

УДК [546.244-31+546.47-31+546.776+546.873]:666.247.2

ПРИМЕСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ИОНАМИ МЕДИ(II) В ВИСМУТСОДЕРЖАЩЕМ ТЕЛЛУРИТНО-ЦИНКАТНОМ СТЕКЛЕ

© 2023 г. М. В. Краснов¹, О. А. Замятин¹, *

¹ *Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, Нижний Новгород, 603950 Россия*

**e-mail: xef7@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.11.2022 г.

После доработки 22.12.2022 г.

Принята к публикации 25.12.2022 г.

Оптическое пропускание многокомпонентных стекол системы $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Vi}_2\text{O}_3$, легированных ионами Cu^{2+} , исследовано методом УФ-спектроскопии. Показано, что в диапазоне длин волн от 350 до 2700 нм присутствует интенсивная полоса с максимумом при ~ 810 нм. По серии образцов стекол с заданным содержанием Cu^{2+} в рассматриваемом интервале длин волн был рассчитан удельный коэффициент поглощения, равный в максимуме полосы 5200 ± 220 дБ/(км ppm), а также установлена его спектральная зависимость.

Ключевые слова: теллуритное стекло, примесное поглощение, ионы Cu^{2+} , удельный коэффициент поглощения

DOI: 10.31857/S0002337X23050093, **EDN:** QBDCCC

ВВЕДЕНИЕ

Теллуритные стекла обладают высокой прозрачностью в видимой и ближней инфракрасной области спектра, высокими значениями показателя преломления по сравнению с силикатными, широким диапазоном составов, склонных к стеклообразованию, низкими температурами синтеза образцов и улучшенными нелинейными оптическими характеристиками [1, 2]. Такие материалы представляют особый интерес для фотоники и волоконной оптики при изготовлении лазеров, рамановских усилителей, фильтров на эффекте Фарадея, а также нелинейных оптических устройств [3–5].

Однако, несмотря на все эти достоинства, широкому применению данных стекол препятствует высокий уровень оптических потерь, и в настоящее время прилагаются большие усилия для разработки способов получения особо чистых теллуритных стекол, свободных от примесей переходных элементов и гидроксогрупп [6, 7]. Присутствие в стеклообразной матрице ионов $3d$ -элементов существенно снижает интенсивность электромагнитного излучения в видимой и ближней ИК-области спектра, что делает данные материалы непригодными для изготовления оптических устройств и волокон. Поэтому исследования, направленные на изучение примесного поглощения, являются актуальными.

Наиболее значимой примесью, обладающей сильным поглощением и вызывающей значительное снижение пропускающей способности стекла, являются ионы Cu^{2+} [8, 9].

В данном исследовании поведение ионов Cu^{2+} изучено в стеклах трехкомпонентной системы $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Vi}_2\text{O}_3$. Эта матрица привлекательна для оптоэлектроники ввиду особых свойств [10], в частности, ионы Vi^{3+} влияют на поляризующую способность Te^{4+} , что приводит к существенному изменению линейного показателя преломления стекла [11] и повышению излучательной способности ионов редкоземельных элементов в области 2 мкм [12–14].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных веществ для синтеза стекол использовали теллурическую ортокислоту H_6TeO_6 , пентагидрат нитрата висмута $\text{Vi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (квалификации “ч. д. а.”, ГОСТ 4110-75) и нитрат цинка $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, полученный растворением оксида цинка (квалификации “ос.ч.”, ТУ 6-09-2175-72) в азотной кислоте (квалификации “х.ч.”, ГОСТ 4661-77). Указанные соединения смешивали в заданном соотношении, к ним приливали рассчитанный объем раствора, содержащего 30.84 ммоль/л ионов Cu^{2+} , далее смесь выпаривалась при темпе-

