

МРНТИ 61.35.31

М.В. Дяденко<sup>1</sup> – основной автор, | ©  
И.А. Левицкий<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, <sup>2</sup>Д-р техн. наук, профессор

ORCID

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-4555-9401>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0001-5001-605X><sup>1,2</sup>Белорусский государственный технологический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

<sup>1</sup>[dyadenko-mihail@mail.ru](mailto:dyadenko-mihail@mail.ru)<https://doi.org/10.55956/VXKK9080>

## РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ СИТАЛЛЫ И СТЕКЛА: ОБЗОР

**Аннотация.** Приведен обзорный материал в области разработки составов и технологии получения радиопрозрачных стекол и ситаллов. Отражены вопросы взаимодействия силикатных материалов с электромагнитным излучением сверхвысокочастотного диапазона и причины его ослабления. Представлены основные подходы на предприятиях и в научных институтах к разработке силикатных материалов радиопрозрачного назначения, а также основные характеристики стекол и ситаллов, имеющих практическое значение. В статье приведены основные требования к радиопрозрачным стеклам и ситаллам, рассмотрены вопросы, касающиеся природы проявления поляризации в неорганических материалах.

**Ключевые слова:** сверхвысокочастотное электромагнитное излучение, поляризация, радиопрозрачность, тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрические потери, ситалл, структура стекла.



Дяденко, М.В. Радиопрозрачные ситаллы и стекла: обзор [Текст] / М.В. Дяденко, И.А. Левицкий // Механика и технологии / Научный журнал. – 2022. – №4(78). – С.81-104. <https://doi.org/10.55956/VXKK9080>

**Введение.** Вопросы изучения принципов влияния сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения на неорганические материалы являются одними из наиболее важных и актуальных в области фундаментальной физики и физической химии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов.

Реальный сектор экономики испытывает потребность в радиопрозрачных материалах невысокой стоимости, применяемых при производстве различных составляющих радиотехнических устройств. В свою очередь это определило возникновение актуального направления в материаловедении, связанного с разработкой функциональных материалов для сверхвысокочастотной техники [1].

Ряд промышленных предприятий характеризуется наличием различного вида излучений. Причина их появления вызвана протеканием ряда процессов в материале: возникновением электромагнитных волн, жесткого электромагнитного гамма-излучения, электрического дипольного излучения, преобразованием тепловой энергии вещества в энергию электромагнитного излучения [2].

Стремительное повышение роли науки в современном мире требует от специалистов в сфере разработки материалов с различным уровнем

электрофизических характеристик необходимых теоретических знаний. Большой практический интерес представляют теоретические исследования, в которых отражается физико-химический аспект воздействия химического состава стекол и ситаллов на их структуру и электрофизические характеристики.

**Условия и методы исследования.** *Общие сведения об СВЧ-излучении.* К сверхвысокочастотному (микроволновому) излучению [3] относят неионизирующее электромагнитное излучение, характеризующееся частотой 300 МГц–300 ГГц. В отличие от рентгеновского, инфракрасного и ультрафиолетового излучения, а также излучения видимого света, СВЧ-излучение обладает более высоким значением длины волны (от 1 м до 1 мм) и энергией квантов на несколько порядков более низкой, чем энергия разрыва химической связи в функциональных группах, встречающихся в кислородсодержащих соединениях, и недостаточной для их прямой активации.

Электромагнитное излучение в классической электродинамике представляет собой процесс образования и распространения электромагнитных волн ускоренно-движущимися заряженными частицами или переменными токами [4]. Распространяясь в среде, электромагнитное излучение так же, как и заряженные частицы, испытывает различные взаимодействия с атомами среды.

Взаимодействие диэлектрических материалов, в том числе и стекол, с электромагнитным полем (ЭП) сверхвысоких частот происходит в целом по следующим механизмам [5]:

- деформация электронного облака атома (атомы с бóльшим количеством электронов легче поляризуются);
- формирование вдоль силовых линий поля структурных элементов, имеющих постоянный дипольный момент;
- изменение величины углов и длин связей у структурных группировок материала под воздействием СВЧ-поля.

Если воздействия внешнего электромагнитного поля нет, диполи характеризуются разупорядоченностью, а структурный каркас – отсутствием поляризации. В идеально-сложившейся ситуации диполи постоянного электромагнитного поля размещаются параллельно его силовым линиям. В таком случае наблюдается максимальная поляризация. В реальных условиях наложения постоянного либо переменного электромагнитного поля все диполи в материале проявляют вращающие движения, осложняемые по причине теплового движения и взаимодействия с соседними структурными группировками. Рост частоты электромагнитного поля обуславливает запаздывание вращательного движения диполей после изменения направления силовых линий. В результате этого поляризация вещества прекращает быть в фазе с электромагнитным полем. В данной ситуации поляризация вносит высокий вклад в мнимую составляющую диэлектрической проницаемости материала [5].

Поляризация представляет собой обратимое смещение электрических заряженных частиц диэлектрика в результате воздействия на него электрического поля и при нагреве диэлектриков определяет величины действительной ( $\epsilon'$ ) и мнимой ( $\epsilon''$ ) составляющих диэлектрической проницаемости [6]:

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$$

где:  $\varepsilon$  – комплексная диэлектрическая проницаемость вещества;  $i$  – компонента, соответствующая оси  $x$  на декартовой системе координат.

Поляризацию классифицируют на упругую и тепловую [7]. В случае упругой поляризации частицы прочно связываются друг с другом. Силы, которые направлены на перемещение смещенных электрическим полем зарядов в исходное положение, имеют квазиупругий характер. Такого рода смещения являются незначительными, а время релаксации упругой поляризации находится в пределах  $10^{-12}$ - $10^{-16}$  с.

В свою очередь упругая поляризация подразделяется на следующие:

- электронную, которая связана с деформацией электронных оболочек неполярных молекул;

- ионную, основой которой является упругое смещение разноименных ионов из положения равновесия вследствие воздействия электрического поля; если смещение иона незначительно, упругая сила стремится вернуть ионы в исходное состояние;

- дипольную, суть которой состоит в пространственной ориентации дипольных моментов и полярных молекул вследствие влияния сил электромагнитного поля.

Первых два вида упругой поляризации существуют достаточно короткий промежуток времени и характеризуются отсутствием рассеяния энергии, то есть выделения тепловой энергии при этом не происходит.

В случае последнего вида упругой поляризации (дипольной) наблюдается частичное ориентирование молекул диэлектрика, которые в присутствии внешнего электрического поля находятся в хаотичном тепловом движении. Для дипольной поляризации характерны потери электромагнитной энергии в виде тепла. Процесс протекания дипольной поляризации происходит замедленно. Она относится к релаксационному типу, включающему в себя ионно-релаксационную и электронно-релаксационную поляризации.

При тепловой поляризации, если связи между частицами незначительны, их тепловое движение происходит на уровне поляризации. Затем под воздействием электрического поля частицы, перемещение которых происходит за счет кинетической энергии теплового движения, преодолевают сдерживающие их в связанном состоянии потенциальные барьеры. При этом возникают значительные смещения, составляющие порядка 0,5 нм. В отсутствие электромагнитного поля ввиду дезориентирующего влияния теплового движения система за  $10^{-6}$ - $10^{-10}$  с возвращается в начальное состояние [8].

В ряде диэлектрических материалов протекает процесс спонтанной поляризации, который происходит внутри отдельных участков материала в отсутствие электрического поля. В данной ситуации электрические моменты доменов располагаются хаотичным образом, компенсируя друг друга. При наложении внешнего электрического поля дипольные моменты ориентируются по полю, приводя к достаточно высоким значениям диэлектрической проницаемости [9]. Итак, в случае релаксационной и спонтанной поляризации наблюдается поглощение энергии, которая рассеивается в диэлектрических материалах в форме тепловой энергии.

Для стекол в большинстве случаев характерна ионно-релаксационная поляризация. В этом случае слабо связанные ионы под влиянием внешнего электрического поля среди ряда хаотических тепловых перебросов получают избыточные перебросы в направлении поля.

Поляризация диэлектрических материалов определяется типом химической связи, то есть распределением электронных плотностей.

*Причины ослабления СВЧ-излучения.* Весомым фактором, влияющим на СВЧ-нагрев диэлектриков, являются диэлектрические потери, которые появляются в процессе поляризации диполей. Определяющим механизмом поглощения в спектральной области электромагнитного излучения является изменение ориентации дипольных молекул диэлектрика под влиянием переменного электрического поля [7].

Поглощение энергии микроволнового излучения по указанному принципу наблюдается лишь тогда, когда связь атомов или молекул внутри материала предполагает определенную степень миграции. Иначе заметного поглощения микроволновой энергии наблюдаться не будет.

Диэлектрические и электрофизические свойства материала зависят напрямую от его структуры. Аморфные материалы, в том числе стекла, характеризуются хаотическим расположением атомов или ионов. Поэтому поглощенная стеклом энергия электромагнитного излучения может быть преобразована как в электрическую, так и в тепловую [10]. В последнем случае такое стекло должно обладать достаточно высокими теплофизическими характеристиками, основными из которых являются теплопроводность и температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР).

Термическое расширение стекла характеризуется величиной ТКЛР, который представляет собой относительное увеличение длины образца стекла при нагревании его на 1°C [11].

