

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-2-9-19>

УДК 54.548.4

СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ, ПРОЧНОСТНЫХ И ЭКРАНИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК $0.6\text{TeO}_2\text{-}0.25\text{BaO-}0.15\text{ZnO}$

А. Л. Козловский^{1,2*}, М. Тулегенова¹, Д. И. Шлимас^{1,2}

¹ НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Астана, Казахстан

² РГП «Институт ядерной физики» МЭ РК, Алматы, Казахстан

* E-mail для контактов: kozlovskiy.a@inp.kz

В данном исследовании представлены результаты изучения оптических, прочностных, диэлектрических и экранирующих характеристик $0.6\text{TeO}_2\text{-}0.25\text{BaO-}0.15\text{ZnO}$ стекол. В качестве метода получения был выбран метод механохимического перемалывания исходных оксидных компонентов с последующим термическим спеканием с целью получения стекловидных образцов, с аморфной структурой. Для характеристики полученных образцов были задействованы методы растровой электронной микроскопии, энергодисперсионного анализа, рентгеновской дифракции, импедансной и оптической спектроскопии, а также определение прочностных свойств было осуществлено с применением метода индентирования. В ходе проведенных исследований изучения структурных особенностей и фазового состава было установлено, что синтезированные стекла обладают аморфной природой, с небольшим содержанием включений в виде зерен $\text{BaZnTe}_2\text{O}_7$. При этом анализ картирования элементов в составе стекол показал изотропное распределение всех компонент в составе стекла и полное отсутствие каких-либо примесей. При определении оптических свойств синтезированных стекол было установлено наличие в спектрах пропускания широкой полосы поглощения в области видимого света, а также трех спектральных полос поглощения, характерных для кислородных вакансий и междоузельных атомов кислорода. Согласно данным прочностных характеристик было установлено, что синтезированные стекла обладают достаточной твердостью и устойчивостью к внешним воздействиям, а характер образования трещин характерен для полудисковых трещин. Анализ экранирующих характеристик синтезированных стекол показал высокую эффективность при экранировании низкоэнергетических гамма-квантов.

Ключевые слова: $\text{TeO}_2\text{-BaO-ZnO}$, гамма-излучение, теллуридные стекла, защитные материалы, эффективность экранирования, прочность.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного мира не обходится без интенсивного использования различных типов ионизирующего излучения, а также источников генерирующих излучение практически во всех ключевых областях, включая энергетику, медицину, электронику и т.д. [1, 2]. При этом, согласно концепции ALARA (As Low As Reasonably Achievable) [3, 4], разработанной Международной Комиссией по радиационной защите, использование источников ионизирующего излучения должно проводиться с максимальной минимизацией вредного воздействия излучения на живые организмы. В этой связи большое внимание при разработке технологий использования источников генерирующих излучение или же самого ионизирующего излучения уделяется поиску технологий экранирования и защиты от негативного воздействия ионизирующего излучения с целью сведения его воздействия к минимуму [5, 6]. Традиционными способами защиты являются использование крупногабаритных бетонных конструкций, позволяющих максимально снизить негативный эффект воздействия, а также свинцовые щиты или блоки, включая освинцованные стекла, обладающие большой поглощающей способностью, которая позволяет с большой эффективностью экранировать воздействие ионизирующего излучения. При этом повсеместное использование тра-

диционных источников экранирования в виде бетонных конструкций или свинцовых пластин имеет ряд ограничений не только в конструкционном плане, но и по ряду причин, связанных с токсичностью свинца, физико-химическими и прочностными свойствами бетонных изделий, а также невозможности использования данных материалов для защиты микроэлектронных устройств в виду их крупногабаритных размеров [7–9].

Одним из альтернативных методов экранирования и снижения негативного воздействия ионизирующего излучения, включая гамма-излучение, нейтронное и электронное, которые обладают высокой проникающей способностью, в последние несколько лет активно предлагается использовать различные варианты композитных керамик или стекол [10–13]. Интерес к данным типам материалов, в частности, обладающих сложной многокомпонентной структурой, содержащих в себе несколько компонент, включая оксиды редких земель, обусловлен большой поглощающей способностью при взаимодействии с излучением [14, 15].

Цель данного исследования заключается в детальной характеристике свойств синтезированных $0.6\text{TeO}_2\text{-}0.25\text{BaO-}0.15\text{ZnO}$ стекол, полученных с применением метода механохимического синтеза с последующим термическим спеканием, а также сравни-

тельном анализе экранирующих характеристик полученных стекол с аналогичными экранирующими защитными материалами. Интерес к данной тематике обусловлен в первую очередь поиском возможных альтернативных материалов для защиты от негативного воздействия ионизирующего излучения [10–15]. Выбор в качестве основы для создания экранирующих стекол диоксида теллура обусловлено его нелинейными оптическими свойствами, позволяющими усилить поглощающую способность, а также высокими показателями диэлектрической проницаемости, что дает его хорошим изоляционным материалом, а также широко применяется в качестве основы для оптических устройств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных компонент для получения стекол были выбраны следующие оксиды: диоксид теллура (TeO₂), выбранный в качестве основного компонента стекол, оксид бария (BaO) и оксид цинка (ZnO). Химическая чистота выбранных оксидов составляла не менее 99,95%, что исключает возможность формирования каких-либо инородных примесей в составе стекол.

На рисунке 1 представлена поэтапная схема получения 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO стекол с применением метода механохимического синтеза с последующим термическим отжигом образцов.

Первый этап синтеза заключался в навеске исходных оксидных компонентов стекол в заданном стехиометрическом соотношении равном 0.6 моль TeO₂, 0,25 моль BaO, 0,15 моль ZnO. После навески полученную смесь подвергли механохимическому перемалыванию в планетарной мельнице PULVERISETTE 6 classic line (Fritsch, Берлин, Германия). Перемалывание проводилось при скорости 400 оборот/мин в течение 1 часа. Перемалывание осуществлялось с помощью шаров диаметром 8 мм в стакане из карбида вольфрама, обладающей повышенной твердостью и устойчивостью к механическому воздействию. Соотношение шаров к массе перемалываемого вещества составляла 2:1. Третий этап синтеза заключался в термическом сплавлении полученных перемолотых смесей в муфельной печи SNOL (SNOL, Утена, Литва). Отжиг проводился в течение 30 минут при температуре 750 °С, скорость нагрева

составляла 10 °С/мин. Для отжига использовали алундовые тигли, способные выдерживать повышенные температуры. После отжига образцы извлекались из печи и представляли собой стекла, обладающие темносиним оттенком и достаточной прозрачностью.

Исследование морфологических особенностей синтезированных стекол было проведено с применением метода растровой электронной микроскопии (РЭМ), реализованной с помощью электронного микроскопа Hitachi TM3030 (Hitachi, Tokyo, Japan). Изучение изотропности распределения элементов в синтезированных образцах было выполнено с применением метода энергодисперсионного анализа (ЭДА) и картирования, позволяющего оценить однородность распределения элементов в структуре стекол. В силу диэлектрической природы стекол для детального изучения морфологических особенностей исследуемых образцов с применением методов РЭМ и ЭДА на поверхность образцов методом магнетронного распыления был нанесен проводящий слой золота толщиной не более 10 нм. При ЭДА регистрируемые малоинтенсивные пики, характерные для золота не учитывались при обработке и анализе спектров, а также определению установленных соотношений элементов.

