

МРНТИ: 29.19.11

А.Л. Козловский

*Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан
(E-mail: kozlovskiy.a@inp.kz)*

Исследование эффективности экранирования гамма-излучения теллуридными стеклами, полученными методом твердофазного синтеза¹

Аннотация: одним из ключевых решений проблемы защиты от негативного воздействия ионизирующего излучения является создание радиационно-стойких керамик или стекол на основе TeO_2 - Bi_2O_3 - WO_3 , которые обладают высокой радиационной стойкостью и поглощающей и экранирующей способностью гамма-излучения. Интерес к данным типам структур обусловлен высокой плотностью получаемых структур, отличными механическими свойствами, а также отсутствием токсичности, которой обладают свинцовые экраны. Целью данной работы является оценка экранирующих характеристик стекол TeO_2 - Bi_2O_3 - WO_3 в зависимости от фазового состава, который контролируется методом термического спекания. В ходе проведенных исследований установлено, что изменение фазового состава приводит к увеличению плотности стекол, которое обусловлено формированием фазы $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{W}_3\text{O}_{16}$ и последующим доминированием ее в структуре синтезированных стекол. Основными результатами экранирующих характеристик являются то, что увеличение плотности керамик приводит к повышению экранирующих характеристик в 1.5-2 раза при поглощении гамма-квантов с энергиями 1270 кэВ, а также увеличению коэффициентов линейного и массового поглощения.

Ключевые слова: теллуридные стекла, защитные материалы, эффективность экранирования, гамма-излучение, радиационная безопасность.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-6836-2022-138-1-22-29>

Введение. На сегодняшний день все больше источников ионизирующего излучения используется в повседневной жизни, в результате чего здоровью и жизням людей угрожают негативное воздействие ионизирующего излучения и последствия, вызванные им. Использование источников ионизирующего излучения, а также установок генерирующих ионизирующее излучение, строительство атомных станций приводят к увеличению сфер пересечения человека с воздействием ионизирующего излучения [1-5]. При этом длительное воздействие ионизирующего излучения на живой организм может оказать существенное губительное воздействие, включающее в себя потерю дееспособности, тяжелые заболевания внутренних органов, вплоть до летального исхода.

Несмотря на повышенный уровень требований к защите от воздействия ионизирующего излучения, в большинстве случаев традиционные защитные свинцовые или бетонные материалы не могут быть использованы. Для решения данной проблемы в последние годы все больше исследований направлено на поиск технологии создания защитных материалов, являющихся альтернативными традиционным защитным материалам на основе свинца и бетона [6-8].

Одними из перспективных материалов для решения данной проблемы и замены традиционных защитных материалов являются многокомпонентные оксидные стекла или керамики на основе таких соединений, как TeO_2 , ZnO , Al_2O_3 , Bi_2O_3 , MoO_3 , SiO_2 .

¹ Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (No. BR11765580)

B_2O_3 , WO_3 , BaO и др. [9-15]. Интерес к данным классам материалов в первую очередь обусловлен их структурными и оптическими свойствами, высокими показателями термо- и химической стойкости, диэлектрическими и прочностными характеристиками, а также высокими значениями плотности, сравнимыми со свинцовыми материалами. При этом в отличие от свинцовых защитных покрытий, данные стекла не являются токсичными, что открывает возможности их повсеместного применения. Также стоит отметить, что выбор компонент для составов стекол, как правило, основывается на требовании увеличения плотности материала с целью увеличения эффективности экранирования [16-20].

Большинство работ, посвященных изучению свойств экранирующих материалов на основе керамик или стекол, направлено на теоретическую оценку влияния фазового состава на экранирующие характеристики и эффективность снижения интенсивности гамма-излучения. В данной статье приведены экспериментальные данные применимости синтезированных керамик для экранирования гамма-излучения и снижения его интенсивности. Определение эффективности экранирования гамма-квантов с энергией 1.3 МэВ проводилось с использованием источника гамма-квантов Na^{22} . Оценка эффективности экранирования проводилась на серии образцов, полученных при различных температурах отжига с целью определения наиболее эффективного состава керамик. Определение экранирующих характеристик проводилось путем измерения регистрируемой интенсивности гамма-квантов до и после экранирования за одинаковые заданные промежутки времени.

