

18. Nikolaenko Y.E., Melnyk R.S., Rotner S.M., Nikolaienko T.Y. The use of Films of Metal-Containing Nanocomposites with a Silicon-Carbon Matrix in Thermal Immitators of the Components of Micro-and Nanoelectronics, 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2018 - Proceedings 28 September, 2018, 8477480, pp. 36-39.
19. Choa Jun-Sik, Janga Eunseok, Lima Dongmin, Ahna Seungkyu, Yooa Jinsu, Choa Ara, Parka Joo Hyung, Kima Kihwan, Choib Bo-Hun. Wide-bandgap nanocrystalline silicon-carbon alloys for photovoltaic applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, Vol. 182, pp. 220-227.
20. Yan X.B., Tay B.K., Chen G., Yang S.R. Synthesis of silicon carbide nitride nanocomposite films by a simple electrochemical method, *Electrochemistry communication*, 2006, No. 8, pp. 737-740.

Статью рекомендовала к опубликованию к.т.н. Т.А. Бедная.

Григорьев Михаил Николаевич – АО «ТНИИС»; e-mail: gregoryevmikhail@mail.ru; 347913, г. Таганрог, ул. Седова, 3; инженер.

Михайлова Татьяна Сергеевна – Южный федеральный университет; e-mail: xelga.maks@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2; кафедра техносферной безопасности и химии; аспирант.

Мясоедова Татьяна Николаевна – кафедра техносферной безопасности и химии, e-mail: tnmyasoedova@sfedu.ru; к.т.н.; доцент, 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 2

Grigoryev Mikhail Nikolaevich – JSC «TNIS»; e-mail: gregoryevmikhail@mail.ru; 3, Sedova street, Taganrog, 347913, Russia; engineer.

Mikhailova Tatiana Sergeevna – Southern Federal University; e-mail: xelga.maks@yandex.ru; 2, Chekhova street, Taganrog, 347928, Russia; the department of technospheric safety and chemistry; postgraduate student.

Myasoedova Tatiana Nikolaevna – e-mail: tnmyasoedova@sfedu.ru; the department of technospheric safety and chemistry; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 546.03

DOI 10.23683/2311-3103-2018-7-66-74

Ю.В. Клунникова, Д.А. Бондарчук

ФОРМИРОВАНИЕ СПЯЯ СТЕКЛОВИДНОГО ДИЭЛЕКТРИКА И САПФИРА ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрены особенности формирования плёнок стекловидного диэлектрика на сапфировой подложке методом центрифугирования для элементов микроэлектроники. Данный метод позволяет получать плёнки стекловидного диэлектрика наиболее равномерные по толщине и однородные покрытия различных составов без использования сложных технологических процессов. Выявлен ряд параметров, влияющих на значение шероховатости полученного стекловидного диэлектрика на сапфире. Представлен технологический маршрут формирования стекловидного диэлектрика на сапфировой подложке, который может являться основой для производства радиационно-стойких элементов микроэлектроники. Для получения плёнки стекловидного диэлектрика на сапфировой подложке методом центрифугирования вначале приготавливался раствор суспензии стекловидного диэлектрика. На начальном этапе необходимо размельчение стекловидного диэлектрического материала до порошка с удельной поверхностью $5000 \text{ см}^2/\text{г}$, затем добавлялся изобутиловый спирт и осуществлялось измельчение стеклопорошка с частотой 1500 об/мин. в течение 24 часов в яшмовом барабане. Был разработан технологический маршрут, позволяющий реализовывать создание образцов спая стекловидного диэлектрика и сапфировой подложки для элементов микроэлектроники. Нанесение рабочей суспензии стекловидного диэлектрического материала на сапфировую подложку осуществляется в течение

