

УДК 538.958:535.37

EDN: BNQFFZ DOI: 10.31429/vestnik-21-2-93-102

Оптические свойства многокомпонентных боратных стекол, легированных трехвалентным ионами тербия

А. Хаммуд  , В. А. Исаев 

Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350040, Россия

✉ Хаммуд Алаа; ORCID 0000-0001-9076-4618; SPIN 4054-3239; e-mail: allahammsss@gmail.com

Аннотация. На основе боратных стекол, легированных ионами Tb^{3+} , получены люминофоры в зеленом спектральном диапазоне. Установлены спектральные и люминесцентные свойства многокомпонентных боратных стекол с различной концентрацией Tb^{3+} . Наиболее интенсивная люминесценция соответствует переходу ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ в ионе Tb^{3+} , длина волны которого составляет 542 нм.

Ключевые слова: боратные стекла, запрещенная зона, люминесценция, время жизни.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Цитирование: Хаммуд А., Исаев В. А. Оптические свойства многокомпонентных боратных стекол, легированных трехвалентным ионами тербия // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2024. Т. 21, № 2. С. 93–102. EDN: BNQFFZ. DOI: 10.31429/vestnik-21-2-93-102

Поступила 5 июня 2024 г. После доработки 20 июня 2024 г. Принято 21 июня 2024 г. Публикация 28 июня 2024 г.

Авторы внесли одинаковый вклад в подготовку рукописи. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Автор(ы), 2024. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Optical Properties of Multicomponent Borate Glasses Doped with Trivalent Terbium Ions

A. Hammoud , V. A. Isaev

Kuban State University, 149 Stavropolskaya Str., Krasnodar, 350040, Russia

✉ Alaa Hammoud; ORCID 0000-0001-9076-4618; e-mail: allahammsss@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of studies of spectral and luminescent properties of new series glass multi compositions based on borate and bismuth glass heavily doped with terbium, and investigate the regularity of the characteristics of the obtained samples at different concentrations of bismuth and activator and the mutual effect on the borate glass matrix. It is shown that the intensity of spontaneous radiation increases with an increase in the concentration of terbium. Three main absorption bands were found due to fluctuations of complexes in borate glass. Characteristic absorption peaks of terbium ions at 367, 377 and 485 nm are observed, corresponding to the transitions ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$, ${}^7F_6 \rightarrow {}^5G_6$, ${}^7F_6 \rightarrow {}^5L_{10}$. The physical parameters of a multicomponent glass doped with Tb^{3+} ions are calculated. The resulting phosphors have high photoluminescent properties and can be used in various optical applications.

Keywords: borate glasses, forbidden zone, luminescence, lifetime.

Funding. The study did not have sponsorship.

Cite as: Hammoud, A., Isaev, V. A., Optical properties of multicomponent borate glasses doped with trivalent terbium ions. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2024, vol. 21, no. 2, pp. 93–102. DOI: 10.31429/vestnik-21-2-93-102

Received 5 June 2024. Revised 20 June 2024. Accepted 21 June 2024. Published 28 June 2024.

The authors contributed equally. The authors declare no competing interests.

© The Author(s), 2024. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

Бинарные и сложные оксиды металлов в кристаллическом и аморфном состоянии, легированные трехвалентными редкоземельными ионами (RE^{3+}), в настоящее время находят широкое применение во многих областях науки и техники. Аморфные среды, легированные RE^{3+} используются как эффективные спектральные трансформаторы вакуумного ультрафиолетового излучения (ВУФ) в видимое свечение с квантовым выходом больше 1, а также в индивидуальной дозиметрии рентгеновской и гамма радиации, кроме того, активированное RE^{3+} стекло является перспективной активной средой для твердотельных лазеров, а также для эффективных квантово-оптических устройств [1–5]. В частности, при возбуждении на длине волны 369 нм наблюдается эффективная люминесценция на переходе $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ в ионе Tb^{3+} в зеленой области спектра ($\lambda = 545$ нм). Поиск новых составов стекол и стеклокерамик, легированных Tb^{3+} , с его различными физическими и фотолюминесцентными свойствами, является актуальной задачей для исследования, для соответствия требованиям быстро расширяющегося технологического рынка.

В настоящей работе представлены результаты исследований спектральных и люминесцентных свойств новой серии образцов на основе боратного и висмутового стекла, легированного ионами тербия.

1. Синтез образцов и интенсивность спонтанного излучения

Для изготовления образцов использовалось следующее сырье: H_3BO_3 ; Na_2CO_3 ; PbO ; Bi_2O_3 ; Tb_4O_7 чистотой около 99,99 %. Многокомпонентные боратные стекла молярного состава $70B_2O_3 - 10Na_2O - 15PbO - (5-x)Bi_2O_3 - xTb_2O_3$, где $x = 0; 1; 2; 3; 5$ мол. % были получены с использованием метода закалки расплава и обозначены следующим образом: Tb0–Bi5; Tb1–Bi4; Tb2–Bi3; Tb3–Bi2; Tb5–Bi0 соответственно, в зависимости от значения активатора x .