Экспериментальные методы. Синтез образцов проводился с применением метода механохимического синтеза с последующим спеканием перемешанных в планетарной мельнице при количестве 400 оборотов в минуту в течение 1 часа. Термический отжиг проводился в диапазоне от 300 до 800 °С в течение 5 часов и последующего остывания вместе с печью в течение 24 часов. В качестве исходных компонент были выбраны соли Bi_2O_3 , TeO_2 , WO_3 (Sigma Aldrich) в равных стехиометрических пропорциях, которые имели химическую чистоту 99.9%. Для дальнейших исследований образцы были пронумерованы и названы, в зависимости от температуры спекания, следующим образом: TBW-0, TBW-300, TBW-400, TBW-500, TBW-600, TBW-700, TBW-800. Использование данных условий синтеза позволяет варьировать степень аморфизации стекол, а также плотность стекол, изменение которой обусловлено эффектами, связанными с температурами плавления и стеклования выбранных оксидных компонент

Определение фазового состава синтезированных стекол проводилось путем измерения рентгеновских дифрактограмм, снятых в режиме $2\theta = 20-90^\circ$, с шагом $\theta = 0.03^\circ$ и временем набора спектра в точке 3 сек на порошковом дифрактометре D8 Advance Eco (Bruker, Германия). Для оценки эффективности экранирования использовалась стандартная схема расположения источника, экрана и детектора. На расстоянии 10 см от источника гамма-излучения располагался детектор NaI (Черноголовка, Россия), который регистрировал интенсивность потока гамма-квантов. В случае определения эффективности экранирования перед детектором размещались пластинки их керамики различной толщины и велась регистрация ослабления потока гамма-квантов. Во всех экспериментах время измерения интенсивности потока гамма-квантов составляло 2 часа. Величина эффективности экранирования (RFE), которая характеризует эффективность снижения интенсивности гамма-излучения, прошедшего через защитное стекло по отношению к интенсивности излучения без экранирования, определялась при помощи уравнения (1) [19]:

$$RFE = 1 - \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (1)$$

где I и I_0 величины интенсивностей спектров до и после экранирования.

Величины линейного коэффициента ослабления μ и массового коэффициента ослабления μ_m определялись с помощью уравнений (2) и (3) [20]:

$$\mu = \frac{\log \frac{I}{I_0}}{d} \quad (2)$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (3)$$

где I_0 - величина исходной интенсивности, I - величина интенсивности после экранирования; d - толщина, ρ - плотность стекол.

Величины слоя половинного поглощения (HVL) и среднего свободного пробега (MFP), которые позволяют определить технические характеристики геометрии керамик, в частности их толщины, которая позволяет ослабить интенсивность падающего излучения на 50 %, а также определить среднее расстояние между двумя последовательными взаимодействиями гамма-квантов с кристаллической структурой определялись с помощью уравнений (4) и (5) [19,20]:

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (4)$$

$$MFP = \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

Результаты. Для оценки фазовых превращений и степени аморфизации и стеклования в зависимости от температуры спекания был применен метод рентгенофазового анализа, результаты которого представлены в таблице 1. Оценка вкладов фаз проводилась с применением метода определения площадей пиков на дифрактограммах каждой фазы, с последующим вычислением процентного вклада в общую дифрактограмму.

