



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-28-35>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 538.945; 537.226.4; 538.956

## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЕРОВСКИТОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Л. А. БЛИЗНЮК, Т. П. ПЕТРОЧЕНКО, А. К. ЛЕТКО, В. И. КАСКО

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению  
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 22.12.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

**Аннотация.** Проведены синтезы и исследования объемных образцов композиций на основе  $Ba_xSr_{(1-x)}TiO_3$ ,  $Pb(Zr, Ti)O_3$ ,  $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_{(n+4)}$ ,  $n = (5, 9, 12)$ , которые использованы для создания гибридных структур. Разработана технология получения гибридных структур высокотемпературный сверхпроводник–сегнетоэлектрик и определены оптимальные температурно-временные режимы их получения. Изучены условия формирования структуры высокотемпературный сверхпроводник–сегнетоэлектрик, ее микро- и кристаллическая структуры, электрофизические свойства. Исследована граница перехода сегнетоэлектрик–сверхпроводник и установлено, что ее размер составляет 4 мкм. Сформированы структуры сегнетоэлектрик–сверхпроводник–электрод. Показано, что нанесение контактов из серебра на поверхность сверхпроводящего покрытия возможно в одном технологическом цикле. Установлено, что для получения композитных материалов с высокими электрофизическими параметрами следует использовать сверхпроводящие материалы  $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_y$  с  $n \geq 12$ .

**Ключевые слова:** сверхпроводник, сегнетоэлектрик, композиционный материал, гибридные структуры, диэлектрические свойства, микроструктура, перовскиты.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарность.** Представленные исследования выполнены при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, договор № T21УЗБГ-015.

**Для цитирования.** Получение и исследование гибридных структур на основе перовскитоподобных материалов / Л. А. Близнюк [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 28–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-28-35>.

## PREPARATION AND INVESTIGATION OF HYBRID PERIODIC STRUCTURES BASED ON PEROVSKITE-LIKE MATERIALS

LYUDMILA A. BLIZNYUK, TATYANA P. PETROCHENKO, ANZHELIKA K. LETKO,  
VYACHESLAV I. KASKO

Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science  
(Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 22.12.2023

**Abstract.** Syntheses and investigations of bulk samples of compositions based on  $Ba_xSr_{(1-x)}TiO_3$ ,  $Pb(Zr,Ti)O_3$ ,  $Bi_{1,7}Pb_{0,3}Sr_2Ca_{(n-1)}Cu_nO_{(n+4)}$ ,  $n = (5, 9, 12)$ , which are used to obtain hybrid structures, have been carried out. The technology for producing high temperature superconductor–ferroelectric hybrid structures has been developed and the optimal temperature–time modes for their production have been determined. The conditions for the formation of the high temperature superconductor–ferroelectric structure have been studied. The microstructure,

crystal structure and electrical properties of the high temperature superconductor–ferroelectric hybrid structure were studied. The ferroelectric–superconductor transition boundary was studied and it was found that its size is 4  $\mu\text{m}$ . The ferroelectric–superconductor–electrode structures have been formed. It has been shown that the deposition of silver contacts on the surface of a superconducting coating is possible in one technological cycle. It has been established that to obtain composite materials with high electrical parameters it is necessary to use superconducting materials  $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  with  $n \geq 12$ .

**Keywords:** superconductor, ferroelectric, composite material, hybrid structures, dielectric properties, microstructure, perovskites.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**Gratitude.** The presented studies were carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, contract No T21UZBG-015.

**For citation.** Bliznyuk L. A., Petrochenko T. P., Letko A. K., Kasko V. I. (2024) Preparation and Investigation of Hybrid Periodic Structures Based on Perovskite-Like Materials. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 28–35. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-28-35> (in Russian).

## Введение

Увеличение добротности СВЧ-устройств, снижение потерь и энергоемкости, повышение управляемости и мобильности – таковы основные тенденции развития современных радиоэлектронных систем. Для реализации указанных тенденций необходимы гибридные структуры, обладающие уникальными физическими свойствами. В последние годы в радиоэлектронике интенсивно исследуются возможности применения сегнетоэлектрических управляемых структур и высокособротных сверхпроводниковых топологий. Значительным потенциалом для разработки устройств нового поколения обладают периодические структуры и слоистые композиции на основе перовскитных пленок и родственных оксидных слоев. Компоненты, выполненные на их основе (антенны, фильтры, резонаторы, линии задержки, ячейки памяти и т. д.), находят широкое применение в различных СВЧ-устройствах [1, 2].