Изучение фазового состава и кристаллической природы синтезированных стекол было осуществлено с применением метода порошковой рентгеновской дифракции, реализованной с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Advance ECO (Bruker, Berlin, Germany). Съемка рентгеновских дифрактограмм проводилась в геометрии Брегг-Брентано в угловом диапазоне $2\theta=15-100^\circ$, с шагом $0,02^\circ$. Идентификация фазового состава была определена с применением базы данных PDF-2(2016).

Оптические свойства синтезированных стекол были определены с использованием УФ-спектрофотометра (Specord250Plus, Analytik Jena GmbH, Jena, Germany). Съемка оптических спектров была осуществлена в диапазоне от 300 до 1000 нм, с шагом 1 нм. Спектры были сняты в двух режимах – пропускания и поглощения для определения оптических и поглощающих характеристик стекол, а также ширины запрещенной зоны.



Рисунок 1. Схематичное представление получения стекол: 1) навеска образцов; 2) механохимическое перемалывание; 3) термический отжиг в муфельной печи; 4) готовые образцы стекол

Определение прочностных свойств и трещиностойкости образцов было проведено с применением методики измерения показателей твердости методом индентирования. Для измерения был использован микротвердомер Durolin-M, в качестве индентера была использована пирамида Виккерса. Диапазон нагрузок на индентер составил от 0,01 до 1,0 кН. Определение характера образующихся микротрещин и показателя трещиностойкости в зависимости от приложенной нагрузки было осуществлено путем анализа полученных оптических изображений поверхности синтезированных стекол.

Частотные зависимости электропроводности и диэлектрической проницаемости в частотном диапазоне 500–200 000 Гц определялись с помощью измерителя импеданса НЮКУ ИМ3533-01 через пересчет значений электроемкости и электрического импеданса. Для этого на полученные образцы наносились электроды из серебряной пасты и формировалась структура плоскопараллельного конденсатора.

Оценка эффективности экранирования оценивалась с применением стандартного метода оценки интенсивности регистрируемого гамма-излучения с определенной энергией на расстоянии 10 см от источника гамма-квантов с помощью NaI детектора. Определение эффективности экранирования было осуществлено путем сравнения величины интенсивности зарегистрированной без защитного экрана и с использованием защитных экранов из синтезированных стекол.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлены результаты рентгеновской дифракции исследуемых образцов полученных методом термического спекания. Общий вид полученной рентгеновской дифрактограммы характерен для аморфных структур и характеризуется отсут-

ствием интенсивных пиков, характерных для высокоупорядоченных структур. Наличие малых пиков, интенсивность которых составляет не более 500 имп., может быть связано с наличием в структуре синтезированных стекол сферических включений, имеющих другой тип структуры, чем основное состояние аморфного стекла. Согласно рентгенофазовому анализу положения установленных малоинтенсивных рефлексов можно сделать заключение о том, что данные пики характерны для орторомбической фазы BaZnTe₂O₇ с пространственной сингонией Ama2(40), имеющих сильно деформированную структуры, о чем свидетельствует искаженная форма рефлексов. Оценка вкладов данных рефлексов в общую дифракционную картину составляет не более 5–7%, что в целом сравнимо с оценкой вкладов сферических включений в общей массе образца при анализе полученных оптических изображений.

Из полученных данных можно сделать вывод о том, что в процессе термического спекания 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO стекол происходит формирование аморфной стеклоподобной структуры, с небольшими включения в виде BaZnTe₂O₇ сферических зерен, наличие которых связано с процессами фазовых трансформаций при спекании.

На рисунке 3 представлены результаты изучения морфологических особенностей синтезированных 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO стекол, а также данные распределения элементов в структуре образцов в виде данных картирования элементов и энергодисперсионного спектра. Согласно детальным изображениям, выполненным с применением метода растровой электронной микроскопии, было установлено наличие в стекловидной форме зеренных включений, содержащих в себе повышенное содержание теллура, согласно данным результатам картирования.

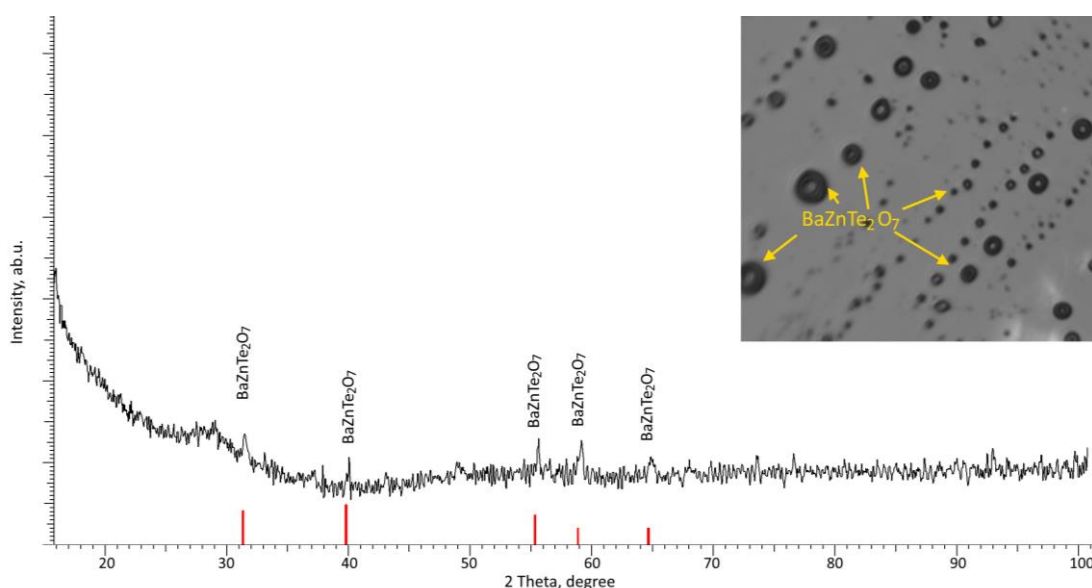


Рисунок 2. Результаты рентгеновской дифракции синтезированного образца 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO стекол

