

УДК 666.117.9:537.226

М. В. Дяденко¹, В. Н. Родионова², В. А. Карпович², А. Г. Петуховская¹¹Белорусский государственный технологический университет²Институт ядерных проблем БГУ**СТЕКЛА, ПРОЗРАЧНЫЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА**

Представлены результаты исследований электрофизических характеристик титаносиликатных стекол, используемых в качестве радиопрозрачных.

Изложены сведения о разработке стекол, характеризующихся минимальным показателем ослабления электромагнитных волн СВЧ-диапазона, синтезированных на основе системы $R_2O - BaO - TiO_2 - SiO_2$ (где $R_2O - Li_2O, K_2O$ и Na_2O). Исследовано влияние отношений R_2O/TiO_2 и R_2O/BaO на устойчивость стеклообразного состояния опытных стекол при их градиентной термообработке в интервале температур 600–1100°C, величину их температурного коэффициента линейного расширения, показатели плотности и термостойкости.

Определена область составов стекол с минимальным показателем ослабления электромагнитного излучения СВЧ-диапазона и значением тангенса угла диэлектрических потерь.

Ключевые слова: стекло, электромагнитная волна, сверхвысокочастотный диапазон, радиопрозрачность, термостойкость, коэффициент ослабления, диэлектрическая проницаемость.

M. V. Dyadenko¹, V. N. Rodionova², V. A. Karpovich², A. G. Petukhovskaya¹¹Belarusian State Technological University²Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University**GLASS, TRANSPARENT FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION OF MICROWAVE RANGE**

Results of researches of electrophysical characteristics of the titanosilicate glasses used as radiotransparent glasses are presented.

Data on the glass development which are characterized by the minimum indicator of weakening of electromagnetic waves of the microwave range synthesized on the basis of the $R_2O - BaO - TiO_2 - SiO_2$ system (where $R_2O - Li_2O, K_2O$ and Na_2O) are stated. Influence of the relations of R_2O/TiO_2 and R_2O/BaO on stability of a vitreous condition of synthesized glasses at their gradient heat treatment in the range of temperatures of 600–1100°C, the size of their temperature coefficient of linear expansion, thermal stability, density and heat resistance indicators is researched.

The area of glass compositions with the minimum indicator of weakening of electromagnetic radiation of the microwave range, and the value of a tangent of angle of dielectric losses is defined.

Key words: glass, electromagnetic wave, superhigh-frequency range, radio transparency, thermal stability, easing coefficient, dielectric permeability.

Введение. К радиопрозрачным относят диэлектрические материалы, которые существенным образом не изменяют амплитуду и фазу проходящей сквозь них электромагнитной волны радиочастотного диапазона.

Диэлектрические материалы широко применяют для изготовления таких элементов сверхвысокочастотной (СВЧ) техники, как электрические конденсаторы, диэлектрические резонаторы, элементы фазовращателей, среды для передачи СВЧ-сигналов и их преобразования, в качестве экранов для защиты антенны от воздействия окружающей среды. Для использования данных материалов в указанных областях прежде всего необходимы низкие потери электромагнитной энергии и высокая температурная стабильность свойств диэлектриков (по-

стоянство диэлектрической проницаемости ϵ при изменении температуры).

Задача исследования малых и сверхмалых диэлектрических потерь в области сверхвысоких частот представляет значительный интерес для специалистов, занимающихся проблемами термоядерного синтеза и вакуумной электроники больших мощностей, где остро ощущается необходимость в радиопрозрачных материалах с требуемыми свойствами, а также в исследованиях космического пространства.

В технике СВЧ находят применение самые разнообразные диэлектрики – на основе стекла, керамики, ситаллов, полимеров и композитов.

Прозрачность таких материалов для радиоволн СВЧ-диапазона достигается использованием диэлектриков с малыми значениями тангенса

угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ (порядка 0,0002–0,0003).

При разработке данного вида изделий необходимо учитывать тот факт, что в настоящее время существует потребность в недорогих радиопрозрачных материалах [1, 2]. Их основу составляют органические и неорганические диэлектрики, одним из которых является радиопрозрачное стекло.

К такому типу стекол предъявляется следующий комплекс требований: устойчивость стеклообразного состояния при термообработке в интервале 600–1100°C в течение 1 ч; показатель ослабления электромагнитного излучения радиочастотного диапазона не более 5 дБ; показатели термостойкости не ниже 100°C; водостойкость не ниже III гидролитического класса. Для радиопрозрачных стеклообразных материалов характерна достаточно широкая (свыше 6 эВ) запрещенная зона, исключаяющая термическую генерацию носителей заряда.

