

Научная статья

УДК 629.7.023.224

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-88-96

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕРМОСТОЙКАЯ БЕССВИНЦОВАЯ ЭМАЛЬ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

О.В. Власова¹, В.С. Денисова¹, А.В. Закалашный¹, С.С. Солнцев¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Исследованы электроизоляционные покрытия на основе стеклообразующей системы $BaO-B_2O_3-SiO_2$ для использования в электронных схемах на металлической подложке. По химической стойкости синтезированные составы относят к классу устойчивых стекол. Проведенные испытания показали, что экспериментальные составы значительно превосходят известные покрытия по диэлектрическим свойствам. Получены положительные данные по стабильности диэлектрических свойств и по качеству бездефектного слоя покрытия.

Ключевые слова: эмаль, электроизоляционное покрытие, стекло, диэлектрические свойства, электросопротивление, диэлектрик

Для цитирования: Власова О.В., Денисова В.С., Закалашный А.В., Солнцев С.С. Электроизоляционная термостойкая бессвинцовая эмаль для защиты элементов радиоэлектронной аппаратуры // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-88-96.

Scientific article

ELECTRICAL INSULATING HEAT-RESISTANT LEAD-FREE ENAMEL FOR THE PROTECTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT

Olga V. Vlasova¹, Valentina S. Denisova¹, Aleksander V. Zakalashniy¹, Stanislav S. Solntsev¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: In present work electrical insulating coatings based on $BaO-B_2O_3-SiO_2$ glass-forming system for use in electronic circuits on a metal substrate were investigated. The synthesized compositions in terms of chemical resistance belong to the class of stabilized glasses. The tests were showed that the experimental compositions significantly exceed the known coatings in terms of dielectric properties. Positive data on the stability of dielectric properties and on the quality of the defect-free coating layer were obtained.

Keywords: enamel, electrical insulating coating, glass, dielectric properties, electrical resistance, dielectric

For citation: Vlasova O.V., Denisova V.S., Zakalashniy A.V., Solntsev S.S. Electrical insulating heat-resistant lead-free enamel for the protection of electronic equipment. *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-88-96.

Введение

При разработке радиоэлектронной аппаратуры на основе источников питания гибридных интегральных схем, в состав которых входят высокоомощные транзисторы, возникает проблема отвода тепла. Наряду с широко распространенными подложками из оксидной керамики, прежде всего оксида алюминия, могут быть использованы металлические подложки с покрытиями на основе тугоплавких стекол. Основными

преимуществами таких подложек, по сравнению с керамическими, являются их высокие значения теплопроводности, термостойкости, механической прочности, а также относительно невысокая стоимость при серийном производстве. Металлические подложки с защитным силикатным покрытием позволяют совмещать на одном основании толсто- и тонкопленочные микросхемы, монтировать бескорпусные элементы и интегральные схемы непосредственно на металлическое основание [1–3].

Интерес при разработке стекловидных диэлектриков представляют бесщелочные и бессвинцовые композиции в алюмоборосиликатной системе, содержащие оксиды щелочноземельных металлов. Достоинствами бесщелочных алюмоборосиликатных составов являются высокий уровень диэлектрических характеристик, химическая устойчивость и термостойкость. Введение оксидов щелочноземельных металлов в состав стекол данной системы позволяет улучшить технологические свойства и повысить температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) [4].

Введение оксида бора (B_2O_3) в кремнекислородный каркас приводит к уменьшению проводимости стекол, а введение оксида алюминия (Al_2O_3), напротив, к ее увеличению. Предполагается, что влияние оксидов B_2O_3 и Al_2O_3 на проводимость обусловлено степенью упорядоченности распределения модификаторов в матрице стекла. Максимальная гидролитическая устойчивость и теплопроводность боросиликатных стекол достигаются в четверной координации бора. Стекла, обогащенные оксидом бора, склонны к расслоению на фазы, одна из которых представлена тетраэдрической алюмокремнекислородной сеткой, а другая – боратной сеткой, включающей бор в тройной и четверной координациях [5].