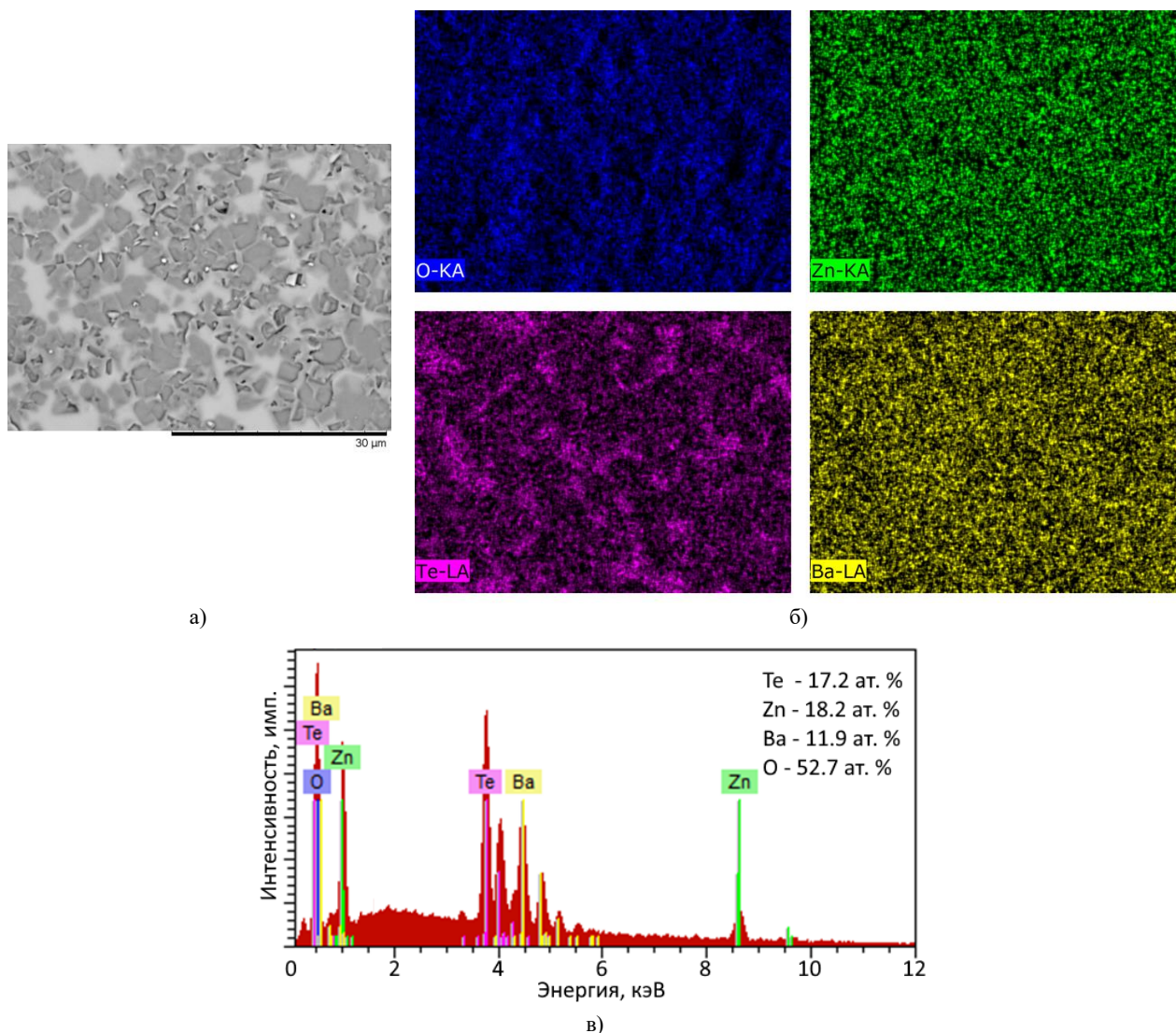


Рисунок 3. а) РЭМ изображение поверхности синтезированных стекол, полученное при увеличении 5000х; б) данные распределения карт элементов стекол; в) энергодисперсионный спектр и усредненные данные элементного состава стекол

При этом детальный анализ картирования поверхности образцов с целью определения изотропности распределения элементов в составе стекол показал, что распределение всех элементов используемых компонент равномерно распределено в структуре стекол, с небольшим увеличением содержания теллура в образованных зернах. Такое формирование зерен также подтверждает данные рентгенофазового анализа о наличии в структуре зерен $\text{BaZnTe}_2\text{O}_7$, с повышенным содержанием теллура согласно химической формуле. При этом на энергодисперсионном спектре исследуемого образца не наблюдается наличие каких-либо малоинтенсивных пиков, характерных для примесных элементов, что свидетельствует о чистоте полученных стекол, не содержащих инородных примесей.

На рисунке 4 представлены результаты определения диэлектрических характеристик синтезированных стекол в виде частотных зависимостей удельной

электропроводности и диэлектрической проницаемости. Как видно из рисунка 4а электропроводность σ возрастает с увеличением частоты электрического переменного поля f более чем 5 порядков на рассматриваемом диапазоне частот. Подобная зависимость характерна для диэлектриков с неоднородной структурой, в которой при низких частотах заряды на неоднородностях дают вклад исключительно в поляризацию, а на высоких частотах также и в проводимость. Значение, измеренное на частоте 5 Гц, равно $6,24 \cdot 10^{-9}$ См/м и близкое к электропроводности на постоянном поле, находится в пределах значений, относимых к диэлектрикам. Частотная зависимость диэлектрической проницаемости (рисунок 4б) менее выражена по сравнению с зависимостью $\sigma(f)$, а среднее значение проницаемости составляет $\sim 20,3$. Повышенное значение диэлектрической проницаемости по сравнению с промышленными стеклами может быть связано с наличием включений $\text{BaZnTe}_2\text{O}_7$.

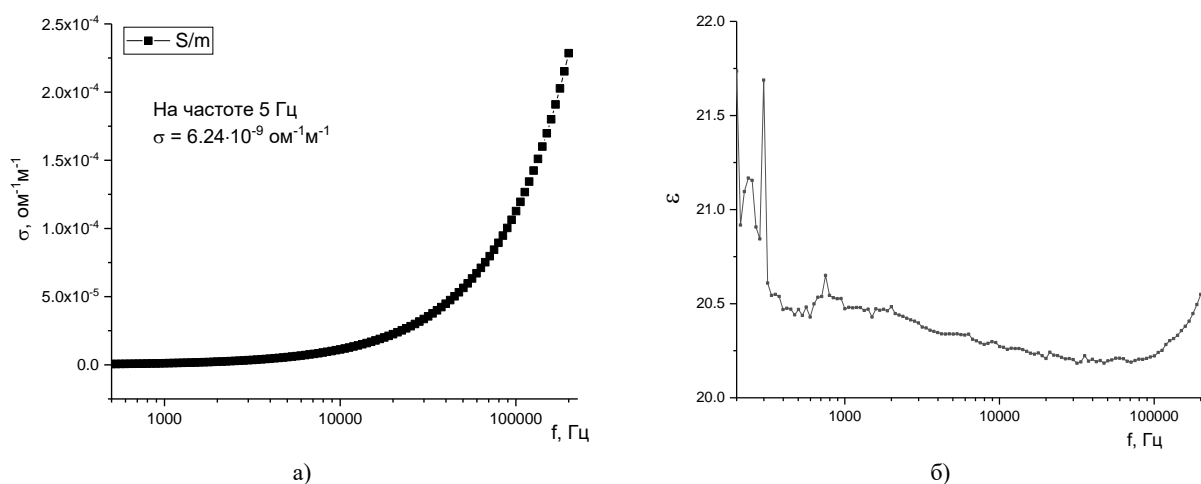


Рисунок 4. Частотная зависимость изменения величины удельного сопротивления (а) и диэлектрической проницаемости (б)