Наиболее применяемыми в электронике являются такие перовскитные сегнетоэлектрики (СЭ), как титанаты бария-стронция (BSTO). СВЧ-электроника в основном использует твердые растворы благодаря высокому значению и нелинейности диэлектрической проницаемости в широком температурном интервале, а также малому тангенсу угла диэлектрических потерь. Применение совокупности свойств сегнетоэлектрических материалов в составе многослойных структур, например, полупроводник–сверхпроводник, при непосредственном взаимном контакте существенно расширяет их функциональные возможности, поскольку параметры таких структур могут перестраиваться под воздействием импульсов поляризующего электрического поля в широком температурном диапазоне. Динамичный прикладной прогресс развития технологий создания слоистых структур затрудняется из-за малой исследованности межслойного взаимодействия переходных слоев и эффекта близости. Использование в таких композитных структурах сверхпроводников с высокими критическими параметрами позволит выявить эти эффекты более четко, определить основные факторы, которые оказывают влияние на результирующие токовые характеристики (морфологию, текстуру, устойчивость фаз, кристаллохимические параметры и т. д.), составляющие структуру материалов.

С учетом экспериментальных данных обосновано практическое применение подобных смешанных структур. Задача исследований авторов – используя аналогии в кристаллической структуре купратных сверхпроводников и перовскитоподобных сегнетоэлектриков, сформировать композитную структуру, на основе которой можно создавать элементы с перестраиваемыми параметрами.

## Экспериментальная часть

Многие подложки и высокотемпературные сверхпроводниковые (ВТСП) покрытия несовместимы вследствие взаимной диффузии материалов подложки и покрытия, что вызывает подавление сверхпроводимости [3].  $\text{SrTiO}_3$  (ST) относится к совместимым сверхпроводникам, так как имеет малую реакционную способность и высокое соответствие структурных характеристик параметрам наиболее распространенных сверхпроводников.

Для формирования и исследования структуры сегнетоэлектрик–сверхпроводник были получены керамика  $\text{SrTiO}_3$  (СЭ-подложка) и сверхпроводник  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  (ВТСП-покрытие). В качестве сверхпроводников использовали: синтезированные в НПЦ НАН Беларуси по материаловедению соединения  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n = 5, 9, 12$ ), а также прекурсоры и ВТСП-керамику с  $T_c = (107-181)$  К номиналов  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n = 5, 9, 30$ ), которую готовили по керамической технологии из прекурсоров, синтезированных в Институте материаловедения НПО «Физика – Солнце» АН Узбекистана (г. Ташкент).

Сверхпроводящие соединения  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n = 5, 9, 12$ ) получали по обычной керамической технологии из исходных окислов и карбонатов  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ , взвешенных согласно стехиометрической формуле. Синтез проводили при температуре  $800-850$  °С в течение 4 ч. Синтез прекурсоров и сверхпроводящих соединений ряда  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n = 2-30$ ) осуществляли по SFAQ-T (Super Fast Alloys Quenching) технологии путем плавления исходных компонентов концентрированным солнечным излучением мощностью  $180-240$  Вт/см<sup>2</sup> и последующей быстрой закалки расплава [4, 5]. Для приготовления образцов использовали химические реактивы следующих квалификаций:  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$  – «ХЧ» (химически чистый) и  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CuO}$  – «ЧДА» (чистый для анализа), которые смешивали в емкостях объемом 5 л, футерованных полиуретаном. Из смесей порошков прессовали заготовки, обжигали их в печи сопротивления (SNOL) при температуре  $300-600$  °С в течение 2 ч. После термообработки при  $600$  °С за 2 ч достигалась прочность заготовок, достаточная для их установки в солнечной печи на водоохлаждаемом поддоне. Перед плавлением заготовки примерно 5–10 мин выдерживали при плотности солнечного потока не более  $200$  Вт/см<sup>2</sup> в большой солнечной печи (БСП). Такая подготовка исключала выброс отдельных фрагментов прессовок под воздействием горячего воздуха. После нагрева осуществляли вывод оптико-энергетической системы БСП в режим получения плотности солнечного потока в фокальной зоне  $\approx(400-480)$  Вт/см<sup>2</sup>. Плавление производилось до полного расплавления массы порошка, находящегося в фокальной зоне. Затем сливали расплав на водоохлаждаемый поддон. Составы шихт с увеличенным содержанием  $\text{CaO}$  плавил при плотностях солнечного потока  $500-570$  Вт/см<sup>2</sup>. Увеличения плотности солнечного потока достигали введением гелиостатов, находящихся на верхних полках гелиостатного поля. Далее получали сверхпроводящие образцы из стеклокристаллических прекурсоров по стандартной технологии: помол–прессование–отжиг. Отжиг керамики осуществляли в интервале  $500-848$  °С в течение 3–120 ч.