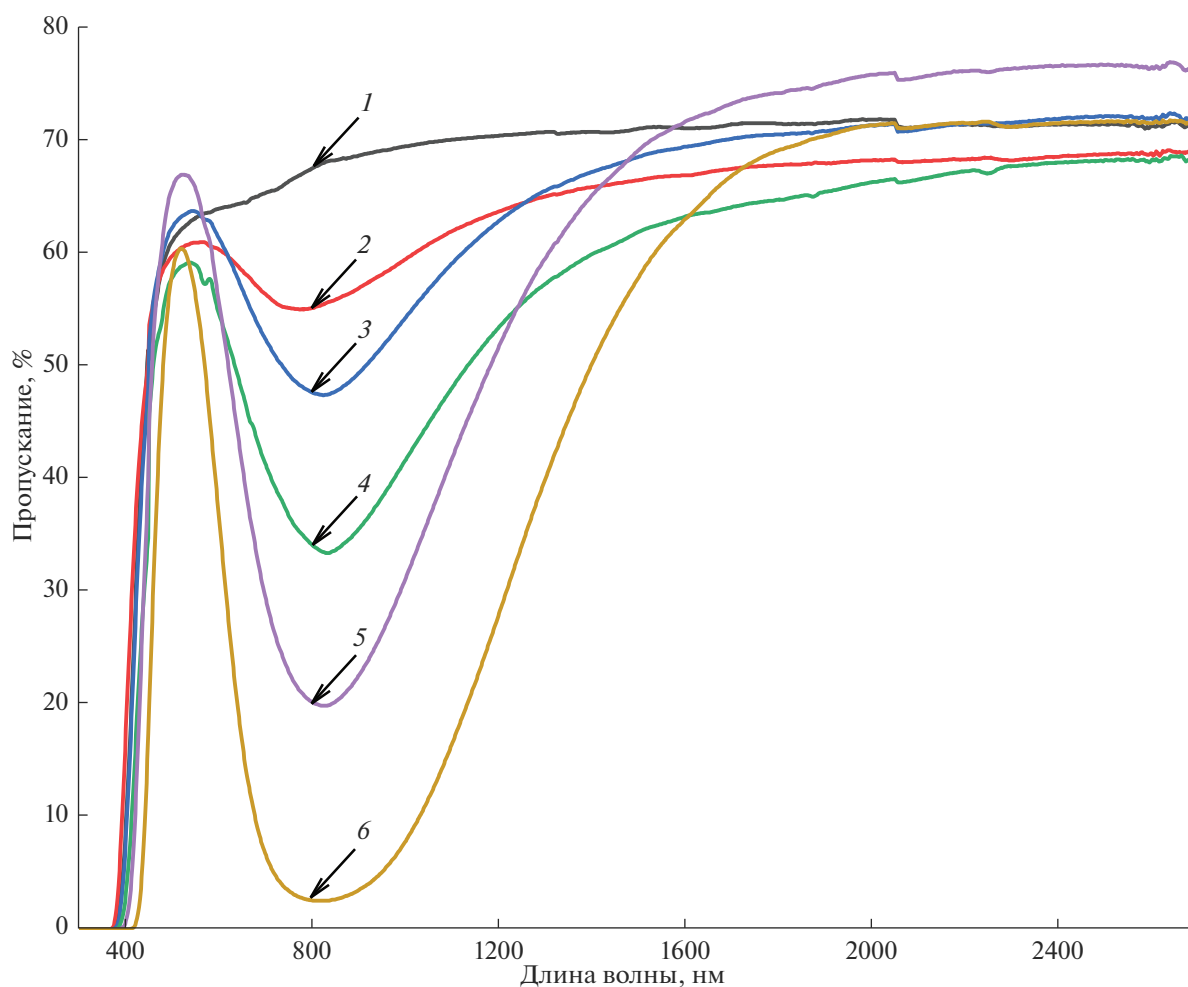


Рис. 1. Спектры пропускания стекол $(\text{TeO}_2)_{0.72}(\text{ZnO})_{0.18}(\text{BiO}_{1.5})_{0.10}$ толщиной 1.5 мм, нелегированных (1), легированных 80 (2), 150 (3), 300 (4), 600 (5), 1200 ppm Cu^{2+} (6).

ратуре 150°C, сухой остаток прокаливали при 500°C, полученный твердый продукт перетерали в фарфоровой ступке и плавил в кварцевом тигле в муфельной печи при температуре 750°C в течение 15 мин. Стеклообразующий расплав разливали в подогретую графитовую форму и отжигали на воздухе в течение 1 ч при температуре 310°C.

Образцы стекол полировали с использованием алмазного порошка, а спектры пропускания регистрировали на спектрофотометре Shimadzu UV-3600 в диапазоне длин волн от 350 до 2700 нм с шагом сканирования 2 нм. Толщину образцов измеряли при помощи электронного микрометра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 изображены спектры пропускания синтезированных многокомпонентных теллуридных стекол толщиной ≈ 1.5 мм. Для всех образцов, легированных ионами Cu^{2+} , наблюдается широ-

кая полоса поглощения с максимумом при ~ 810 нм, интенсивность которой увеличивается пропорционально концентрации Cu^{2+} .

На основании закона светопоглощения Бугера–Ламберта–Берра по экспериментальным значениям пропускания (T) во всем диапазоне прозрачности стекол была рассчитана абсорбционность (A):

$$A = -\ln\left(\frac{T}{100\%}\right).$$

Ее зависимость от толщины образца стекла, содержащего 0.08 мас. % Cu^{2+} , представлена на рис. 2 для длины волны 810 нм. Экспериментальные точки аппроксимированы линейной функцией методом наименьших квадратов и вычислен угловой коэффициент прямой, который характеризует объемное поглощение ионов Cu^{2+} . Расчеты выполнены для всех образцов, полученная зависимость указывает на достаточно равномерное