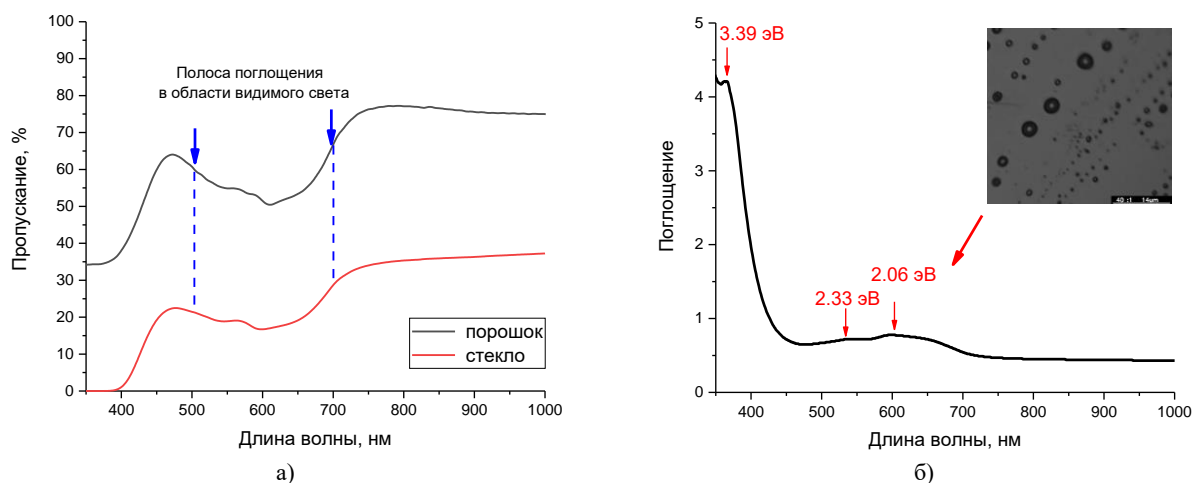


Рисунок 5. Данные UV-Vis спектроскопии синтезированных 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO стекол: а) спектр пропускания; б) спектр поглощения

На рисунке 5 представлены результаты измерений оптических свойств синтезированных 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO стекол в виде спектров пропускания и поглощения. Данные спектры были получены с использованием метода измерения UV-Vis спектроскопии в диапазоне длин волн 350–1000 нм, охватывающем край ультрафиолетовой области, видимого света и ближнего ИК-диапазона. Согласно полученным данным оптических спектров пропускания, представленных в двух вариациях (спектр стекла и спектр перетертого порошка, измерение которого было выполнено с использованием интегральной сферы) было установлено наличие широкой полосы поглощения в области границы видимого света (500–650 нм), наличие которой может быть объяснено как структурными включениями в виде зерен BaZnTe₂O₇, так и образованием дополнительных поглощающих центров в составе стекол.

Анализ спектра поглощения выявил наличие трех полос поглощения при гауссовом разложении кото-

рых были установлены величины их максимумов. Максимум с величиной 3,39 эВ может быть обусловлен наличием кислородных вакансий в случае разрыва химических связей Te-O, появление которых можно связать с процессами образования несвязанных состояний на электронных орбиталях. Наличие максимумов с величинами 2,33–2,35 эВ может быть обусловлено формированием в структуре кислородных вакансий V_O, а наличие спектральной полосы с максимумом 2,0–2,06 эВ обусловлено наличием междоузельных атомов кислорода (O_i), формирование которых приводит к появлению излучательных переходов носителей заряда из зоны проводимости. Таким образом, из полученных данных оптических спектров пропускания и поглощения можно сделать вывод о влиянии электронной структуры исходных оксидных компонентов на образование дополнительных полос поглощения в стеклах, что может быть использована в оптоэлектронных устройствах.

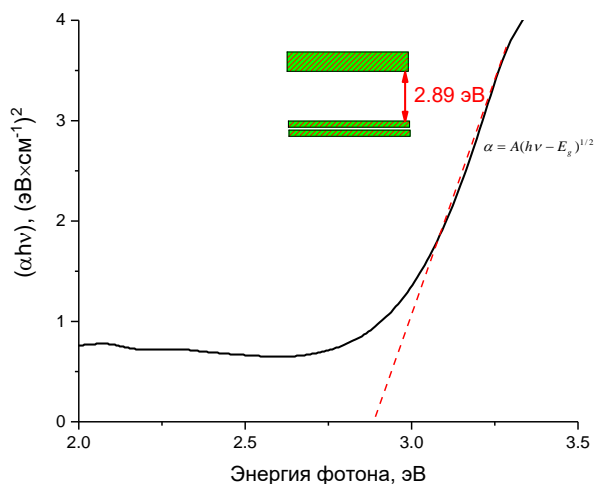


Рисунок 6. Данные построения Таука

На рисунке 6 представлены результаты построений Таука, отражающих изменение величины края фундаментального поглощения или красного сдвига, а также ширины запрещенной зоны полученных 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO стекол. Согласно оценке величины ширины запрещенной зоны было установлено, что данная величина для синтезированных стекол составляет 2,89 эВ. Как известно, ширина запрещенной зоны диоксида теллура составляет 3,6–3,8 эВ, в зависимости от кристаллической модификации, в свою очередь величина ширины запрещенной зоны для оксида цинка, являющегося широкозонным полупроводником составляет 3,3–3,4 эВ, величина ширины запрещенной зоны оксида бария составляет

2,9–3,2 эВ. Полученное значение величины ширины запрещенной зоны для синтезированного стекла 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO имеет значение несколько меньше, чем для основной компоненты диоксида теллура, что может быть обусловлено эффектом изменения электронной плотности, связанной с процессами аморфизации стекол, а также наличием дополнительных компонент в виде ионных и полупроводниковых соединений, имеющих значительно меньшую ширину запрещенной зоны.

Немаловажным свойством синтезированных стекол в случае их практического использования в качестве защитных материалов для экранирования является их устойчивость к внешним механическим воздействиям, в том числе сжатию, ударам, сдавливанию и т.д. Прочностные свойства и устойчивость к механической деструкции играют весьма важную роль в определении области применимости данных материалов, так как в случае использования их для экранирования космического излучения. В случае спутниковых аппаратов, летающих на околоземной орбите, необходимо учитывать вероятность механических столкновений с космическим мусором или метеоритными потоками, воздействие которых не раз выводило из строя космические аппараты.

На рисунке 7 представлены оптические изображения отпечатков индентера, полученных при различных нагрузках на индентер, отражающих изменение твердости приповерхностного слоя на различной глубине, а также характер образующихся микротрещин в месте повреждений.