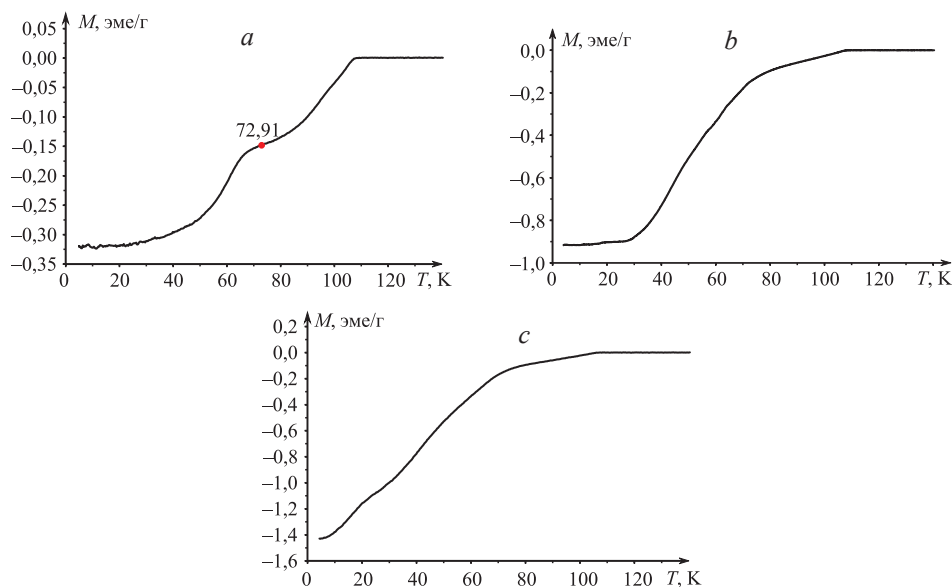
Формирование высокотемпературных сверхпроводниковых покрытий проводилось на подложках из керамического материала  $\text{SrTiO}_3$ . Шероховатость поверхности подложки создавали таким образом, чтобы обеспечить хорошую адгезию сверхпроводящего слоя к подложке. На СЭ-подложку из керамики толщиной 1 мм аэрозольным методом наносили слой предварительно синтезированного сверхпроводника  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n = 5, 9, 12$ ) и перетертого прекурсора и керамики  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n = 5, 9, 12$ ). Затем нанесенный слой сушили и полученную систему (подложку с нанесенным на нее сверхпроводящим слоем) обжигали при температуре окончательного формирования требуемой кристаллической структуры и сверхпроводящих свойств.

Для электрофизических исследований свойств гибридной системы на слой сверхпроводника наносился слой серебросодержащего покрытия. Температура вжигания серебряного покрытия совпадает с температурой обжига сверхпроводника, что позволяет создавать контакты из серебра на поверхности сверхпроводящего покрытия даже в одном технологическом цикле. Фазовый состав полученных образцов СЭ–ВТСП контролировали с помощью рентгенофазового анализа, который производили в  $\text{CuK}$ -монохроматическом излучении в диапазоне углов  $20^\circ-60^\circ$ .

Исследования намагниченности сверхпроводников на основе  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n = 5, 9, 12$ ) проводили на вибрационном магнитометре высокополевой измерительной системы Cryogenic фирмы Cryogenic Ltd (Великобритания). Точность измерения величины намагниченности составляла  $1 \cdot 10^{-3}$  А·м<sup>2</sup>/кг. Диэлектрические измерения образцов выполняли с помощью измерителя иммитанса E7-20 на частотах 1 кГц и 1 МГц. Исследование микроструктуры, толщины сверхпроводящего покрытия и изучение границы перехода полученных композитных материалов проводили с помощью растрового электронного микроскопа марки EVO 10 фирмы Carl Zeiss.