Этапы приготовления стекла по этой методике аналогичны тем, которые приведены в работах [6,7]. Следует отметить, что однородность расплава достигается в температурном диапазоне от 700 до 950 °С в зависимости от концентрации тербия. При разливке расплава в платиновый тигель, его предварительно нагревали до температуры 350 °С (ниже температуры стеклования боратного висмутового стекла (T_g) [6,8]), чтобы предотвратить любой возможный процесс кристаллизации и уменьшения вероятности возникновения деформаций из-за термомеханиче-

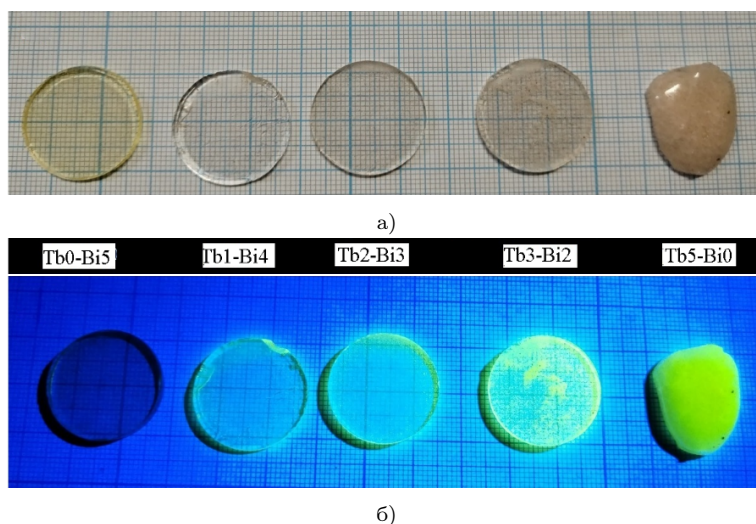


Рис. 1. Образцы многокомпонентных боратных стекол: а) образцы с различной концентрацией Tb^{3+} ; б) свечение образцов под воздействием ультрафиолетового излучения (365 нм)

Fig. 1. Samples of multicomponent borate glasses: (a) Sample series of Tb^{3+} - doped bismuth borate glass with different concentrations; (b) Glasses under 365 nm excitation

ских напряжений, образующихся внутри матрицы полученных образцов. Процесс охлаждения стекол от 350 °С до комнатной температуры происходит со скоростью 1 градус в минуту. На рис. 1а показана серия изготовленных образцов после полировки и шлифования, толщина которых составляла приблизительно 2,8 мм ±0,1 мм, за исключением ВВіТ-5, который не обрабатывался.

На рис. 1б показано, что синтезированные стекла под воздействием ультрафиолетового излучения (365 нм) светятся ярко-зеленым цветом, за исключением образца ВВіТ-0, который не был легирован. Визуально видно, что интенсивность спонтанного излучения возрастает с увеличением концентрации тербия.

2. Спектральный анализ. Ширина запрещенной зоны

Спектры поглощения для полученных образцов измерялись на Фурье-спектрометре VERTEX 70 (рис. 2). В результате обнаружены три основные полосы поглощения, обусловленные колебаниями комплексов в боратном стекле: VO_4 тетраэдрические комплексы на 800 cm^{-1} , VO_3 тригональные на 1300 cm^{-1} и небольшой пик поглощения при 680 cm^{-1} , обусловленный деформационными колебаниями различных боратных кластеров (пентаборатных групп, состоящих из комплексов VO_4 и VO_3) [9–13]. Эти группы содержат большое количество немостиковых атомов кислорода (NBO) и предполагают взаимодействие тетраэдра VO_4 с немостиковыми кислородсодержащими комплексами VO_3 [9].

Спектры пропускания регистрировались на спектрофотометре Hitachi u-3000 (рис. 3). Стекло, не легированное Tb_2O_3 Tb0–Bi5, обладает высокой прозрачностью около 80 % в видимой области без учета отражения на поверхности образца. В образцах с $x = 1; 2; 3$ наблюдаются характерные пики поглощения ионов тербия на 367, 377 и 485 нм, соответствующие переходам ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{D}_4$, ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{G}_6$, ${}^7\text{F}_6 \rightarrow {}^5\text{L}_{10}$.