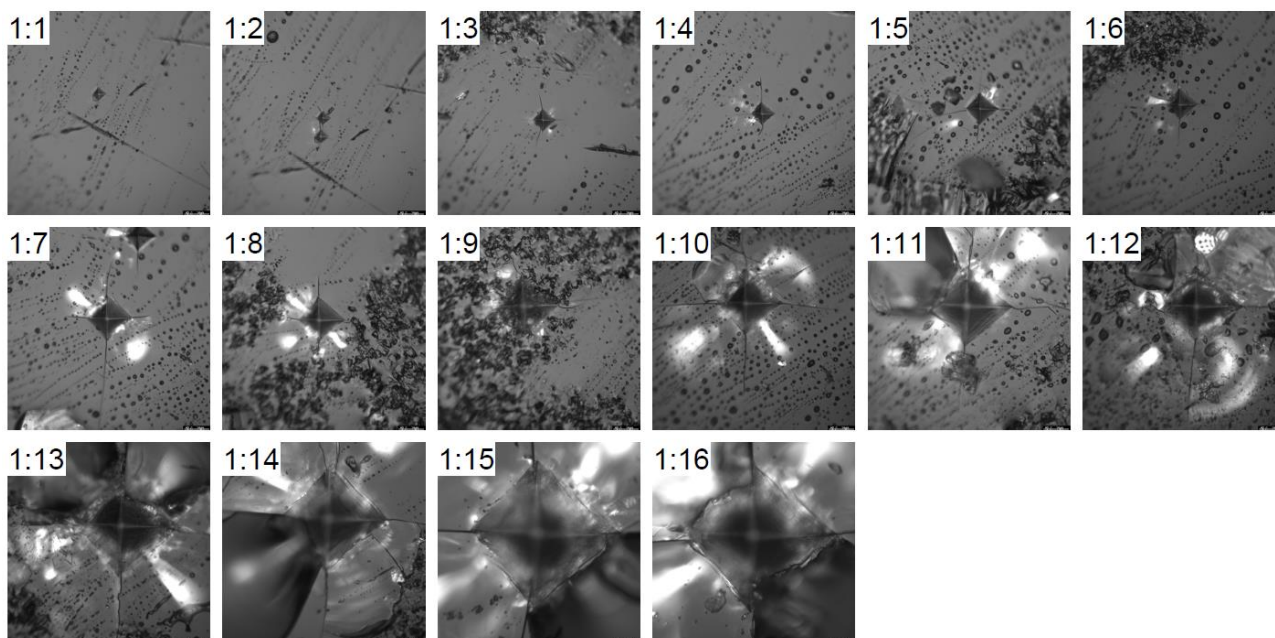


Рисунок 7. Оптические изображения отпечатков индентера при индентировании механических свойств в зависимости от нагрузки на индентер

Общий вид представленных отпечатков индентера свидетельствует о достаточной прочности образцов и устойчивости к трещинообразованию, а характер наблюдаемых трещин при увеличении нагрузки характерен для полудисковых трещин, образующихся вблизи вершин отпечатка индентера. При этом форма отпечатка индентера близка к изотропной, что свидетельствует о равновероятном распределении отклика возникающих искажающих факторов в приповерхностном слое образца при внешних воздействиях. При этом индентирование образцов вблизи сферических включений отражает их более высокую устойчивость к распространению трещин, что характерно для армирующего фактора упрочнения аморфных стекол за счет образованных включений в структуре.

На рисунке 8 представлены результаты данных твердости исследуемых образцов в зависимости от величины нагрузки на индентер в процессе механических испытаний. Твердость была определена с применением формулы (1), которая отражает вычисление значений твердости по Виккерсу с учетом геометрии индентера в виде алмазной пирамидки.

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2}, \quad (1)$$

где P — приложенное давление, d — средняя длина диагонали отпечатка.

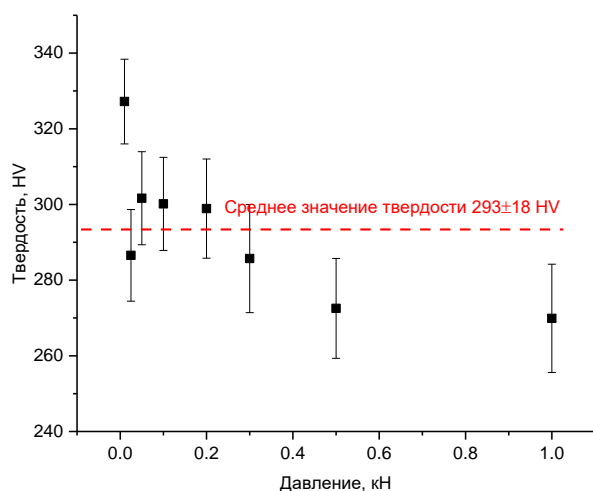


Рисунок 8. Результаты изменения величины твердости по Виккерсу в случае увеличения нагрузки на индентер

Полученные данные отражают изменение показателей твердости синтезированного образца в зависимости от глубины проникновения индентера, а также силы внешнего воздействия на него. Согласно общим представлениям, в случае однородного по составу образца изменение значений твердости в зависимости от силы нагружения на индентер должны быть близки, так как материал должен обладать устойчивостью к внешним воздействиям. Согласно полученным данным, при малых нагрузках на индентер (ме-

нее 0,05 кН) значения твердости несколько завышены, что может быть обусловлено как фактором малого воздействия, так и наличия в структуре приповерхностного слоя большего количества структурных напряжений, препятствующих деформации и разрушению. В случае увеличения нагрузки наблюдается стабилизация значений твердости в диапазоне значений 290–300 HV, что свидетельствует о стабильности механических свойств образцов. При больших нагрузках (более 0,5 кН) наблюдается незначительное снижение значений твердости, что может быть связано в первую очередь с увеличением внешнего воздействия при нагружении, приводящей к большему вдавливанию индентера вглубь образца, а также увеличению образующихся микротрещин, приводящих к деструкции. На основании полученных данных изменений твердости была рассчитана средняя величина твердости, которая составила не менее 293 HV, что в переводе в единицы системы СИ составляет не менее 2,87 ГПа.

На рисунке 9 представлены результаты, отражающие вязкость разрушения синтезированных образцов в результате воздействия индентером в виде пирамиды Виккерса при различных нагрузках.

