

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.3>**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ДЛЯ СПЕКАНИЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА НИОБАТОВ КОЛУМБИТА**

Научная статья

Абубакаров А.Г.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-6294-9877;¹ Академия гражданской защиты МЧС России имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, Химки, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (abubakarov12[at]mail.ru)

Аннотация

Добавки 1 мас.% V₂O₅, 1 мас.% CeO₂, 2 мас.% WO₃ и 0,5 мас.% CuO оказывали чрезвычайно изменчивое и непредсказуемое воздействие на спекание и диэлектрические потери ниобатов колумбита. Почти во всех случаях ϵ_r было увеличено, а τ_f значительно уменьшено, и максимальный Q также обычно уменьшался. Однако значения добротности более 20 000 ГГц часто получались при более низких температурах в плохо спеченных ниобатах. В CaNb₂O₆ + CuO, V₂O₅ или CeO₂ и CoNb₂O₆ + CuO или WO₃ значительно увеличенная добротность была получена при более низких температурах, в случае CaNb₂O₆ + CuO значительно выше, чем у чистого колумбита. CoNb₂O₆ + V₂O₅ или CuO давали 90% спеченных или слабо спеченных материалов с Qf > 10 000 или 25 000 ГГц.

Ключевые слова: диэлектрические резонаторы, колумбит, ниобаты, добавки для спекания.**INFLUENCE OF SINTERING ADDITIVES ON DIELECTRIC MICROWAVE PROPERTIES OF COLUMBITE NIOBATES**

Research article

Abubakarov A.G.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0001-6294-9877;¹ The Civil Defence Academy of EMERCOM of Russia named after Lieutenant General D.I. Mikhaylik, Khimki, Russian Federation

* Corresponding author (abubakarov12[at]mail.ru)

Abstract

Additions of 1 wt.% V₂O₅, 1 wt.% CeO₂, 2 wt.% WO₃ and 0.5 wt.% CuO had extremely variable and unpredictable effects on the sintering and dielectric loss of columbite niobates. In almost all cases, ϵ_r was increased and τ_f was significantly decreased, and the maximum Q was also generally decreased. However, goodness-of-fit values above 20 000 GHz were often obtained at lower temperatures in poorly sintered niobates. In CaNb₂O₆ + CuO, V₂O₅ or CeO₂ and CoNb₂O₆ + CuO or WO₃ significantly increased goodness of fit was obtained at lower temperatures, in the case of CaNb₂O₆ + CuO significantly higher than that of pure columbite. CaNb₂O₆ + V₂O₅ or CuO gave 90% sintered or weakly sintered materials with Qf > 10 000 or 25 000 GHz.

Keywords: dielectric resonators, columbite, niobates, sintering additives.**Введение**

Существует постоянно растущий спрос на дешевую, но, тем не менее, высокоэффективную диэлектрическую резонаторную керамику. Эти материалы должны обладать достаточно высокой относительной диэлектрической проницаемостью, чтобы обеспечить миниатюризацию компонента ($\epsilon_r > 10$), низкими диэлектрическими потерями на микроволновых частотах ($Q > 5000$, где $Q \sim 1 / \tan \delta$) и температурным коэффициентом резонансной частоты, близким к нулю, для температурной стабильности ($\tau_f < \pm 20$ ppm) [1]. Микроволновая керамика в настоящее время доступна с низким τ_f и Qf > 100 000 (Qf = Q x f_r). Однако они обычно изготавливаются из сложных перовскитов, таких как перовскиты смешанного металлического танталата BaZn_{0.33}Ta_{0.67}O₃ (BZT) и BaMg_{0.33}Ta_{0.67}O₃ (BMT) [2]. Для этого требуются довольно высокие температуры спекания (> 1400°C), а структуры и свойства сложных перовскитов оказывается трудно предсказать, и они сильно зависят от степени упорядоченности [3].