Различные в спектрах пропускания образцов с увеличением концентрации тербия обусловлено:

- во-первых, снижение прозрачности образца Tb3–Bi2 в области от 400 до 1100 нм непосредственно связано с образованием кристаллитов различных размеров и типов внутри стекла, что вместе с сопутствующими дефектами приводит к рассеянию света;
- во-вторых, незначительное увеличение прозрачности образцов в ультрафиолетовом диапазоне обусловлено уменьшением концентрация висмута с увеличением содержания тербия

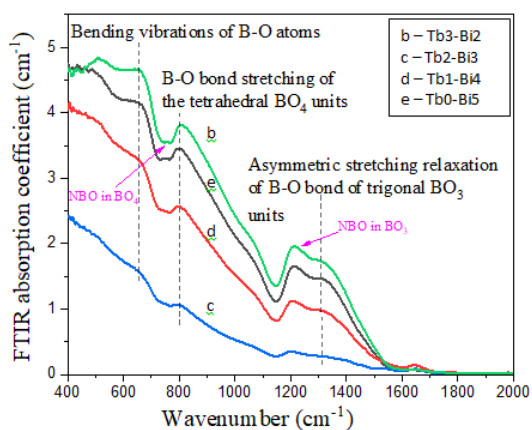


Рис. 2. Инфракрасные Фурье-спектры боратного стекла

Fig. 2. Infrared Fourier spectra of borate glass

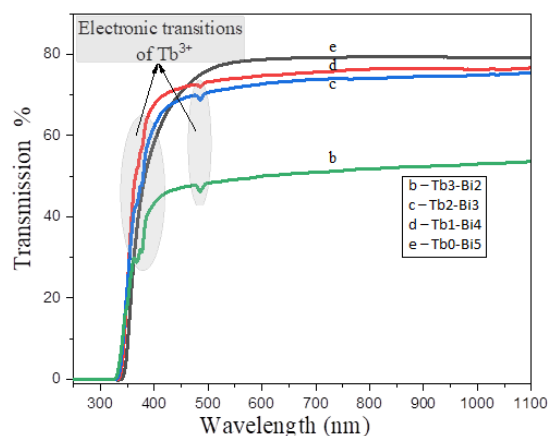


Рис. 3. Спектры пропускания многокомпонентного стекла бората висмута с различной концентрацией Tb_2O_3

Fig. 3. Transmission spectra of multicomponent bismuth borate glass with different concentrations of Tb_2O_3

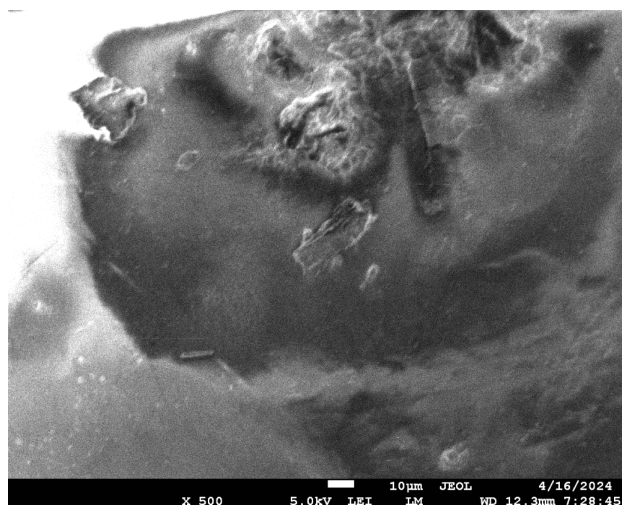


Рис. 4. СЭМ изображение образца Tb3–Bi2 с включением кристаллитов

Fig. 4. SEM image of Tb3–Bi2 sample with inclusion of crystallites

в матрице. Висмут играет существенную роль в увеличении поглощения стекла в ближнем ультрафиолетовом диапазоне [7, 14]. Предел пропускания смещается с 340 нм (для чистого стекла) до 328 нм (для стекла с содержанием тербия 3 мол. %).

В качестве доказательства первого утверждения для образца Tb3–Bi2 на сканирующем электронном микроскопе модели JSM-7500F были сняты СЭМ изображения (рис. 4). Данные СЭМ показывают, что образец содержит кристаллиты размерами до 30 мкм.

Ширина запрещенной зоны была рассчитана по спектру поглощения в соответствии с уравнением [15, 16]

$$(\alpha h\nu)^p = A(h\nu - E_g),$$

где $p = 2$ и $0,5$ для разрешенных прямых и непрямых переходов, соответственно; E_g — ширина запрещенной зоны; A — константа пропорциональности, для стекла равная единице; ν — частота; α — коэффициент поглощения; h — постоянная Планка.

Результаты, приведенные на рис. 5, указывают на тот факт, что с увеличением содержания тербия в матрице ширина прямой запрещенной зоны увеличивалась примерно на 0,1 эВ при значении в диапазоне от 3,60 до 3,72 эВ, а непрямой от 3,49 до 3,66 эВ. Небольшое изменение ширины запрещенной зоны в зависимости от различных концентраций эрбия непосредственно связано с небольшим изменением оптической плотности образцов. В статье [20] авторы сообщали о корреляции между шириной запрещенной зоны и оптической плотностью образцов.