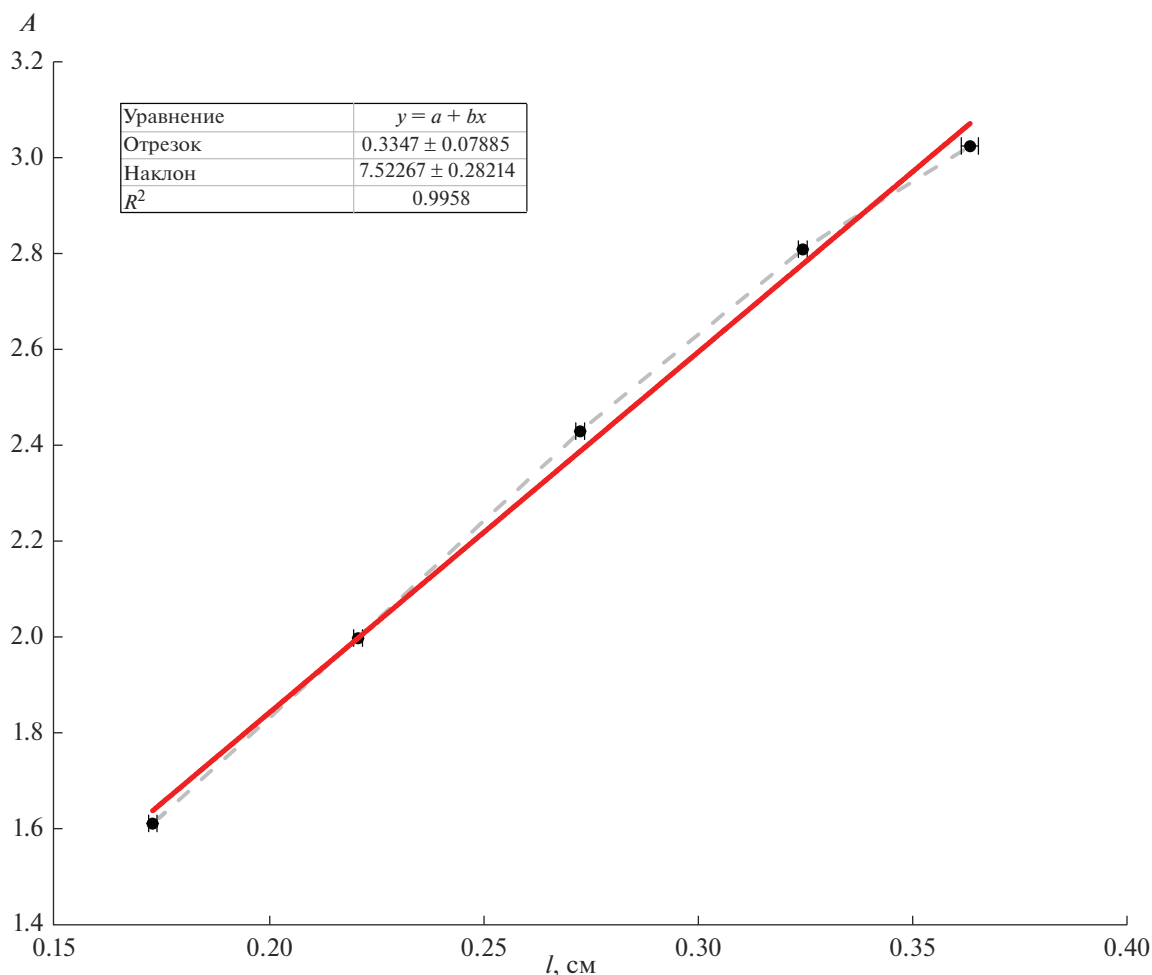


Рис. 2. Зависимость абсорбционности от толщины стекла на длине волны 810 нм в образце, содержащем 600 ppm ионов Cu^{2+} .

распределение примесных атомов меди по всему объему образца стекла.

Поглощающая способность ионов Cu^{2+} количественно охарактеризована в виде удельного коэффициента поглощения, рассчитанного как тангенс угла наклона прямой в координатах коэффициент поглощения – концентрация Cu^{2+} (рис. 3). На рис. 4 отражена спектральная зависимость удельного коэффициента поглощения во всем диапазоне прозрачности стекла. Обращает на себя внимание достаточно резкое увеличение данного коэффициента при длине волны меньше 500 нм.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исходя из электронного строения атомы меди могут находиться в стеклообразной матрице в различных состояниях окисления. Для данной системы неустойчивость соединений, содержа-

щих Cu^{3+} и выше, связана с достаточно жесткими условиями синтеза, приводящими к их распаду до состояния $2+$. В эту же степень окисления приходят низшие производные меди благодаря наличию окислительных реагентов шихты: в частности, на начальных этапах синтеза происходит выделение диоксидов азота и кислорода вследствие разложения нитрата цинка [15, 16] и нитрата меди [17, 18], а при повышенной температуре разлагается теллуровая ортокислота [19–22]. Кроме того, эти вещества способны взаимодействовать между собой с образованием достаточно устойчивых теллуридов меди(2+) – Cu_3TeO_6 и CuTeO_4 [23–25].

Для всех легированных ионами Cu^{2+} образцов стекол в спектре пропускания наблюдалась одна полоса поглощения с максимумом при 810 нм. Ее наличие обусловлено суперпозицией трех электронных переходов – ${}^2B_{1g} \rightarrow {}^2B_{2g}$ [26–38], ${}^2B_{1g} \rightarrow {}^2E_g$ [29–31, 33–38] и ${}^2B_{1g} \rightarrow {}^2A_{1g}$ [29, 30, 33–38] – иона меди(II), находящегося в октаэдрическом окру-