В настоящее время в Республике Беларусь существует потребность в изделиях на основе радиопрозрачных стекол, но их производство в стране отсутствует. Учитывая возрастающий спрос на радиопрозрачные стекла, актуальным является создание производства такого типа стекол.

Основная часть. Целью проводимых исследований является разработка составов стекол, характеризующихся показателем ослабления электромагнитного излучения радиочастотного диапазона не более 5 дБ и термостойкостью не ниже 100°C.

Решение поставленной задачи предопределяет знание особенностей взаимодействия электромагнитных волн с веществом.

Электропроводность силикатных стекол имеет электролитический характер, так как электрический ток возникает за счет миграции подвижных катионов, в качестве которых выступают катионы щелочных металлов.

В связи с этим уровень диэлектрических свойств стекол определяется содержанием в их составе оксидов щелочных металлов, от количества которых зависят значения $\text{tg}\delta$, ϵ и удельного электрического сопротивления [3].

Учитывая поставленную в работе задачу, стекла необходимо синтезировать на основе систем, позволяющих разработать диэлектрики с заданным комплексом свойств.

Как известно [3, 4], в структурной сетке стекла помимо атомов кремния и кислорода, которые ковалентно связаны между собой, присутствуют также катионы, связанные с кислородом ионным типом связи (например, катионы щелочных металлов). Их присутствие в составе определяет ионную проводимость стекол в области температур ниже T_g . Для снижения подвижности щелочных катионов дополнительно

вводят в состав стекол оксиды щелочноземельных металлов либо используют принцип «полищелочного эффекта», суть которого состоит в совместном введении различных катионов щелочных металлов.

С другой стороны, введение оксидов щелочных и щелочноземельных металлов способствует образованию немоستيковых атомов кислорода, легко поляризующихся в электрическом поле. Это обуславливает повышение диэлектрической проницаемости стекол, которая является индикатором подвижности катионов под влиянием внешнего электрического поля и, как результат, уровня диэлектрических свойств стекла.

Введение в состав стекол значительного количества оксидов PbO и BaO обеспечивает низкие значения тангенса угла диэлектрических потерь. Однако оксид свинца относится к чрезвычайно опасным веществам (I класс опасности), применение которого является нежелательным, а введение BaO в количестве выше 15 мол. % повышает агрессивность стеклорасплава к материалу тигля [4, 5].

В связи с этим для разработки составов радиопрозрачных стекол с требуемым комплексом свойств в качестве основы для исследования выбрана система $R_2O - BaO - TiO_2 - SiO_2$ (где $R_2O - Li_2O, K_2O$ и Na_2O) с содержанием 50–70 мол. % SiO_2 , при этом молярное соотношение R_2O/BaO изменялось в пределах 0,2–0,6, а $R_2O/TiO_2 - 0,25-0,75$ (табл. 1).

Выбор исследуемой системы обусловлен наличием в ней достаточно широкой области стеклообразования, а также необходимостью синтеза стекол с требуемым комплексом физико-химических и электрофизических характеристик.

Как известно [5], полупроводниковые стекла получают на основе оксидов, катионы которых имеют частично заполненные d -оболочки ($TiO_2, ZrO_2, SnO_2, Nb_2O_5$ и т. д.).

Однако оксидные соединения титана в четырехвалентном состоянии обладают стабильными свойствами диэлектрика. В связи с этим для смещения равновесия $Ti^{+4} \leftrightarrow Ti^{+3}$ влево необходимо в состав исследуемых стекол вводить посредством оксидов s -элементы, которые имеют невысокую электроотрицательность (K^+, Na^+, Ba^{+2}), что существенно повысит ковалентность связи $Ti-O$ и усилит способность оксида титана к стеклообразованию [6]. Сильное кулоновское взаимодействие катионов Ba^{+2} с отрицательно заряженными кремнекислородными тетраэдрическими группировками обуславливает значительно низкую (на несколько порядков) их подвижность в сравнении с подвижностью катионов щелочных металлов, что и определяет возможность получения на основе системы $R_2O - BaO - TiO_2 - SiO_2$ стеклорасплава радиопрозрачного назначения.