Различие величин длины связи В–О (0,148 нм) и Si–О (0,16–0,163 нм) приводит к структурной несовместимости тетраэдров $[BO_4]^-$ и $[SiO_4]$, что является причиной несмешиваемости стекол, содержащих тетраэдрические структурные элементы $[BO_4]^-$ и $[SiO_4]$.

Для совершенствования физико-химических свойств бесщелочных алюмоборосиликатных стекол широко используют оксиды двухвалентных металлов. Для синтеза электроизоляционных покрытий наибольший интерес представляют барийсодержащие алюмоборатные стекла, так как они обладают высоким электрическим сопротивлением и характеризуются одним из самых высоких значений ТКЛР наряду со свинецсодержащими стеклами [6].

Для получения достаточно высокого значения ТКЛР содержание BaO должно быть в количестве не менее 20 % (по массе). Исходя из положения области несмешиваемости в системе BaO– B_2O_3 –SiO₂, в стеклах с содержанием BaO до 20 % (по массе) максимальное количество оксида B_2O_3 не может превышать 15 % (по массе), поскольку с увеличением содержания оксида бора стекла приобретают склонность к расслаиванию.

Покрытия на основе стекол системы BaO– B_2O_3 –SiO₂ без модифицирующих добавок характеризуются высокой температурой формирования (обжига) – более 900–1000 °С, что может быть причиной коробления металлических подложек. В целях обеспечения надежности диэлектрического слоя требуется получение покрытий толщиной до ~200 мкм, в связи с чем процесс формирования покрытия будет осуществляться в 2–3 раза дольше ввиду особенностей шликерно-обжиговой технологии. При повторных обжигах дальнейшее коробление субстратов неизбежно. Правка металлического основания не допускается, так как это может привести к разрушению диэлектрического слоя покрытия. Нарушение плоскостных характеристик основания не позволяет производить процесс построения электрической схемы. В связи с указанными

ранее ограничениями к качеству поверхности диэлектрического покрытия предъявляются самые высокие требования [7–10].

В данной работе снижение термических характеристик стекла как основы исследуемых электроизоляционных покрытий осуществлялось благодаря введению легкоплавкого оксида бора.

Материалы и методы

В качестве основы исследуемых электроизоляционных покрытий использовали стекло системы $\text{BaO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ с высоким содержанием BaO .

Оксидный состав используемого стекла, % (по массе):

| | | | |
|----------------|--------------|--|----------------|
| SiO_2 | BaO | $\text{CaO} + \text{MgO} + \text{ZnO}$ (сумма) | MoO_3 |
| 42–45 | 40–43 | 10–13 | 3 |

Физико-термические свойства стекла:

| Свойства | Значения свойств |
|--|------------------|
| Плотность, г/см^3 | 3,5 |
| ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ | 8,3 |
| Температура начала деформации, $^\circ\text{C}$ | 780 |
| Динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$ (при 900–1020 $^\circ\text{C}$) | 10^8-10^4 |

Приготовление шликеров покрытий на основе исследуемых электроизоляционных стекол осуществляли по штатной шликерно-обжиговой технологии путем помола в фарфоровых барабанах алундовыми шарами с добавлением воды в течение 40 ч. Нанесение покрытия выполняли с помощью краскораспылителя (условная вязкость шликера по вискозиметру ВЗ-246 составляла 18–19 с) в 2–3 слоя. Температура формирования покрытия составляла 800–880 $^\circ\text{C}$ (в зависимости от состава), толщина защитного диэлектрического слоя – не менее 120–150 мкм.

Для изучения физико-химических свойств покрытий подготовлены сухие шликеры, из которых прессовали образцы для исследования на плавкость, ТКЛР и растекаемость. Растекаемость покрытий оценивали при использовании поворотной рамки, изготовленной в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50045–92 (ИСО 4534–80), и пластины для растекания размером 80×60 мм из оксида Al_2O_3 . На пластине для растекания размещали спрессованные образцы исследуемых покрытий, а затем саму пластину помещали в печь, разогретую до температуры испытаний, на установленную в печном пространстве поворотную рамку, находящуюся в горизонтальном положении. После выдержки в течение 1 мин поворотную рамку наклоняли под углом 45 градусов. Через 2 мин пластину для растекания вынимали из печи. За результат принимали показатели трех измерений.