Среди ряда силикатных стекол минимальное значение ТКЛР в интервале от 0 до 1000°C характерно для кварцевого стекла ( $\alpha=5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ). По мере уменьшения степени связанности структурной сетки, появления в системе менее прочных связей Si–O–Me, чем связи Si–O–Si, и увеличения размера ионного радиуса в рядах Периодической системы Д.И. Менделеева ТКЛР стекла возрастает [12].

Тепловое движение в стеклах сводится к колебаниям стеклообразующего каркаса и диффузионному перемещению (миграции) слабо закрепленных ионов щелочно-земельных и щелочных металлов [13].

Частицы среды и внешнее электромагнитное поле не могут создавать энергетически замкнутую систему. При неупругих столкновениях происходит лишь некоторая передача энергии электромагнитного поля, являющаяся причиной перемещения частиц. Это в свою очередь обуславливает снижение уровня вновь генерируемого ими поля. В связи с этим доля энергии падающей электромагнитной волны полностью преобразуется в механическую энергию беспорядочного движения зарядов. В этом и состоит причина преобразования энергии электромагнитного поля в тепловую.

Известны следующие основные способы преобразования энергии СВЧ-поля в тепловую: выделение тепла вследствие диэлектрических потерь при поляризации и выделение Джоулева тепла при появлении в материале наведенных токов ввиду наличия носителей зарядов [14].

Гомогенные и гетерогенные среды при СВЧ-воздействии характеризуются комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостями, а также тангенсом угла потерь (диэлектрических и магнитных) [15,16].

В связи с тем, что определяющее количество стекол на основе оксидов не взаимодействует с магнитной составляющей электромагнитного поля, их поляризация в основном вызвана влиянием электрической составляющей.

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon'$  характеризует степень проникновения электрического поля в среду (ее способность к поляризации), а коэффициент потерь  $\varepsilon''$  – возможность материала, в том числе стекла и ситалла, поглощать электромагнитное излучение определенной частоты и преобразовывать его в тепловую энергию.

Ослабление СВЧ-энергии материалом зависит от величины мнимой составляющей диэлектрической проницаемости. При частотах, значения действительных частей которых намного превышают мнимые, поглощение будет минимальным, и материал в таком случае будет прозрачным для СВЧ-излучения (радиопрозрачным). В связи с этим величина  $\varepsilon'$  связана с преобразованием энергии СВЧ-излучения, а  $\varepsilon''$  – с ее диссипацией ввиду явлений проводимости и релаксации.

Диэлектрические потери характеризуют долю энергии электрического поля, поглощенную или рассеянную в виде тепла за единицу времени в единице объема, и имеют физический смысл мощности. Потери энергии обусловлены возникновением токов проводимости, установлением различных видов поляризации. Количественно диэлектрические потери характеризуются непосредственно значением тангенса угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg}\delta$ ), представляющего собой разницу между  $90^\circ$  и углом  $\varphi$ , на который суммарный ток  $I$  опережает напряжение тока по фазе. Значение  $\operatorname{tg}\delta$  характеризует возможность использования материала в низкочастотной или высокочастотной аппаратуре.

Тангенс угла диэлектрических потерь представляет собой отношение

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$$

Для обеспечения значительного проникновения электромагнитных волн в материал должно соблюдаться оптимальное сочетание умеренных значений  $\varepsilon'$ , а для эффективного поглощения СВЧ-энергии в объеме материала должен быть высокий коэффициент потерь  $\varepsilon''$ .

Тангенс угла диэлектрических потерь достаточно чувствителен к влажности, поэтому проведение микроволновых измерений осуществляется в помещениях с контролируемой влажностью, а образцы перед экспериментом подвергают нагреву с целью удаления адсорбированной влаги. Однако основное влияние на значения потерь оказывает природа диэлектрика. В случае необходимости получения изделий с невысоким уровнем потерь в качестве исходных используют материалы с минимально возможной концентрацией диполей и носителей с низкой подвижностью заряда. На величину диэлектрических потерь также влияют неупорядоченные распределения зарядов в кристаллической решетке [17].

Вместе с тем уровень диэлектрических потерь определяется интенсивностью и частотой электромагнитного поля, величиной температуры, при которой поглощается сверхвысокочастотное излучение [18-21].

Первые наиболее значительные исследования диэлектрических свойств стекол в СВЧ-диапазоне провели Л. Навиас и Р.Л. Грин, в соответствии с которыми выявлено, что  $\operatorname{tg}\delta$  тем больше, чем выше частота. Медленнее всего  $\operatorname{tg}\delta$  увеличивается при повышении частоты у боросиликатного стекла с невысоким содержанием ионов-модификаторов. Резкое повышение  $\operatorname{tg}\delta$  характерно для свинцовосиликатного стекла [21].

Автором [21] приводятся сведения, что эквимоллярная замена иона на равнозарядный, но с более высокой молекулярной массой вызывает рост  $\text{tg}\delta$  в СВЧ-области.

Диэлектрические потери в стекле как и его электропроводность зависят от химического состава стекла: оксиды, которые способствуют росту электрической проводимости стекла, вызывают также и увеличение диэлектрических потерь в нем. В связи с этим для стекол, в составе которых присутствуют малоподвижные ионы, характерна незначительная электропроводность и малые диэлектрические потери [21]. Стекла, содержащие крупные малоподвижные ионы (например,  $\text{Ba}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ), имеют невысокую электропроводность и малую величину диэлектрических потерь [22].

Например, чистое кварцевое стекло имеет достаточно низкие диэлектрические потери, невысокую проводимость и небольшую диэлектрическую проницаемость. Силикатные стекла, содержащие оксиды щелочных и щелочноземельных металлов, наоборот, характеризуются значительным уровнем диэлектрических потерь, определенной степенью проводимости и повышенной диэлектрической проницаемостью [23-24].

В работе [25] отмечено, что у многокомпонентных стекол в диапазоне СВЧ выше  $10^7$ – $10^8$  Гц начинается монотонный рост  $\text{tg}\delta$ .

Исторически сложилось, что на данную закономерность существуют две различные точки зрения [21, 25]:

1. Теория Стевелса, в соответствии с которой в диапазоне  $10^{12}$ – $10^{13}$  Гц проявляется «хвост» широкой полосы поглощения, обусловленной резонансными упругими колебаниями ионов-модификаторов.

2. Теория Продома основана на более низких значениях собственных частот колебаний релаксаторов, ответственных за деформационные потери. В соответствии с данной теорией зависимость  $\text{tg}\delta$  при  $20^\circ\text{C}$  в области СВЧ является результатом наложения релаксационного (деформационные потери) и резонансного (вибрационные потери) процессов.

В соответствии с работой [25] у бесщелочных стекол влияние тепловой ионной релаксации, вызывающей рост  $\text{tg}\delta$  по мере повышения температуры, незначительно, а максимум  $\text{tg}\delta$  в СВЧ-диапазоне отсутствует.

Наоборот, у стекол, содержащих в своем составе оксиды щелочных металлов, по мере увеличения температуры наблюдается плавный рост  $\text{tg}\delta$ . Такая зависимость подтверждает, что реальный вклад в диэлектрические потери стекол в области СВЧ вносит тепловая ионная релаксация. С ростом частоты прилагаемого электромагнитного поля усиливается влияние резонансных процессов, что изменяет характер температурных зависимостей  $\text{tg}\delta$  [21].

Среди четырех типов диэлектрических потерь основное влияние на радиофизические свойства стекол оказывают релаксационные и деформационные потери [21].

Релаксационные потери, как правило, имеют наиболее важное значение, их возникновение связано с наличием подвижных ионов, которые под влиянием электрического поля способны перемещаться на незначительные расстояния в структуре материала и проходить через невысокие потенциальные барьеры. Воздействие внешнего переменного напряжения вызывает поляризацию вещества с определенным временем релаксации. Обычно такие поля достаточно слабые, и ионы не в состоянии преодолеть потенциальные барьеры – для этого они должны получить дополнительную

энергию, которую могут приобрести при столкновении с другими ионами в результате их теплового движения в материале [21].

Причиной возникновения релаксационных потерь в стеклах являются ионы щелочных либо щелочноземельных металлов, характеризующиеся слабой степенью связанности со структурным каркасом стекла. Внешнее электрическое поле вызывает асимметрию в распределении зарядов, что является причиной возникновения электромагнитного поля. Это в свою очередь вызывает рост показателя ослабления, который представляет собой величину, обратную расстоянию, на котором параллельный пучок света ослабляется в результате поглощения и отражения в среде [21].

Релаксационные потери в стеклах при низких температурах и поглощение ими электромагнитного излучения в диапазоне  $10^{10}$ – $10^{11}$  Гц обусловлены наличием определенных элементов структуры (тетраэдрических группировок с 2 мостиковыми атомами кислорода (Q2), с 1 (Q1) и тетраэдрических единиц, в которых все атомы кислорода немостиковые (Q0)). Так, в колебательном спектре аморфного твердого тела в отличие от кристаллического присутствуют низкочастотные составляющие. В полостях неупорядоченной структурной решетки могут находиться атомы или группы атомов, связанные только с одним или двумя из соседних атомов. Такие слабосвязанные элементы структуры колеблются с низкой частотой, причем колебания носят локальный характер и поэтому не сказываются на упругих параметрах вещества [26].