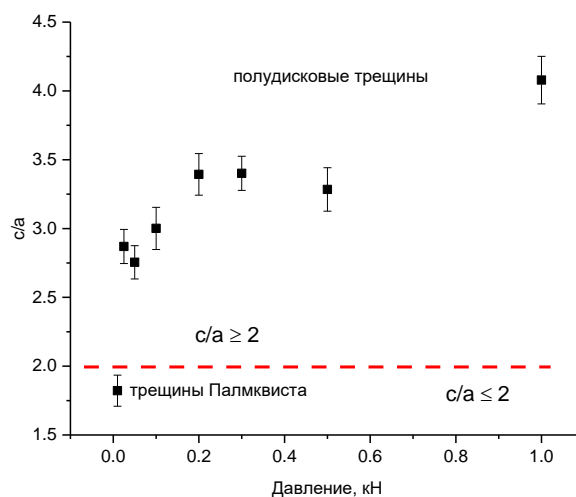


Рисунок 9. Результаты изменения величины c/a , отражающей характер трещин, образующихся в результате внешних воздействий

Представленные на рисунке 9 данные изменения величины c/a , где c — полудлина трещины, и a — полудиагональ отпечатка индентера. Данная величина характеризует характер и тип образующихся трещин в результате внешних воздействий. Известно, что при $c/a \leq 2$, тип образующихся трещин характерен для трещин Палмквиста, которые распространяются в основном в боковом направлении от воздействия индентера, образуя концентрические круги. При величине $c/a \geq 2$, тип трещин характерен для полудисковых, образование которых происходит на концах отпечатка индентера, а распространение происходит в радиальном и поперечном направлении от центра.

Согласно полученным данным изменения величины c/a в зависимости от величины нагрузки на индентер видно, что при малых нагрузках образующимся трещинам характерен тип Палмквиста, в то время как увеличение нагрузки выше 0,05 кН приводит к образованию полудисковых трещин. При этом стоит отметить, что увеличение нагрузки не приводит к серьезным различиям в величинах соотношения c/a , что свидетельствует о стабильности материала к трещинообразованию при внешних нагрузках. Ниже на рисунке 10, в качестве примера приведены изображения отпечатков индентера с характерными полудисковыми трещинами, образующимися в результате внешних воздействий при нагрузке 0,1 кН.

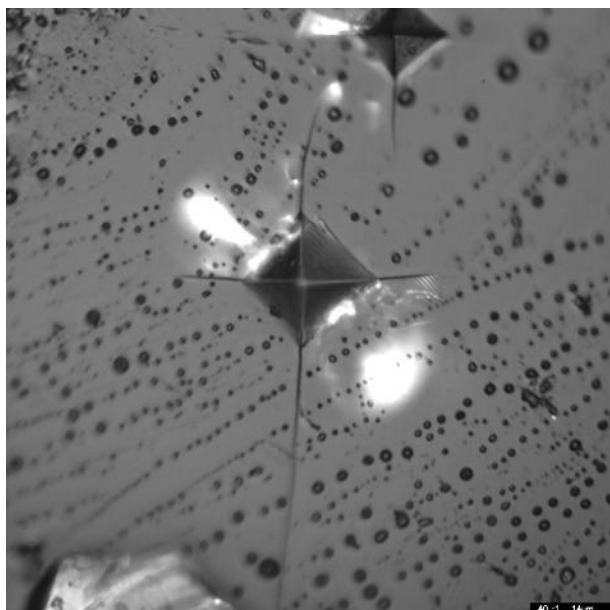


Рисунок 10. Пример изображения распространения трещин при индентировании

На основе изменений величины c/a , а также величины твердости с использованием формулы (2) можно оценить величину критического коэффициента интенсивности напряжений (K_{Ic}) в образцах при индентировании.

$$K_{Ic} = 0,16 \cdot H \cdot a^{1/2} \cdot (c/a)^{-3/2}, \quad (2)$$

где H – величина твердости по Виккерсу, c – полу-длина трещины, и a – полудиagonalь отпечатка индентера. Результаты расчетов представлены на рисунке 11.

Как видно из представленных данных, при малых нагрузках 0,01 кН для которых характерен характер распространения трещин по Палмквисту в приповерхностном слое величина K_{Ic} значительно превышает среднее значение, что свидетельствует о том, что в малом приповерхностном слое содержится больше упрочняющих факторов, связанных с деформационными искажениями, возникающими при застывании стекол, а также сферическими мелкими включениями, которые были отчетливо видны при

индентировании, среднее значение величины K_{Ic} для всего измеряемого диапазона нагрузок составляет не менее 3,13 МПа·м^{1/2}. При этом анализируя представленные изменения величины K_{Ic} в зависимости от нагрузки видно, что основные отличия наблюдаются при малых нагрузках, что может быть связано с деформационными включениями в приповерхностном слое.

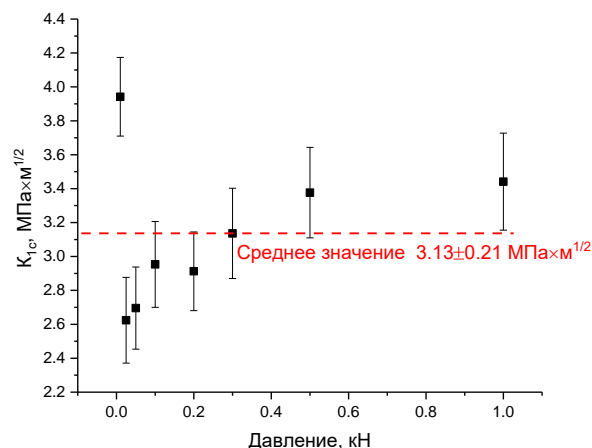


Рисунок 11. Результаты изменения величины K_{Ic} в зависимости от приложенного давления на индентер

На рисунке 12 представлена схема эксперимента по определению эффективности экранирования гамма-излучения с использованием синтезированного стекла толщиной 3 мм. В качестве источников гамма-излучения были использованы источники Co⁵⁷, Cs¹³⁷, Na²² с энергиями гамма-квантов 130 кэВ, 660 кэВ и 1270 кэВ соответственно. Используемая схема для экранирования представляет собой источник гамма-излучения, помещенный в свинцовый контейнер, имеющий одно выходное отверстие диаметром 5 мм, которое позволяет испускать гамма-кванты в одном направлении. Перед источником излучения размещается защитный экран в виде образца, основная цель которого заключается в снижении интенсивности прохождения гамма-излучения. Детектирование гамма-излучения и регистрация интенсивности прошедших гамма-лучей было проведено с использованием регистрирующей системы на основе детектора NaI. Регистрация проводилась в равном временном интервале, для сравнения была измерена интенсивность регистрируемых гамма-квантов без защитного экрана.

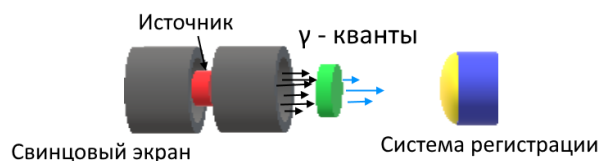


Рисунок 12. Схема эксперимента для регистрации гамма-излучения

На рисунке 13 представлены данные о величине эффективности экранирования гамма-излучения с различной энергией гамма-квантов, рассчитанные с использованием формулы (3).

$$\text{Эффективность экранирования} = \frac{I_0 - I_i}{I_0} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где I_0 , I_i – интенсивность регистрируемого гамма-излучения без защитного экрана и с защитным экраном.