### Результаты исследований и их обсуждение

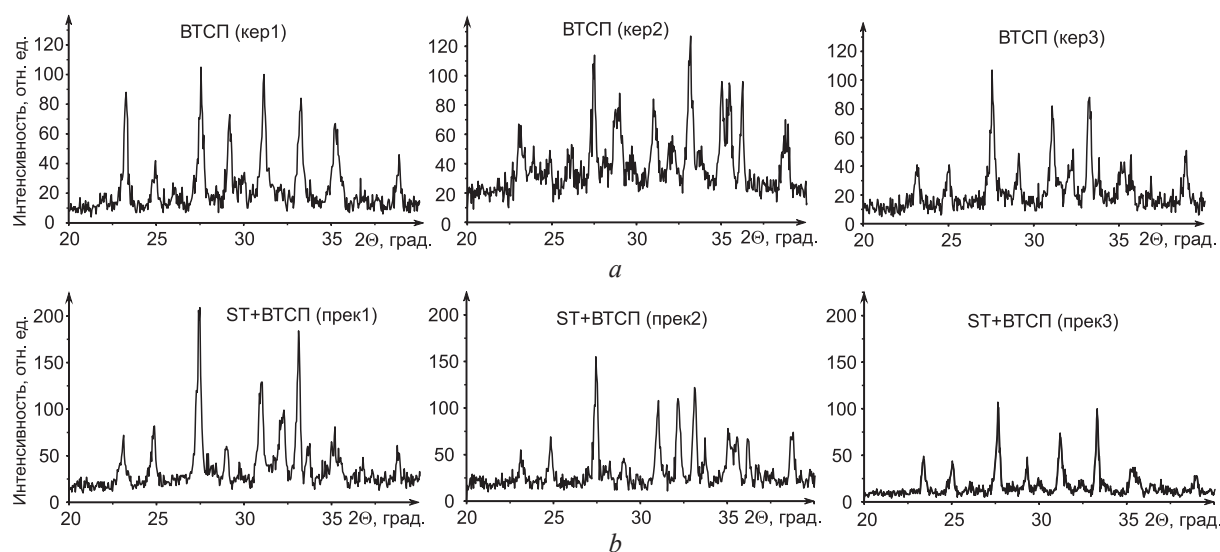
Рентгенофазовый анализ синтезированных составов  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n = 5, 9, 12$ ) показал, что синтезированные материалы являются многофазными, в них, наряду со сверхпроводящими фазами 2212 и 2223, присутствует незначительное количество исходных компонентов и промежуточных соединений. Из полученных материалов были изготовлены объемные керамические ВТСП-образцы, на которых проводили эксперименты для определения температуры перехода в сверхпроводящее состояние. Результаты исследования свойств сверхпроводящих образцов на основе  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Температурные зависимости намагниченности сверхпроводников на основе  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  для  $n$ :  $a - 5$ ;  $b - 9$ ;  $c - 12$

**Fig. 1.** Temperature dependences of the magnetization of superconductors based on  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  for  $n$ :  $a - 5$ ;  $b - 9$ ;  $c - 12$

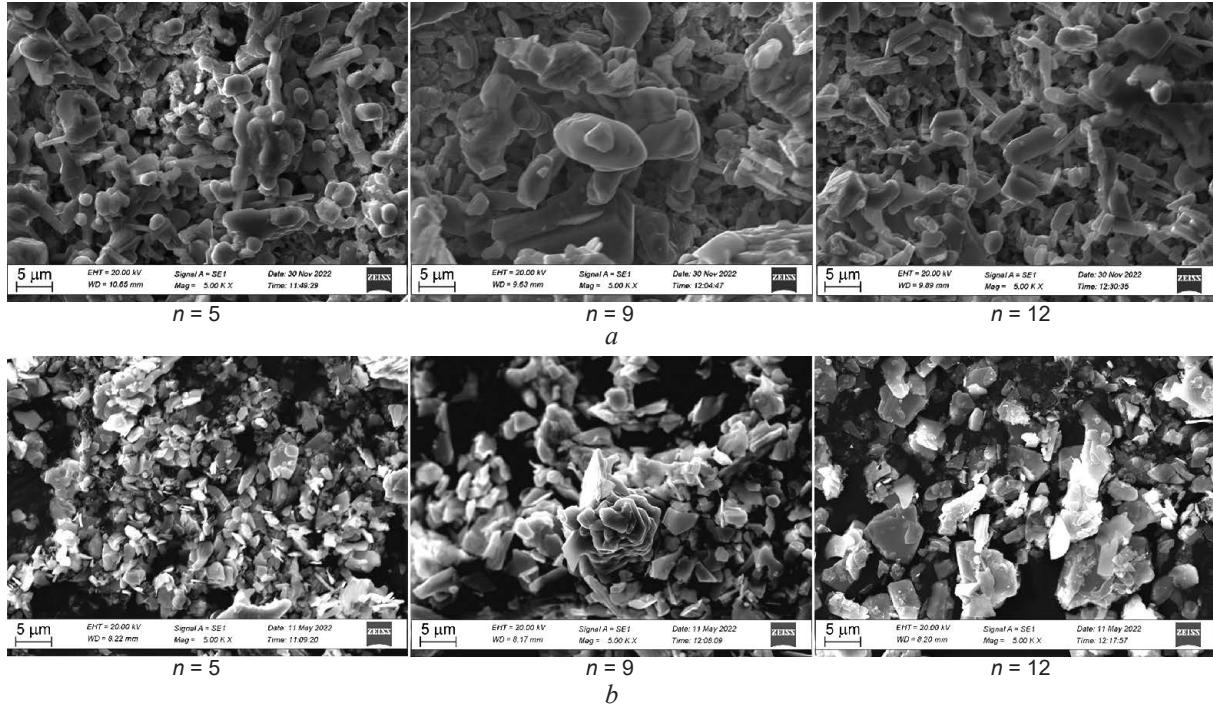
На рис. 2 изображены рентгенограммы образцов синтезированного сверхпроводящего материала (ВТСП) и композитного материала ST+ВТСП, полученного из прекурсоров. Из графиков видно, что поверхностный слой полностью состоит из рефлексов соединений Bi-Sr-Ca-Cu-O, и рефлексы компонентов слоя подложки не наблюдаются.