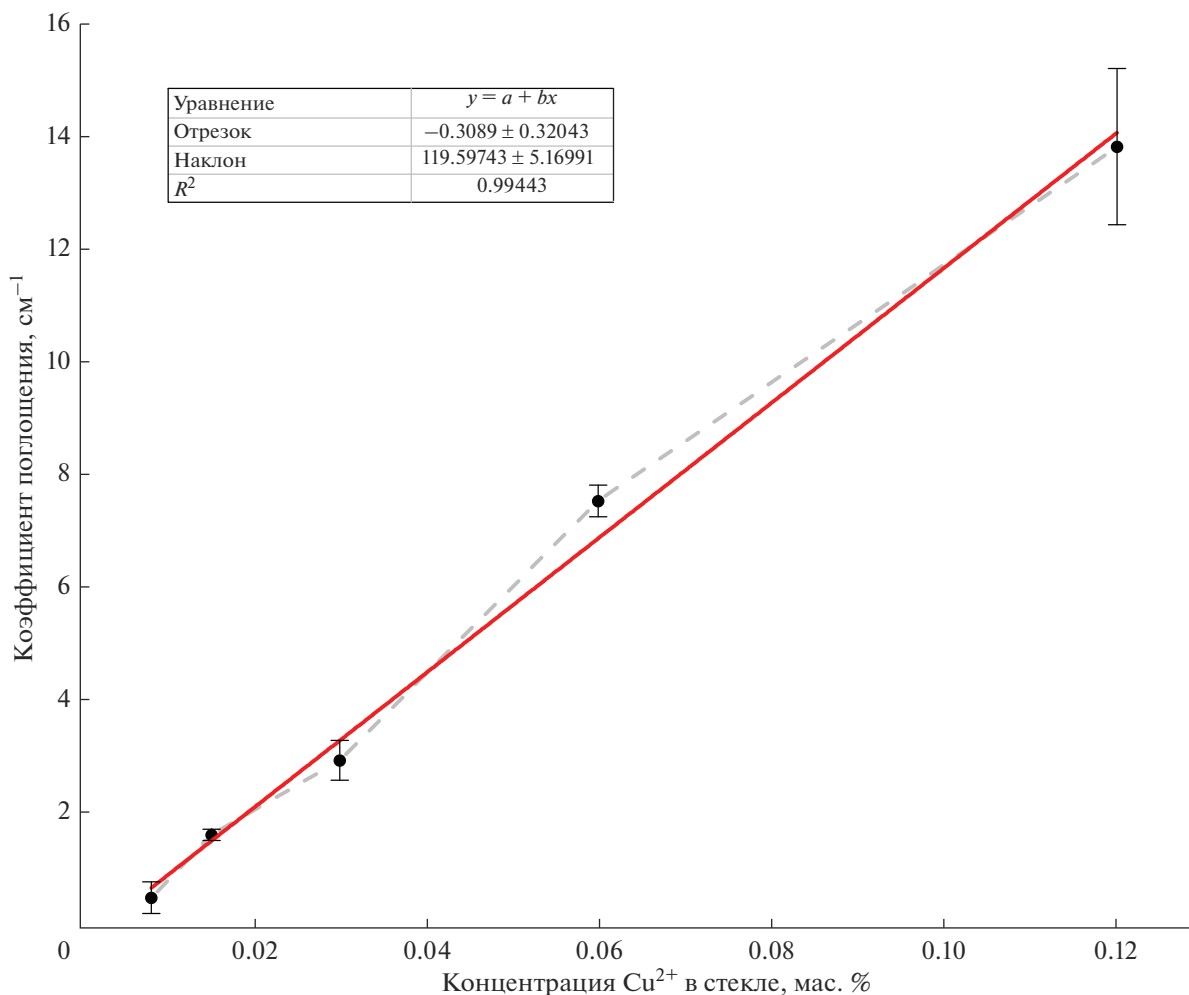


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения ионов Cu^{2+} от их концентрации в стекле $(\text{TeO}_2)_{0.72}(\text{ZnO})_{0.18}(\text{BiO}_{1.5})_{0.10}$ на длине волны 810 нм.

жении с тетрагональным искажением из-за эффекта Яна–Теллера.

Установлено, что интенсивность данной полосы поглощения увеличивается с повышением содержания Cu^{2+} без существенного изменения формы и положения, что свидетельствует об одинаковом координационном окружении ионов меди(II) в матрице стекла для всех изученных составов. Относительно оксидных стекол других систем (кварцевых или силикатных) максимум полосы смещен в сторону больших длин волн из-за присутствия атомов тяжелых элементов, таких как цинк и висмут (табл. 1). Эти атомы обладают достаточно сильным поляризационным воздействием на ионы Cu^{2+} и способны деформировать их электронную оболочку. Это вызывает изменение энергетических уровней и смещение полосы поглощения. Близкие значения положения мак-

симума зафиксированы в теллуритных системах, приведенных в работах [9, 26].

На рис. 4 приведена спектральная зависимость удельного коэффициента поглощения, рассчитанная во всем диапазоне прозрачности стекла. В коротковолновой области наблюдается резкое увеличение данного коэффициента, что может быть связано с полосой переноса заряда $\text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{O}^{2-}$ [29], располагающейся вне области прозрачности данного стекла.

Обращает на себя внимание достаточно широкий разброс значений удельного коэффициента поглощения для стекол различного состава при заданной длине волны (табл. 2). В то же время для составов, макрокомпоненты которых содержат атомы тяжелых элементов, значения удельных коэффициентов хорошо согласуются между собой, что также можно объяснить сильным поляризационным влиянием макрокомпонентов стекла.