Что касается образца Tb5–Bi0, то попытка получить энергию запрещенной зоны с использованием спектра отражения и функции Кубелки–Мунка не увенчалась успехом. Результаты были неудовлетворительными из-за содержания различных фаз внутри образца, который содержит аморфную основу, кристаллы различного химического состава и, как следствие, обладающих разными физическими свойствами.

3. Расчет физических параметров многокомпонентного стекла, легированного ионами Tb³⁺

Используя величину ширины запрещенной зоны, показатель преломления образцов был рассчитан по уравнению [17]

$$\frac{(n^2 - 1)}{(n^2 + 2)} = 1 - \sqrt{\frac{E_g}{20}}$$

где n — оптический показатель преломления.

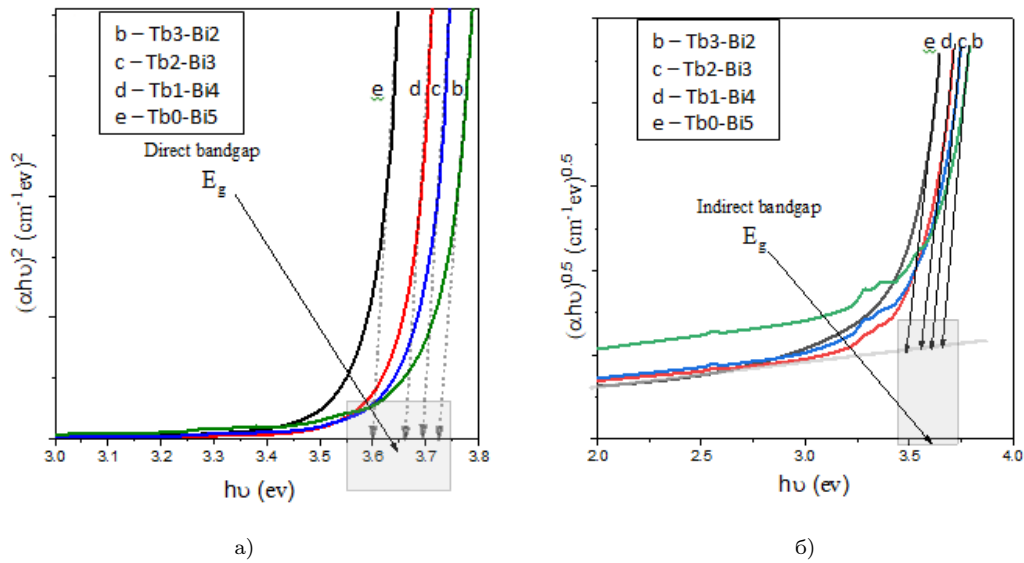


Рис. 5. Графическое определение прямой ширины запрещенной (а) и не прямой (б) зоны многокомпонентного боро-висмутного стекла

Fig. 5. Graphical determination of the direct width of the forbidden (a) and indirect (b) zones of multicomponent boron-bismuth glass

Плотность полученных образцов рассчитывалась методом Архимеда

$$\rho = \frac{W_a}{(W_a - W_b)} \rho_b,$$

где W_a — вес образца в воздухе, W_b — вес образца в плавучем состоянии и ρ_b — плотность плавучего вещества. Для определения плотности использовали дистиллированную воду.

Используя плотность и показатель преломления образцов, можно рассчитать следующие физические параметры по соотношениям, представленным в работах [18, 19]:

– молярный объем

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^N X_i Z_i}{\rho},$$

где V_m — молярный объем; X_i и M_i — мольная доля и молекулярная масса компонент стекла; — эффективную концентрацию ионов тербия

$$N_{Tb^{3+}} = \frac{2\rho N_a x_{Tb^{3+}}}{M_m},$$

где $N_{Tb^{3+}}$ — эффективная концентрация ионов Tb^{3+} ; N_a — число Авогадро; ρ — плотность стекла; M_m — средняя молекулярная масса стекла; M_m ; $x_{Tb^{3+}}$ — мольная доля оксида редкоземельного элемента;

– радиус полярона

$$r_p(A^\circ) = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{\pi}{6N}\right)^{1/3};$$

– межъядерное расстояние

$$r_i(A^\circ) = \left(\frac{1}{N}\right)^{1/3};$$

– диэлектрическую постоянную

$$\varepsilon = n^2;$$

– потери на отражение

$$R_L = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2;$$

– молярную рефракцию

$$R_M = \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right) \cdot V_m.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Физические параметры многокомпонентного стекла, легированного ионами Tb³⁺

Table 1. Physical parameters of multicomponent glass doped with Tb³⁺ ions

Код образца	ρ (г/см ³)	V_m (см ³ /мол)	$N_{Tb^{3+}}$ (см ⁻³)	r_p (Å)	r_i (Å)	ε	R_L %	R_M
Tb5-Bi0	3,40	31,383	$1,9 \cdot 10^{21}$	3,25	8,07	–	–	–
Tb3-Bi2	3,61	30,112	$1,19 \cdot 10^{21}$	3,8	9,43	4,97	14,5	17,16
Tb2-Bi3	3,64	30,139	$0,8 \cdot 10^{21}$	4,34	10,77	5,06	14,97	17,34
Tb1-Bi4	3,67	30,165	$0,4 \cdot 10^{21}$	5,46	13,57	5,10	14,93	17,43
Tb0-Bi5	3,70	30,191	–	–	–	5,18	15,08	17,53