**Рис. 2.** Дифрактограммы образцов:  $a$  – ВТСП;  $b$  – ST+ВТСП (из прекурсоров): ВТСП – высокотемпературный сверхпроводник; ST –  $\text{SrTiO}_3$

**Fig. 2.** X-ray diffraction patterns of samples:  $a$  – HTSC;  $b$  – ST+HTSC (from precursors): HTSC – high temperature superconductor; ST –  $\text{SrTiO}_3$

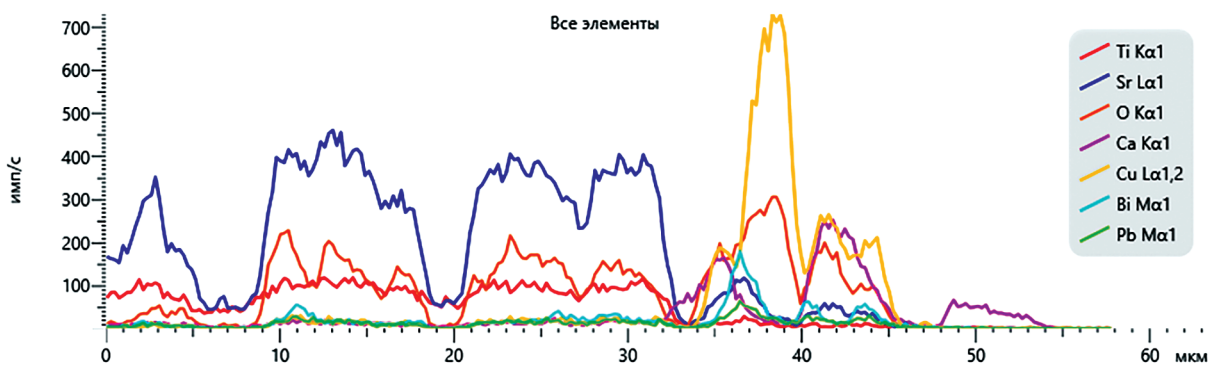
Данные рентгенофазового анализа показали, что основной фазой всех ВТСП-покрытий является фаза 2212. Кроме того, присутствуют фазы CuO и Ca<sub>2</sub>CuO. Только на рентгенограмме образца с нанесенным покрытием из керамики ВТСП (рис. 2, кер. 2) с  $n = 9$  присутствуют рефлексы, соответствующие фазе 2223. На рис. 3 приведены микрофотографии микроструктуры образцов СЭ–ВТСП-покрытия Bi<sub>1,7</sub>Pb<sub>0,3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>y</sub> ( $n = 5, 9, 12$ ).



**Рис. 3.** Микрофотографии поверхности образцов сегнетоэлектрик–высокотемпературный сверхпроводник: *a* – из синтезированного высокотемпературного сверхпроводящего материала; *b* – из прекурсоров  
**Fig. 3.** Microphotographs of the surface of ferroelectric samples – high-temperature superconductor: *a* – from synthesized high-temperature superconducting material; *b* – from precursors