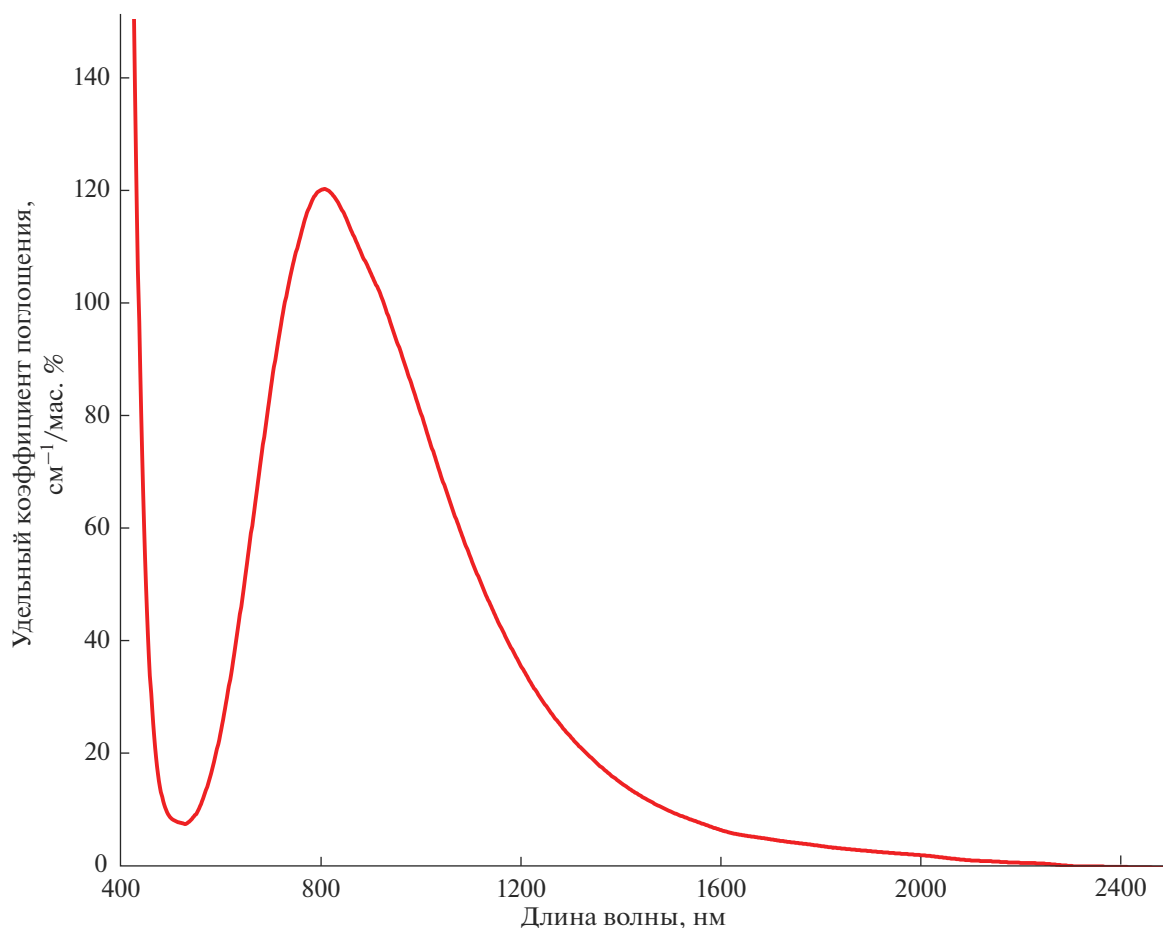


Рис. 4. Зависимость удельного коэффициента поглощения ионов Cu^{2+} в стекле $(\text{TeO}_2)_{0.72}(\text{ZnO})_{0.18}(\text{BiO}_{1.5})_{0.10}$ от длины волны.

Таблица 1. Сравнение положений максимумов полос поглощения иона Cu^{2+} в стеклах различных систем

Стекло	Положение максимума интенсивной полосы поглощения, нм	Источник
SiO_2	≈ 500	[39]
$(\text{Na}_2\text{O})_{0.22}(\text{CaO})_{0.03}(\text{SiO}_2)_{0.75}$	800	[40]
$(\text{GeO}_2)_{0.29}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.02}(\text{SiO}_2)_{0.44}$ $(\text{Na}_2\text{O})_{0.14}(\text{CaO})_{0.1}(\text{K}_2\text{O})_{0.01}$	780	[41]
$\text{TeO}_2\text{--GeO}_2\text{--WO}_3$	806–839	[42]
$\text{TeO}_2\text{--Ag}_2\text{O--WO}_3$	794–808	[29]
$\text{ZrF}_4\text{--BaF}_2\text{--LaF}_3\text{--AlF}_3\text{--NaF--PbF}_2$	1000	[43]
$(\text{TeO}_2)_{0.80}(\text{MoO}_3)_{0.20}$	830	[9]
$(\text{TeO}_2)_{0.70}(\text{ZnO})_{0.30}$	820	[8]
$(\text{TeO}_2)_{0.72}(\text{ZnO})_{0.18}(\text{MoO}_3)_{0.10}$	819	[44]
$(\text{TeO}_2)_{0.72}(\text{ZnO})_{0.18}(\text{BiO}_{1.5})_{0.10}$	810	Настоящая работа

Таблица 2. Сравнение значений удельного коэффициента поглощения Cu^{2+} в окрестности максимума полосы поглощения при ~ 819 нм в стеклах различных систем