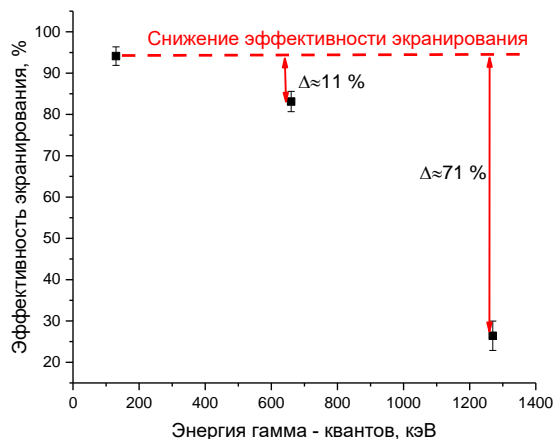


Рисунок 13. Данные оценки эффективности экранирования в зависимости от энергии налетающих гамма-квантов (на графике приведены данные о снижении эффективности в процентном соотношении с величиной эффективности экранирования для гамма-квантов с энергией 130 кэВ)

Как видно из представленных данных, в случае экранирования низкоэнергетических гамма-квантов с энергией 130 кэВ, для которых основным механизмом взаимодействия с веществом является фотоэффект, сопровождающийся полным поглощением гамма-кванта, эффективность экранирования составляет более 95%, что является весьма хорошим показателем для экранирующих материалов. В случае экранирования гамма-квантов с энергией 660 кэВ, испускаемых источником Cs¹³⁷, с характерными механизмами взаимодействия гамма-излучения связанных с эффектом Комптона, сопровождающихся упругим рассеянием гамма-квантов на свободных электронах, наблюдается снижение эффективности экранирования более чем на 10% в сравнении с аналогичной величиной эффективности при экранировании гамма-квантов с энергией 130 кэВ. При этом величина эффективности составляет более 80%. Такое снижение эффективности может быть объяснено различием в механизмах взаимодействия гамма-квантов с веществом, а также увеличением проникающей способности гамма-квантов с увеличением энергии, которое наиболее явно проявляется для гамма-квантов с энергиями 1270 кэВ, испускаемых источником Na²². В случае увеличения энергии гамма – квантов свыше 1,0 МэВ при взаимодействии его с электромагнитным полем ядер возможно образование электрон-позитронных пар по следующему механизму $\gamma \rightarrow e^- + e^+$,

включающему в себя полное исчезновение гамма-кванта. Также стоит отметить, что образование электрон-позитронных пар происходит только в случае преодоления энергетического порога (1,02 МэВ), а избыток энергии при взаимодействии и образовании электрон-позитронных пар распределяется в виде кинетической энергии электрона и позитрона. При этом последующие процессы взаимодействия образовавшихся электрона и позитрона приводит к образованию так называемых вторичных гамма-квантов, с более низкой энергией, что приводит к изменению их механизмов взаимодействия с веществом. Образующееся вторичное излучение, в виде электронов, позитронов и гамма-квантов в объеме экранирующего материала обладает более низкой проникающей способностью, в отличие от гамма-квантов, послуживших родоначальником их образования, однако, несмотря на это также способны оказать негативное воздействие. В этом случае, основным и наиболее эффективным решением для защиты от высокоэнергетических гамма-квантов, является использование методики увеличения толщины защитных покрытий и экранирующих материалов, которое позволяет снизить интенсивность гамма-излучения, а также поглотить большую часть вторичного излучения.

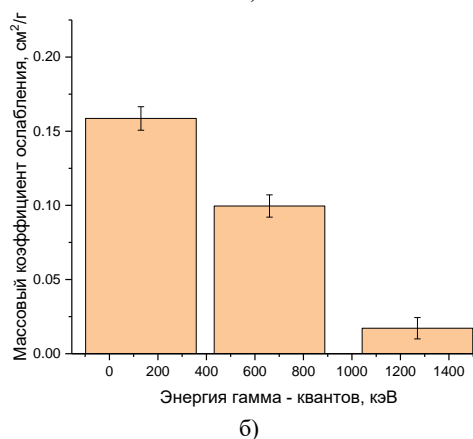
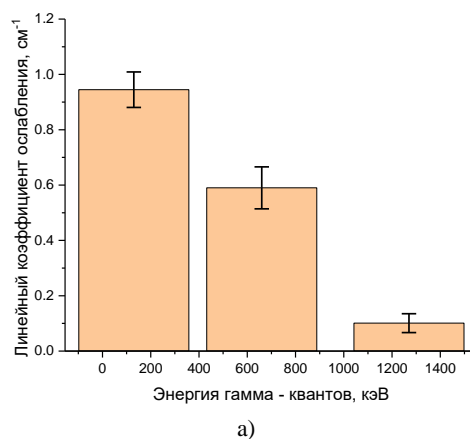


Рисунок 14. а) зависимость величины линейного коэффициента ослабления; б) зависимость массового коэффициента ослабления гамма-излучения

На рисунке 14 представлены результаты оценки величин линейного и массового коэффициентов ослабления гамма-излучения, которые позволяют спрогнозировать эффективную толщину образцов для снижения интенсивности гамма-квантов с различной энергией, а также отражают во сколько раз снижается интенсивность гамма-излучения.

Как видно из представленных данных, изменение величин коэффициентов ослабления имеют явно выраженную зависимость от энергии гамма-излучения, при этом в случае гамма-квантов с энергиями 130–660 кэВ для экранирования можно использовать достаточно тонкие защитные стекла при экранировании, а для экранирования высокоэнергетических гамма-квантов следует значительно увеличивать толщину либо изменять концентрацию компонент оксидов при синтезе с целью увеличения плотности, а также эффективного заряда Z_{eff} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены данные характеристики свойств и экранирующей способности синтезированных 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO стекол, полученных с применением метода механохимического перемалывания и последующего термического отжига. Согласно данным рентгенофазового анализа было установлено, что синтезированные стекла обладают аморфной природой, с примесными включениями в виде зерен BaZnTe₂O₇, наличие которых может быть объяснено процессами плавления и последующего формирования стекол. Образование BaZnTe₂O₇ зерен в виде сферических упорядоченных включений может быть обусловлено процессами фазовых превращений при больших температурах, связанных с образованием мелкодисперсных частиц орторомбической фазы твердого раствора BaZnTe₂O₇, которые в процессе остывания и закалывания не успевают полностью аморфизоваться. Оценка оптических и диэлектрических свойств показала, что полученные стекла обладают высокой поглощающей способностью в области видимого света, а также являются весьма хорошими диэлектрическими изоляторами, с характерной величиной удельной проводимости $6,24 \cdot 10^{-9}$ См/м, что позволит свести эффект электрических пробоев к минимуму в случае использования данных стекол в качестве изоляционных подложек для микроэлектронных устройств.

Согласно данным оценки эффективности экранирования было установлено, что в случае экранирования гамма – квантов с энергиями 130 кэВ и 600 кэВ величина экранирования составляет более 83%, а в случае низкоэнергетических гамма-квантов эффективность экранирования близка к 100%.