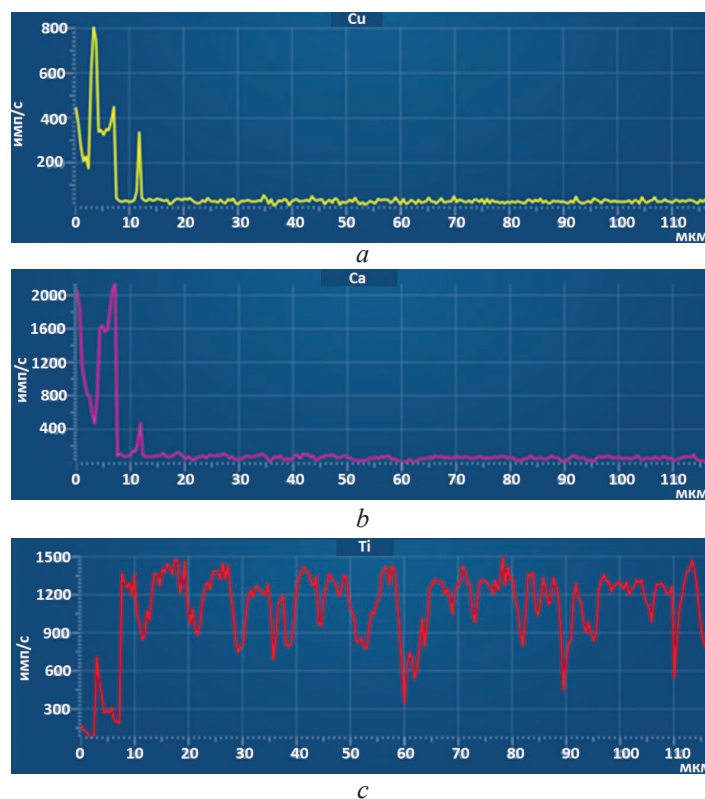
Исследования микроструктуры образцов СЭ–ВТСП показали, что керамическая подложка SrTiO<sub>3</sub> имеет плотную упаковку, средний размер зерен которой 1–2 мкм. ВТСП-пленки (рис. 3) обладают неоднородной зернистой структурой и представляют конгломерат хаотически ориентированных пластинчатых кристаллитов, характерных для 2212 фазы, с существенным разбросом по размерам зерен от 2 до 5 мкм и плоских кристаллитов неправильной формы CuO- и Ca<sub>2</sub>CuO<sub>3</sub>-фаз со средним размером зерен 1–3 мкм.

На рис. 4 представлен профиль поверхности, сделанный на изломе гибридной структуры сегнетоэлектрик (SrTiO<sub>3</sub>)–сверхпроводник (Bi<sub>1,7</sub>Pb<sub>0,3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>y</sub>). Из графиков видно, что на поверхности СЭ формируется слой сверхпроводника толщиной 10–12 мкм.



**Рис. 4.** Профиль поверхности гибридной структуры сегнетоэлектрик–сверхпроводник  
**Fig. 4.** Surface profile of a ferroelectric–superconductor hybrid structure

Для исследования границы перехода изучали спектры распределения элементов Cu и Ca, входящих в состав ВТСП-керамики, и Ti, входящего в состав СЭ-подложки. Сопоставление спектров позволяет определить, что размер границы перехода ВТСП–СЭ составляет 4 мкм. Из спектров распределения элементов, приведенных на рис. 5, можно сделать вывод, что на границе перехода не происходит межфазных взаимодействий подложки и нанесенных ВТСП-слоев. В табл. 1 приведены значения сопротивления ВТСП-покрытия на подложке из SrTiO<sub>3</sub>.



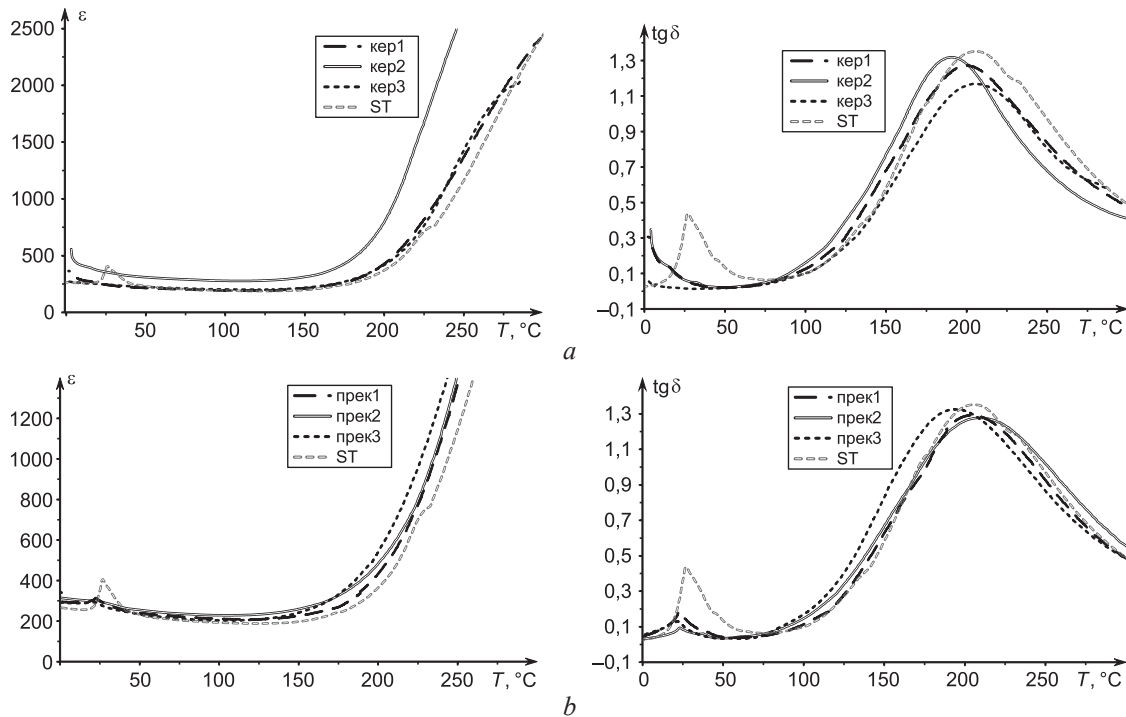
**Рис. 5.** Спектры распределения элементов на изломе гибридной структуры сверхпроводник (Bi<sub>1,7</sub>Pb<sub>0,3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>y</sub>)–сегнетоэлектрик (SrTiO<sub>3</sub>): *a* – Cu; *b* – Ca; *c* – Ti  
**Fig. 5.** Distribution spectra of elements at the break of the hybrid structure superconductor (Bi<sub>1,7</sub>Pb<sub>0,3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>4</sub>Cu<sub>5</sub>O<sub>y</sub>)–ferroelectric (SrTiO<sub>3</sub>): *a* – Cu; *b* – Ca; *c* – Ti