Таблица 1 - Результаты фазового анализа

Температура спекания, °С	Фаза			Плотность, г/см ³
	WO ₃ – орторомбическая, P(0)	Bi ₂ Te ₄ O ₁₁ – кубическая, Fm-3m(225)	Bi ₂ Te ₂ W ₃ O ₁₆ – моноклинная, C2/c(15)	
0	57	43	-	7.09±0.05
300	49	51	-	7.16±0.07
400	18	82	-	7.18±0.02
500	15	-	85	7.70±0.06
600	-	-	100	7.79±0.01
700	-	-	100	7.80±0.03
800	Аморфное состояние			

В ходе анализа было установлено, что в исходном состоянии фазовый состав исследуемых керамик представляет собой смесь двух фаз WO₃ и Bi₂Te₄O₁₁, при этом наличие данных фаз свидетельствует о протекании процессов фазовых превращений в процессе перемалывания. В случае термического отжига при 300 °С наблюдается изменение концентрации двух фаз, в то время как при температуре 400 °С наблюдается резкое увеличение вклада фазы Bi₂Te₄O₁₁. При температуре 500 °С установлено формирование моноклинной фазы Bi₂Te₂W₃O₁₆, с небольшим содержанием фазы WO₃ в структуре. Последующее увеличение температуры отжига до 600-700 °С приводит к завершению фазовых превращений и доминированию фазы Bi₂Te₂W₃O₁₆. Однако при температуре 800 °С наблюдается аморфизация структуры и завершение фазовых превращений в стекловидную форму. Таким образом, в ходе проведенных исследований установлена динамика фазовых превращений в зависимости от температуры отжига, которые свидетельствуют о протекании процессов уплотнения и изменения свойств материалов.

На рисунках 1-3 представлены результаты изменения экранирующих характеристик для исследуемых керамик в зависимости от температуры отжига.

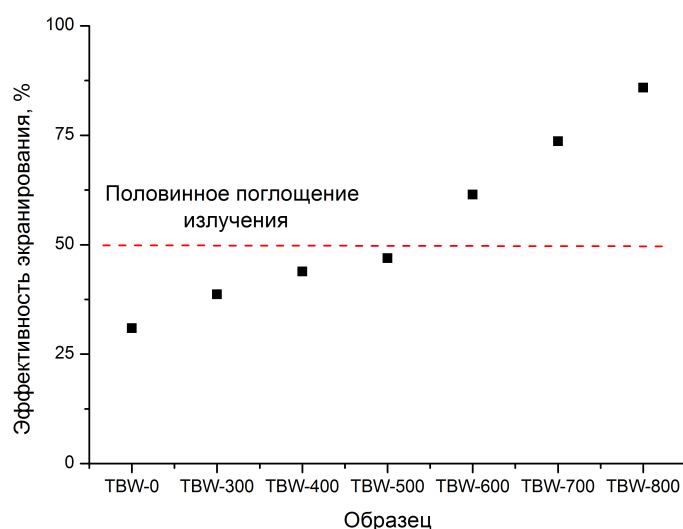


Рисунок 1 – График зависимости изменения эффективности экранирования от типа образца

Согласно полученным данным изменения величины эффективности экранирования, было установлено, что для образцов TBW-0, TBW-300, TBW-400, TBW-500 эффективность ослабления интенсивности гамма-излучения составляет ниже 50%, что свидетельствует о том, что данные типы керамик обладают низкими показателями эффективности. Такое поведение связано в первую очередь фазовым составом и плотностью керамик. При этом в ходе проведенных экспериментов установлено, что половинное ослабление интенсивности прошедшего излучения через защитный экран из керамик толщиной 0.5 мм наблюдалось только для образцов, полученных при температуре отжига выше 500°C , для которых характерна высокая плотность, обусловленная формированием фазы $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{W}_3\text{O}_{16}$.