Бинарная ниобатная керамика с формулой MNb₂O₆ (M = ²⁺) в основном изоструктурна с орторомбическим минералом колумбитом [4]. Ниобаты колумбита переходного металла спекаются при температуре 1100-1200°C, что намного ниже, чем у перовскитов [5], а Q ниобатов колумбита выше, чем у соединений M²⁺Ta₂O₆, которые не имеют структуры колумбита [5]. Поскольку ниобий намного дешевле тантала, и поскольку химию бинарных соединений должно быть легче исследовать, чем химию сложных перовскитов, было проведено исследование этих бинарных ниобатов, и об этих результатах сообщалось ранее [6], наряду с исследованиями эффектов использования легирующих добавок снизить τ_f этих ниобатных соединений [7].

Из исследованных ниобатов колумбита четыре, в частности, продемонстрировали потенциал для коммерческого применения: это были ZnNb₂O₆ (ZnNO), MgNb₂O₆ (MgNO), CaNb₂O₆ (CaNO) и CoNb₂O₆ (CoNO). В этой статье подробно описывается легирование этой керамики различными агломерационными добавками в попытке снизить температуру спекания. Используемые добавки для спекания составляли 1 мас.% V₂O₅, 1 мас.% CeO₂, 2 мас.% WO₃ и 0,5 мас.% CuO, все из которых являются общепризнанными добавками для спекания в различных системах перовскита

или ниобата. Было обнаружено, что во многих случаях легирующие добавки также оказывали благоприятное влияние на микроволновые свойства, увеличивая ϵ_r , значительно уменьшая τ_f и часто существенно увеличивая коэффициент качества (Q), особенно во многих плохо спеченных образцах.

Методы и принципы исследования

Все образцы ниобата были приготовлены стандартным методом смешивания керамики и оксида (оксиды не менее 99,9% чистоты). Легированные образцы получали путем добавления необходимых количеств добавки для спекания к порошку ниобата, а затем сухого измельчения (без растворителя) легированного порошка в течение 24 часов для перемешивания. Порошки подвергали одноосному прессованию с образованием гранул (связующее не требовалось) под давлением 100 МПа с использованием матрицы диаметром 8 мм. Затем все образцы спекались на воздухе при температурах в диапазоне 1000-1400°C. Все образцы нагревали со скоростью 5°C мин⁻¹ до температуры спекания, спекали при этой температуре в течение 2 часов, а затем охлаждали до 40°C со скоростью 5°C мин⁻¹. Плотность образцов рассчитывалась исходя из их измеренного объема и массы.

Коэффициент добротности (Q) и относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ_r) были измерены с помощью векторного сетевого анализатора Hewlett-Packard HP8720D, используя резонансный режим TE₀₁₈ образца, и были скорректированы на любые потери, вызванные стенками полости или измерительным оборудованием [8], [9], [10], [11]. Измерения проводились на образцах после обжига при комнатной температуре. Результаты приведены в виде Qf, то есть Q x резонансная частота (f_r), и f_r во всех случаях находилась в диапазоне 8,5-9,5 ГГц. Температурный коэффициент резонансной частоты (τ_f) был получен путем непрерывного измерения изменения f_r образца в диапазоне от 250 до 300 К. Затем была произведена линейная подгонка к этим данным, при этом коэффициент корреляции давал уровень достоверности более 99,99%.

Основные результаты

Графики спекания, Qf и ϵ_r показаны на рисунках 1-4 для чистых колумбитов и для легированных образцов до точки, при которой они расплавились. Обычно это происходило при температуре выше, которая давала самую высокую добротность в чистых колумбитах, но перед этим у них часто проявлялись признаки размягчения.