**Таблица 1.** Сопротивление высокотемпературного сверхпроводящего покрытия на подложке из SrTiO<sub>3</sub>  
**Table 1.** Resistance of high temperature superconducting coating on SrTiO<sub>3</sub> substrate

Сопротивление, Ом / Resistance, Ω	Состав гибридной структуры / Composition of the hybrid structure		
	SrTiO <sub>3</sub> + Bi <sub>1,7</sub> Pb <sub>0,3</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>4</sub> Cu <sub>5</sub> O <sub>y</sub>	SrTiO <sub>3</sub> + Bi <sub>1,7</sub> Pb <sub>0,3</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>8</sub> Cu <sub>9</sub> O <sub>y</sub>	SrTiO <sub>3</sub> + Bi <sub>1,7</sub> Pb <sub>0,3</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>11</sub> Cu <sub>12</sub> O <sub>y</sub>
R <sub>комнатная</sub> при комнатной температуре	820	45 · 10 <sup>6</sup>	50
R <sub>азот</sub> при температуре жидкого азота	1217	Более 200 · 10 <sup>6</sup>	25

Как видно из табл. 1, с понижением температуры (от комнатной температуры до температуры жидкого азота) сопротивление ВТСП-покрытия для составов Bi<sub>1,7</sub>Pb<sub>0,3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>(n-1)</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>y</sub>, с *n* = 5 и *n* = 9 увеличивается, в то время как для покрытия из ВТСП с *n* = 12 – уменьшается, хотя сверхпроводимость при температуре жидкого азота не наблюдается. Температурные зависимости диэлектрических свойств (относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь) образцов составов СЭ–ВТСП с покрытием, полученным из синтезированных составов Bi<sub>1,7</sub>Pb<sub>0,3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>(n-1)</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>y</sub>, (*n* = 5, 9, 12) и прекурсоров Bi<sub>1,7</sub>Pb<sub>0,3</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>(n-1)</sub>Cu<sub>n</sub>O<sub>y</sub>, (*n* = 5, 9, 12), представлены на рис. 6. Все образцы СЭ–ВТСП имеют более высокие значения диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь, чем образец SrTiO<sub>3</sub> без ВТСП-покрытия (рис. 6). Увеличение диэлектрических потерь обусловлено неравномерностью нанесенного

слоя ВТСП по площади подложки. Как видно из графиков рис. 6, для образцов с нанесенным слоем из ВТСП-прекурсоров наблюдается сдвиг фазового сегнетоэлектрического перехода в сторону меньших температур, а для образцов СЭ–ВТСП – сдвиг в сторону отрицательных значений.



**Рис. 6.** Температурные зависимости относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов сегнетоэлектрик–высокотемпературный сверхпроводник: *a* – из синтезированного высокотемпературного сверхпроводникового материала; *b* – из прекурсоров  
**Fig. 6.** Temperature dependences of relative dielectric constant and dielectric loss tangent of the samples ferroelectric–high-temperature superconductor: *a* – from a synthesized high-temperature superconducting material; *b* – from precursors

### Заключение

1. В результате проведенных экспериментов получены композиционные керамические образцы, где в качестве подложки использовали сегнетоэлектрик  $\text{SrTiO}_3$ , на который наносили слой сверхпроводника  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$ . Исследована граница перехода сегнетоэлектрик–сверхпроводник и установлено, что она составляет 4 мкм.