Ион-модификатор, находящийся в междоузлии структурной сетки стекла, помимо валентных и деформационных колебаний может участвовать в заторможенном вращении структурного фрагмента  $[-Si-O-Na]$  относительно иона кремния. В данном случае колебания совершаются вокруг связи Si–O без изменения угла  $\angle SiONa$ . Участвуя в таком колебательном процессе, ион-модификатор при определенных температурах может переходить в пределах междоузлия из одного равновесного положения в другое, сохраняя преимущественную связь с одним и тем же кислородом. Такие переходы происходят с достаточно малой энергией активации и обуславливают релаксационный максимум  $\tan\delta$  в стеклах при низких температурах в области радиочастот. Максимальные значения энергии активации этого процесса на порядок ниже энергии активации переброса ионов-модификаторов из одного междоузлия в другое.

В области частот, непосредственно прилегающих к диапазону СВЧ, интенсивность поглощения электромагнитного излучения последовательно уменьшается при переходе от многокомпонентных стекол к ситаллам, керамике и монокристаллу сапфира, что вызвано изменением степени упорядоченности структуры. Поглощение стеклами электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне связано с протеканием деформационных процессов [21,27].

В случае деформационных потерь наблюдаются относительно малые смещения атомов структурной сетки, данные перемещения более ограничены в пространстве, поэтому данный вид потерь связан с малыми деформациями структурной сетки материала [13,28].

Диэлектрические потери при СВЧ определяются главным образом колебаниями свободных концов или слабых участков структурной сетки стекла (структурные элементы Q2, Q1 и Q0) и упругими колебаниями ионов-модификаторов относительно немостиковых ионов кислорода [21].

Диэлектрические потери ситаллов различного состава и разной структуры существенно различаются между собой по характеру частотной зависимости  $\text{tg}\delta$  [21].

В отличие от стекол в ситаллах, как правило, наблюдаются диэлектрические потери двух дополнительных видов: потери, обусловленные контактными явлениями на границе раздела фаз, и потери, связанные с релаксацией электронов в местах структурных дефектов [21].

Первый вид потерь является причиной межповерхностной поляризации, а второй – образования локальных дефектов у поверхности раздела фаз. В зависимости от времени релаксации диэлектрическое поглощение проявляется в разных частотных и температурных областях. В связи с этим направление изменения диэлектрических потерь при кристаллизации стекла неодинаково для различных составов и в разных частотных диапазонах [21].

В целом, диэлектрические свойства ситаллов зависят не только от их фазового состава, но и от его макроструктуры (характера гетерогенности) и микроструктуры (наличия дефектов в кристаллических фазах).

По характеру влияния на диэлектрические потери кристаллы, образующиеся в ситаллах, можно разделить на две группы: относительно плотные кристаллы, которые приводят к снижению  $\text{tg}\delta$  в области радиочастот и СВЧ (цельзиан, дисиликат бария, метасиликат лития, клиноэн-статит, диопсид, сапфирин, ганит, виллемит); рыхлые структуры, которые повышают  $\text{tg}\delta$  в той или иной области частот (кристобалит, кордиерит, твердые растворы на основе  $\beta$ -кварца,  $\beta$ -эвклипта и  $\beta$ -сподумена, петалитоподобные фазы) [21].

Диэлектрические свойства ситаллов, которые содержат кристаллы первой категории, наиболее стабильны при изменении частоты и температуры. Для ситаллов же второй группы характерно проявление дополнительных ярко выраженных релаксационных процессов [21].

Вместе с тем сопоставление спектров диэлектрических потерь для различных по составу стекол и ситаллов показывает, что единообразие характера изменения диэлектрических свойств у стекол гораздо большее, чем у ситаллов. Это связано с тем, что различные по составу стекла структурно более близки между собой, чем различные кристаллические фазы, присутствующие в различных по составу ситаллах.

Существуют две области частот, в которых возникают явления, характерные для перехода от стеклообразного состояния к закристаллизованному. При низких частотах (менее  $10^3$  Гц) у всех бесщелочных ситаллов диэлектрические потери выше, чем у исходных стекол. Дело в том, что у невосстановленных ситаллов проявляется межповерхностная поляризация. В диапазоне СВЧ у большинства ситаллов по мере развития кристаллизации происходит снижение  $\text{tg}\delta$ . Оно вызвано тем, что у кристаллов отсутствуют деформационные потери, характерные для неупорядоченного, стеклообразного состояния, а резонансное поглощение, обусловленное упругой ионной поляризацией, проявляется слабее и расположено в более узкой области [21].

Специфичность структуры стекла состоит в наличии слабой химической связи ионов-модификаторов с ближайшим окружением (стеклообразователями), а также относительно больших объемов междоузлий, что предопределяет некоторые особенности диэлектрической релаксации: прежде всего величину фиктивной частоты колебаний ионов-модификаторов, включающую энтропийный сомножитель [21].

Если у ситаллов исключить случаи, когда релаксация связана с электронными процессами, то характерным для них является положительное значение энтропии активации независимо от величины энергии активации. Данный факт указывает на разупорядочивающее действие электрического поля, что обусловлено значительной связанностью ионов-модификаторов с ближайшим окружением. В результате этого происходит их деформация в процессе перехода ионов из одного положения равновесия в другое [21].

Значения же энтропии активации для тепловой ионной релаксации в стеклах в большинстве случаев отрицательны, хотя энергия активации велика.

Интенсивность снижения  $\text{tg}\delta$  в диапазоне СВЧ при переходе от стекла к ситаллу определяется степенью закристаллизованности стекла [21].

У керамических материалов, в составе которых присутствует стеклофаза, частотные зависимости  $\text{tg}\delta$  в области СВЧ при комнатных температурах аналогичны наблюдаемым для ряда стекол. Отличие состоит лишь в том, что  $\text{tg}\delta$  керамического материала возрастает менее интенсивно с повышением частоты электромагнитного поля.

Около 60% керамических диэлектриков с низким уровнем потерь разрабатываются на основе оксидов щелочноземельных металлов, таких как BaO, SrO, CaO или MgO. Кроме того, такие материалы получают на основе титанатов; композиций, которые содержат в своем составе редкоземельные элементы; а также танталатов/ниобатов; силикатов и вольфраматов [17].

Установление взаимосвязи между структурой и диэлектрическими свойствами микроволнового излучения имеет важное значение. Так, силикаты в целом имеют преимущественно ковалентную связь, которая геометрически ограничивает движение атомов и приводит к низким диэлектрическим потерям. С другой стороны, низкая диэлектрическая поляризуемость кремния и прочные ковалентные связи в силикатах дают низкую величину эффективной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_r$ ). Поэтому в целом силикаты и вольфраматы имеют низкий  $\epsilon_r$ , ниобаты и танталаты – средний  $\epsilon_r$ , а титанаты – относительно большой  $\epsilon_r$  [17].

Таким образом, понимание взаимодействия стекол и стеклокристаллических материалов с СВЧ-излучением сводится к изучению не только их теплофизических и электрических свойств, но и особенностей структуры.

Твердые материалы (стекла, ситаллы, а также материалы на основе керамики) по характеру взаимодействия со сверхвысокочастотным излучением делят на 3 группы: радиопрозрачные, радиопоглощающие и радиозащитные.

*Радиопрозрачные стекла и ситаллы.* К материалам радиопрозрачного назначения относят диэлектрики, которые не вызывают изменений амплитуды проходящей через них электромагнитной волны и не способны беспорядочно изменять ее фазу. Радиопрозрачным материалам в СВЧ-диапазоне при рабочих температурах свойственны невысокие диэлектрические потери и отсутствие отражения радиоволн (различные диэлектрики, пластмассы, кварцевое и специальные типы стекол [29], керамопласты, различные керамические материалы) [30]. Основное назначение радиопрозрачных материалов – изготовление на их основе защитных укрытий антенных систем от воздействия внешних факторов, уменьшение радиолокационной контрастности летательных, морских и наземных объектов, защита от внешних факторов приемопередающих устройств антенного типа, расположенных на летательных объектах. Это достигается за счет снижения их эффективной поверхности рассеяния [30-31].

Для того, чтобы материалы обладали радиопрозрачностью они должны быть термостойкими, иметь невысокие значения теплопроводности, теплоемкости и плотности, высокую прочность и ударную вязкость, минимальное значение тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ), а также обеспечивать максимальную радиопрозрачность. В авиационной и ракетно-космической технике такие материалы используют для производства радиопрозрачных обтекателей, геометрия которых зависит от конфигурации устройств антенного типа и их местоположения [32-33].

До 70-х годов прошлого столетия основная доля радиоантенных обтекателей производилась на основе стеклопластика с заданными комплексом механических и радиотехнических характеристик. Это определяло возможность получать на их основе изделия требуемой конфигурации. С развитием скоростей и маневренности летательных аппаратов стеклопластики перестали отвечать поставленным условиям по причине невысокой термостойкости и нестабильности диэлектрических характеристик материала в процессе его использования [34].

Стекла, ситаллы и керамические материалы являются наиболее перспективными с точки зрения получения на их основе изделий радиопрозрачного назначения и в максимальной степени отвечают требованиям, предъявляемым к материалам данного типа.