Степень спекания для чистых и легированных образцов ZnNO показана на рисунке 1(а). Можно видеть, что только 1 мас.% V₂O₅ и 0,5 мас.% CuO улучшали спекание ZnNO в какой-либо степени, и что только добавление CuO приводило к получению значительно более плотного продукта при температурах ниже 1200°C, обычной температуре спекания для ZnNO [6]. Даже тогда эффект заключался лишь в снижении температуры спекания примерно на 50°C. Все добавки для спекания оказывали вредное воздействие на Q, снижая его менее чем до половины от значения чистого ZnNO, обжигаемого до 1200°C, как хорошо видно на рисунке 1(б), при этом WO₃ был особенно низким.

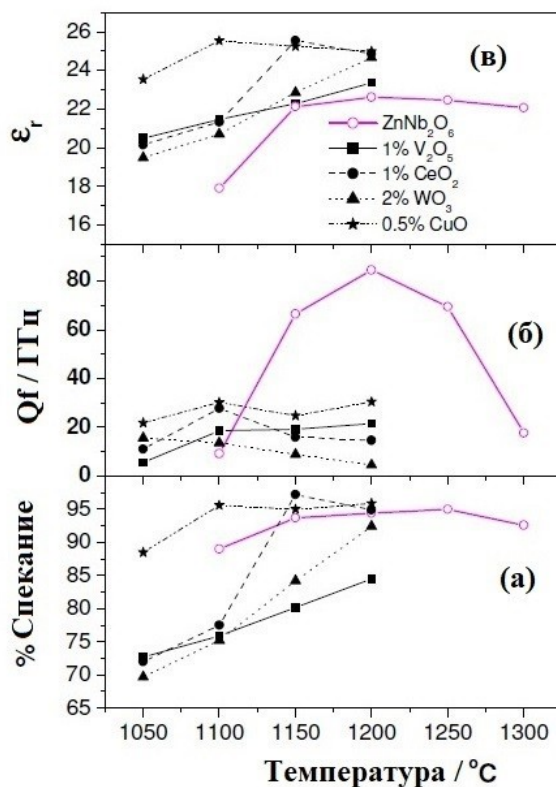


Рисунок 1 - % спекания, Qf и ϵ_r в зависимости от температуры спекания для ZnNb₂O₆, легированного V₂O₅, CeO₂, WO₃ и CuO

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.3.1>

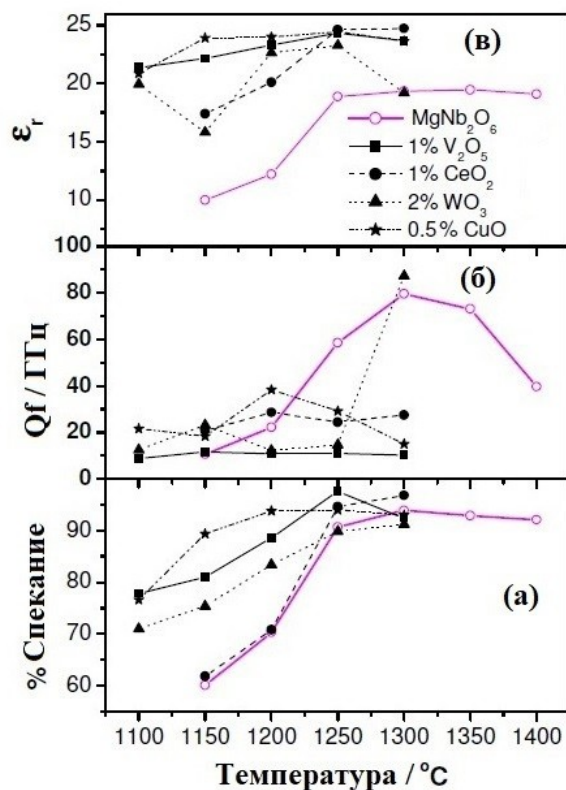


Рисунок 2 - % спекания, Qf и ϵ_r в зависимости от температуры спекания для $MgNb_2O_6$ легированного V_2O_5 , CeO_2 , WO_3 и CuO