Стекло	Удельный коэффициент поглощения, дБ/(км ppm)	Источник
SiO_2	0.01	[39]
$(\text{Na}_2\text{O})_{0.22}(\text{CaO})_{0.03}(\text{SiO}_2)_{0.75}$	≈ 640	[40]
$(\text{GeO}_2)_{0.29}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0.02}(\text{SiO}_2)_{0.44}$ $(\text{Na}_2\text{O})_{0.14}(\text{CaO})_{0.1}(\text{K}_2\text{O})_{0.01}$	≈ 200	[41]
$\text{TeO}_2\text{--GeO}_2\text{--WO}_3$	–	[42]
$\text{TeO}_2\text{--Ag}_2\text{O--WO}_3$	–	[29]
$\text{ZrF}_4\text{--BaF}_2\text{--LaF}_3\text{--AlF}_3\text{--NaF--PbF}_2$	≈ 250	[43]
$(\text{TeO}_2)_{0.80}(\text{MoO}_3)_{0.20}$	(4700 ± 30)	[9]
$(\text{TeO}_2)_{0.70}(\text{ZnO})_{0.30}$	(4460 ± 40)	[8]
$(\text{TeO}_2)_{0.72}(\text{ZnO})_{0.18}(\text{MoO}_3)_{0.10}$	(4070 ± 83)	[44]
$(\text{TeO}_2)_{0.72}(\text{ZnO})_{0.18}(\text{BiO}_{1.5})_{0.10}$	(5200 ± 220)	Настоящая работа

Полученная зависимость удельного коэффициента поглощения позволяет оценить минимальную концентрацию ионов меди(II) в стекле при контролируемом уровне примесных оптических потерь в 100 дБ/км. Для диапазона длин волн от 350 до 2700 нм содержание Cu^{2+} в образцах не должно превышать ~ 20 ppbwt. Исходя из полученного значения атомы Cu^{2+} следует считать сильно поглощающей примесью, содержание которой необходимо тщательно контролировать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В спектрах пропускания теллуридных стекол $(\text{TeO}_2)_{0.72}(\text{ZnO})_{0.18}(\text{BiO}_{1.5})_{0.10}$, легированных ионами меди(II) и приготовленных из теллурической ортокислоты, нитратов висмута и цинка, в диапазоне длин волн от 350 до 2700 нм установлено наличие интенсивной полосы поглощения с максимумом при ~ 810 нм.

Удельный коэффициент поглощения ионов Cu^{2+} был рассчитан во всем диапазоне прозрачности стекла в виде спектральной зависимости, найдено, что в максимуме при ~ 810 нм он равен 5200 ± 220 дБ/(км ppm).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Результаты исследований, связанные с разработкой способа получения стекол и сложных оксидов, получены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-73-10099).

Исследования, связанные с изучением оптического поглощения ионов меди, выполнены при финансовой

поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0729-2020-0039) в рамках базовой части государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rivera V.A.G., Manzani D.* Technological Advances in Tellurite Glasses. Cham: Springer, 2017.
2. *El-Mallawany R.A.H.* Tellurite Glasses Handbook. Boca Raton Taylor & Francis, 2011.
3. *Jose R., Arai Y., Ohishi Y.* Raman Scattering Characteristics of the TBSN-Based Tellurite Glass System as a New Raman Gain Medium // J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys. 2007. V. 24. № 7. P. 1517. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.24.001517.xe>
4. *Qin G., Jose R., Ohishi Y.* Design of Ultimate Gain-Flattened O-, E-, and S + C + L Ultrabroadband Fiber Amplifiers Using a New Fiber Raman Gain Medium // J. Lightwave Technol. 2007. V. 25. № 9. P. 2727–2738. <https://doi.org/10.1109/JLT.2007.902767>
5. *Stegeman R., Jankovic L., Kim H., Rivero C., Stegeman G., Richardson K., Delfyett P., Guo Y., Schulte A., Cardinal T.* Tellurite Glasses with Peak Absolute Raman Gain Coefficients up to 30 Times that of Fused Silica // Opt. Lett. 2003. V. 28. № 13. P. 1126–1128. <https://doi.org/10.1364/OL.28.001126>
6. *Denker B.I., Dorofeev V.V., Galagan B.I., Koltashev V.V., Motorin S.E., Plotnichenko V.G., Sverchkov S.E.* 2.3 μm Laser Action in Tm^{3+} -Doped Tellurite Glass Fiber // Laser. Phys. Lett. 2019. V. 16. № 1. P. 15101. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aaeda4>
7. *Dorofeev V.V., Moiseev A.N., Churbanov M.F., Plotnichenko V.G., Kosolapov A.F., Dianov E.M.* Characterization of High-Purity Tellurite Glasses for Fiber Optics // Specialty Optical Fibers: Advanced Photonics. Washington: OSA. SOMC4.