Наиболее высоким уровнем диэлектрических и физико-химических характеристик в ряду оксидных стекол обладает кварцевое стекло. Оно имеет низкий ТКЛР, обеспечивая высокую термостойкость изготавливаемых изделий, характеризуется диэлектрической проницаемостью 3,2–3,5 и  $\text{tg}\delta$ , составляющим  $2 \cdot 10^{-4}$ . Однако использование кварцевого стекла для изготовления изделий радиопрозрачного назначения ограничено ввиду высоких температур его получения, невысокого уровня прочностных свойств и температуры эксплуатации, которая не превышает  $1100^\circ\text{C}$  [30].

Ситаллы по комплексу свойств являются более перспективными радиопрозрачными материалами, так как обладают достаточно низким тангенсом угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta < 10^{-4}$ ), имеют высокую стабильность свойств при изменении температуры (диэлектрическая проницаемость изменяется в пределах  $\pm 1\%$ , а тангенс угла диэлектрических потерь – в пределах  $\pm 20\%$  при изменении температуры от  $-60$  до  $+1200^\circ\text{C}$ ) [35].

В советский период научно-исследовательские организации делали акцент на разработку такого радиопрозрачного материала как ситалл. Оксидной системой, на основе которой многие ученые преимущественно синтезировали ситаллы, являлась  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ . По-видимому, ее выбор обусловлен необходимостью формирования в материале кристаллических фаз типа эвкриптита и сподумена, обеспечивающих низкие значения ТКЛР и тангенса угла диэлектрических потерь.

Основные характеристики и свойства радиопрозрачных ситаллов наиболее известных марок [36] приведены в таблице 1.

На ряде промышленных предприятий для изготовления обтекателей антенных устройств используют ситаллы на основе оксидных систем  $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  и  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  [32, 37–41].

Так, фирма «Corning Glass Inc.» (США) несколько десятилетий выпускает обтекатели на основе кордиеритового (Pyroceram 9606) и сподуменового (Pyroceram 9608) составов [38]. Положительно себя зарекомендовал Pyroceram 9606 [32, 39, 41], который представляет собой стеклокристаллический материал на основе магневоалюмосиликатной системы с добавкой  $\text{TiO}_2$ , используемого

в качестве катализатора. Ругосерам 9606 имеет температуру плавления 1349 °С и максимальную рабочую температуру порядка 1000 °С. При комнатной температуре Ругосерам 9606 характеризуется пределом прочности при растяжении 155 МПа, диэлектрической проницаемостью 5,55 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,0002 при частоте 35 ГГц. Ругосерам 9606 сохраняет постоянство диэлектрических свойств в диапазоне температур до 800 °С, выше которой диэлектрическая проницаемость значительно возрастает [39].

Главной кристаллической фазой данного материала является кордиерит, обеспечивающий радиопрозрачность, низкие диэлектрические потери, высокую механическую прочность, устойчивость к термоудару и дождевой эрозии [30, 32, 40, 41].

В сравнении с керамикой на основе  $Al_2O_3$  Ругосерам 9606 более устойчив к перепадам температур и обладает высокой устойчивостью к термоудару. Во время полета на высоте 30 км и скорости 5 М (где М – число Маха) поверхность Ругосерам 9606 достигает температуры порядка 700 °С (керамика на основе  $Al_2O_3$  при аналогичных условиях нагревается до 980 °С). Более высокая влагостойкость и меньшая плотность материала Ругосерам 9606 по сравнению с керамикой на основе  $Al_2O_3$  обусловили его использование в качестве антенных или ракетных обтекателей.

Однако Ругосерам 9606 в диэлектрическом отношении неустойчив к колебаниям температуры и не может использоваться при скоростях выше 5М [42].

В начале 1980-х годов компанией «Raytheon Company» разработан стеклокристаллический материал Раусерам 8, отвечающий составу  $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ . Изделия на основе такого материала изготавливали методом изостатического прессования, что исключало дорогостоящую стадию – механическую обработку поверхности изделий. Варьирование геометрии частиц, химическим составом и микроструктурой, позволило получать материал, превосходящий по диэлектрическим и термическим характеристикам Ругосерам. Однако промышленного развития Раусерам 8 не получил [32].

Кроме стеклокерамических материалов на основе сподумена и кордиерита, которые на протяжении долгого периода времени являются основным материалом для обтекателей летательных аппаратов, также ведется разработка цельзиановой и стронцийанортитовой стеклокерамики на основе систем  $BaO-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2$  (BAS) и  $SrO-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2$  (SAS) [43,44]. Рабочая температура таких материалов составляет порядка 1100 °С. Для BAS диэлектрическая проницаемость находится в пределах 6,55–7,00;  $tg\delta - (8-25) \cdot 10^{-4}$ , а для SAS – 6,16–6,77 и  $(11-50) \cdot 10^{-4}$  соответственно.

Обтекатели на основе ситаллов и кварцевой керамики применяются главным образом при скоростях, больших 3М, и эксплуатируются в условиях жесткого термоудара [41, 43].

В качестве радиопрозрачного материала для производства обтекателей также используют плавный кремнезем, который получают методом «скользящего» литья (SCFS) [42].

Таблица 1

Основные характеристики и свойства радиопрозрачных ситаллов некоторых марок

Показатель	Значение показателя для ситаллов различных марок								
	АС-418	106-ПС	АС-415	515	АС-392 (прозрачный)	АС-392 (непрозрач- ный)	АС-646	СТМ-46	ситалл 36
Система в которой получен ситалл	Li <sub>2</sub> O–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub>	BaO–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O–CaO–SrO–TiO <sub>2</sub> –SiO <sub>2</sub>	CaO–MgO–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –TiO <sub>2</sub> –SiO <sub>2</sub>	MgO–Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub>
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2560–2590	2450	2500–2650	2500–2650	2500–2600	2500–2550	2700–2780	2670	2600
Гермостойкость, °С	800–900	600	750–850	750–850	950–1000	850–1000	1000–1050	Более 950	Более 700
ТКЛР, $\alpha \cdot 10^7, K^{-1}$	5,5 (в интервале 20–200 °С) 18 (в интервале 200–700 °С)	34 (в интервале 20–400 °С) 150 (в интервале 400–900 °С)	5,5–20 (в интервале 20–250 °С) 15–25 (в интервале 250–700 °С)	5,5–20 (в интервале 20–250 °С) 15–25 (в интервале 250–700 °С)	(–3)–(+5) (в интервале 20–650 °С) (–5)–0 (в интервале 650–800 °С)	2,5–15,0 (в интервале 20–650 °С) 5–15 (в интервале 650–800 °С)	21,0 (в интервале 60–250 °С) 34,5 (в интервале 250–650 °С)	16–28 (в интервале 20–900 °С)	56–64 (в интервале 20–300 °С)
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 <sup>10</sup> Гц	7,4	4,2	7,0–7,5	6,5–7,7	6,0–6,5	5,9–6,2	9,5–10,5	7,43	5,4 (при частоте 3·10 <sup>9</sup> )
tgδ·10 <sup>3</sup> при частоте 10 <sup>10</sup> Гц	8–10	14	9–13	9–13	50–60	9,5–12	20	1,6	2 (при частоте 3·10 <sup>9</sup> )

В качестве радиопрозрачного материала для производства обтекателей также используют плавный кремнезем, который получают методом «скользящего» литья (SCFS) [42].

Данный метод включает в себя использование пористой формы, в которой порошок кремнезема смешивается с жидкостью, а затем вдавливаются в нее. После того, как форма впитает жидкость, отливка спекается и готовое изделие приобретает конечную форму. Полученный таким методом плавный кремнезем имеет максимальную рабочую температуру 1538 °С и прочность на изгиб при комнатной температуре 44 МПа [42].

В области высоких температур SCFS характеризуется низкими колебаниями диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и температурного коэффициента линейного расширения. Механическая прочность данного материала при температурах выше 870 °С значительно снижается из-за присутствия примесей, вызывающих переход кварца в кристобалит. В последующем переход кристобалита из  $\alpha$ -формы в  $\beta$ -форму вызывает значительное изменение объема, что приводит к более высокому тепловому расширению, а также к снижению механической прочности обтекателя. Обладая достаточно низким тепловым расширением и исключительными диэлектрическими характеристиками, SCFS имеет существенный недостаток: он является пористым материалом. Поэтому при высоких скоростях вода проникает в материал, изменяя его диэлектрические и структурные свойства. В связи с этим широкого применения SCFS в качестве материала для гиперзвуковых обтекателей не нашел [42].

В период существования СССР производство ситалловых обтекателей на основе кордиерита и сподумена (АС-370 и АС-418 соответственно) осуществлялось на предприятиях «Автостекло» (Украина) и «Завод технического стекла» (Российская Федерация) [41, 43].

В настоящее время российское предприятие ОНПП «Технология» производит обтекатели на основе литийалюмосиликатной стеклокерамики марки ОТМ-357 [30, 32]. Данный стеклокерамический материал обеспечивает необходимый уровень диэлектрических и механических характеристик обтекателей в интервале температур от -60 до +1000 °С и превосходит известные марки ситаллов по ряду физико-химических свойств. Это в свою очередь предопределило создание на основе материала ОТМ-357 новой линейки радиопрозрачных обтекателей для летательных аппаратов. Радиопрозрачность такого материала обусловлена формированием зернистых структур из твердых растворов  $\beta$ -сподумена [30].

Рассматриваемые материалы входят в число технических ситаллов, производство которых осуществляют по классической стекольной и керамической технологиям.