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.3.2>

С $MgNO$ все добавки улучшали спекание (рис. 2(a)), особенно 0,5 мас.% CuO , что давало продукт плотностью 90% всего при 1150°C, что на 150°C ниже обычной температуры спекания [6]. Однако легирующие добавки снова оказали вредное влияние на добротность, почти во всех случаях снизив ее ниже половины добротности чистого колумбита (рис. 2(б)), исключением было 2 мас.% WO_3 при 1300°C, что дало значительно увеличенную добротность 87 000 ГГц, даже выше, чем у чистого колумбита чистый $MgNO$. Причина этого выясняется, и может быть связана с формированием второй фазы. Кроме того, $MgNO + 0,5$ мас.% CuO дает 94%-ную плотность продукта при 1200°C с полезной добротностью 38 000 ГГц.

Хотя добавление CeO_2 и WO_3 приводило к получению плохо спеченных образцов только при добавлении к $CaNO$, как 1 мас.% V_2O_5 , так и 0,5 мас.% CuO улучшали спекание при более низких температурах, причем V_2O_5 был особенно эффективен и приводил к получению продукта плотностью более 90% всего при 1100°C (рис. 3(a)). Следует отметить, что, хотя плотности образцов, легированных V_2O_5 и CuO , по-видимому, падают выше 1200°C, образцы начинали плавиться при этих температурах, и поэтому плотности могут быть занижены. Все легирующие добавки давали улучшенные значения добротности ниже 1350°C (рис. 3(б)). Результаты для $CaNO$, легированного 1 мас.% CeO_2 , особенно интересны, учитывая, насколько плохо были спечены образцы в диапазоне 1200-1300°C, при $Qf = 35\ 000$ -45 000 ГГц в образцах плотностью всего 42-62%. 1 мас.% V_2O_5 неизменно давал значения Qf примерно в два раза выше, чем у чистого $CaNO$ -колумбита, пока он не расплавился выше 1300°C, и это было лучше, чем у образца, легированного 0,5 мас.% CuO , который давал Qf более 65 000 ГГц в диапазоне 1200-1250°C.

Добавки как V_2O_5 , так и CuO улучшали спекание $CoNO$, в то время как CeO_2 и WO_3 имели обратный эффект (рис. 4(a)). 1 мас.% V_2O_5 был особенно эффективен, придавая продуктам плотность более 90% при температуре выше 1050°C – как раз в пределах диапазона. К сожалению, V_2O_5 также оказал наиболее негативное влияние на добротность $CoNO$, в результате чего значения Qf были ниже половины значений чистого колумбита. Однако 2 мас.% CeO_2 и 0,5 мас.% CuO показали лучшие результаты при значениях добротности более 20 000 ГГц в диапазоне 1000-1150°C (рис. 4(б)). CuO был особенно интересен, поскольку он дал материал с Qf более 25 000 ГГц при 1000°C, несмотря на то, что плотность образца составляла всего 68%.

Как видно на рисунках 1(с) – 4(с), почти все добавки имели эффект увеличения диэлектрической проницаемости чистых колумбитов, за исключением CeO_2 и WO_3 с $CaNO$ и WO_3 с $CoNO$. Как и ожидалось, диэлектрические проницаемости в целом увеличивались с плотностью, за исключением $MgNO + 2$ мас.% WO_3 (рис. 2(с)), у которого наблюдалось падение ϵ_r (поскольку Q значительно увеличилось) при 1300°C.