3–5 минут, при этом скорость вращения ротора центрифуги 7000 об/мин. Сушка равномерно нанесённого стекловидного диэлектрика проводится в термошкафу при температуре 50–60 °C в течение 3–5 мин. Высокотемпературный отжиг осуществляется в муфельной печи при $T < 600$ °C продолжительностью 5–7 мин. и с изотермической выдержкой на $T = 300$ °C в течение 10 минут. Некристаллизующиеся стекловидные плёнки легкоплавкого стекловидного диэлектрика обладают хорошей адгезией к сапфировым подложкам, согласованностью по коэффициенту линейно-термического расширения (КЛТР) между компонентами спая и температурой их формирования. Полученные образцы плёнок стекловидных диэлектриков на сапфировых подложках исследовались методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Стекловидная диэлектрическая плёнка, полученная методом центрифугирования, имеет толщину 1,5–2 мкм, средняя высота пиков составляет 1,5 мкм. Результаты формирования спая стекловидного диэлектрика и сапфира могут быть использованы при производстве элементов микроэлектроники.

Стекловидный неорганический диэлектрик; сапфировая подложка; метод центрифугирования; формирование спая.

Yu.V. Klunnikova, D.A. Bondarchuk

JUNCTION FORMATION OF GLASSY DIELECTRIC AND SAPPHIRE FOR MICROELECTRONICS ELEMENTS

The paper describes the features of films formation from glassy dielectric suspension on sapphire substrate by centrifugation. This method allows to obtain the glassy dielectric films with most uniform thickness and uniform coating of different compositions without the use of complex processes. It was found the set of parameters influencing on the roughness value for obtained glassy dielectric on sapphire. The technological route for glassy dielectric formation on sapphire substrate is presented. It can be the basis for the production of radiation-resistant elements for microelectronics. The glassy dielectric suspension solution was prepared initially for glass dielectric film obtaining on sapphire substrate. At the first stage it is necessary to grind glassy dielectric material to powder with specific surface of 5000 cm²/g and then to add the isobutyl alcohol, and to grind glass powder with frequency of 1500 rpm for 24 hours in an agate drum. Technological route for junction formation of glassy dielectric and sapphire substrate for microelectronic components was developed. Putting the glassy dielectric material suspension on sapphire substrate is performed for 3-5 minutes with the rotational speed of the centrifuge of 7000 rpm. Drying uniformly inflicted glassy dielectric conducted in an oven at the temperature of 50–60 °C for 3–5 min. High temperature annealing is carried out in a muffle furnace at $T < 600$ °C during 5-7 min and isothermal exposure is carried at $T = 300$ °C for 10 min. Noncrystallizing glassy low-melting films have good adhesion to the sapphire substrate, the consistency of the coefficient of linear thermal expansion between the junction components and the temperature of their formation. The resulting samples of glassy dielectric films on sapphire substrates were investigated by atomic force microscopy (AFM). The glassy dielectric film obtained by centrifugation has a thickness of 1,5–2 μm, the average height of the peaks is 1,5 μm. The results of junction formation of glassy dielectric and sapphire can be used in the production of microelectronic elements.

Glassy inorganic dielectric; sapphire substrate; centrifugation method; junction forming.

Введение. В современном мире полупроводниковые датчики давления являются весьма перспективными приборами электронной техники. Датчики давления, в настоящее время, выполненные на основе кремния, не способны удовлетворить комплексу высоких требований к свойствам электронных приборов и устройств, предназначенных для эксплуатации в экстремальных условиях (повышенные температуры, высокий уровень радиации и химически агрессивные среды). Для решения данных задач исследователи и технологи все больше применяют широкозонный материал – «кремний-на-сапфире». На сегодняшний день важной **проблемой** при разработке полупроводниковых датчиков давления является выбор метода присоединения чувствительного элемента к корпусу прибора, так как существующие в настоящее время методы резко снижают технические параметры и надёж-

ность электрического прибора. Сегодня прочный спай стекловидного неорганического диэлектрика на сапфировой подложке находит широкое применение в разных областях микроэлектроники. Особенности создания спаев с использованием плёнок стекловидного диэлектрического материала на сапфировых подложках считается **актуальной** проблемой для микроэлектронной техники [1–16, 19–22].

Постановка задачи. Данная работа посвящена исследованию особенностей формирования спаев стекловидного диэлектрика на сапфировой подложке. Методом нанесения стекловидного диэлектрика является центрифугирование, поскольку данный способ обеспечивает формирование стекловидных диэлектрических плёнок равномерных по толщине, целостности, хорошей адгезии к сапфировым подложкам [4–7, 9].