8. Zamyatin O.A., Plotnichenko V.G., Churbanov M.F., Zamyatina E.V., Karzanov V.V. Optical Properties of Zinc Tellurite Glasses Doped with Cu^{2+} Ions // *J. Non-Cryst. Solids*. 2018. V. 480. P. 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.08.025>
9. Замятин О.А., Чурбанов М.Ф., Плотниченко В.Г., Сибиркин А.А., Федотова И.Г., Гаврин С.А. Удельный коэффициент поглощения меди в стекле $(\text{TeO}_2)_{0.80}(\text{MoO}_3)_{0.20}$ // *Неорган. материалы*. 2015. Т. 51. № 12. С. 1380–1384. <https://doi.org/10.7868/S0002337X15110160>
10. Marzuki A., Ega F.D., Saraswati A. Effect of B_2O_3 Addition on Thermal and Optical Properties of TeO_2 – ZnO – Bi_2O_3 – TiO_2 Glasses // *Mater. Res. Express*. 2022. V. 9. № 2. P. 25203. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac55c5>
11. Wang Y., Dai S., Chen F., Xu T., Nie Q. Physical Properties and Optical Band Gap of New Tellurite Glasses within the TeO_2 – Nb_2O_5 – Bi_2O_3 System // *Mater. Chem. Phys.* 2009. V. 113. № 1. P. 407–411. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.07.117>
12. Kundu R.S., Dhankhar S., Punia R., Nanda K., Kishore N. Bismuth Modified Physical, Structural and Optical Properties of mid-IR Transparent Zinc Boro-Tellurite Glasses // *J. Alloys Compd.* 2014. V. 587. № 1. P. 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.10.141>
13. Lin S.-B., Wang P.-F., She J.-B., Guo H.-T., Xu S.-N., Zhao P.-F., Yu C.-L., Liu C.-X., Peng B. Spectroscopic and Thermal Properties of Yb^{3+} Doped TeO_2 – Bi_2O_3 – Nb_2O_5 Based Tellurite Glasses // *J. Lumin.* 2014. V. 153. P. 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2014.02.031>
14. Gao G., Hu L., Fan H., Wang G., Li K., Feng S., Fan S., Chen H., Pan J., Zhang J. Investigation of $2.0\mu\text{m}$ Emission in Tm^{3+} and Ho^{3+} co-Doped TeO_2 – ZnO – Bi_2O_3 Glasses // *Opt. Mater.* 2009. V. 32. № 2. P. 402–405. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2009.07.003>
15. Kozak A.J., Wiczorek-Ciurowa K., Kozak A. The Thermal Transformations in $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ – H_2O (1 : 6) System // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2003. V. 74. № 2. P. 497–502. <https://doi.org/10.1023/B:JTAN.0000005186.15474.be>
16. Małeckı A., Gajerski R., Łabuś S., Prochowska-Klisch B., Wojciechowski K.T. Mechanism of Thermal Decomposition of d-Metals Nitrates Hydrates // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2000. V. 60. № 1. P. 17–23. <https://doi.org/10.1023/A:1010155931266>
17. Živković Ž.D., Živković D.T., Grujičić D.B. Kinetics and Mechanism of the Thermal Decomposition of $\text{M}(\text{NO}_3)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ($\text{M}=\text{Cu}, \text{Co}, \text{Ni}$) // *J. Therm. Anal. Calorim.* 1998. V. 53. № 2. P. 617–623. <https://doi.org/10.1023/A:1010170231923>
18. Nikolic R., Zec S., Maksimovic V., Mentus S. Physico-Chemical Characterization of Thermal Decomposition Course in Zinc Nitrate-Copper Nitrate Hexahydrates // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2006. V. 86. № 2. P. 423–428. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-7237-z>
19. Ahmed M.A.K., Fjellvåg H., Kjekshus A. Synthesis, Structure and Thermal Stability of Tellurium Oxides and Oxide Sulfate Formed from Reactions in Refluxing Sulfuric Acid // *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 2000. № 24. P. 4542–4549. <https://doi.org/10.1039/B005688J>
20. Rosick J., Loub J., Pavel J. ber die Thermische Zersetzung der Orthotellursure und die Verbindung Te_2O_5 // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 1965. V. 334. № 5–6. P. 312–320. <https://doi.org/10.1002/zaac.19653340512>
21. Bart J.C.J., Bossi A., Perissinoto P., Castellan A., Gior-dano N. Some Observations on the Thermochemistry of Telluric Acid // *J. Therm. Anal.* 1975. V. 8. № 2. P. 313–327. <https://doi.org/10.1007/BF01904009>
22. Bayer G. On the Polymorphism of Orthotelluric Acid, H_6TeO_6 // *J. Less-Common Met.* 1968. V. 16. № 3. P. 215–222. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(68\)90017-9](https://doi.org/10.1016/0022-5088(68)90017-9)
23. Missen O.P., Mills S.J., Canossa S., Hadermann J., Néner G., Weil M., Libowitzky E., Housley R.M., Artnier W., Kampf A.R., Rumsey M.S., Spratt J., Momma K., Dun-stan M.A. Polytypism in Mcalpineite: a Study of Natural and Synthetic Cu_3TeO_6 // *Acta Crystallogr., Sect. B: Struct. Sci.* 2022. V. 78. № Pt 1. P. 20–32. <https://doi.org/10.1107/S2052520621013032>
24. Falck L., Lindqvist O., Mark W., Philippot E., Moret J. The Crystal Structure of CuTeO_4 // *Acta Crystallogr., Sect. B: Struct. Sci.* 1978. V. 34. № 5. P. 1450–1453. <https://doi.org/10.1107/S0567740878005889>
25. Zhu X., Wang Z., Su X., Vilarinho P.M. New Cu_3TeO_6 Ceramics: Phase Formation and Dielectric Properties // *ACS Appl. Mater Interfaces*. 2014. V. 6. № 14. P. 11326–11332. <https://doi.org/10.1021/am501742z>
26. Kamalaker V., Upender G., Prasad M., Mouli V.C. Infrared, ESR and Optical Absorption Studies of Cu^{2+} Ions Doped in TeO_2 – ZnO – NaF Glass System // *Indian J. Pure Appl. Phys.* 2010. V. 48. № 10. P. 709–715.
27. Gayathri Pavani P., Vijaya Kumar R., Chandra Mouli V. Characterization of ZnO Based Boro Tellurite Glass System // *Phys. Chem. Glasses*. 2016. V. 57. № 2. P. 104–110. <https://doi.org/10.13036/17533562.57.2.013>
28. Hosono H., Kawazoe H., Kanazawa T. ESR and Optical Absorption of Cu^{2+} in Na_2O – SiO_2 Glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. 1979. V. 33. № 1. P. 103–115. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(79\)90099-1](https://doi.org/10.1016/0022-3093(79)90099-1)
29. Upender G., Devi C.S., Kamalaker V., Mouli V.C. The Structural and Spectroscopic Investigations of Ternary Tellurite Glasses, Doped with Copper // *J. Alloys Compd.* 2011. V. 509. № 19. P. 5887–5892. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.03.001>
30. Ramadevudu G., Shareefuddin M., Sunitha Bai N., Lakshminpathi Rao M., Narasimha Chary M. Electron Paramagnetic Resonance and Optical Absorption Studies of Cu^{2+} Spin Probe in MgO – Na_2O – B_2O_3 Ternary Glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. 2000. V. 278. № 1–3. P. 205–212. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(00\)00255-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(00)00255-6)
31. Sreedhar B., Rao J.L., Lakshman S.V.J. Electron Spin Resonance and Optical Absorption Spectra of Cu^{2+} Ions in Alkali Zinc Borosulphate Glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. 1990. V. 124. № 2–3. P. 216–220. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(90\)90265-N](https://doi.org/10.1016/0022-3093(90)90265-N)
32. Narendra G.L., Sreedhar B., Rao J.L., Lakshman S.V.J. Electron Spin Resonance and Optical Absorption Spectra of Cu^{2+} Ions in Na_2SO_4 – ZnSO_4 Glasses // *J.*