Термостойкость образцов определяли путем термоциклирования. Испытания проводили по режиму $20 \pm 200 \text{ }^\circ\text{C}$ и $20 \pm 400 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 300 ч при 15-кратном охлаждении на воздухе в течение 15 мин через равные промежутки времени.

Определение химической стойкости стекол выполнено по методу порошка. Порошок стекла просеивали через сито № 2,5. Конечную пробу для проведения исследования просеивали через сито № 063. Таким образом, размер частиц стекла находился в пределах от 0,63 до 2 мм. Из полученного просеянного порошка стекла отбирали три навески, помещали в колбу объемом 500 мл, заливали дистиллированной водой в количестве 400 мл, накрывали крышкой и подвергали нагреву на водяной бане в течение

3 ч. Далее жидкость сливали и порошок стекла высушивали при температуре 120 °С до постоянной массы. За результат испытания принимали разницу в массе между исходной навеской и порошком после нагрева в воде.

Проведение качественной оценки выщелачивания стекол при нагреве в дистиллированной воде на водяной бане происходило с помощью определения рН раствора. С помощью анализатора жидкости Эксперт-001-2 определяли рН дистиллированной воды перед заливкой в колбы и рН раствора после нагрева проб порошка стекла на водяной бане в течение 3 ч.

Исследование влияния температуры нагрева на электросопротивление покрытий проводили на универсальной пробойной установке УПУ-5М при напряжении электрического поля 1000 В. Нагрев осуществляли до температуры 650 °С.

Результаты и обсуждение

Ввиду слабых молекулярных связей между кольцами оксида бора (B_2O_3) данный оксид обладает низкой температурой плавления, несмотря на высокую прочность единичной связи В–О (496 кДж/моль), при этом прочность связи Si–О (444 кДж/моль) сопоставима с прочностью связи В–О. С увеличением температуры структура боратных стекол приобретает большую однородность, уменьшается число структурных неоднородностей, что способствует процессу формирования покрытий при обжиге. Оксид бора в эмалях действует в качестве флюса, уменьшая продолжительность варки и снижая вязкость при высоких температурах, а также уменьшает поверхностное натяжение. Результаты исследований показали, что введение оксида B_2O_3 в состав стекла приводит к постепенному снижению температуры начала размягчения с 780 до 700 °С (рис. 1).

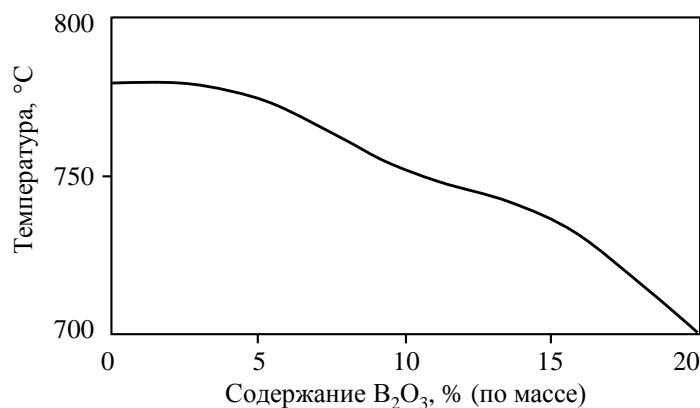


Рис. 1. Влияние содержания оксида бора (B_2O_3) на температуру начала размягчения покрытия

Цинк является тяжелым металлом, его оксид (ZnO) вводится в состав стекол в специальных целях ввиду токсичности данного соединения. Оксид цинка, являясь флюсом, значительно снижает вязкость стекол. Известно, что данный оксид повышает твердость и прочность эмали, уменьшает ТКЛР, повышает термическую и химическую стойкость. В результате исследования установлено, что с введением ZnO в состав исследуемого покрытия в количестве 3 % (по массе) происходит снижение температуры начала размягчения на 25 °С. Дальнейшее увеличение содержания ZnO (до 5 % (по массе)) не приводит к существенному изменению температурного интервала размягчения (рис. 2).