Из различных методов получения сапфира (метод Огюста Вернейля, метод Чохральского и др.) выбран метод горизонтально-направленной кристаллизации (ГНК), позволяющий получать монокристаллы сапфира большого сечения, осуществлять эффективное удаление вредных примесей. В табл. 1 приведен сравнительный анализ методов получения монокристаллов сапфира [5–14, 16].

Таблица 1

Сравнительный анализ методов получения монокристаллов сапфира

| Метод | Достоинства | Недостатки |
|-----------------------|--|--|
| 1. Метод Чохральского | <ol style="list-style-type: none"> 1. Отсутствует контакт со стенками тигля. 2. Достаточно легко изменяется диаметр растущего кристалла и визуальное контролировать рост. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Незначительная химическая однородность выращиваемого кристалла, выраженная в монотонном изменении состава последовательных слоев кристаллов вдоль направления роста. |
| 2. Метод ГНК | <ol style="list-style-type: none"> 1. Постоянная площадь расплава. 2. Возможность выращивания монокристаллов большого сечения, эффективное удаление примеси. 3. Возможность проведения многократных предростовых перекристаллизаций материалов, что способствует глубокой очистке кристаллизуемого вещества и способствует значительному снижению требований к чистоте исходного шихтового материала. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Присутствие контактов выращиваемого монокристалла с контейнером, что показывает загрязнение расплава и возникновение в кристаллах остаточного напряжения и трещин. 2. Малые толщины кристаллов – до 50 мм. |
| 3. Метод Степанова | <ol style="list-style-type: none"> 1. Большие скорости теплоотвода, позволяющие вырастить кристаллы быстрее. 2. Высокая производительность. 3. Возможность выращивания сапфировых профилей, которые нельзя изготавливать механической обработкой. | <ol style="list-style-type: none"> 1. Получение кристалла с высокой плотностью структурных дефектов. |

К основным физико-химическим свойствам монокристаллов лейкосапфира при содержании Al_2O_3 99,99 % можно отнести: температуру плавления 2054 °С, рабочую температуру 2000 °С; плотность 3,97 г/см³; твёрдость по Моосу 9; прочность на сжатие 2450 МПа, на растяжение 990 МПа; оптическую прозрачность 95 %; теплопроводность 0,09 кал/см·°С; коэффициент термического расширения $5 \cdot 10^{-6}$ 1/°К; удельное электрическое сопротивление 10^{16} Ом·см; диэлектрическую проницаемость 10 и электрическую прочность на пробой $4 \cdot 10^5$ В/см.

Для получения спая сапфир – стекловидный диэлектрик для элементов микроэлектроники используется легкоплавкий неорганический стекловидный диэлектрик системы $\text{PbO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}$ (рис. 1) [17–23].

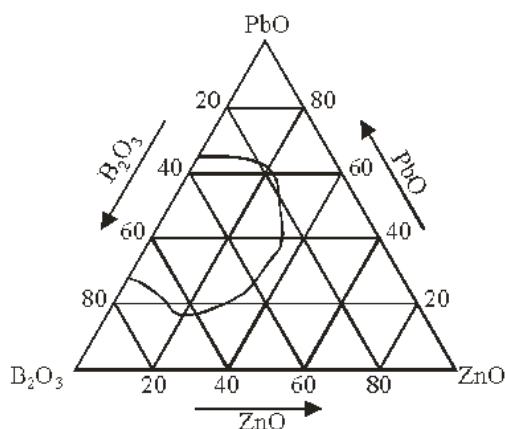


Рис. 1. Область стеклообразования стекловидного неорганического диэлектрического материала системы $\text{PbO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}$

Приведены основные физико-механические свойства неорганических стекловидных диэлектриков системы $\text{PbO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{ZnO}$ для получения спая сапфир – стекловидный диэлектрик: КЛТР в интервале температур 20...500 °С, $85 \dots 95 \cdot 10^{-7}$ К⁻¹; температура растекания – не выше 600°С; микротвёрдость не ниже 350 кг/мм²; отсутствие кристаллизации; электрические характеристики: $\epsilon = 10 \dots 14$; $\text{tg}\delta \cdot 10^4 = 20 \dots 25$; $E_{\text{проб}} \cdot 10^6 = 5$ В/см; химическая стойкость – II гидролитический класс.