4. Люминесцентный анализ

Спектры возбуждения излучения люминофора на длине волны 542 нм демонстрируют широкую полосу возбуждения в УФ-области с центром при 274 нм и характерные пики в ближней УФ- и синей областях. Регистрацию спектров возбуждения образцов осуществляли на спектрофлюориметре FLUORAT-02-Rainoma spectrofluorometer (рис. 6). Характерные пики возбуждения иона Tb³⁺ наблюдаются на 352 нм и 372 нм для квантовых переходов $^7F_6 \rightarrow ^5L_{10}$ и $^7F_6 \rightarrow ^5G_6$ соответственно. Широкая полоса возбуждения в стеклянной матрице также наблюдается в области 200–320 нм. Она обусловлена $4f^n \rightarrow 4f^{n-1}5d$ ($4f-5d$) переходами ионов Tb³⁺, эти квантовые переходы описывают спин-орбитальное взаимодействие электронами на уровнях $4f-5d$ в лантаноидах, где (SF) означает запрещенный спин с полосами с высоким спином ($4f-5d$), а (SA) — разрешенный спин для переходов с низким спином ($4f-5d$) [21].

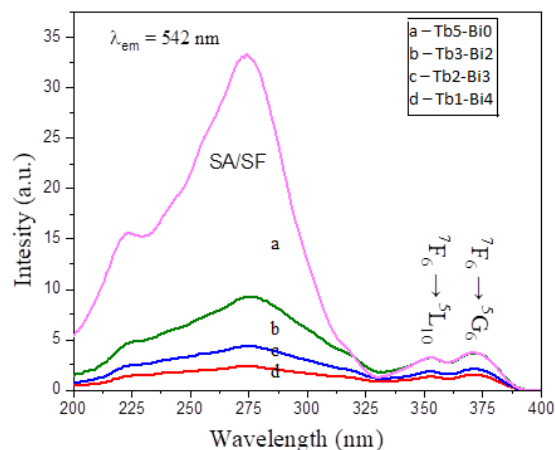


Рис. 6. Спектры возбуждения фотолюминесценции стекол бората висмута, легированных ионами Tb³⁺ (контроль излучения при 542 нм)

Fig. 6. Photoluminescence excitation spectra of Tb³⁺ ions doped bismuth borate glasses (monitoring emission at 542 nm)

На интенсивность и поведение этого уникального квантового перехода влияет природа взаимодействия между ионами активатора и окружающей их средой. Широкие полосы возбуждения (4f–5d) указывают на возможность возбуждения с высокой эффективностью ионов тербия через стеклянную матрицу. Максимум этого возбуждения приходится на 274 нм. Для переходов (4f–5d) интенсивность возбуждения возрастала с увеличением концентрации ионов тербия. Что касается образца Tb5–Bi0, то увеличение интенсивности спектра возбуждения носит нелинейный характер, что связано с образованием в нем кластеров в кристаллических состояниях.

Следует также отметить, что интенсивность прямого возбуждения иона лантаноида одинакова для образцов с содержанием тербия 3 моль % и 5 моль %, что может быть обусловлено насыщением концентрации тербия и, как следствие, активным влиянием процессов реабсорбции в стеклах.

Спектры фотолюминесценции (рис. 7) образцов, легированных тербием, при возбуждении 274 нм содержат характерные узкие пики люминесценции иона металла, соответствующие излучательным переходам следующим образом: $^5D_4 \rightarrow ^7F_6$ (488,5 нм), $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ (542,0 нм), $^5D_4 \rightarrow ^7F_4$ (583,9 нм), $^5D_4 \rightarrow ^7F_3$ (622,0 нм). Резкое расщепление пиков в спектрах всех образцов одинаково, что указывает на идентичное координационное окружение ионов тербия. По мере увеличения содержания тербия в стекле интегральная интенсивность люминесценции увеличивается нелинейно.

Интенсивность фотолюминесценции зависит от ряда факторов, остановимся на двух из них, непосредственно связанных с образцами, изученными в этом исследовании. Это концентрация активированных ионов и структура образцов. Концентрационное тушение ионов Tb^{3+} в спектре излучения не наблюдалось, поэтому с увеличением концентрации ионов тербия интенсивность радиационных переходов увеличивались, а безызлучательные переходы (тепловые фононы) четко не наблюдались. Это приводит к увеличению радиационной эффективности образцов из-за высокой симметрии координации ионов Tb^{3+} и совпадающих атомных связей внутри образцов.