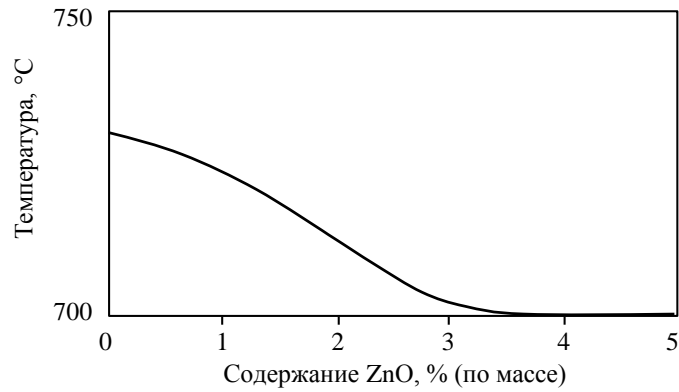


Рис. 2. Влияние содержания оксида цинка (ZnO) на температуру начала размягчения покрытия

Влияние содержания оксида бора на растекаемость аналогично влиянию на температуру начала размягчения. С увеличением содержания оксида B_2O_3 в покрытии наблюдается повышение растекаемости (рис. 3).

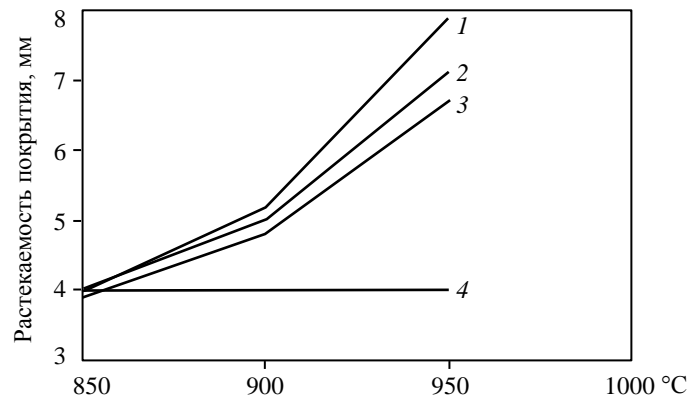


Рис. 3. Влияние температуры и содержания оксида бора (B_2O_3) на растекаемость покрытия, % (по массе): 20 (1); 15 (2); 10 (3); 4 – не содержит B_2O_3

Увеличение содержания оксида B_2O_3 в покрытии также приводит к существенному снижению ТКЛР – с $8,6 \cdot 10^{-6}$ до $6,7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ (рис. 4).

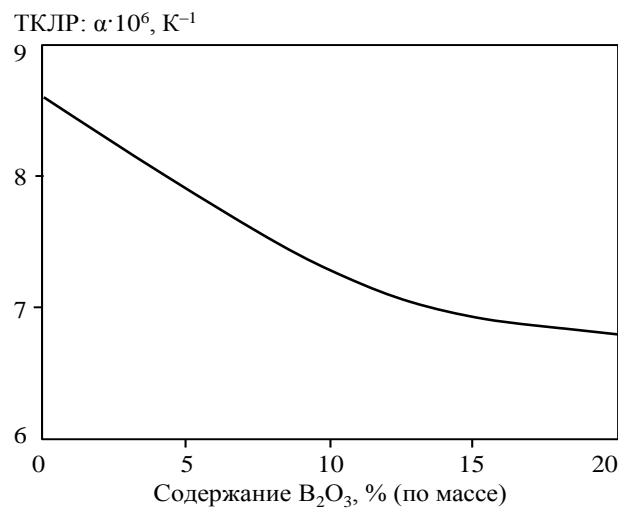


Рис. 4. Влияние содержания оксида бора (B_2O_3) на температурный коэффициент линейного расширения покрытия (ТКЛР)

В таблице представлены результаты исследований химической стойкости покрытия. Согласно классификации гидролитических классов аппаратных стекол, исследуемая композиция относится ко II классу (устойчивые стекла).