Как известно, в диапазоне энергий от 0.001 до 1.5 МэВ могут наблюдаться все основные виды взаимодействия гамма-излучения с веществом, включающие в себя комптоновское рассеяние (область от 1 кэВ до 100-150 кэВ), фотоэффект (область от 150 кэВ до 1 МэВ) и образование электрон-позитронных пар (область выше 1 МэВ) [21-25]. В области малых энергий гамма-квантов от 1 кэВ до 150 кэВ преобладают эффекты комптоновского рассеяния, которые сопровождаются потерями энергии гамма-квантов за счет последовательных соударений и последующей потери энергии и затухании. В этом случае величина сечения поглощения для всех синтезированных материалов достаточна велика, что обусловлено наличием в структуре как легких элементов, наиболее применимых для поглощения гамма-квантов низкой энергии, так и тяжелых, которые полностью поглощают гамма-кванты в процессе многократных соударений. Область, характерная для образования электрон-позитронных пар, характеризуется экспоненциальным снижением величины сечения. Это обусловлено несколькими факторами, включающими в себя как образование электрон-позитронных пар, которые впоследствии могут привести к образованию двух или трех новых гамма-квантов с энергиями вдвое меньше начальной и способными к инициализации процессов фотоионизации, так и уменьшение величины сечения, которая в этом случае пропорциональна Z^2 . При этом для образования электрон-позитронных пар основную роль играют такие факторы, как плотность материала, а также ширина запрещенной зоны. В свою очередь увеличение плотности керамик и, соответственно, их уплотнение и снижение пористых включений в

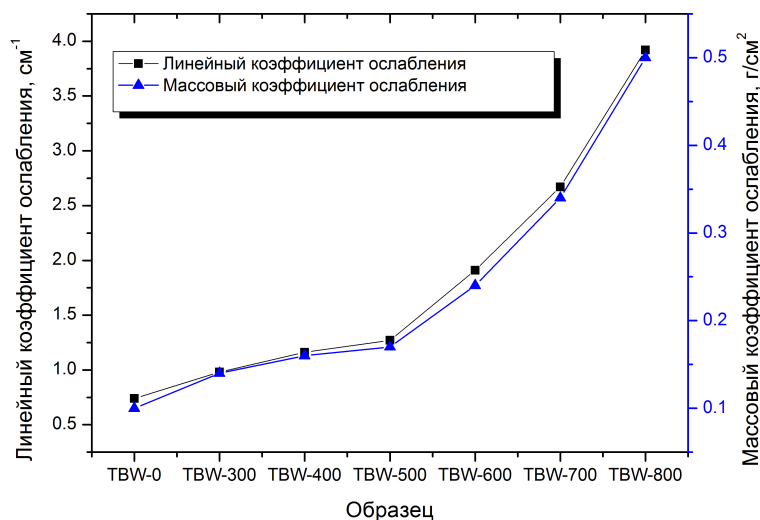


Рисунок 2 – График зависимости изменения величин линейного и массового коэффициентов ослабления

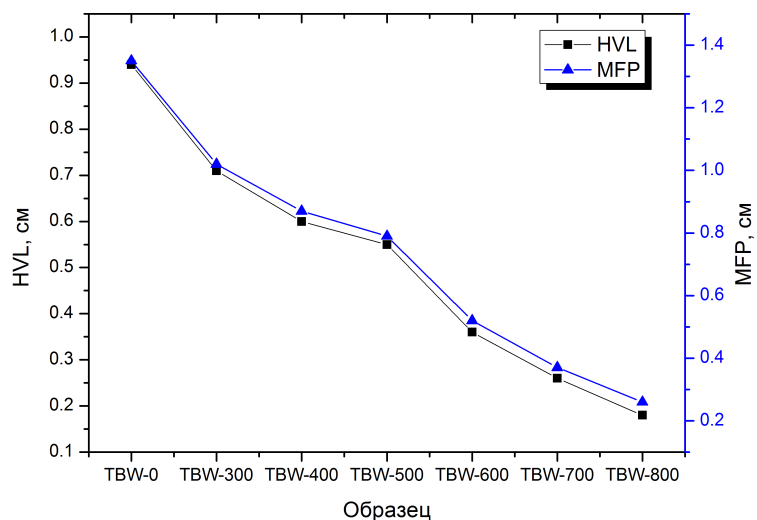


Рисунок 3 – График изменения слоя половинного поглощения и среднего свободного пробега