Что касается второго фактора, который обусловлен природой образцов и проявляется непосредственно в образце Tb5–Bi0, то наличие нанокристаллов с высокой степенью симметрии, образовавшихся внутри стеклянной матрицы, привело к увеличению интенсивности спектра излучения.

Кинетика затухания люминесценции является моноэкспоненциальной для всех образцов, что указывает на эквивалентность всех центров люминесценции. Время жизни люминесценции,

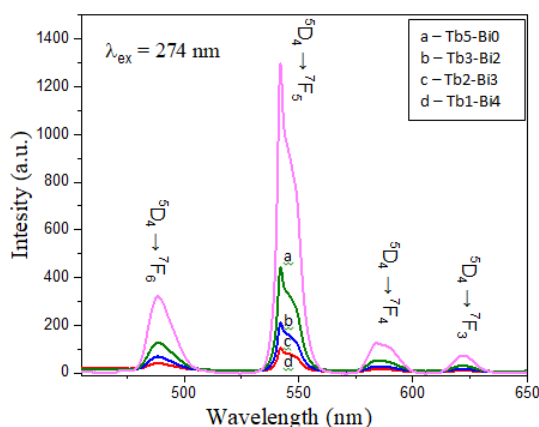


Рис. 7. Спектры фотолюминесценции стекла бората висмута, легированного ионами Tb^{3+} , возбуждение при 274 нм

Fig. 7. Photoluminescence spectra of bismuth borate glass doped Tb^{3+} ions

определяемое как время уменьшения интенсивности люминесценции в e раз, близко для образцов с различным содержанием тербия и незначительно уменьшается с увеличением концентрации легированных ионов.

В табл. 2 приведены основные оптические характеристики полученных образцов.

Таблица 2. Оптические параметры многокомпонентного стекла, легированного ионами Tb^{3+}

Код образца	E_g прямой (eВ)	E_g непрямой (eВ)	n	Время жизни, мкс
Tb5-Bi0	–	–	–	2325
Tb3-Bi2	3,73	3,66	2,23	2330
Tb2-Bi3	3,69	3,60	2,25	2325
Tb1-Bi4	3,66	3,55	2,26	2370
Tb0-Bi5	3,60	3,49	2,27	–

Для того чтобы оценить квантовый выход фотолюминесценции полученных образцов в соответствии с доступными нам технологическими возможностями, применен относительный метод сравнения с эталонным образцом, квантовая эффективность которого известна и составляет около 62 % [22]. По технологии работы [22] был приготовлен образец со следующим составом $16,58Li_2O - 82,92B_2O_3 - 0,5Tb_4O_7$ мол. %, обозначенный как (LBT), затем измерялась плотность полученного образца и сравнивалась с плотностью в статье. Было установлено, что плотность одинакова и равна $2,21 \text{ г/см}^3 \pm 0,03$.

Части от каждого из образцов измельчили их в агатовой ступке, приготовили таблетки массой 1 г, при этом все таблетки имели одинаковую площадь поверхности, затем возбудили все образцы одним и тем же источником (мощность 1 Вт, GaN, 365 нм) и зарегистрировали люминесценцию. Данные, приведенные в табл. 3, показывают, что образцы обладают сопоставимой фотолюминесценцией по сравнению с образцом LBT. Площадь под кривой соответствует энергетическому выходу.

Таблица 3. Сравнение площади области спектра излучения между образцами при 542 нм

Код образца	Tb1-Bi4	Tb2-Bi3	Tb3-Bi2	Tb5-Bi0	LBT
Интегральная площадь, отн. ед.	30	62	133	404	53

Результаты табл. 3 указывают на тот факт, что квантовая эффективность излучения образцов выше по сравнению с таковой у образца LBT. Однако судить о величине эффективности на основе используемого этого метода нельзя, поскольку изменение технологии приготовления стекла с учетом погрешности может привести к иным результатам. Однако образцы при $x = 2, 3$ и 5 можно считать эффективными источником зеленого света.

Заключение

Методом закалки из расплава получены стекла $70B_2O_3 - 10Na_2O - 15PbO - (5-x)Bi_2O_3 - xTb_2O_3$, где $x = 0; 1; 2; 3; 5$ мол. %. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье проливают свет на различные структурные свойства стекол. Выявлено, что полученные образцы имеют три основные инфракрасные полосы около $\sim 1300 \text{ см}^{-1}$ (BO_3 тригональные); 800 см^{-1} (BO_4 тетраэдрические) и при 680 см^{-1} (пентаборатных групп) соответственно, эти комплексы характеризуют боратное стекло. Спектр пропускания доказал, что образцы имеют высокую прозрачность (340–1100 нм), в ультрафиолетовом диапазоне при уменьшении висмута в образцах наблюдалось большее пропускание. С увеличением концентрации тербия вместо висмута плотность образцов уменьшалась от 3,7 до 3,4 г/см^3 (Tb0–Bi5–Tb5–Bi0), а уменьшение плотности образцов приводит к увеличению ширины запрещенных зон (прямых и непрямых). Поглощение Tb^{3+} ионы в видимом диапазоне слишком слабое (при 460 нм) и увеличивается