Определение химической стойкости стекол

| Условный номер навески | Исходная масса, г | Масса после испытания, г | Потери массы, г | Относительное значение потерь массы, % | Отклонение от среднего значения потерь массы, % | Среднее квадратическое отклонение | Средняя относительная ошибка |
|------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|--|---|-----------------------------------|------------------------------|
| 1 | 10,0018 | 9,99130 | 0,1950 | 0,115 | 0,0100 | 0,00935 | 8,1 |
| 2 | 10,0022 | 9,98945 | 0,1275 | | -0,0125 | | |
| 3 | 10,0000 | 9,98875 | 0,1125 | | 0,0025 | | |

В результате испытаний на химическую стойкость порошка стекла установлено, что в ходе кипячения данного состава в течение 3 ч кислотность среды из нейтральной смещена в сторону щелочной среды (значение pH составило 8,2). Данный факт свидетельствует о том, что происходит процесс выщелачивания ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и Ba^{2+} , которые содержатся в составе стекла (содержание последнего в количестве 42,5 % (по массе)). Химическая стойкость силикатных стекол обуславливается содержанием в них щелочных оксидов. Стойкость силикатов двухвалентных металлов значительно больше стойкости щелочных силикатов, особенно это относится к кальциевым и магниевым силикатам. Сравнительно менее химически устойчивы силикаты бария и свинца. Из-за высокого содержания в составе стекла оксида бария, а также небольшого содержания оксидов магния и кальция химическая стойкость к выщелачиванию данного состава относительно невысокая.

Твердые силикатные стекла обладают обычно отличными электроизоляционными свойствами и относятся к числу типичных диэлектриков. Подавляющему большинству силикатных стекол, как и диэлектрикам, свойственна плохая проводимость.

По механизму переноса тока в веществе различают проводимость ионную и электронную. В случае ионной проводимости ток переносится катионами Me^+ , в значительно меньшей степени – катионами Me^{+2} . С повышением температуры эксплуатации применяемых стекол электропроводность резко возрастает [11–13].

Мерой устойчивости к температуре у диэлектриков принято считать температуру вблизи точки Кюри ($T_{\text{K-100}}$), при которой удельное сопротивление $\rho_{\text{уд}} = 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [14–17].

В работе проведены исследования влияния температуры нагрева на электросопротивление покрытий. Для сравнения эффективности синтезированных составов произведены замеры электросопротивлений покрытий ЭВ-300-60М и ЭВК-103, разработанных в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и внедренных в конструкции изделий в различных отраслях промышленности. Значения сопротивлений, а также величина $T_{\text{K-100}}$ для синтезированных покрытий находятся в пределах 450–500 °С, в то время как у покрытия ЭВ-300-60М уменьшение электросопротивления наблюдается уже при более низких температурах ($T_{\text{K-100}} = 290 \text{ °С}$). Полученные данные отражают влияние химического состава стекла на электросопротивление. Известно, что повышенное электросопротивление синтезированных составов обусловлено высокими изоляционными свойствами основного компонента покрытия – оксида бора, его компактной упаковкой структурных элементов $[\text{BO}_3]$ и $[\text{BO}_4]^-$ в пространственной сетке.

Электрическую прочность стекла оценивали по способности выдерживать воздействие высоких электрических полей без разрушения и потери изолирующих свойств. Нарушение электрической прочности в том случае, когда сила поля превышает

критическое значение, называют пробоем, а соответствующее значение напряжения электрического поля – пробивным напряжением. Проведенные исследования показали способность экспериментальных составов выдерживать напряжения до 3000 В.

Проведены испытания образцов с покрытиями оптимальных составов на ресурс при суммарной наработке 300 ч при температуре 200 °С и 100 ч при температуре 300 °С. Образцы подвергали термической обработке по указанным режимам, после чего они прошли испытания на электрический пробой при напряжении 1000 В и замер электросопротивления. Установлено, что при воздействии высоких напряжений разрушения диэлектрического слоя не происходит, а значения электросопротивления остаются близкими к первоначальным ($\rho_{уд} = 10^{16}$ Ом·м).

Проведенные испытания на термостойкость образцов при температуре 200–400 °С в течение 300 ч при 15-кратном охлаждении до комнатной температуры через равные промежутки времени показывают, что после испытаний нарушения сплошности эмалевого слоя не происходит, также не наблюдается и других дефектов (сколы, язвы).