Таблица 1

Составы опытных стекол

Номер состава	SiO ₂	R ₂ O/BaO	R ₂ O/TiO ₂
1	70	0,60	0,750
2	65	0,43	0,750
3	65	0,60	0,500
4	60	0,33	0,750
5	60	0,43	0,500
6	60	0,60	0,375
7	55	0,27	0,750
8	55	0,33	0,500
9	55	0,43	0,375
10	55	0,60	0,300
11	50	0,23	0,750
12	50	0,27	0,500
13	50	0,33	0,375
14	50	0,43	0,300
15	50	0,60	0,250

Вместе с тем BaO способен блокировать подвижность щелочных катионов и, как следствие, резко повышать удельное сопротивление стекол.

Кроме того, подвижность катионов зависит от сопротивления их движению, которое возрастает с увеличением радиуса катиона, и от степени притяжения между катионами и отрицательно заряженными кремнекислородными группировками [SiO₄]⁴⁻. Катионы крупных размеров мигрируют медленнее, но вместе с тем испытывают и значительно меньшее притяжение к отрицательно заряженным группировкам [SiO₄]⁴⁻. Это предопределило выбор оксидов BaO и R₂O для введения их в состав опытных титаносиликатных стекол [6].

Синтез радиопрозрачных стекол осуществлялся в корундовых тиглях в газовой пламенной печи периодического действия при максимальной температуре (1440 ± 10)°C с выдержкой 2 ч.

Определение кристаллизационной способности опытных стекол осуществлялось методом градиентной термообработки. По результатам исследований установлено, что стекла с соотношением 0,75 R₂O/TiO₂ и 0,43–0,60 R₂O/BaO характеризуются наличием кристаллической корки в интервале температур 790–1100°C. Для стекол остальных составов отмечено проявление кристаллической пленки.

С изменением соотношения R₂O/TiO₂ от 0,75 до 0,50 кристаллизационная способность опытных стекол снижается, при этом верхняя граница кристаллизации смещается в низкотемпературную область на 100–150°C, а интервал кристаллизации сужается от 250 до 100°C.

Возможность использования радиопрозрачных стекол на практике в различных сферах народного хозяйства зависит как от величины их температуры начала размягчения, которая обуславливает рабочий диапазон использования данного типа стекол, так и от массы гото-

вых изделий, которая характеризуется величиной плотности стекла разработанного состава.

Определение температуры начала размягчения осуществлялось методом вдавливания металлического стержня, по результатам которого установлено, что данный показатель изменяется в пределах 635–655°C и с ростом соотношения R₂O/TiO₂ от 0,25 до 0,75 при постоянном содержании SiO₂ повышается от 635 до 655°C. Последний факт связан с увеличением доли более прочной связи Ti–O (305,6 кДж/моль), чем связь Ba–O (139 кДж/моль).

Определение плотности опытных стекол проводилось методом гидростатического взвешивания. По результатам данных исследований установлено, что плотность изменяется от 3190 до 3600 кг/м³ и определяется соотношением R₂O/BaO. Так, уменьшение соотношения R₂O/BaO от 0,60 до 0,23 приводит к повышению данного показателя от 3210 до 3600 кг/м³ в связи с увеличением плотности упаковки структуры за счет преобладания катионов с высокой молекулярной массой (Ba²⁺). Следует отметить, что эквимольная замена SiO₂ на TiO₂ (снижение величины R₂O/TiO₂) вызывает незначительное уменьшение показателей плотности [7].

При распространении электромагнитной волны СВЧ-диапазона в материальной среде происходит изменение ее фазовой скорости и поглощение ее энергии. Это объясняется возбуждением колебаний электронов и ионов в атомах и молекулах среды под действием электрического поля волны и излучением ими вторичных волн. Если напряженность поля волны мала по сравнению с напряженностью поля, действующего на электрон в атоме, то колебания электрона под действием поля волны происходят по гармоническому закону с частотой пришедшей волны. Поэтому электроны излучают радиоволны той же частоты, но с разными

амплитудами и фазами. Сдвиг фаз между первичной и переизлученной волнами приводит к изменению фазовой скорости. Потери энергии при взаимодействии волны с атомами являются причиной поглощения радиоволн. Степень поглощения электромагнитных волн и изменение фазовой скорости в среде характеризуются показателями ослабления и преломления, которые, в свою очередь, определяются диэлектрической проницаемостью и проводимостью среды, а также длиной волны [8–10].