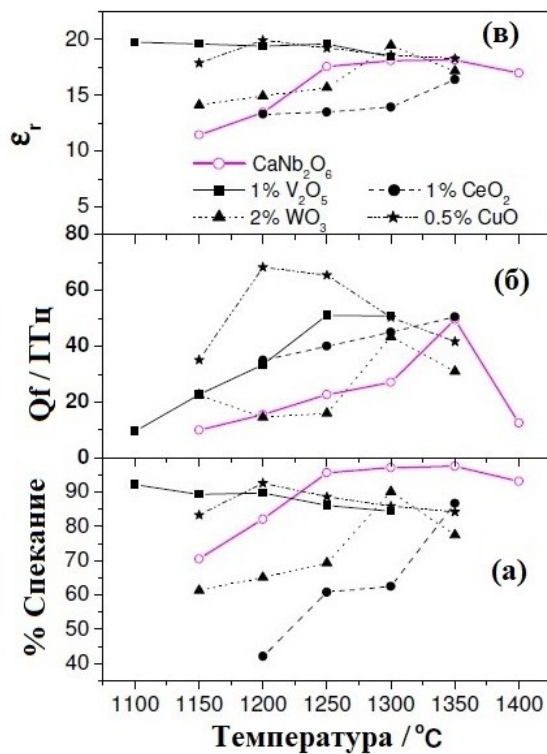


Рисунок 3 - % спекания, Qf и ϵ_r в зависимости от температуры спекания для CaNb_2O_6 , легированного V_2O_5 , CeO_2 , WO_3 и CuO

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.3.3>

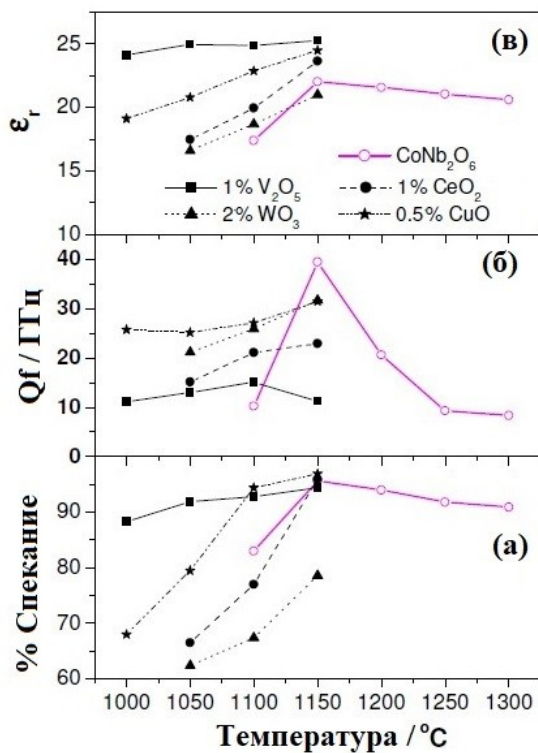


Рисунок 4 - % спекания, Qf и ϵ_r в зависимости от температуры спекания для CoNb_2O_6 , легированного V_2O_5 , CeO_2 , WO_3 и CuO