кристаллической структуре приводит к увеличению эффективности экранирования и, как следствие, увеличению таких величин, как линейный и массовый коэффициенты поглощения. При этом стоит отметить, что в случае керамик, полученных при 800 °С, аморфная или стекловидная форма приводит к наибольшему увеличению эффективности экранирования, так как известно, что в аморфном состоянии теллуридные стекла обладают большой эффективностью экранирования. При этом 2.5-3 кратное снижение таких величин слоя половинного поглощения и среднего свободного пробега для керамик, полученных при температурах отжига 600-800 °С, по сравнению с исходными образцами и полученными при температурах отжига 300-500 °С, свидетельствует о высокой эффективности экранирования и снижении толщины керамик для защиты и половинного ослабления потока гамма-квантов.

Заключение. Результатом фазовых превращений теллуридных стекол в зависимости от температуры отжига является следующая диаграмма $WO_3/Vi_2Te_4O_{11} \rightarrow WO_3/Vi_2Te_2W_3O_{16} \rightarrow Vi_2Te_2W_3O_{16} \rightarrow$ Аморфное стекло. В ходе испытаний на определение эффективности экранирования синтезированных керамик было установлено, что увеличение плотности керамик приводит к повышению экранирующих характеристик в 1.5 - 2 раза при поглощении гамма-квантов с энергиями 1270 кэВ, а также увеличению коэффициентов линейного и массового поглощения. В заключение можно сделать вывод о том, что полученные результаты исследования влияния термического отжига на фазовый состав и экранирующие характеристики теллуридных стекол продемонстрировали хорошие перспективы применения данных материалов в качестве экранирующих покрытий.

Список литературы

- 1 Hansson S.O. ALARA: What is reasonably achievable? // *Radioactivity in the Environment*. - 2013. - Vol. 19. - P. 143-155.
- 2 Prasad K.N., Cole W.C., Haase G.M. Radiation protection in humans: extending the concept of as low as reasonably achievable (ALARA) from dose to biological damage // *The British journal of radiology*. - 2004. - Vol. 77. - № 914. - P. 97-99.
- 3 Sayed M. et al. Degradation of quinolone antibiotic, norfloxacin, in aqueous solution using gamma-ray irradiation // *Environmental Science and Pollution Research*. - 2016. - Vol. 23. - № 13. - P. 13155-13168.
- 4 Lotfi-Omran O., Sadrumontazi A., Nikbin I.M. A comprehensive study on the effect of water to cement ratio on the mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete // *Construction and Building Materials*. - 2019. - Vol. 229. - P. 116905.
- 5 Alwaeli M. Investigation of gamma radiation shielding and compressive strength properties of concrete containing scale and granulated lead-zinc slag wastes // *Journal of Cleaner Production*. - 2017. - Vol. 166. - P. 157-162.
- 6 Berkhout W.E. The ALARA-principle. Backgrounds and enforcement in dental practices // *Nederlands tijdschrift voor tandheekkunde*. - 2015. - Vol. 122. - № 5. - P. 263-270.