В частности, характер взаимодействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона со стеклом определяется его электрическими свойствами. При помещении образца стекла в электромагнитное поле возникает ток сквозной проводимости, вызванный движением свободных заря-

дов, и поляризация, механизм которой связан со смещением центров электрических зарядов частиц, поворотом осей дипольных молекул или миграцией носителей зарядов [9, 10].

Показатель ослабления электромагнитных волн опытными титаносиликатными стеклами в диапазонах 8,0–11,3 и 26–35 ГГц оценивался волноводным методом измерения на векторном анализаторе цепей Agilent E5061B с подключением к измерительному стенду высокостабильного источника внешнего опорного сигнала генератора рубидиевого опорного LPFRS-01. Погрешность измерения составляла $\pm 0,4$ дБ.

Результаты определения показателя ослабления радиоволн в указанных выше диапазонах образцами стекол синтезированных составов представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Показатель ослабления СВЧ-излучения стеклами в диапазоне 8,0–11,3 ГГц

Номер образца	Показатель ослабления на соответствующей частоте, дБ							
	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,3
1	1,0	1,0	1,0	1,0	0	0	0	0
2	2,5	2,5	0,4	0,4	0,4	0	0	0
3	1,0	1,0	1,0	0	0	0	0	0
4	1,7	1,7	0	0	0	0	0	0
5	3,2	3,2	0,2	0	0	0	0	0
6	1,7	1,7	1,3	0	0	0	0	0
7	1,7	1,5	1,1	0,7	0	0	0	0
8	1,9	1,9	0	0	0	0	0	0
9	1,9	1,9	0	0	0	0	0	0
10	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0	0	0
11	1,7	1,7	0,7	0	0	0	0	0
12	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
13	1,2	1,2	1,2	0	0	0	0	0
14	1,0	1,0	1,0	1,0	0	0	0	0
15	1,0	1,0	1,0	1,0	0	0	0	0

Таблица 3

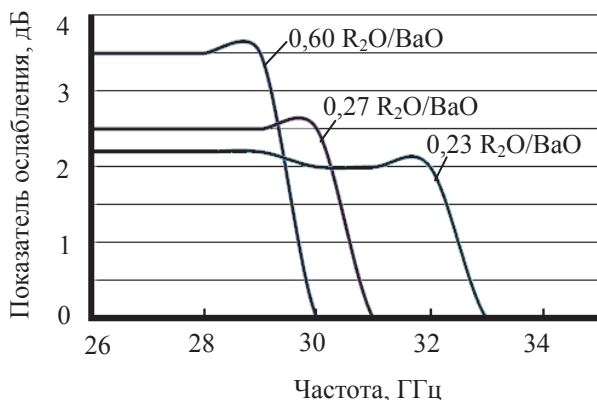
Показатель ослабления СВЧ-излучения стеклами в диапазоне 26–35 ГГц

Номер образца	Показатель ослабления на соответствующей частоте, дБ									
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
1	3,5	3,5	3,5	3,5	0	0	0	0	0	0
2	5,0	5,0	3,0	2,0	2,0	0	0	0	0	0
3	5,5	5,0	4,5	2,0	2,0	0	0	0	0	0
4	6,0	5,5	5,0	1,0	1,0	0	0	0	0	0
5	5,5	5,5	5,0	2,0	0,7	0	0	0	0	0
6	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0	0	0	0	0
7	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0	0	0	0	0
8	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	0	0	0	0	0
9	5,0	5,0	4,5	1,8	0,9	0	0	1,0	1,0	1,0
10	3,8	3,8	3,8	3,8	1,2	0	0	0	0	0
11	2,2	2,2	2,2	2,2	2,0	2,0	2,0	0	0	0
12	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
13	2,5	2,5	2,5	2,5	0	0	0	0	0	0
14	2,4	2,4	2,4	2,4	0	0	0	0	0	0
15	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,9	0	0	0	0

На величину показателя ослабления главным образом оказывают влияние релаксационные и деформационные потери. Одним из источников релаксационных потерь в неорганических диэлектриках являются слабо связанные катионы щелочных металлов.

Приложение электрического поля вызывает асимметрию в распределении зарядов, в результате чего в диэлектрике возникает электрический момент.

На рисунке приведено влияние величины R_2O/BaO на показатель ослабления опытных стекол.