с увеличением концентрации. В основном Tb^{3+} возбуждается в ультрафиолетовом диапазоне, на что указывает спектр возбуждения. Эффект тушения не наблюдается с увеличением концентрации Tb_2O_3 , соответственно, люминесценция образцов зарегистрировала максимальное значение при концентрации 5 мол. % Tb^{3+} при 542 нм. Кинетика затухания люминесценции, соответствующая излучательному переходу $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ (542,0 нм) при возбуждении на 270 нм, позволила определить время жизни примерно в 2,3 мс. Для оценки эффективности полученных люминофоров провели сравнение с изученным стеклом, которое имеет высокую эффективность спонтанного излучения на 542 нм. Доказано, что образец (Tb_5-Bi_0), имеющий двойную структурную фазу, светится значительно интенсивнее, что указывает на то, что полученные люминофоры имеют высокие фотолюминесцентные свойства и могут использоваться в различных оптических приложениях.

Литература [References]

1. Alzahrani, J.S., Alrowaili, Z.A., Eke, C., Al-Qaisi, S., Alsufyani, S.J., Olarinoye, I.O., Boukhris, I., Al-Buriahi, M.S., Tb^{3+} -doped $GeO_2-B_2O_3-P_2O_5-ZnO$ magneto-optical glasses: Potential application as gamma-radiation absorbers. *Radiation Physics and Chemistry*, 2023, vol. 208(11), art. 110874. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2023.110874](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110874)
2. Kesavulu, C.R., Kim, H.J., Lee, S.W., Kaewkhao, J., Kaewnuam, E., Wantana, N., Luminescence properties and energy transfer from Gd^{3+} to Tb^{3+} ions in gadolinium calcium silicoborate glasses for green laser application. *J. Alloys Compd.*, 2017, vol. 704, pp. 557–564. DOI: [10.1016/j.jallcom.2017.02.056](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.056)
3. Swapna, K., Mahamuda, Sk., Srinivasa Rao, A., Jayasimhadri, M., Shakya, Suman, Prakash, G. Vijaya, Tb^{3+} doped Zinc Alumino Bismuth Borate glasses for green emitting luminescent devices. *Journal of Luminescence*, 2014, vol. 156, pp. 180–187. DOI: [10.1016/j.jlumin.2014.08.019](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.08.019)
4. Abbas, B.K., Baki, S.O., Leng, F.W., Abbas, H.K., Al-Sarraj, L., Mahdi, M.A., Investigation of Structural, Thermal Properties and Shielding Parameters of Borosilicate Glasses Doped with Dy^{3+}/Tb^{3+} Ions for Gamma and Neutron Radiation Shielding Applications. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2021, vol. 80(1), pp. 50–61. DOI: [10.37934/arfmts.80.1.5061](https://doi.org/10.37934/arfmts.80.1.5061)
5. Linganna, K., Sreedhar, V.B., Jayasankar, C.K., Luminescence properties of Tb^{3+} ions in zinc fluorophosphates glasses for green laser applications. *Mater. Res. Bull.*, 2015, vol. 67, pp. 196–200. DOI: [10.1016/j.materresbull.2015.02.062](https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.02.062)
6. Alrowaili, Z.A., Basha, B., Alwadai, N., Olarinoye, I.O., Hammoud, A., Al-Buriahi, M.S., V. Stroganova, E.V., Sriwunkum, C., Experimental design and characterization of Eu-doped tellurite matrix glassy composite for medical and ionizing-radiation sensing applications. *Ceramics International*, 2023, vol. 49, iss. 12, pp. 20772–20783. DOI: [10.1016/j.ceramint.2023.03.209](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.209)
7. Altowyan, A.S., Hammoud, A., Al-Qaisi, S., Alwadai, N., Lebedev, A.V., Klimenko, V.A., Vasileva, L.V., Al-Buriahi, M.S., Synthesis, XRD, UV-Vis spectra and photoluminescent properties of TeO_2 -based glasses doped with Yb^{3+} and Bi^{3+} . *Optik*, 2022, vol. 268, art. 169808. DOI: [10.1016/j.ijleo.2022.169808](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169808)
8. Farouk, M., Samir, A., Metawe, F., Elokr, M., Optical absorption and structural studies of bismuth borate glasses containing Er^{3+} ions. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, vol. 371–372, pp. 14–21. DOI: [10.1016/j.jnoncrsol.2013.04.001](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2013.04.001)
9. Kumar, A., Kaur, R., Sayyed, M.I., Rashad, M., Singh, M., Ali, A.M., Physical, structural, optical and gamma ray shielding behavior of $(20+x)PbO-10BaO-10Na_2O-10MgO-(50-x)B_2O_3$ glasses. *Phys. B Condens. Matter*, 2019, vol. 552, pp. 110–118. DOI: [10.1016/j.physb.2018.10.001](https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.10.001)
10. Vishal, K., Pandey, O.P., Singh, K., Structural and optical properties of barium borosilicate glasses. *Phys. B Condens. Matter*, 2010, vol. 405, pp. 204–207. DOI: [10.1016/j.physb.2009.08.055](https://doi.org/10.1016/j.physb.2009.08.055)
11. Laariedh, F., Sayyed, M.I., Kumar, A., Tekin, H.O., Kaur, R., Badech, T.-B., Studies on the structural, optical and radiation shielding properties of $(5,0-x)PbO-10WO_3-10Na_2O-10MgO-(20+x)B_2O_3$ glasses. *J. Non-Cryst. Solids*, 2019, vol. 513, pp. 159–166. DOI: [10.1016/j.jnoncrsol.2019.03.007](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2019.03.007)
12. Kaur, R., Singh, S., Singh, K., Pandey, O.P., Effect of swift heavy ions on structural and optical properties of bismuth based alumina borosilicate glasses. *Radiat. Phys. Chem.*, 2013, vol. 86, pp. 23–30. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2013.01.031](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2013.01.031)
13. Priyanka Goyal, P., Sharma, Y.K., Pal, S., Bind, U.C., Huang, S.C., Chung, S.L. The effect of SiO_2 content on structural, physical and spectroscopic properties of Er^{3+} doped B_2O_3 . *J. Non-Cryst. Solids*, 2017, vol. 463, pp. 118–127. DOI: [10.1016/j.jnoncrsol.2017.03.009](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrsol.2017.03.009)