Заключения

Определены температурно-временные параметры формирования составов электроизоляционных покрытий.

Исследовано влияние содержания оксидов V_2O_3 и ZnO на растекаемость покрытий, температуру начала размягчения и ТКЛР. Установлено, что с увеличением содержания оксидов V_2O_3 и ZnO в покрытии происходит снижение температуры начала размягчения на 70–80 °С и ТКЛР на 20 % по сравнению с исходным стеклом, а также повышается растекаемость.

Исследованы диэлектрические свойства покрытий, оцениваемые величиной удельного электросопротивления и температурой, при которой начинается снижение сопротивления. Проведенные испытания показали, что экспериментальные составы значительно превосходят известные покрытия по диэлектрическим свойствам. Например, $T_{к-100}$ у покрытия ЭВ-300-60М составляет ~300 °С, а у покрытий системы $BaO-V_2O_3-SiO_2$: 500–580 °С. Величина пробивного напряжения составляет более 1000 В.

Проведены исследования диэлектрических составов на ресурс при суммарной наработке 300 ч при температуре 200 °С и 100 ч при температуре 300 °С, а также испытания на термостойкость образцов с покрытием при температуре 200–400 °С в течение 300 ч при 15-кратном охлаждении до комнатной температуры через равные промежутки времени. В результате проведенных испытаний получены положительные данные по стабильности диэлектрических свойств и по качеству бездефектного слоя покрытия.

Исследование химической стойкости синтезированных составов определяли согласно классификации гидролитических классов аппаратных стекол и установили, что синтезированные составы относятся ко II классу.

В работе исследованы электроизоляционные покрытия в системе $BaO-V_2O_3-SiO_2$ для использования их при изготовлении электронных схем на металлической подложке. Преимуществом синтезированных покрытий является не только наличие высоких диэлектрических свойств, но и более простая технология их применения.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тезисы докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
2. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-техническое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.

3. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 65. № 6. С. 846–855.
5. Немиллов С.В. Оптическое материаловедение. Оптические стекла: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 175 с.
6. Аппен А.А. Химия стекла. Л.: Химия, 1974. 352 с.
7. Денисова В.С., Власова О.В., Малинина Г.А. Влияние добавки тетраборида кремния на термостойкость реакционноотверждаемых покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 50–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-50-55.
8. Беляченков И.О., Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Ваганова М.Л., Шавнев А.А. Влияние спекающих и модифицирующих добавок на процесс спекания и свойства нитридокремниевой керамики // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 70–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-70-78.
9. Баринев Д.Я., Мараховский П.С., Мальцева Е.Ю., Беспрозванный Е.Д., Алясова Е.Е. Исследование теплопроводности печатных плат на основе алюминиевой подложки и алюмооксидного диэлектрика // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 43–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-43-48.
10. Лощинин Ю.В., Будиновский С.А., Размахов М.Г. Теплопроводность теплозащитных легированных оксидами РЗМ покрытий $ZrO_2-Y_2O_3$, полученных магнетронным нанесением // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
11. Шилова О.А., Полякова И.Г., Петрова И.В. и др. Синтез и исследование пленкообразующих композиций на основе кремнезоль и дисперсных оксидов для получения стеклокерамических электроизоляционных покрытий // Физика и химия стекла. 2015. Т. 41. № 6. С. 819–829.
12. Ефимова Л.Н., Иванов Н.В., Шилова О.А. Электроизоляционное стеклокерамическое покрытие на нихромовом проводе малого сечения // Сборник материалов II науч.-техн. конф. с междунар. участием «Наноиндустрия и технологии будущего» для студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 10 апр. 2014 г.). СПб., 2014. С. 74–76.
13. Структурные превращения в стеклах при повышенных температурах / под ред. Н.А. Торопова, Е.А. Порай-Кошица. М.; Л.: Наука, 1965. 514 с.
14. Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла: пер. с англ. М.: Мир, 2006. 288 с.
15. Krishnan A.T., Bae S., Fonash S.J. Low temperature microcrystalline silicon thin film resistors on glass substrates // Solid-State Electronics. 2000. Vol. 44. No. 7. P. 1163–1168.
16. Bao R., Busta C.M., Su X. et al. Microstructures, phases, and properties of low melting $BaO-B_2O_3-ZnO$ glass films prepared by pulsed laser deposition // Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. Vol. 371. P. 28–32.
17. Технология эмали и защитных покрытий: учеб. пособие / под ред. Л.Л. Брагиной, А.П. Зубехина. Харьков: НТУ «ХПИ»; Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2003. 484 с.