Влияние R_2O/BaO на показатель ослабления опытных стекол

Как следует из рисунка, с ростом частоты от 26 до 35 ГГц показатель ослабления опытных стекол уменьшается. При этом на графических зависимостях наблюдается площадка, отражающая отсутствие влияния частоты на исследуемый показатель. Изменение отношения R_2O/BaO от 0,60 до 0,23 вызывает уменьшение показателя ослабления СВЧ-излучения и смещение его максимума на графической зависимости в высокочастотную область. Данный факт обусловлен снижением интенсивности деформационных потерь, определяющих доли щелочных и щелочноземельных катионов, которые характеризуются невысокой прочностью связи с кислородом, что приводит к образованию слабых участков в структуре стекла. Кроме того, резонансное поглощение при частотах СВЧ-диапазона вызывает упругая ионная поляризация и, прежде всего, поляризация щелочных и щелочноземельных катионов. Наличие свободных катионов, перемещаемых в ближайших междоузлиях, обуславливает появление тепловой ионной поляризации и электропроводности.

Энергия электромагнитной волны при ее распространении в веществе частично преобразуется в электрическую и тепловую. В связи с этим радиопрозрачный материал должен обладать требуемым значением термостойкости.

При наложении электрического напряжения в диэлектрике, представляющем сложную электрическую систему, протекают разнообразные электрические процессы, связанные с его поляризацией и электрической проводимостью. Они определяют диэлектрическую проницаемость и диэлектрические потери опытных стекол, а следовательно, и надежность их работы в СВЧ-устройствах.

Термостойкость характеризует способность опытных стекол выдерживать резкие перепады температур без разрушения и зависит в первую очередь от температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), определение которого осуществлялось dilatометрическим методом с использованием dilatометра DIL 402 PC фирмы Netzsch (Германия).

По результатам исследований установлено, что ТКЛР опытных стекол изменяется в пределах от $73,1 \cdot 10^{-7}$ до $109,0 \cdot 10^{-7} K^{-1}$.

Выявлено, что определяющее влияние на ТКЛР опытных стекол оказывает отношение R_2O/BaO . Влияние оксида SiO_2 , вводимого от 50 до 70 мол. % взамен R_2O/TiO_2 при постоянном отношении R_2O/BaO , на показатели ТКЛР выражено менее значительно. Увеличение ТКЛР в этом случае обусловлено уменьшением доли более прочной связи $Ti^{IV}-O$ (455 кДж/моль), чем связь $Si-O$ (443 кДж/моль).

При уменьшении соотношения R_2O/TiO_2 от 0,75 до 0,25 взамен R_2O/BaO при постоянном содержании SiO_2 , равном 50 мол. %, наблюдается снижение ТКЛР от $109 \cdot 10^{-7}$ до $81,5 \cdot 10^{-7} K^{-1}$, что связано с уменьшением доли слабых связей R^+-O и $Ba-O$. Как известно [11], введение оксидов щелочных и щелочноземельных металлов вызывает заполнения пустот в структуре стекла, препятствующих изгибу связей $Si-O$ и усиливающих ее асимметрию, что является результатом роста ТКЛР.

Установлено, что оптимальной с точки зрения получения радиопрозрачных стекол с требуемым показателем термостойкости является область составов стекол, в которых соотношение R_2O/BaO составляет 0,43–0,60, а R_2O/TiO_2 – 0,300–0,375.

Знание частотной зависимости $tg\delta$ необходимо для рационального выбора диэлектрика, работающего при вполне определенных напряжениях и частотах, определяющих уровень диэлектрических потерь и температуру материала, которая не должна превышать предельно допустимую. Минимальные значения тангенса угла диэлектрических потерь характерны для стекол, в которых отношение R_2O/BaO изменялось в пределах 0,27–0,43, а R_2O/TiO_2 – 0,375–0,750.

Химическая устойчивость характеризует способность опытных стекол противостоять воздействию влаги, растворов различных реагентов, которые действуют на его поверхность. Она зависит от химического состава: чем меньше содержание щелочных оксидов, тем оно более химически стойкое.

Химическая устойчивость всех опытных стекол определялась зерновым методом, согласно ГОСТ 22291–83.

По результатам исследований выявлено, что все опытные стекла относятся к III и IV гидролитическим классам.

Заключение. Таким образом, в ходе проведенных исследований определена область оптимальных составов стекол, для которых молярное соотношение R_2O/BaO изменялось в пределах 0,43–0,60, а R_2O/TiO_2 – 0,300–0,375. Они характеризуются низкой кристаллизационной способностью; показателем ослабления радиоволн в диапазонах 8,0–11,3 и 26–35 ГГц, не превышающим 5 дБ; показателем тангенса угла диэлектрических потерь, находящимся в пределах 0,0035–0,0045; показателями плотности 3350–3400 кг/м³ и ТКЛР (78–85) · 10⁻⁷ К⁻¹.