14. Alzahrani, J.S., Hammoud, A., Altowyan, A.S., Olariyoec, I.O. Lebedev, A.V., Al-Buriahi, M.S., Influence of Sm/Bi substitution on synthesis, structural, and photon interaction properties of TeO single bond MoO₃ single bond BaO single bond Sm₂O₃ single bond Bi₂O₃ glass system. *Optik*, 2023, vol. 274, art. 170507. DOI: [10.1016/j.ijleo.2023.170507](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170507)
15. Tauc, J., Menth, A., Wood, D.L., Optical and Magnetic Investigations of the Localized States in Semiconducting Glasses. *Phys. Rev. Letters*, 1970, vol. 25, pp. 749–752. DOI: [10.1103/PhysRevLett.25.749](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.25.749)
16. Li, X., Zhu, H., Wei, J., Wang, K., Xu, E., Li, Z., Wu, D., Determination of band gaps of self-assembled carbon nanotube films using Tauc/Davis–Mott model. *Appl. Phys. A*, 2009, vol. 97, pp. 341–344. DOI: [10.1007/s00339-009-5330-z](https://doi.org/10.1007/s00339-009-5330-z)
17. Dimitrov, V., Sake, S., Electronic oxide polarizability and optical basicity of simple oxides. I. *Journal of Applied Physics*, 1996, vol. 79, pp. 1736–1740. DOI: [10.1063/1.360962](https://doi.org/10.1063/1.360962)
18. Mohan, S., Thind, K., Optical and spectroscopic properties of neodymium doped cadmium-sodium borate glasses. *Optics and Laser Technology*, 2017, vol. 95, pp. 36–41. DOI: [10.1016/j.optlastec.2017.04.016](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.04.016)
19. Sayyeda, M.I., Aşkın, A., Ali, A.M., Kumard, A., Rashada, M. Alshehric, A.M., Extensive study of newly developed highly dense transparent PbO-WO₃-BaO-Na₂O-B₂O₃ glasses for radiation shielding applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, vol. 521, art. 119521. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2019.119521](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.119521)
20. Tamam, N., Alrowaili, Z.A., Hammoud, A., Lebedev, A.V., Boukhris, I., Olariyoec, I.O., Al-Buriahi, M.S., Mechanical, optical, and gamma-attenuation properties of a newly developed tellurite glass system. *Optik*, 2022, vol. 266, art. 169355. DOI: [10.1016/j.ijleo.2022.169355](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169355)
21. van Pieterse, L., Reid, M.F., Burdick, G.W., Meijerink, A., $4f^n \rightarrow 4f^{n-1}5d$ transitions of the heavy lanthanides: Experiment and theory. *Physical review B*, 2002, vol. 65, art. 045114. DOI: [10.1103/PhysRevB.65.045114](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.65.045114)
22. Rimbacha, A.C., Steudel, F., Ahrens, B., Schweizer, S., Tb³⁺, Eu³⁺, and Dy³⁺ doped lithium borate and lithium aluminoborate glass: Glass properties and photoluminescence quantum efficiency. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2018, vol. 499, pp. 380–386. DOI: [10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.029](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.029)