Проведенные исследования. Формирование плёнок стекловидного диэлектрика на подложке может осуществляться различными методами, такими как центрифугирование, погружение (окувание) и пульверизация. Эти методы позволяют получать плёнки стекловидного диэлектрика различных составов и морфологий, без использования сложных технологических процессов [4].

Для получения спая стекловидных плёнок на сапфировой подложке методом центрифугирования приготавливаем вначале раствор суспензии стекловидного диэлектрика. На начальном этапе гранулят легкоплавкого стекловидного диэлектрического материала размельчался до порошка с удельной поверхностью 5000 см²/г (сухой помол). Для получения рабочей суспензии в приготовленный порошок добавляется изобутиловый спирт (мокрый помол). Далее раствор помещается на 24 часа в яшмовый барабан, в вибрационную мельницу, которая состоит из горизонтальной цилиндрической рабочей камеры с мелющими телами. В данном случае в качестве мелющих тел использовались яшмовые шары размером от 8 до 20 мм. Через камеру проходит эксцентриковый вал, который приводится в движение электродвигателем с частотой 1500 об/мин. Вал, вращаясь, передает вибрационное воздействие на рабочую камеру, а камера в свою очередь приводит в движе-

ние находящиеся внутри неё шары. Нанесение суспензии из легкоплавкого стекловидного диэлектрического материала системы $PbO - B_2O_3 - ZnO$ на подложку из сапфира осуществляется в течение 3–5 минут при скорости вращения ротора центрифуги 7000 об/мин. Сушка равномерно нанесенной плёнки проводится в термощкафу при температуре 50–60 °С в течение 3–5 мин. Высокотемпературный отжиг осуществляется в муфельной печи при $T < 600$ °С продолжительностью 5–7 мин. и с изотермической выдержкой на $T = 300$ °С в течение 10 минут. Некристаллизующиеся стекловидные плёнки легкоплавкого стекловидного диэлектрика обладают хорошей адгезией к материалам подложек (сапфир), согласованностью по коэффициенту линейного термического расширения (КЛТР) между компонентами спая и температурам их формирования.

Был разработан технологический маршрут, позволяющий реализовывать спай сапфир - стекловидный диэлектрик для элементов микроэлектроники, который представлен на рис. 2.

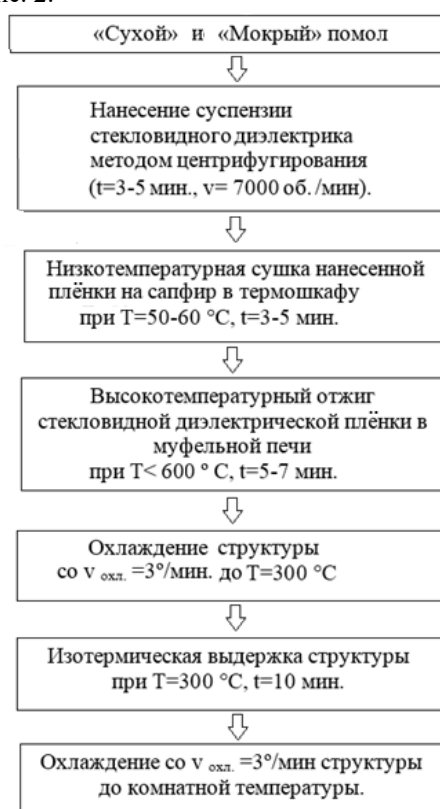


Рис. 2. Технологический маршрут создания спая сапфир – стекловидный неорганический диэлектрик

Для оценки качества поверхности стекловидной неорганической диэлектрической плёнки на сапфировой подложке использовали метод атомной силовой микроскопии (АСМ). АСМ-изображение представлено на рис. 3. Плёнка, полученная методом центрифугирования, имеет толщину 1,5–2 мкм, средняя высота пиков составляет 1,5 мкм, коэффициент смачивания 0,7 (находится в пределах допустимости), удельное сопротивление $1,4 \times 10^6$ Ом·см минимально.