- Mater. Sci. 1991. V. 26. № 19. P. 5342–5346.
<https://doi.org/10.1007/BF01143231>
33. *Bae B.-S., Weinberg M.C.* Optical Absorption of Copper Phosphate Glasses in the Visible Spectrum // *J. Non-Cryst. Solids*. 1994. V. 168. № 3. P. 223–231.
[https://doi.org/10.1016/0022-3093\(94\)90333-6](https://doi.org/10.1016/0022-3093(94)90333-6)
 34. *Chakradhar R.P.S., Ramesh K.P., Rao J.L., Ramakrishna J.* Mixed Alkali Effect in Borate Glasses – Electron Paramagnetic Resonance and Optical Absorption Studies in Cu^{2+} Doped $x\text{Na}_2\text{O}-(30-x)\text{K}_2\text{O}-70\text{B}_2\text{O}_3$ Glasses // *J. Mater. Sci.* 2003. V. 15. № 9. P. 1469–1486.
<https://doi.org/10.1088/0953-8984/15/9/311>
 35. *Rao L.S., Reddy M.S., Rao D.K., Veeraiah N.* Influence of Eedox Behavior of Copper Ions on Dielectric and Spectroscopic Properties of $\text{Li}_2\text{O}-\text{MoO}_3-\text{B}_2\text{O}_3$: CuO Glass System // *Solid State Sci.* 2009. V. 11. № 2. P. 578–587.
<https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2008.06.022>
 36. *Rayan D.A., Elbasha Y.H., Rashad M.M., El-Korashy A.* Optical Spectroscopic Analysis of Cupric Oxide Doped Barium Phosphate Glass for Bandpass Absorption Filter // *J. Non-Cryst. Solids*. 2013. V. 382. P. 52–56.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.002>
 37. *Stefan R., Culea E., Pascuta P.* The Effect of Copper Ions Addition on Structural and Optical Properties of Zinc Borate Glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. 2012. V. 358. № 4. P. 839–846.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.12.079>
 38. *Takebe H., Nishimoto S., Kuwabara M.* Thermal and Optical Properties of $\text{CuO}-\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ Glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. 2007. V. 353. № 13–15. P. 1354–1357.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.09.044>
 39. *Schultz P.C.* Optical Absorption of the Transition Elements in Vitreous Silica // *J. Am. Ceram. Soc.* 1974. V. 57. № 7. P. 309–313.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1974.tb10908.x>
 40. *Newns G.R., Pantelis P., Wilson J.L., Uffen R.W.J., Worthington R.* Absorption Losses in Glasses and Glass Fibre Waveguides // *Opto-electronics*. 1973. V. 5. № 4. P. 289–296.
<https://doi.org/10.1007/BF02057128>
 41. *Spierings G.A.C.M.* Optical Absorption of Transition Metals in Alkali Lime Germanosilicate Glasses // *J. Mater. Sci.* 1979. V. 14. № 10. P. 2519–2521.
<https://doi.org/10.1007/BF00737045>
 42. *Upender G., Prasad M., Mouli V.C.* Vibrational, EPR and Optical Spectroscopy of the Cu^{2+} Doped Glasses with $(90-x)\text{TeO}_2-10\text{GeO}_2-x\text{WO}_3$ ($7.5 \leq x \leq 30$) Composition // *J. Non-Cryst. Solids*. 2011. V. 357. № 3. P. 903–909.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2010.12.001>
 43. *France P.W., Carter S.W., Williams J.R.* Effects of Atmosphere Control on the Oxidation States of 3d Transition Metals in ZrF_4 Based Glasses // *Mater. Sci. Forum*. 1985. V. 5–6. P. 353–359.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.5-6.353>
 44. *Замятин О.А., Лексаков Д.А., Носов З.К.* Примесное поглощение ионами меди(II) в молибденсо-держателем теллурично-цинкатном стекле // *Неорг. материалы*. 2021. Т. 57. № 11. С. 1246–1252.
<https://doi.org/10.31857/S0002337X21110142>