Стекольная технология включает в себя процесс подготовки шихты заданного химического состава, синтез стекла, получение изделий из расплавленной стекломассы методом центробежного литья или прессования, отжиг полученных изделий, их последующую кристаллизацию, а затем механическую или химическую обработку поверхности изделий. Стекольную технологию применяют в ряде стран СНГ, а в прошлом на предприятии «Автостекло» (Украина) она была базовой в производстве обтекателей на основе ситаллов марок АС-370 и АС-418.

В настоящее время достаточно широкое развитие получила керамическая (порошковая) технология. Ее используют для получения ситаллов. Особенностью данной технологии является гранулирование

расплавленной стекломассы, измельчение гранул в порошок, его классификация, формование заготовок полусухим прессованием или термопластичным литьем под давлением с использованием различных связующих, последующее спекание и кристаллизация [45].

Следует отметить, что в настоящий момент доля предприятий, осуществляющих выпуск изделий на основе ситаллов, крайне малочисленна. В основном это предприятия, специализирующиеся на производстве изделий для ракетной, космической и оборонной промышленности (Schott, Германия; Ohara, Япония; St. Gobain, Франция; Corning, США; Nippon Electric Glass, Япония; Alstom, Франция; Eurokera, Франция; Vitron, Ivoclar, Германия; ОНПП «Технология», ООО «ФАЗАР», РХТУ им. Д.И. Менделеева, Россия и др.) [43, 46, 47]. Огромные энергозатраты, обусловленные технологической необходимостью подвергать изделия из стекла дополнительной достаточно длительной термической обработке с целью формирования требуемой микрокристаллической структуры обусловили отказ в производстве изделий на основе ситаллов для сфер народного хозяйства, характеризующихся относительно невысокой потребностью, то есть производство которых будет экономически неоправданным.

В связи с этим отдельными исследователями проводятся попытки разрабатывать радиопрозрачные материалы на основе стекла.

Так, в работе [29] приведены результаты экспериментальных исследований по получению состава радиопрозрачного стекла на основе системы  $R_2O-BaO-TiO_2-SiO_2$  (где  $R_2O - Li_2O, K_2O$  и  $Na_2O$ ) с низкой кристаллизационной способностью; показателем тангенса угла диэлектрических потерь равным  $35 \cdot 10^{-4}$ ; плотностью  $3388 \text{ кг/м}^3$ ; ТКЛР  $84,5 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ ; минимальным ослаблением электромагнитного излучения в интервале 8–11,3 и 26–35 ГГц.

Технология производства радиопрозрачных стекол сходна с производством ряда сортовых, тарных и листовых стекол: приготовление стекольной шихты осуществляют по классической порошковой технологии; варку ведут периодическим методом в тигельных электрических печах или непрерывным методом с использованием ванн газовых печей; формование может осуществляться несколькими способами в зависимости от ассортимента выпускаемой продукции (прокат, флоат-способ, прессование).

В авиационной и ракетно-космической технике в последние десятилетия наметилась тенденция разработки радиопрозрачных керамических материалов на основе нитридов бора и кремния [46, 48-50].

В настоящее время создание новых радиопрозрачных материалов осуществляется путем разработки композитов с применением в качестве основы высокотемпературной бесщелочной алюмосиликатной стеклокерамики или нитридной керамики (радиопрозрачные материалы Ceralloy 147-31N и Ceralloy 147-01EXP, полученные фирмой Ceradyne Inc., радиопрозрачный материал GD-1, разработанный фирмой General Dynamics) [30, 51-53].

Компания Ceradyne Inc. выпускает антенные обтекатели на основе плавленного кварца, IRBAS, Ceralloy 147-31N и Ceralloy 147-01EXP. Они находят широкое применение в ракетных системах, подверженных высоким механическим и термическим нагрузкам, а их диэлектрические свойства обладают постоянством значений вплоть до  $1400 \text{ }^\circ\text{C}$  [30].

Обтекатель из материала IRBAS изготавливают на основе  $Si_3N_4$ . Механические свойства такого материала значительно выше, чем у плавленного кварца, а  $\epsilon$  при увеличении температуры сохраняет постоянство значений.

Недостатком нитрида кремния является значительное уменьшение  $\text{tg}\delta$  при температуре более  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  [30].

Материал Ceralloy 147-31N в сравнении с IRBAS обладает большей чистотой, имеет более высокие механические характеристики и стабильность электрических свойств [30].

Материал Ceralloy 147-01EXP – это реакционно-спеченный нитрид кремния с постоянным уровнем диэлектрических свойств в интервале до  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ , более высокими механическими характеристиками, чем у кварца, но уступающими Ceralloy 147-31N [30].

Среди многообразия применяемых в промышленности радиопрозрачных материалов оптимальными диэлектрическими характеристиками обладает нитрид бора. Его  $\text{tg}\delta$  при температуре  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  не превышает  $0,001$ , а изменение диэлектрической проницаемости в интервале  $20\text{-}1350\text{ }^\circ\text{C}$  не превышает  $3\%$ . Вместе с тем нитрид бора обладает низким уровнем механических свойств, что ограничивает его применение (в основном используется в качестве компонента композиционных материалов) [30].

В последнее время наблюдается выраженный интерес к получению радиопрозрачных материалов на основе керамики, что, по-видимому, связано с необходимостью достижения температуры эксплуатации не ниже  $2000\text{ }^\circ\text{C}$  [30].

Дело в том, что оксидная керамика устойчива к окислению, характеризуется высокими тепловыми и механическими характеристиками [54-58]. Одними из тугоплавких видов оксидной керамики являются керамика на основе оксидов алюминия ( $T_{\text{пл}}=2054\text{ }^\circ\text{C}$ ), циркония ( $T_{\text{пл}}=2680\text{ }^\circ\text{C}$ ) и магния ( $T_{\text{пл}}=2800\text{ }^\circ\text{C}$ ). Испытательное оборудование для работы в таких условиях в настоящее время практически не производят, что объясняет отсутствие в научно-технической литературе данных, характеризующих поведение и свойства материалов при температурах выше  $2000\text{ }^\circ\text{C}$  [30].

Достаточно полный перечень керамических диэлектрических материалов с указанием величины диэлектрических потерь, температуры спекания, добротности, изменения температуры резонансной частоты приведен в работе [17].

**Заключение.** Таким образом, разработка современных радиопрозрачных материалов на основе специальных составов стекол и ситаллов, а также композитов с использованием стеклокерамических материалов, армированных нитридами кремния, алюминия и бора является востребованной и актуальной. Вопросы поляризации и ослабления электромагнитного излучения в настоящей статье неразрывно связаны с формированием структуры материала. Так, формирование полностью полимеризованных структурных мотивов будет определять практически полную радиопрозрачность стекла. Появление деполимеризованных структурных участков или областей с повышенной поляризуемостью обусловит ослабление электромагнитного излучения СВЧ-диапазона путем преобразования его энергии в тепловую либо электрическую. В связи с этим поглощение стеклами энергии электромагнитного поля будет наблюдаться в том случае, если их составы представлены таким соотношением оксидов-стеклообразователей и модификаторов, при котором формируется двумерный (Q2), одномерный (Q1) либо нульмерный (Q0) структурный мотив стекла.

Диэлектрические свойства ситаллов в зависимости от характера и содержания кристаллических фаз могут быть существенно различными. Если в ситалле присутствуют кристаллы с «открытой рыхлой» структурой, они обуславливают повышенные диэлектрические потери, высокая степень

закристаллизованности ситаллов обеспечивает стабильность их диэлектрических свойств.

#### Список литературы

1. Голдин, Б.А. Проблемы радиопрозрачности и радиопоглощения керамических и композиционных материалов со структурой корунда (сравнительный анализ) [Текст] / Б.А. Голдин, Ю.И. Рябков, Н.А. Секушин, Л.Ю. Назарова // Известия Коми научного центра УрО РАН. – Вып. 3. – Сыктывкар. – 2010. – С. 66–68.
2. Марцунь, В.Н. Экология и контроль состояния окружающей среды [Текст] / В.Н. Марцунь, В.П. Капориков, А.М. Головач. - Минск: БГТУ, 2009. – 95 с.
3. Ковнеристый, Ю.К. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения [Текст] / Ю.К. Ковнеристый, И.Ю. Лазарева, А.А. Раваев. – М.: Наука, 1982. – 165 с.
4. Беспалов, В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом [Текст] / В.И. Беспалов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 369 с.
5. Ванецев, А.С. Спекание оксидных порошков с использованием микроволнового воздействия [Текст] / А.С. Ванецев. - М.: МГУ, 2011. – 32 с.
6. Acher, O. Generalization of Snoek's law to ferromagnetic film sand composites [Текст] / O. Acher, S. Dubourg // Physical review B. – 2008. – Vol. 10. – No. 77. – P. 104440.
7. Гюльмалиев, Э.А. Химические аспекты развития технологии СВЧ. Возможности и перспективы использования микроволнового излучения [Текст] / Э.А. Гюльмалиев [и др.] // История и педагогика естествознания. – 2016. – №2. – С. 59–68.
8. Liu, L. Microwave absorption properties of a wave-absorbing coating employing carbonyl-iron powder and carbon black // Applied Surface Science. – 2010. – Vol. 3. – No. 257. – PP. 842–846.
9. Казанцева, Н.Е. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона [Текст] / Н.Е. Казанцева, Н.Г. Рывкина, И.А. Чмутин // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48. – № 2. – С. 196–209.
10. Машкович, В.П. Защита от ионизирующих излучений [Текст] / В.П. Машкович. - Минск: Энергоатомиздат, 1995. – 440 с.
11. Сивко, А.П. Технология электролампового стекла [Текст] / А.П. Сивко. - Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2015. – 624 с.
12. Шелби, Дж. Структура, свойства и технология стекла [Текст] / Дж. Шелби. - М.: Мир, 2006. – 288 с
13. Борисова, М.Э. Физика диэлектриков [Текст] / М.Э. Борисова, С.Н. Койков. - Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1979. – 240 с.
14. Высоцкий, С.Л. Спектр и потери поверхностных магнитостатических волн в одномерном магнитном кристалле [Текст] / С.Л. Высоцкий [и др.] // Журнал технической физики. – 2011. – № 81. – Вып. 2. – С. 108–118.
15. Pozar, D.M. Microwave engineering // Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. – 17 p.
16. Thostenson, E.T., Chou T.W. Microwave processing: fundamentals and applications // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 1999. – Vol. 30. – Issue 9. – P. 1055–1071.
17. Sebastian M.T., Uvic R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties // International Materials Reviews. – 2015. – Vol. 60. – Issue 7. – P. 392–412.