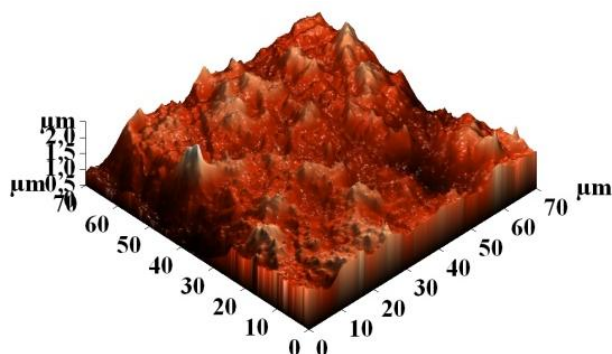


Рис. 3. АСМ - изображение поверхности плёнки стекловидного неорганического диэлектрика на сапфировой подложке

Результат. Использование стекловидного диэлектрика системы $\text{PbO} - \text{V}_2\text{O}_5 - \text{ZnO}$ считается весьма перспективным в качестве «связующего» материала при создании тройных спаев сапфир - стекловидный диэлектрик - керамика для электроники, в особенности для создания датчиков давления на базе структуры «кремний-на-сапфире».

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 14.587.21.0025, уникальный идентификатор проекта RFMEFI58716X0025).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добровинская Е.Р., Литвинов Л.А., Пицик В.В. Энциклопедия сапфира. – Харьков: НТК «Институт монокристаллов», 2004. – 508 с.
2. Стучебников В.М. Структуры «кремний на сапфире» как материал для тензопреобразователей механических величин // Радиотехника и электроника. – 2005. – Т. 50, № 6. – С. 678-696.
3. Носов Ю.Г., Деркаченко Л.И. Последствие при испытании корунда на микротвердость // Журнал технической физики – 2003. – № 10. – С. 139-142.
4. Гончаров В.А., Азанова И.В., Васекин Б.В. Модель неравновесной кристаллизации для численного решения задачи роста полупроводниковых кристаллов из расплавов // Известия вузов. Электроника. – 2010. – № 5. – С. 5-13.
5. Алферов Ж.И., Копьев П.С., Суриц Р.А. Наноматериалы и нанотехнологии // Нано- и микросистемная техника. – 2003. – № 8. – С. 3-13.
6. Wang Y.D., Wu X.H., Su Q., Li Y.-F., Zhou Z.L. Ammonia-sensing characteristics of Pt and SiO_2 doped SnO_2 materials // Solid-State Electronics. – 2001. – Vol. 45. – P. 347-350.
7. Зайцев В.И., Нелина С.Н. Исследование температурных полей в электропечах для выращивания монокристаллов лейкосапфира методом горизонтальной направленной кристаллизации // Известия ЮФУ. Технические науки. Тематический выпуск. – 2009. – № 12 (101). – С. 187-193.
8. Стефанович В.А., Лебедев Г.А. Метод оптимизации управления технологическим процессом выращивания кристаллов лейкосапфира // Известия ТРТУ. – 2006. – № 5 (60). – С. 210-214.
9. Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов. – М.: Стройиздательство, 1943. – 432 с.
10. Клунникова Ю.В., Малюков С.П., Саенко А.В. Моделирование процесса лазерной обработки материалов для микроэлектроники // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – № 8. – С. 15-19.
11. Угай Я.А. Введение в химию полупроводников. – М.: Высш. школа, 1975. – 302 с.