- 7 Temir A. et al. Study of gamma radiation shielding efficiency with radiation-resistant Bi₂O₃-TeO₂-WO₃ ceramics // *Solid State Sciences*. - 2021. - Vol. 115. - P. 106604.
- 8 Gaikwad D.K. et al. Comparative study of gamma ray shielding competence of WO₃-TeO₂-PbO glass system to different glasses and concretes // *Materials Chemistry and Physics*. - 2018. - Vol. 213. - P. 508-517.
- 9 Scuderi G.J. et al. Evaluation of non-lead-based protective radiological material in spinal surgery // *The Spine Journal*. - 2006. - Vol. 6. - № 5. - P. 577-582.
- 10 Roslan M.K. A. et al. High-density concrete: exploring Ferro boron effects in neutron and gamma radiation shielding // *Construction and Building Materials*. - 2019. - Vol. 215. - P. 718-725.
- 11 Al-Hadeethi Y., Sayyed M.I., Rammah Y.S. Fabrication, optical, structural and gamma radiation shielding characterizations of GeO₂-PbO-Al₂O₃-CaO glasses // *Ceramics International*. - 2020. - Vol. 46. - № 2. - P. 2055-2062.
- 12 Sayyed M.I. Half value layer, mean free path and exposure buildup factor for tellurite glasses with different oxide compositions // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2017. - Vol. 695. - P. 3191-3197.
- 13 Gaikwad D. K. et al. Gamma ray shielding properties of TeO₂-ZnF₂-As₂O₃-Sm₂O₃ glasses // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2018. - Vol. 765. - P. 451-458.
- 14 Naseer K.A. et al. Influence of Bi₂O₃ concentration on barium-telluro-borate glasses: physical, structural and radiation-shielding properties // *Ceramics International*. - 2021. - Vol. 47. - № 1. - P. 329-340.
- 15 Sayyed M.I. et al. Radiation shielding properties of pentatertiary borate glasses using MCNPX code // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. - 2018. - Vol. 121. - P. 17-21.
- 16 Hampton R.N. et al. The electrical conductivity of pure and binary TeO₂ glasses // *Journal of non-crystalline solids*. - 1987. - Vol. 94. - № 3. - P. 307-314.
- 17 Issa S.A.M., Tekin H.O. The multiple characterization of gamma, neutron and proton shielding performances of xPbO-(99-x) B₂O₃-Sm₂O₃ glass system // *Ceramics International*. - 2019. - Vol. 45. - № 17. - P. 23561-23571.
- 18 Kumar A. et al. Physical, structural, optical and gamma ray shielding behavior of (20+ x) PbO-10 BaO-10 Na₂O-10 MgO-(50-x) B₂O₃ glasses // *Physica B: Condensed Matter*. - 2019. - Vol. 552. - P. 110-118.
- 19 Sayyed M.I., et al. Physical, structural, optical and gamma radiation shielding properties of borate glasses containing heavy metals (Bi₂O₃/MoO₃) // *Journal of Non-Crystalline Solids*. - 2019. - Vol. 507. - P. 30-37.
- 20 El-Mallawany R., Sayyed M.I., and Dong M.G. Comparative shielding properties of some tellurite glasses: Part 2 // *Journal of Non-Crystalline Solids*. - 2017. - Vol. 474. - P. 16-23.
- 21 Tekin H.O., and Kilicoglu O. The influence of gallium (Ga) additive on nuclear radiation shielding effectiveness of Pd/Mn binary alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2020. - Vol. 815. - P. 152484.