Литература

1. Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
2. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / И. Г. Гуртовник [и др.]. М.: Мир, 2003. 368 с.
3. Станек Я. Электрическая варка стекла. М.: Легкая индустрия, 1979. 248 с.
4. Сивко А. П. Технология электролампового стекла. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 624 с.
5. Аппен А. А. Химия стекла. М.: Химия, 1974. 360 с.
6. Ходаковская Р. Я. Химия титаносодержащих стекол и ситаллов. М.: Химия, 1978. 288 с.
7. Технология строительного и технического стекла и шлакоситаллов / В. В. Полляк [и др.]. М.: Стройиздат, 1983. 432 с.
8. Лисовский В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Минск: БГАТУ, 2005. 292 с.
9. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1961. 548 с.
10. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. 336 с.
11. Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла. М.: Мир, 2006. 288 с.

References

1. Mashkovich V. P. *Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy* [Protection against ionizing radiation]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 496 p.
2. Gurtovnik I. G., Sokolov V. I., Trofimov N. N., Shalgunov S. I. *Radioprozrachnyye izdeliya iz stekloplastikov* [Radiotransparent products from fiberglass]. Moscow, Mir Publ., 2003. 368 p.
3. Stanek Ya. *Elektricheskaya varka stekla* [Electric synthesis of glass]. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1979. 248 p.
4. Sivko A. P. *Tekhnologiya elektrolampovogo stekla* [Technology of electrolamp glass]. Saransk, Izdatel'stvo Mordovskogo universiteta Publ., 2015. 624 p.
5. Appen A. A. *Khimiya stekla* [Glass chemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1974. 360 p.
6. Khodakovskaya R. Ya. *Khimiya titansoderzhashchikh stekol i sitallov* [Chemistry of titanitic glass and glass and ceramic]. Moscow, Khimiya Publ., 1978. 288 p.
7. Pollyak V. V., Sarkisov P. D., Solinov V. F., Tsaritsyn M. A. *Tekhnologiya stroitel'nogo i tekhnicheskogo stekla i shlakositallov* [Technology of construction and technical glass and glass and ceramic slag]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 432 p.
8. Lisovskiy V. V. *Teoriya i praktika sverkhvysokochastotnogo kontrolya vlazhnosti sel'skokhozyaystvennykh materialov* [Theory and practice of superhigh-frequency control of humidity of agricultural materials]. Minsk, BGATU Publ., 2005. 292 p.
9. Feynberg E. L. *Rasprostraneniye radiovoln vdol' zemnoy poverkhnosti* [Distribution of radio waves along the land surface]. Moscow, Nauka Publ., 1961. 548 p.
10. Dolukhanov M. P. *Rasprostraneniye radiovoln* [Distribution of radio waves]. Moscow, Svyaz' Publ., 1972. 336 p.
11. Shelbi Dzh. *Struktura, svoystva i tekhnologiya stekla* [Structure, properties and glass technology]. Moscow, Mir Publ., 2006. 288 p.

Информация об авторах

Дяденко Михаил Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии стекла и керамики. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dyadenko-mihail@mail.ru

Родионова Валентина Николаевна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиофизических исследований. Институт ядерных проблем БГУ (220030, г. Минск, ул. Бобруйская, 11, Республика Беларусь). E-mail: rodionova@inp.bsu.by

Карпович Виктор Аркадьевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиофизических исследований. Институт ядерных проблем БГУ (220030, г. Минск, ул. Бобруйская, 11, Республика Беларусь). E-mail: karpovich@inp.bsu.by

Петуховская Анастасия Геннадьевна – студентка. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: keramika@belstu.by

Information about the authors

Dyadenko Mikhail Vasil'yevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Glass and Ceramics Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyadenko-mihail@mail.ru

Rodionova Valentina Nikolaevna – PhD (Physics and Mathematics), Leading Researcher, the Laboratory of Radiophysical Research. Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Bobruyskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rodionova@inp.bsu.by

Karpovich Viktor Arkad'yevich – PhD (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Radiophysical Research. Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (11, Bobruyskaya str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: karpovich@inp.bsu.by

Petukhovskaya Anastasiya Gennad'yevna – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: keramika@belstu.by

Поступила 28.04.2017