12. Лебедев Г.А., Стефанович В.А., Чередниченко Д.И. Теплофизические процессы при получении кристаллов лейкосапфира методом горизонтальной направленной кристаллизации // Кристаллография. – 2008. – № 2. – С. 356-360.
13. Herrmann J.M., Desdier J., Fernandez V.M. Oxygen gas sensing behavior of nanocrystalline tin oxide prepared by the gas phase condensation method // Nanostructured Material. – 1977. – Vol. 8. – No. 6. – P. 675-686.
14. Корякова З., Бутт В. Легкоплавкие стекла с определенным комплексом физико-механических свойств // Компоненты и технологии. – 2004. – № 5. – С. 126-128.
15. Малюков С.П., Нелина С.Н., Стефанович В.А. Физико-технологические аспекты изготовления изделий из сапфира. – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – 164 с.
16. Лебедев Г.А., Чередниченко Д.И. Исследование модели жидкофазной рекристаллизации слоя поликремния на сапфировой подложке // Кристаллография. – 2009. – № 3. – С. 553-558.
17. Maluykov S.P., Klunnikova Yu.V., Parinov I.A. Investigations of Defects Formation During Sapphire Growth. In: Advanced Nano- and Piezoelectric Materials and Their Applications. – USA: Nova Science, 2014. – P. 89-108.
18. Grin L.A., Budnikov A.T., Sidelnikova N.S., Adonkin G.T., Baranov V.V. Optimization of temperature conditions for the growth of large-size sapphire crystals by the method of horizontally directed crystallization // Functional Materials. – 2013. – No. 20. – P. 111-117.
19. Буй Т.Х. Разработка и исследование чувствительных элементов датчиков давления на основе структур «кремний на сапфире» с использованием лазерных технологий: дис. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 2017. – 123 с.
20. Нелина С.Н. Снижение количества дефектов в монокристаллах сапфира за счёт стабилизации градиента температуры теплового поля // Тр. международной научной конференции и школы молодёжи «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники». – 2006. – С. 82-84.
21. Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pischik V.V. Sapphire. Material, Manufacturing, Applications. – New York: Springer, 2009. – 481 p.
22. Малюков С.П., Бондарчук Д.А., Силенок А.В., Мишнев В.Д. Исследование плёнки неорганического стекловидного диэлектрика на сапфировой подложке // Тр. VI молодёжной научно-технической конференции и школы молодых учёных «Наукоёмкие химические технологии – 2015». – 2015. – С. 83.

REFERENCES

1. Dobrovinskaya E.P., Litvinov L.A., Pischik V.V. Enziklopedia saphira [Encyclopedia of sapphire]. Harkov: NTK "Institut monokristallov", 2004, 508 p.
2. Stuchebnikov V.M. Struktury "kremniy-na-sapfire" kak material dlya tenzopreobrazovateley mekhanicheskikh velichin [Silicon-on-sapphire structures as a material for strain transducers of mechanical quantities], *Radiotekhnika i ehlektronika* [Radio engineering and electronics], 2005, No. 6, pp.678-696.
3. Nosov Ju.G., Derkachenko L.I. Posledstvie pri ispytanii korunda na mikrotverdest' [The consequence of the test of corundum for microhardness], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Journal], 2003, No. 10, pp. 139-142.
4. Goncharov V.A., Azanova I.V., Vasekin B.V. Model' neravnesnoy kristallizatsii dlya chislennoogo resheniya zadachi rosta poluprovodnikovyykh kristallov iz rasplavov [Nonequilibrium crystallization model for the numerical solution of the problem of growth of semiconductor crystals from melts], *Izvestiya vuzov. Ehlektronika*. [Izvestiya vuzov.Elektronika], 2010, No. 5, pp. 5-13.
5. Alferov Zh.I., Kop'ev P.S., Suris R.A. Nanomaterialy i nanotekhnologii [Nanomaterials and nanotechnology], *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and Microsystem technology], 2003, No. 8, pp. 3-13.
6. Wang Y.D., Wu X.H., Su Q., Li Y.-F., Zhou Z.L. Ammonia-sensing characteristics of Pt and SiO₂ doped SnO₂ materials, *Solid-State Electronics*, 2001, Vol. 45, pp. 347-350.
7. Zaycev V.I., Nelina S.N. Issledovanie temperaturnykh poley v ehlektropetchah dlya vyrashchivaniya monokristallov lejkosapfira metodom gorizonta'noy napravlennoy kristallizatsii [The study of temperature fields in electric furnaces for growing single crystals of sapphire by horizontal directed crystallization], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. Tematicheskij vypusk* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 12 (101), pp.187-193.