- 22 Sayyed M.I., et al. Gamma radiation shielding investigations for selected germanate glasses // Journal of Non-Crystalline Solids. - 2019. - Vol. 512. - P. 33-40.
- 23 Akman F., et al. Study of gamma radiation attenuation properties of some selected ternary alloys // Journal of Alloys and Compounds. - 2019. - Vol. 782. - P. 315-322.
- 24 Sayyed M.I., et al. Investigation on gamma and neutron radiation shielding parameters for BaO/SrO-Bi₂O₃-B₂O₃ glasses // Radiation Physics and Chemistry. - 2018. - Vol. 145. - P. 26-33.
- 25 Sayyed M.I., et al. Novel tellurite glass (60-x) TeO₂-10GeO₂-20ZnO-10BaO-xBi₂O₃ for radiation shielding // Journal of alloys and compounds. - 2020. - Vol. 844. - P. 155668.

А.Л. Козловский

Ядролық физика институты ЭМ ҚР, Алматы, Қазақстан

Қатты фазалық синтез әдісімен алынған теллуридті шынылармен гамма-сәулеленуді экрандаудың тиімділігін зерттеу

Аннотация. Иондаушы сәулеленудің теріс әсерінен қорғау мәселесінің негізгі шешімдерінің бірі жоғары радиациялық төзімділікке және гамма-сәулеленудің сіңіру және экрандау қабілетіне ие TeO₂-Bi₂O₃-WO₃ негізінде радиациялық төзімді керамика немесе әйнектер жасау болып табылады. Құрылымдардың бұл түрлеріне қызығушылық алынған құрылымдардың жоғары тығыздығына, керемет механикалық қасиеттерге, сондай-ақ қорғасын экрандарының ұйыттылығының болмауына байланысты. Бұл жұмыстың мақсаты термиялық синтездеу әдісімен бақыланатын фазалық құрамға байланысты TeO₂-Bi₂O₃-WO₃ шыныларының экрандау сипаттамаларын бағалау болып табылады. Зерттеулер барысында фазалық құрамның өзгеруі шыны тығыздығының жоғарылауына әкелетіні анықталды, бұл Bi₂Te₂W₃O₁₆ фазасының пайда болуымен және оның синтезделген нышы құрылымында одан әрі үстемдігімен байланысты. Экрандау сипаттамаларының негізгі нәтижелері керамиканың тығыздығының артуы 1270 кэВ энергиясымен гамма-кванттарды сіңіру кезінде экрандау сипаттамаларының 1.5-2 есе жоғарылауына, сондай-ақ сызықтық және жаппай сіңіру коэффициенттерінің жоғарылауына әкеледі.

Түйін сөздер: теллуридті шынылар, қорғаныс материалдары, экрандау тиімділігі, гамма-сәулелену, радиациялық қауіпсіздік.

A.L. Kozlovskiy

Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

Study of the efficiency of gamma radiation shielding by telluride glasses obtained by solid-phase synthesis

Abstract. One of the key solutions to the problem of protection against the negative effects of ionizing radiation is the creation of radiation-resistant ceramics or glasses based on TeO₂-Bi₂O₃-WO₃, which have high radiation resistance and absorption and shielding ability of gamma radiation. Interest in these types of structures is connected with the high density of the resulting structures, excellent mechanical properties, and the absence of toxicity, found in lead shields. The purpose of this work is to evaluate the shielding characteristics of TeO₂-Bi₂O₃-WO₃ glasses depending on the phase composition, which is controlled by thermal sintering. During the studies, it was found that a change in the phase composition leads to an increase in the density of glasses, which is due to the Bi₂Te₂W₃O₁₆ phase formation and its subsequent dominance in the structure of the synthesized glasses. The main results of shielding characteristics are that an increase in the ceramic density leads to an increase in shielding characteristics by a factor of 1.5-2 upon absorption of gamma rays with energies of 1270 keV, as well as an increase in the linear and mass absorption coefficients.

Keywords: telluride glasses, protective materials, shielding efficiency, gamma radiation, radiation safety.

References

- 1 Hansson S.O. ALARA: What is reasonably achievable?, Radioactivity in the Environment, 19, 143-155 (2013).
- 2 Prasad K.N., Cole W.C., Haase G.M. Radiation protection in humans: extending the concept of as low as reasonably achievable (ALARA) from dose to biological damage, The British journal of radiology, 77(914), 97-99 (2004).
- 3 Sayed M. et al. Degradation of quinolone antibiotic, norfloxacin, in aqueous solution using gamma-ray irradiation, Environmental Science and Pollution Research, 13(23), 13155-13168 (2016).
- 4 Lotfi-Omran O., Sadrmomtazi A., Nikbin I.M. A comprehensive study on the effect of water to cement ratio on the mechanical and radiation shielding properties of heavyweight concrete, Construction and Building Materials, 229, 116905 (2019).
- 5 Alwaeli M. Investigation of gamma radiation shielding and compressive strength properties of concrete containing scale and granulated lead-zinc slag wastes, Journal of Cleaner Production, 166, 157-162 (2017).
- 6 Berkhout W.E. The ALARA-principle. Backgrounds and enforcement in dental practices, Nederlands tijdschrift voor tandheelkunde, 5(122), 263-270 (2015).
- 7 Temir A. et al. Study of gamma radiation shielding efficiency with radiation-resistant Bi₂O₃-TeO₂-WO₃ ceramics, Solid State Sciences, 115, 106604 (2021).