18. Benedek G., Milani P., Ralchenko V.G. Nanostructured carbon for advanced applications // Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2000. – 365 p.
19. Shuba, M.V. Theory of multiwall carbon nanotubes as waveguides and antennas in the infrared and the visible regimes // Physical Review B. – 2009. – Vol. 15. – №. 79. – PP. 155–403.
20. Balberg, I. A comprehensive picture of the electrical phenomena in carbon black–polymer composites // Carbon, 2002. – Vol. 40. – Issue. 2. – PP. 139–143.
21. Машкович, М.Д. Электрические свойства неорганических диэлектриков в диапазоне СВЧ [Текст] / М.Д. Машкович. - М.: Советское радио, 1969. – 240 с.
22. Бобкова, Н.М. Теоретические основы стеклообразования. Строение и свойства стекол [Текст] / Н.М. Бобкова. - Минск: БГТУ, 2003. – 133 с.
23. Томилин, В.И. Физическое материаловедение: в 2 ч [Текст] / В.И. Томилин, Н.П. Томилина, В.А. Бахтина // Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – Ч.1: Пассивные диэлектрики. – 280 с.
24. Негоденко, О.Н. Материалы электронной техники [Текст] / О.Н. Негоденко, С.П. Мирошниченко. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – Ч.1. – 66 с.
25. Машкович, М.Д. О диэлектрических потерях стекол при СВЧ [Текст] / М.Д. Машкович // Стеклообразное состояние. – 1970. – Т.5. – Вып.1. – С. 75–82.
26. Rosenstoch, H.V. Anomalous specific heat of disordered solids // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1962. – Vol. 23. – PP. 659–664.
27. Машкович, М.Д. Исследование некоторых неорганических диэлектриков в длинно-волновой части инфракрасной области [Текст] / М.Д. Машкович, А.Т. Демешина // Физика твердого тела. – 1965. – Т.7. – №6. – С.1634–1638.
28. Минаев, В.С. Стеклообразные полупроводниковые сплавы [Текст] / В.С. Минаев. – М.: Металлургия, 1991. – 407 с.
29. Дяденко, М.В. Радиопрозрачные материалы на основе титаносиликатных стекол [Текст] / М.В. Дяденко, А.И. Гелай // Стекло и керамика. – 2017. – № 8. – С. 15–20.
30. Ивахненко, Ю.А. Высокотемпературные радиопрозрачные керамические композиционные материалы для обтекателей антенн и других изделий авиационной техники (обзор) [Текст] / Ю.А. Ивахненко, Н.М. Варрик, В.Г. Максимов // Труды ВИАМ. – 2016. – №5 (41). – С. 36–43.
31. Ромашин, А.Г. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания [Текст] / А.Г. Ромашин, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Русин. - Харьков: Хар. авиац. ин-т, 2003. – 239 с.
32. Уварова, Н.Е. Высокотемпературные радиопрозрачные материалы: сегодня и завтра [Текст] / Н.Е. Уварова [и др.] // Авиационные материалы и технологии. – 2010. – № 1 (14). – С. 16–21.
33. Красюк, В.Н. Бортовые антенны гиперзвуковых летательных аппаратов [Текст] / В.Н. Красюк. – СПб: СПбГААП, 1994. – 216 с.
34. Гуртовник, И.Г. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков [Текст] / И.Г. Гуртовник [и др.]. – М.: Мир, 2003. – 363 с.
35. Hummel, F.A. Thermal expansion of some glasses in the system MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> [Текст] / F.A. Hummel, H.W. Reid // Journal of the American Ceramic Society. – 1951. – V.34. – № 10. – PP. 319–321.
36. Новые неорганические материалы [Текст] / под общ. ред. И.В. Тананева, С.М. Бреховских. – Вып. 2. – М.: ОНТИ НИТС, 1972. – 388 с.

37. Саркисов, П.Д. Современные достижения в области создания высокотемпературных радиопрозрачных материалов [Текст] / П.Д. Саркисов [и др.] // Техника и технология силикатов. – 2009. – № 1. – С. 2–10.
38. Missile Domes and Missile Radomes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.corning.com/asean/en/products/advanced-optics/product-materials/aerospace-defense/missile-domes-radomes.html](http://www.corning.com/asean/en/products/advanced-optics/product-materials/aerospace-defense/missile-domes-radomes.html). Дата обращения: 05.11.22.
39. Kenion T., Yang N., Xu Ch. Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and met-amaterial design: A review // Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – Vol. 42. – Issue 1. – Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.006.
40. Vandrai, S.N. Cordierite glass-ceramic for radioengineering articles // Glass and Ceramics. – 2020. – Vol. 76. – Pp. 334–339. DOI: 10.1007/s10717-020-00195-7.
41. Суздальцев, Е.И. Керамические радиопрозрачные материалы: вчера, сегодня, завтра [Текст] / Е.И. Суздальцев // Новые огнеупоры. – 2014. – №10. – С. 5–18.
42. Ganesh I., Mahajan Y.R. Slip-Cast Fused Silica Radomes for Hypervelocity Vehicles: Advantages, Challenges, and Fabrication Techniques // Handbook of Advanced Ceramics and Composites. – 2020. – P. 251–317.
43. Чайникова, А.С. Технологические аспекты создания радиопрозрачных стеклокристаллических материалов на основе высокотемпературных алюмосиликатных систем [Текст] / А.С. Чайникова, М.Л. Ваганова, Н.Е. Щеголева, Ю.Е. Лебедева // Труды ВИ-АМ. – 2015. – № 11. doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-4-4.
44. Балабанова, Е.А. BaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> и SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> – базовые системы для получения радиопрозрачных стеклокерамических материалов [Текст] / Е.А. Балабанова, Н.Г. Тюрнина // XVII Молодежная научная конференция, школа молодых ученых: сб. тез. докл., Санкт-Петербург, 5–6 декабря 2019 г. – СПб.: ООО «Издательство «ЛЕМА», 2019. – С. 19–20.
45. Gilde G. Sion low dielectric constant ceramic nanocomposite // Patent 5677252 US. 1996.
46. Уварова, Н.Е. Радиопрозрачные стеклокерамические материалы [Текст] / Н.Е. Уварова, Ю.Е. [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. XXI. – №7 (75). – С. 96–99.
47. Чайникова, А.С. Современное состояние разработок в области радиопрозрачных кордиеритовых ситаллов (обзор) [Текст] / А.С. Чайникова [и др.] // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – №S6. – С. 45–51.
48. Wen G., Wu G.L., Lei T.Q. Co-enhanced SiO<sub>2</sub>-BN ceramics for high-temperature dielectric application // J. Euro Ceram.Soc. – 2000. – №11. – Pp. 19–23.
49. Omatete O., Janney M., Strehlow R. Gelcasting – a new ceramic forming process // Ceramic Bulletin. – 1991. – №10. – Pp. 28–35.
50. Kirby, K.W. Gelcasting of GD-1 ceramic radomes // Proceeding of the 8th DoD Electromag. – Windows Symposium. – 2000. – Pp. 287–295.
51. Shen Q., Chen F., Zhang L. Progression New Type high temperature ceramic missile radome Materials // Materials Review. – 2006. – №9. – Pp. 1–4.
52. Dodds G.C., Tanzilli R.A. Silicon boron, aluminium composite, article and method of making the same // Patent 5891815 US. 1999.
53. Douglas W.F., Kerry K.B. BAS reinforced in-situ with silicon nitride // Patent 5358912 US. 1994.
54. Максимов, В.Г. О проявлении сверхпластичности в полидисперсной керамике муллит-оксид циркония с размером кристаллов более 10 мкм / В.Г. Максимов,

- О.В. Басаргин, Т.М. Щеглова, В.Ю. Никитина // Труды ВИАМ. – 2013. – №6. – Ст. 04 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.11.2022).
55. Каблов, Е.Н. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов / Е.Н. Каблов, Б.В. Щетанов, Ю.А. Ивахненко, Ю.А. Балинова // Труды ВИАМ. – 2013. – №2. – Ст. 05 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.11.2022).
56. Максимов, В.Г. Исследование высокотемпературной ползучести в полидисперсной керамике муллит-оксид циркония [Текст] / В.Г. Максимов [и др.] // Стекло и керамика. – 2014. – № 5. – С. 36–40.
57. Гращенков, Д.В. Исследование высокотемпературной ползучести в полидисперсной керамике на основе муллита, упрочненного диоксидом циркония [Текст] / Д.В. Гращенков [и др.] // Вестник РФФИ. – 2015. – №1 (85). – С. 47–53.
58. Варрик, Н.М. Оксид-оксидные композиционные материалы для газотурбинных двигателей (обзор) [Текст] / Н.М. Варрик, Ю.А. Ивахненко, В.Г. Максимов // Труды ВИАМ. – 2014. – №8. – Ст. 03 [Электронный ресурс]. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 01.11.2022).