8. *Stefanovich V.A., Lebedev G.A.* Metod optimizatsii upravleniya tekhnologicheskim protsessom vyrashchivaniya kristallov leykosapfira [Method of optimization of control of technological process of growing sapphire crystals], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURe], 2006, No. 5 (60), pp. 210-214.
9. *Pavluchkin N.M.* Himicheskaya tehnologiya stekla i sitallov [Chemical technology of glass and Sital]. Moscow: "Strojizdatelstvo", 1943, 432 p.
10. *Klunnikova Yu.V., Maljukov S.P., Saenko A.V.* Modelirovanie processa lazernoy obrabotki materialov dlya mikroelektroniki [Modeling of laser processing of materials for microelectronics], *Izvestiya SPbGJeTU «LJeTI»* [Izvestiya ETU "LETI"], 2014, No. 8, pp. 15-19.
11. *Ugaj Ja.A.* Vvedenie v himiju poluprovodnikov [Introduction to the chemistry of semiconductors]. Moscow: Vyssh. shk., 1975, 302 p.
12. *Lebedev G.A., Stefanovich V.A., Cherednichenko D.I.* Teplofizicheskie processy pri poluchenii kristallov leykosapfira metodom gorizontальной napravlennoy kristallizatsii [Ethermal processes for the production of crystals of sapphire by horizontal directed crystallization], *Kristallografiya* [Crystallography], 2008, No. 2, pp. 356-360.
13. *Herrmann J.M., Desdier J., Fernanrez V.M.* Oxygen gas sensing behavior of nanocrystalline tin oxide prepared by the gas phase condensation method, *Nanostructured Material*, 1977, Vol. 8, No. 6, pp. 675-686.
14. *Koryakova Z., Bitt V.* Legkoplavkie stekla s opredelennym kompleksom fiziko-mekhanicheskikh svoystv [Fusible glasses with a certain complex of physicommechanical properties], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2004, No. 5, pp. 126-128.
15. *Malyukov S.P., Nelina S.N., Stefanovich V.A.* Fiziko-tekhnologicheskie aspekty izgotovleniya izdeliy iz sapfira [Physico-technological aspects of manufacturing products from sapphire]. – Germanya: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012, 164 p.
16. *Lebedev G.A., Cherednichenko D.I.* Issledovanie modeli zhidkofaznoy rekristallizatsii sloya polikremniya na sapfirovoj podlozhke [Ethermal processes for the production of crystals of sapphire by horizontal directed crystallization], *Kristallografiya* [Crystallography], 2009, No. 3, pp. 553-558.
17. *Malyukov S.P., Klunnikova Yu.V., Parinov I.A.* Investigations of Defects Formation During Sapphire Growth. In: *Advanced Nano- and Piezoelectric Materials and Their Applications*. USA: Nova Science, 2014, pp. 89-108.
18. *Grin L.A., Budnikov A.T., Sidelnikova N.S., Adonkin G.T., Baranov V.V.* Optimization of temperature conditions for the growth of large-size sapphire crystals by the method of horizontally directed crystallization, *Functional Materials*, 2013, No. 20, pp. 111-117.
19. *Buy T.H.* Razrabotka i issledovanie chuvstvitelnykh elementov datchikov davleniya na osnove struktur «kremniy na sapfire» s ispolzovaniem lazernykh tekhnologii: dis.kand.tekhn.nauk [Development and investigation of pressure sensing elements on the basis of "silicon on sapphire" structures using laser technologies: cand. of eng sc.diss.], Taganrog, 2017, 123 p.
20. *Nelina S.N.* Snizhenie kolichestva defektov v monokristallah sapfira za schet stabilizatsii gradienta temperatury teplovogo polya [Reducing the number of defects in sapphire single crystals by stabilizing the temperature gradient of the thermal field], *Trudy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii i shkoly-seminara "Aktual'nye problemy tverdotel'noj ehlektroniki i mikroelektroniki* [Proceedings of the international scientific conference and school-seminar "Actual problems of solid-state electronics and microelectronics"], 2006, pp. 82-84.
21. *Dobrovinskaya E.R., Lytvynov L.A., Pischik V.V.* Sapphire. Material, Manufacturing, Applications. New York: Springer, 2009, 481 pp.
22. *Malyukov S.P., Bondarchuk D.A., Silenok A.V., Mishnev V.D.* Issledovanie plenki neorganicheskogo steklovidnogo dielektrika na sapfirovoj podlozhke [Investigation of inorganic vitreous dielectric film on sapphire substrate], *Trudy 6 molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii i shkoly molodykh uchenykh "Naukoemkie khimicheskije tekhnologii - 2015"* [Proceedings of the 6th youth scientific and technical conference and school of young scientists "science-Intensive chemical technologies-2015"], 2015, pp. 83.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