- 8 Gaikwad D.K. et al. Comparative study of gamma ray shielding competence of WO₃-TeO₂-PbO glass system to different glasses and concretes, *Materials Chemistry and Physics*, 213, 508-517 (2018).
- 9 Scuderi G.J. et al. Evaluation of non-lead-based protective radiological material in spinal surgery, *The Spine Journal*, 5(6), 577-582 (2006).
- 10 Roslan M.K. A. et al. High-density concrete: exploring Ferro boron effects in neutron and gamma radiation shielding, *Construction and Building Materials*, 215, 718-725 (2019).
- 11 Al-Hadeethi Y., Sayyed M.I., Rammah Y.S. Fabrication, optical, structural and gamma radiation shielding characterizations of GeO₂-PbO-Al₂O₃-CaO glasses, *Ceramics International*, 2(46), 2055-2062 (2020).
- 12 Sayyed M.I. Half value layer, mean free path and exposure buildup factor for tellurite glasses with different oxide compositions, *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 3191-3197 (2017).
- 13 Gaikwad D. K. et al. Gamma ray shielding properties of TeO₂-ZnF₂-As₂O₃-Sm₂O₃ glasses, *Journal of Alloys and Compounds*, 765, 451-458 (2018).
- 14 Naseer K.A. et al. Influence of Bi₂O₃ concentration on barium-telluro-borate glasses: physical, structural and radiation-shielding properties, *Ceramics International*, 1(47), 329-340 (2021).
- 15 Sayyed M.I. et al. Radiation shielding properties of pentateryary borate glasses using MCNPX code, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 121, 17-21 (2018).
- 16 Hampton R.N. et al. The electrical conductivity of pure and binary TeO₂ glasses, *Journal of non-crystalline solids*, 3(94), 307-314 (1987).
- 17 Issa S.A.M., Tekin H.O. The multiple characterization of gamma, neutron and proton shielding performances of xPbO-(99-x) B₂O₃-Sm₂O₃ glass system, *Ceramics International*, 17(45), 23561-23571 (2019).
- 18 Kumar A. et al. Physical, structural, optical and gamma ray shielding behavior of (20+ x) PbO-10 BaO-10 Na₂O-10 MgO-(50-x) B₂O₃ glasses, *Physica B: Condensed Matter*, 552, 110-118 (2019).
- 19 Sayyed M.I., et al. Physical, structural, optical and gamma radiation shielding properties of borate glasses containing heavy metals (Bi₂O₃/MoO₃), *Journal of Non-Crystalline Solids*, 507, 30-37 (2019).
- 20 El-Mallawany R., Sayyed M.I., and Dong M.G. Comparative shielding properties of some tellurite glasses: Part 2, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 474, 16-23 (2017).
- 21 Tekin H.O., and Kilicoglu O. The influence of gallium (Ga) additive on nuclear radiation shielding effectiveness of Pd/Mn binary alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 815, 152484 (2020).
- 22 Sayyed M.I., et al. Gamma radiation shielding investigations for selected germanate glasses, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 512, 33-40 (2019).
- 23 Akman F., et al. Study of gamma radiation attenuation properties of some selected ternary alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 315-322 (2019).
- 24 Sayyed M.I., et al. Investigation on gamma and neutron radiation shielding parameters for BaO/SrO-Bi₂O₃-B₂O₃ glasses, *Radiation Physics and Chemistry*, 145, 26-33 (2018).
- 25 Sayyed M.I., et al. Novel tellurite glass (60-x) TeO₂-10GeO₂-20ZnO-10BaO-xBi₂O₃ for radiation shielding, *Journal of alloys and compounds*, 844, 155668 (2020).

Сведения об авторе:

Козловский А.Л. - PhD, заведующий лабораторией АФ ИЯФ МЭ РК, пр.Аблайхана 2/1, Нур-Султан, Казахстан; Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан.

Kozlovskiy A.L. - PhD, Head of Laboratory, AF BINP ME RK, 2/1 Ablaykhan Ave., Nur-Sultan, Kazakhstan; Institute of Nuclear Physics ME RK, Almaty, Kazakhstan.