*Материал поступил в редакцию 28.11.22.*

**М.В. Дяденко, И.А. Левицкий**

*Беларусь мемлекеттік технологиялық университеті,  
Минск қ., Беларусь Республикасы*

#### **РАДИОӨТКІЗГІШ СИТАЛЛАР МЕН ШЫНЫЛАР: ШОЛУ**

**Аңдатпа.** Шолу материалы радиоөткізгіш шынылар мен шыны керамика алудың композициялары мен технологиясын жасау саласында жасалған. Силикатты материалдардың микротолқынды диапазонның электромагниттік сәулеленуімен әрекеттесу мәселелері және оның әлсіреу себептері көрсетілген. Кәсіпорындар мен ғылыми институттардағы радиоөткізгіш мақсаттар үшін силикат материалдарын әзірлеудің негізгі тәсілдері, сонымен қатар практикалық маңызы бар шыны және шыны керамиканың негізгі сипаттамалары берілген. Мақалада радиоөткізгіш шынылар мен шыны керамикаға қойылатын негізгі талаптар берілген, бейорганикалық материалдардағы поляризацияның көріну сипатына қатысты мәселелер қарастырылған.

**Тірек сөздер:** микротолқынды электромагниттік сәулелену, поляризация, радиоөткізгіштік, диэлектрлік жоғалту тангенсі, диэлектрлік жоғалту, керамикалық шыны, шыны құрылымы.

**M.V. Dyadenko, I.A. Levitskii**

*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus*

#### **RADIO-TRANSPARENT GLASS CERAMICS AND GLASSES: REVIEW**

**Abstract.** The review material in the field of the compositions and technology development for the production of radio-transparent glasses and glass ceramics is given. The issues of silicate materials interaction with electromagnetic radiation of the ultrahigh

frequency range and the reasons for its attenuation are presented. The main approaches at enterprises and scientific institutes to the development of radio-transparent silicate materials and the main characteristics of glasses and glass ceramics of practical importance are given. The article presents the basic requirements for radio-transparent glasses of glass ceramics, discusses issues concerning the nature of the demonstration of polarization in inorganic materials.

**Keywords:** ultrahigh frequency electromagnetic radiation, polarization, radio transparency, dielectric loss angle tangent, dielectric losses, glass ceramics, glass structure.

#### Reference

1. Goldin, B.A. Problemy radioprozrachnosti i radiopogloshcheniya keramicheskikh i kompozitsionnykh materialov so strukturoy korunda (sravnitel'nyy analiz) [Problems of radio transparency and radio absorption of ceramic and composite materials with corundum structure (comparative analysis)]. // Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN [Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences] – 2010 – No3 – PP. 66-68 [in Russian].
2. Martsul V.N., Kaporikov V.P., Golovach A.M. Ekologiya i kontrol' sostoyaniya okruzhayushchey sredy [Ecology and environmental control]. - Minsk: BSTU, 2009. – 95 p. [in Russian].
3. Kovneristy Yu.K., Lazareva I.Yu., Ravaev A.A. Materialy, pogloshchayushchiye SVCH-izlucheniya [Materials that absorb microwave radiation]. - Moscow: Nauka, 1982. - 165 p. [in Russian].
4. Bespalov V.I. Vzaimodeystviye ioniziruyushchikh izlucheniy s veshchestvom [Interaction of ionizing radiation with matter]. - Tomsk: Publishing House of TPU, 2008. - 369 p. [in Russian].
5. Vanetsev A.S. Spekaniye oksidnykh poroshkov s ispol'zovaniyem mikrovolnovogo vozdeystviya [Sintering oxide powders using microwave treatment]. - Moscow: MGU. – 2011. - 32 p. [in Russian].
6. Acher, O. Generalization of Snoek's law to ferromagnetic film sand composites / O. Acher, S. Dubourg // Physical review B. – 2008. – Vol. 10. – No. 77. – P. 104440.
7. Gyulmaliev E.A. Khimicheskiye aspekty razvitiya tekhnologii SVCH. Vozmozhnosti i perspektivy ispol'zovaniya mikrovolnovogo izlucheniya [Chemical aspects of microwave technology development. Opportunities and prospects for the use of microwave radiation] // History and pedagogy of natural sciences. — 2016 – No. 2. – PP. 59–68 [in Russian].
8. Liu, L. Microwave absorption properties of a wave-absorbing coating employing carbonyl-iron powder and carbon black / L. Liu [and others] // Applied Surface Science. – 2010. – Vol. 3. – No. 257. – PP. 842–846.
9. Kazantseva N.E., Ryvkina N.G., Chmutin I.A. Perspektivnyye materialy dlya poglotiteley elektromagnitnykh voln sverkhvysoko-chastotnogo diapazona [Promising Materials for Absorbers of Electromagnetic Waves in the Microwave Range] // Radio engineering and electronics. - 2003. - V. 48. - No. 2. - PP. 196-209. [in Russian].
10. Mashkovich V.P. Zashchita ot ioniziruyushchikh izlucheniy [Protection against ionizing radiation]. - Minsk: Energoatomizdat, 1995. - 440 p. [in Russian].
11. Sivko A.P. Tekhnologiya elektrolampovogo stekla [Electric lamp glass technology] // Saransk: Publishing House of the Mordovian University, 2015. - 624 p. [in Russian].

12. Shelby J. Структура, свойства и технология стекла [Structure, properties and technology of glass]. - Moscow: Mir, 2006. - 288 p. [in Russian].
13. Borisova M.E., Koikov S.N. Физика диэлектриков [Physics of dielectrics]. - Leningrad: Publishing House of the Leningrad University, 1979. - 240 p. [in Russian].
14. Vysotsky S.L. Spektr i poteri poverkhnostnykh magnitostaticeskikh voln v odnomernom magnon-nom kristalle [Spectrum and losses of surface magnetostatic waves in a one-dimensional magnonic crystal] // Journal of Technical Physics. - 2011. - No. 81. - Issue. 2. - PP. 108-118. [in Russian].
15. Pozar, D.M. Microwave engineering / D.M. Pozar. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. – 17 p.
16. Thostenson E. T. Microwave processing: fundamentals and applications / E.T. Thostenson, T.W. Chou // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 1999. – Vol. 30. – Issue 9. – PP. 1055–1071.
17. Sebastian, M.T. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties / M.T. Sebastian, R. Uvic, H. Jantunen // International Materials Reviews. – 2015. – Vol. 60. – Issue 7. – PP. 392–412.
18. Benedek G. Nanostructured carbon for advanced applications / G. Benedek, P. Milani, V.G. Ralchenko. – Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2000. – 365 p.
19. Shuba M.V. Theory of multiwall carbon nanotubes as waveguides and antennas in the infrared and the visible regimes / M.V. Shuba [and others] // Physical Review B. – 2009. – Vol. 15. – №. 79. – PP. 155–403.
20. Balberg I. A comprehensive picture of the electrical phenomena in carbon black–polymer composites / I. Balberg // Carbon, 2002. – Vol. 40. – Issue. 2. – PP. 139–143.
21. Mashkovich M.D. Elektricheskiye svoystva neorganicheskikh dielektrikov v diapazone SVCH [Electrical properties of inorganic dielectrics in the microwave range]. - Moscow: Soviet radio, 1969. - 240 p. [in Russian].
22. Bobkova N.M. Teoreticheskiye osnovy stekloobrazovaniya. Stroyeniye i svoystva stekol [Theoretical foundations of glass formation. The structure and properties of glasses]. - Minsk: BSTU, 2003. - 133 p. [in Russian].
23. Tomilin V.I., Tomilina N.P., Bakhtin V.A. Fizicheskoye materialovedeniye: v 2 ch [Physical materials science: in 2 hours] // Passive dielectrics. – 2012. – 280 p. [in Russian].
24. Negodenko O.N., Miroshnichenko S.P. Materialy elektronnoy tekhniki [Materials of electronic engineering] // Taganrog: Publishing House of TRTU, 2006. - Part 1. – 66 p. [in Russian].
25. Mashkovich M.D. O dielektricheskikh poteryakh stekol pri SVCH [On the dielectric loss of glass in microwaves] // Stekloobraznoye sostoyaniye. - 1970. - V.5. – Issue 1. – P. 75–82. [in Russian].
26. Rosenstoch, H.B. Anomalous specific heat of disordered solids / H.B. Rosenstoch // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 1962. – Vol. 23. – Pp. 659–664.
27. Mashkovich M.D., Demeshina A.T. Issledovaniye nekotorykh neorganicheskikh dielektrikov v dlinnovolnovoy chasti infrakrasnoy oblasti [Investigation of some inorganic dielectrics in the far infrared region] // Solid state physics. - 1965. - V.7. - No. 6. – PP.1634–1638. [in Russian].
28. Minaev V.S. Stekloobraznyye poluprovodnikovyye splavy [Glassy semiconductor alloys]. - Moscow: Metallurgy, 1991. - 407 p. [in Russian].