Данная работа была выполнена в рамках реализации программы целевого финансирования под номером BR11765580, финансируемой Комитетом науки Министерства науки и высшего образования РК.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Le Moigne N. et al. Radiation-induced modifications in natural fibres and their biocomposites: Opportunities for controlled physico-chemical modification pathways? // Industrial Crops and Products. – 2017. – Vol. 109. – P. 199–213.
2. Ali Y. et al. Gamma radiation induced modifications in Au-polypyrrole nanocomposites: Detailed Raman and X-ray studies // Vacuum. – 2014. – Vol. 99. – P. 265–271.
3. Jaju P. P., Jaju S. P. Cone-beam computed tomography: Time to move from ALARA to ALADA // Imaging science in dentistry. – 2015. – Vol. 45, No. 4. – P. 263–265.
4. Oakley P. A., Harrison D. E. Death of the ALARA radiation protection principle as used in the medical sector // Dose-Response. – 2020. – Vol. 18, No. 2. – P. 1559325820921641.
5. Pomaro B. et al. A review on radiation damage in concrete for nuclear facilities: from experiments to modeling // Modelling and Simulation in Engineering. – 2016. – Vol. 2016. – P. 1–10.
6. Kim J. H. Three principles for radiation safety: time, distance, and shielding // The Korean journal of pain. – 2018. – Vol. 31, No. 3. – P. 145–146.
7. Khan M. U. et al. Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation // Progress in Nuclear Energy. – 2020. – Vol. 130. – P. 103550.
8. Shultis J. K., Faw R. E. Radiation shielding. – La Grange Park, Illinois: American Nuclear Society. – 2000. – Vol. 555. – P. 1–100.
9. Ban C. C. et al. Modern heavyweight concrete shielding: Principles, industrial applications and future challenges; review // Journal of Building Engineering. – 2021. – Vol. 39. – P. 102290.
10. Singh N. et al. Comparative study of lead borate and bismuth lead borate glass systems as gamma-radiation shielding materials // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2004. – Vol. 225, No. 3. – P. 305–309.
11. Kavaz E. et al. Estimation of gamma radiation shielding qualification of newly developed glasses by using WinXCOM and MCNPX code // Progress in nuclear energy. – 2019. – Vol. 115. – P. 12–20.
12. Katubi K. M. et al. Enhancement on radiation shielding performance of B₂O₃+ Li₂O+ ZnO+ Na₂O glass system // Radiation Physics and Chemistry. – 2022. – Vol. 201. – P. 110457.
13. Yin S. et al. Effect of B₂O₃ on the radiation shielding performance of telluride lead glass system // Crystals. – 2022. – Vol. 12, No. 2. – P. 178.
14. Kaky K. M. et al. Structural, optical and radiation shielding properties of zinc boro-tellurite alumina glasses // Applied Physics A. – 2019. – Vol. 125. – P. 1–12.
15. Kozlovskiy A. L., Shlimas D. I., Zdorovets M. V. Synthesis, structural properties and shielding efficiency of glasses based on TeO₂-(1-x)ZnO-xSm₂O₃ // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2021. – Vol. 32. – P. 12111–12120.

**0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO ОПТИКАЛЫҚ, БЕРІКТІЛІК ЖӘНЕ ҚОРҒАУ
СИПАТТАМАЛАРЫНЫҢ СИНТЕЗІ ЖӘНЕ СИПАТТАМАСЫ**

А. Л. Козловский^{1,2*}, М. Тулегенова¹, Д. И. Шлимас^{1,2}

¹ «Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана, Қазақстан

² ҚР ЭМ «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: kozlovskiy.a@inp.kz

Бұл зерттеуде 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO шыныларының оптикалық, беріктік, диэлектрлік және скринингтік сипаттамаларын зерттеу нәтижелері берілген. Дайындау әдісі ретінде аморфты құрылымы бар шыны тәрізді үлгілерді алу үшін бастапқы оксидті компоненттерді механикалық-химиялық ұнтақтау, содан кейін термиялық агломерациялау әдісі таңдалды. Алынған үлгілерді сипаттау үшін сканерлік электронды микроскопия, энергетикалық дисперсиялық талдау, рентгендік дифракция, кедергі және оптикалық спектроскопия әдістері қолданылды және шегініс әдісі арқылы беріктік қасиеттері анықталды. Құрылымдық ерекшеліктері мен фазалық құрамын зерттеу барысында синтезделген шынылардың аморфты сипатқа ие, құрамында BaZnTe₂O₇ түйіршіктері түріндегі қосындылары аз екені анықталды. Сонымен қатар, шыны композициясындағы элементтерді картаға түсіру талдауы шыны құрамындағы барлық компоненттердің изотропты таралуын және ешқандай қоспалардың толық болмауын көрсетті. Синтезделген шынылардың оптикалық қасиеттерін анықтаған кезде трансмиссиялық спектрлерде көрінетін жарық аймағындағы кең жұтылу жолағы, сонымен қатар оттегінің бос орындары мен интерстициалды оттегі атомдарына тән үш спектрлік жұту жолағы бар екені анықталды. Беріктік сипаттамаларының деректері бойынша синтезделген шынылардың қаттылығы мен сыртқы әсерлерге төзімділігі жеткілікті, ал жарықтар түзілу сипаты жартылай дискілік жарықтарға тән екені анықталды. Синтезделген көзілдіріктің экрандау сипаттамаларын талдау энергиясы төмен гамма-сәулелерді қорғаудың жоғары тиімділігін көрсетті.

Түйін сөздер: қорғайтын материалдар, гамма-сәулелену, теллуридті көзілдірік, қорғаныс материалдары, экрандау тиімділігі.

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF OPTICAL, STRENGTH AND SHIELDING
CHARACTERISTICS OF 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO**

A. L. Kozlovskiy^{1,2*}, M. Tulegenova¹, D. I. Shlimas^{1,2}

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

² RSE "Institute of Nuclear Physics" ME RK, Almaty, Kazakhstan

* E-mail for contacts: kozlovskiy.a@inp.kz

This study presents the results of studying the optical, strength, dielectric and screening characteristics of 0.6TeO₂-0.25BaO-0.15ZnO glasses. The method of mechanochemical grinding of the initial oxide components followed by thermal sintering in order to obtain vitreous samples with an amorphous structure was chosen as the preparation method. To characterize the obtained samples, the methods of scanning electron microscopy, energy dispersive analysis, X-ray diffraction, impedance and optical spectroscopy were used, and the strength properties were determined using the indentation method. In the course of the studies of the structural features and phase composition, it was found that the synthesized glasses have an amorphous nature, with a small content of inclusions in the form of BaZnTe₂O₇ grains. At the same time, the analysis of the mapping of elements in the glass composition showed an isotropic distribution of all components in the glass composition and the complete absence of any impurities. When determining the optical properties of the synthesized glasses, it was found that the transmission spectra contain a wide absorption band in the visible light region, as well as three spectral absorption bands characteristic of oxygen vacancies and interstitial oxygen atoms. According to the data of strength characteristics, it was found that the synthesized glasses have sufficient hardness and resistance to external influences, and the nature of crack formation is typical for semi-disk cracks. An analysis of the shielding characteristics of the synthesized glasses showed high efficiency in shielding low-energy gamma rays.

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