Клунникова Юлия Владимировна – Южный федеральный университет; e-mail: jklunnikova@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371603; кафедра конструирования электронных средств; к.т.н.; доцент.

Бондарчук Дина Алексеевна – e-mail: gemtschugnaja@rambler.ru; кафедра конструирования электронных средств; аспирант.

Klunnikova Yulia Vladimirovna – Southern Federal University; e-mail: jklunnikova@rambler.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371603; the department of electronic apparatuses design; assistant professor.

Bondarchuk Dina Alexeevna – e-mail: gemtschugnaja@rambler.ru; the department of electronic apparatuses design; postgraduate student.

УДК 546.05

DOI 10.23683/2311-3103-2018-7-74-85

А.А. Нестеров, А.А. Панич, М.И. Толстуннов**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЁМЫ СОЗДАНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПЬЕЗОМАТЕРИАЛОВ С ОПТИМАЛЬНОЙ, ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, СОВОКУПНОСТЬЮ ПАРАМЕТРОВ**

Развитие современного пьезоприборостроения невозможно без создания новых технологий пьезоматериалов различных типов. Это обусловлено тем, что число направлений науки и техники в которых используются ультразвуковые пьезопреобразователи (УЗП) с каждым годом увеличивается. Одним из способов, позволяющим оптимизировать функциональные характеристики каждого конкретного типа преобразователя, является использование пьезоматериала с индивидуальной оптимальной совокупностью электрофизических и механических параметров. Традиционные методы варьирования этих параметров заключаются в изменении состава базовых сегнетофаз, однако их возможности близки к насыщению. Анализ задач, возникающих при проектировании УЗП показывает, что часть из них могут быть решены на уровне конструкции. В большинстве же случаев более удобно, а иногда единственно возможное, их решение на уровне пьезоматериала, а именно требуемые значения ЭФП и механических параметров (МП) пьезопреобразователя, их соотношение, а также стабильность ЭФП УЗП по отношению к эксплуатационным параметрам (управляющие электрические поля и внешние механические напряжения) и параметрам состояния систем (температура, давление). Второй проблемой современного пьезоприборостроения является ограниченное число сегнетофаз, на базе которых могут быть созданы действительно высокоэффективные пьезоматериалы. Это объясняется тем, что основой таких пьезоматериалов являются свинецсодержащие сегнетофазы, традиционные технологии которых характеризуются неприемлемой экологичностью. Эта проблема связана, как с высокой токсичностью соединений свинца, так и с высоким давлением их паров над конденсированной фазой, которое экспоненциально растёт по мере увеличения температуры процессов синтеза сегнетофаз и спекания прессзаготовок, сформированных на их основе. В предлагаемой работе предложены новые пути решения проблем создания керамических пьезоматериалов с оптимальной (для конкретного типа преобразователя) совокупностью диэлектрических и пьезоэлектрических параметров, а также рассмотрены низкотемпературные технологии синтеза базовых сегнетофаз и спекания пьезокерамики. Помимо решения экологических проблем материалов данного типа, переход от традиционных высокотемпературных технологий, к технологиям, реализуемым при более низких температурах, имеет значительный экономический эффект, так как снижает расход энергии на единицу конечной продукции.

Сегнетофазы; ультрадисперсные порошки; низкотемпературные технологии синтеза и спекания; пьезокерамика; микроструктура электрофизические свойства.