29. Dyadenko M.V., Gelai A.I. Radioprozrachnyye materialy na osnove titanosilikatnykh stekol [Radiotransparent materials based on titanosilicate glasses] // Glass and ceramics. - 2017. - No. 8. - PP. 15–20. [in Russian].
30. Ivakhnenko YU.A., Varrik N.M., Maksimov V.G. Vysokotemperaturnyye radioprozrachnyye keramicheskiye kompozitsionnyye materialy dlya obtekateley anten i drugikh izdeliy aviatsionnoy tekhniki (obzor) [High-temperature radio-transparent ceramic composite materials for antenna radomes and other aircraft products (review)]. Proceedings of VIAM. - 2016. - No. 5 (41). – PP. 36–43. [in Russian].
31. Romashin A.G., Gaydachuk V.Ye., Karpov YA.S., Rusin. M.YU. Radioprozrachnyye obtekateli letatel'nykh apparatov. Proyektirovaniye, konstruktsionnyye materialy, tekhnologiya proizvodstva, ispytaniya [Radiotransparent fairings for aircraft. Design, construction materials, production technology, testing] // Kharkov: Har. aviation int, 2003. - 239 p. [in Russian].
32. Uvarova N.Ye. Vysokotemperaturnyye radioprozrachnyye materialy: segodnya i zavtra [High-temperature radio-transparent materials: today and tomorrow] // Aviation materials and technologies. – 2010. –No. 1 (14). – PP. 16–21. [in Russian].
33. Krasnyuk V.N. Bortovyye anteny giperzvukovykh letatel'nykh apparatov [Onboard antennas of hypersonic aircraft] // St. Petersburg: SPbGAAP, 1994. - 216 p. [in Russian].
34. Gurtovnik I.G. Radioprozrachnyye izdeliya iz stekloplastikov [Radiotransparent fiberglass products]. - Moscow: Mir, 2003. - 363 p. [in Russian].
35. Hummel F.A. Thermal expansion of some glasses in the system MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> / F.A. Hummel, H.W. Reid // Journal of the American Ceramic Society. – 1951. – V.34. – № 10. – Pp. 319–321.
36. Novyye neorganicheskiye materialy / pod obshch. red. I.V. Tananeva, S.M. Brekhovskikh. – Vol. 2. – Moscow: ONTI NITS, 1972. – 388 p. [in Russian].
37. Sarkisov P.D. Sovremennyye dostizheniya v oblasti sozdaniya vysokotemperaturnykh radioprozrachnykh materialov [Modern achievements in the field of creation of high-temperature radio-transparent materials] // Technique and technology of silicates. - 2009. - No. 1. - PP. 2–10. [in Russian].
38. Missile Domes and Missile Radomes [Electronic resource]. – Access mode: [www.corning.com/asean/en/products/advanced-optics/product-materials/aerospace-defense/missile-domes-radomes.html](http://www.corning.com/asean/en/products/advanced-optics/product-materials/aerospace-defense/missile-domes-radomes.html). Date of access: 05.11.22.
39. Kenion, T. Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and met-amaterial design: A review / T. Kenion, N. Yang, Ch.Xu // Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – Vol. 42. – Issue 1. – Pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.006.
40. Vandrai, S.N. Cordierite glass-ceramic for radioengineering articles // Glass and Ceramics. – 2020. – Vol. 76. – Pp. 334–339. DOI: 10.1007/s10717-020-00195-7.
41. Suzdaltsev E.I. Keramicheskiye radioprozrachnyye materialy: vchera, segodnya, zavtra [Ceramic Radiotransparent Materials: Yesterday, Today, Tomorrow] // New refractories. - 2014. - No. 10. – P. 5–1 [in Russian].

42. Ganesh I., Mahajan Y.R. Slip-Cast Fused Silica Radomes for Hypervelocity Vehicles: Advantages, Challenges, and Fabrication Techniques // Handbook of Advanced Ceramics and Composites. – 2020. – PP. 251–317.
43. Chaynikova A.S., Vaganova M.L., Shchegoleva N.E., Lebedev Yu.E. Tekhnologicheskiye aspekty sozdaniya radioprozrachnykh steklokristallicheskikh materialov na osnove vysokotemperaturnykh alyumosilikatnykh system [Technological aspects of creating radio-transparent glass-ceramic materials based on high-temperature aluminosilicate systems] // Proceedings of VIAM. – 2015. – No. 11. doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-11-4-4. [in Russian].
44. Balabanova E.A., Turnina N.G. BaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> и SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> – bazovyye sistemy dlya polucheniya radioprozrachnykh steklokeramicheskikh materialov [BaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> и SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> are basic systems for obtaining radio-transparent glass-ceramic materials] // XVII Youth Scientific Conference, School of Young Scientists: Sat. abstract dokl., St. Petersburg, December 5–6, 2019 - St. Petersburg: Publishing House LLC "LEMA", 2019. - PP. 19–20. [in Russian].
45. Gilde G. Sion low dielectric constant ceramic nanocomposite / G. Gilde [and others] // Patent 5677252 US. 1996.
46. Uvarova N.Ye. Radioprozrachnyye steklokeramicheskiye materialy [Radiotransparent glass-ceramic materials] // Advances in chemistry and chemical technology - 2007. - V. XXI. - No. 7 (75). – PP. 96–99. [in Russian].
47. Chaynikova A.S. Sovremennoye sostoyaniye razrabotok v oblasti radioprozrachnykh kordiyeritovykh sitallov (obzor) [Current state of developments in the field of radiotransparent cordierite glass-ceramics (review)] // Aviation materials and technologies. - 2014. - No. 6. – P. 45–51. [in Russian].
48. Wen G. Wu L., Lei T.Q. Co-enhanced SiO<sub>2</sub>-BN ceramics for high-temperature dielectric application // J. Euro Ceram.Soc. – 2000. – No. 11. – PP. 19–23.
49. Omatete O. Janney M., Strehlow R. Gelcasting – a new ceramic forming process // Ceramic Bulletin. – 1991. – No. 10. – PP. 28–35.
50. Kirby K.W. Gelcasting of GD-1 ceramic radomes // Proceeding of the 8th DoD Electromag. – Windows Symposium. – 2000. – PP. 287–295.
51. Shen Q. Chen F., Zhang L. Progression New Type high temperature ceramic missiles radome Materials // Materials Review. – 2006. – No.9. – PP. 1–4.
52. Dodds G.C. Tanzilli R.A. Silicon boron, aluminium composite, article and method of making the same // Patent 5891815 US. 1999.
53. Douglas W.F. Kerry K.B. BAS reinforced in-situ with silicon nitride // Patent 5358912 US. 1994.
54. Maksimov V.G., Basargin O.V., Shcheglova T.M., Nikitin V.Yu. O proyavlenii sverkhplastichnosti v polidispersnoy keramike mullit-oksida tsirko-niya s razmerom kristallov boleye 10 mkm [On the manifestation of superplasticity in polydisperse ceramics mullite-zirconium oxide with a crystal size of more than 10 μm] // Proceedings of VIAM. - 2013. - No. 6. – P. 04 [Electronic resource]. <http://www.viam-works.ru> (accessed 11/01/2022). [in Russian].
55. Kablov Ye.N., Shchetanov B.V., Ivakhnenko YU.A., Balinova YU.A. Perspektivnyye armiruyushchiye vysokotemperaturnyye volokna dlya metallicheskikh i keramicheskikh kompozitsionnykh materialov [Promising reinforcing high-temperature fibers for metal and ceramic composite materials] // Proceedings of

- 
- VIAM. - 2013. - No. 2. – P. 05 [Electronic resource]. <http://www.viam-works.ru> (accessed 11/01/2022). [in Russian].
56. Maksimov V.G. Issledovaniye vysokotemperaturnoy polzuchesti v polidispersnoy keramike mul-lit–oksid tsirkoniya [Investigation of High-Temperature Creep in Polydisperse Ceramics Mullite–Zirconium Oxide] // Glass and ceramics. - 2014. - No. 5. - P. 36–40. [in Russian].
57. Grashchenkov D.V. Issledovaniye vysokotemperaturnoy polzuchesti v polidispersnoy keramike na os-nove mullita, uprochnennogo dioksidom tsirkoniya [Investigation of High-Temperature Creep in Polydisperse Ceramics Based on Zirconium Dioxide-Hardened Mullite] // Vestnik RFBR. - 2015. - No. 1 (85). – PP. 47–53. [in Russian].
58. Varrik N.M., Ivakhnenko YU.A., Maksimov V.G. Oksid-oksidnyye kompozitsionnyye materialy dlya gazoturbinnnykh dvigateley (obzor) [Oxide-oxide composite materials for gas turbine engines (review)] // Proceedings of VIAM. - 2014. - No. 8. – Art. 03 [Electronic resource]. <http://www.viam-works.ru> (accessed 11/01/2022). [in Russian].