2. Сформированы структуры электрод–сегнетоэлектрик–сверхпроводник–электрод. Исследования диэлектрических параметров и их температурных зависимостей показали, что полученные образцы композитных керамических материалов сегнетоэлектрик–высокотемпературный сверхпроводник сохраняют сегнетоэлектрические свойства, причем нанесение сверхпроводящего слоя приводит к повышению значений диэлектрической проницаемости.

3. Установлено, что свойства гибридной структуры, для создания которой использовался высокотемпературный сверхпроводник  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{11}\text{Cu}_{12}\text{O}_y$ , значительно отличаются от свойств гибридной структуры, созданной с применением высокотемпературных сверхпроводников  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  с  $n = 5$  и  $n = 9$ . То есть с возрастанием числа купратных слоев свойства гибридной структуры изменяются. Из этого можно сделать вывод, что для получения композитных материалов с высокими электрофизическими параметрами надо использовать сверхпроводящие материалы  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  с  $n \geq 12$ .

### Список литературы

1. Ferrite-Superconductor Devices for Advanced Microwave Applications / G. F. Dionne [et al.] // IEEE Trans, on Microwave Theory and Techniques. 1996. Vol. 44, No 7. P. 1361–1368.
2. HTS Wireless Filters: Past, Present, and Future Performance / R. B. Hammond [et al.] // Microwave Journal. 1998. Vol. 41, No 10. P. 94–107.

3. Гершензон, М. Е. Итоги науки и техники / М. Е. Гершензон, М. А. Тарасов // Электроника. 1990. Т. 26. С. 38–75.
4. Фазовый состав и свойства сверхпроводящей керамики на основе прекурсоров  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ , полученных закалкой расплава на солнечной печи / Д. Д. Гуламова [и др.] // Журнал технической физики. 2009. Т. 79, вып. 6. С. 98–102.
5. Солнечная технология получения и исследование свойств керамики  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  ( $n = 3\div 5$ ) / Д. Д. Гуламова [и др.] // Новые огнеупоры. 2016. № 1. С. 35–38.

## References

1. Dionne G. F., Oates D. E., Temme D. H., Weiss J. A. (1996) Ferrite-Superconductor Devices for Advanced Microwave Applications. *IEEE Trans, on Microwave Theory and Techniques*. 44 (7), 1361–1368.
2. Hammond R. B., Scalarino D. J., Schrieffer J. R., Willemsen B. A. (1998) HTS Wireless Filters: Past, Present, and Future Performance. *Microwave Journal*. 41 (10), 94–107.
3. Gershenzon M. E., Tarasov M. A. (1990) Results of Science and Technology. *Electronics*. 26, 38–75 (in Russian).
4. Gulamova D. D., Uskenbaev D. E., Fantozzi J., Chigvinadze J. G., Magradze O. V. (2009) Phase Composition and Properties of Superconducting Ceramics Based on  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  Precursors Obtained by Quenching the Melt in a Solar Furnace. *Journal of Technical Physics*. 79 (6), 98–102 (in Russian).
5. Gulamova D. D., Turdiev Zh. Sh., Bobokulov S. Kh., Bakronov Kh., Nebesny A. (2016) Solar Technology for the Production and Study of the Properties of  $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_{(n-1)}\text{Cu}_n\text{O}_y$  Ceramics ( $n = 3\div 5$ ). *New Refractories*. (1), 35–38 (in Russian).

## Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

### Сведения об авторах

**Близнюк Л. А.**, зав. лаб. электронной керамики, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (НПЦ НАН Беларуси по материаловедению)

**Петроченко Т. П.**, науч. сотр. лаб. электронной керамики, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

**Летко А. К.**, науч. сотр. лаб. электронной керамики, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

**Каско В. И.**, мл. науч. сотр. лаб. электронной керамики, НПЦ НАН Беларуси по материаловедению

### Адрес для корреспонденции

220072, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 19–5  
Научно-практический центр  
Национальной академии наук Беларуси  
по материаловедению  
Тел.: +375 29 756-95-97  
E-mail: tanya-petr@physics.by  
Петроченко Татьяна Петровна

### Information about the authors

**Bliznyuk L. A.**, Head of the Laboratory of Electronic Ceramics, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science (SPC of the NAS of Belarus for Materials Science)

**Petrochenko T. P.**, Researcher at the Laboratory of Electronic Ceramics, SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

**Letko A. K.**, Researcher at the Laboratory of Electronic Ceramics, SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

**Kasko V. I.**, Junior Researcher at the Laboratory of Electronic Ceramics, SPC of the NAS of Belarus for Materials Science

### Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 19–5  
Scientific and Practical Center  
of the National Academy of Sciences  
of Belarus for Materials Science  
Tel.: +375 29 756-95-97  
E-mail: tanya-petr@physics.by  
Petrochenko Tatyana Petrovna