References

1. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Abstracts of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
2. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technical development of Russia in the context of achieving national goals: problems and solutions. *Innovatsii*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
3. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for Their Digital Processing. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020, vol. 90, no. 2, pp. 225–228.
4. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 65, no. 6, pp. 846–855.
5. Nemilov S.V. *Optical materials science. Optical glasses*: textbook. St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2011, 175 p.

6. Appen A.A. *Glass chemistry*. Leningrad: Khimiya, 1974, 352 p.
7. Denisova V.S., Vlasova O.V., Malinina G.A. Effect of the addition of silicon tetraboride on the thermal stability of reaction cured coatings. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 50–55. DOI: 10.18577 / 2071-9140-2020-0-2-50-55.
8. Belyachenkov I.O., Schegoleva N.E., Chainikova A.S., Vaganova M.L., Shavnev A.A. The influence of sintering and modifying additives on the sintering process and the properties of silicon nitride ceramics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 70–78. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-70-78.
9. Barinov D.Ya., Marahovskiy P.S., Maltceva E.Yu., Besprozvanniy E.D., Aliasova E.E. Research of thermal conductivity of printed circuit boards based on aluminum substrate and alumina dielectric. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 43–48. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-43-48.
10. Loshchinin Yu.V., Budinovskiy S.A., Razmakhov M.G. Heat conductivity of heat-protective coatings ZrO_2 – Y_2O_3 alloyed by REM oxides obtained by magnetronny application. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 3, pp. 42–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-42-49.
11. Shilova O.A., Polyakova I.G., Petrova I.V. et al. Synthesis and study of film-forming compositions based on silica sols and dispersed oxides for obtaining glass-ceramic electrical insulating coatings. *Fizika i khimiya stekla*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 819–829.
12. Efimova L.N., Ivanov N.V., Shilova O.A. Electrical insulating glass-ceramic coating on a small-section nichrome wire. *Collection of materials II scientific-technical. conf. with int. participation "Nanoindustry and technologies of the future" for students, graduate students and young scientists*. St. Petersburg, 2014, pp. 74–76.
13. *Structural transformations in glasses at elevated temperatures*. Ed. N.A.. Toropova, E.A. Porai-Kosice. Moscow; Leningrad: Nauka, 1965, 514 p.
14. Shelby J. *Structure, properties and technology of glass*: trans. from English Moscow: Mir, 2006, 288 p.
15. Krishnan A.T., Bae S., Fonash S.J. Low temperature microcrystalline silicon thin film resistors on glass substrates. *Solid-State Electronics*, 2000, vol. 44, no. 7, pp. 1163–1168.
16. Bao R., Busta C. M., Su X. et al. Microstructures, phases, and properties of low melting BaO – B_2O_3 – ZnO glass films prepared by pulsed laser deposition. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, vol. 371, pp. 28–32.
17. *Technology of enamel and protective coatings*: textbook. Ed. L.L. Bragina, A.P. Zubekhin. Kharkov: NTU KhPI; Novocherkassk: YURSTU (NPI), 2003, 484 p.

Информация об авторах

Власова Ольга Викторовна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Денисова Валентина Сергеевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Закалашный Александр Вадимович, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Солнцев Станислав Сергеевич, советник генерального директора, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Olga V. Vlasova, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Valentina S. Denisova, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksander V. Zakalashniy, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Stanislav S. Solntsev, Counselor of Director General, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 05.10.2021; одобрена после рецензирования 13.10.2021; принята к публикации 13.10.2021.

The article was submitted 05.10.2021; approved after reviewing 13.10.2021; accepted for publication 13.10.2021.