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.3.4>

Заключение

Добавки 1 мас.% V_2O_5 , 1 мас.% CeO_2 , 2 мас.% WO_3 и 0,5 мас.% CuO оказывали чрезвычайно изменчивое и непредсказуемое воздействие на спекание и диэлектрические потери ниобатов колумбита. Почти во всех случаях ϵ_r было увеличено, а τ_f значительно уменьшено, и максимальный Q также обычно уменьшался. Однако значения добротности более 20 000 ГГц часто получались при более низких температурах в плохо спеченных ниобатах. В $CaNb_2O_6 + CuO$, V_2O_5 или CeO_2 и $CoNb_2O_6 + CuO$ или WO_3 значительно увеличенная добротность была получена при более низких температурах, в случае $CaNb_2O_6 + CuO$ значительно выше, чем у чистого колумбита. $CoNb_2O_6 + V_2O_5$ или CuO давали 90% спеченных или слабо спеченных материалов с $Q_f > 10\ 000$ или 25 000 ГГц.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Садыков Х.А. Влияние ионов переходных 3d-металлов на формирование электрофизических свойств поликристаллических материалов на основе ниобатов щелочных металлов / Х.А. Садыков, И.А. Вербенко, Л.А. Резниченко и др. // Известия Российской Академии Наук. Серия физическая. — 2013. — Т. 77. — № 9. — С. 1253-1255. — DOI: 10.7868/S0367676513090391.
2. Абубакаров А.Г. Радиопоглощающие свойства в 4-х компонентной системе 0,98 0,98 (XPBTIO3 – YPBZRO3 – ZPBNB2/3MG1/3O3) – 0,02PBGEO3 / А.Г. Абубакаров, А.А. Павелко, Л.А. Шилкина и др. // Четвёртый международный междисциплинарный молодежный симпозиум «Физика бесвинцовых пьезоактивных и родственных материалов (анализ современного состояния и перспективы развития)». — Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2015. — С. 39-43. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24026688_79806802.pdf (дата обращения: 10.04.2023).
3. Сторчевой В.Ф. Электрооборудование транспортно-технологических средств и систем: Учебное пособие к лабораторным работам / В.Ф. Сторчевой, С.В. Сучугов, П.М. Уманский. — Москва: Редакция журнала "Механизация и электрификация сельского хозяйства", 2017. — 122 с.
4. Толмачев Г.Н. Исследование пленок Ва-Sr-Nb-O (BSN), приготовленных при помощи разряда с убегающими электронами / Г.Н. Толмачев, И.М. Алиев, А.П. Ковтун и др. // Вестник Южного научного центра РАН. — 2014. — № 4. — С. 29-33. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22670694> (дата обращения: 10.04.2023).
5. Алиев И.М. Метод контроля оптических характеристик тонких прозрачных пленок с использованием угловой оптической рефлектометрии / И.М. Алиев, С.П. Зинченко, А.П. Ковтун и др. // Журнал технической физики. — 2015. — № 10. — С. 145-147. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24196229> (дата обращения: 10.04.2023).
6. Абубакаров А.Г. Особенности свч-поглощения электромагнитного излучения сегнетоэлектрическими ниобиевыми сложными оксидами / А.Г. Абубакаров, Л.А. Резниченко, М.Б. Мануилов и др. // Известия вузов. Физика. — 2015. — Т. 58. — № 10-3. — С. 88-90. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26459783_34477212.pdf (дата обращения: 10.04.2023).
7. Абубакаров А.Г. Спектры поглощения свч-мощности в керамиках твёрдых растворов на основе VIFEOJ и NANB03 / А.Г. Абубакаров, А.В. Павленко, Л.А. Резниченко и др. // Физика бесвинцовых пьезоактивных и родственных материалов. Анализ современного состояния и перспективы развития (LFPM-2013) / под ред. Л.А. Резниченко. — Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский научный центр Высшей Школы ЮФУ, 2013. — С. 106-112. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35150774> (дата обращения: 10.04.2023).
8. Абубакаров А.Г. Диссипативные характеристики нестехиометрического ниобата натрия / А.Г. Абубакаров, Ю.М. Нойкин, М.Б. Мануилов и др. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. — 2014. — Т. 14. — № 2. — С. 107-109. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23420939_67849557.pdf (дата обращения: 10.04.2023).
9. Абубакаров А.Г. Корреляционные связи состав – структура – радиопоглощающие свойства в 4-компонентной системе 0,98 (XPBTIO3-YPBZRO3-ZPBNB2/3MG1/3O3)-0,02PBGEO3 / А.Г. Абубакаров, А.А. Павелко, Л.А. Шилкина и др. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. — 2015. — № 4(128). — С. 43-47. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25593805_91209237.pdf (дата обращения: 10.04.2023).
10. Абубакаров А.Г. СВЧ-поглощение в системах твердых растворов PB(TI, ZR)O3 и PBNB2/3MG1/3O3-PBTIO3 / А.Г. Абубакаров, Л.А. Резниченко, М.Б. Мануилов и др. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. — 2016. — № 1(129). — С. 65-69. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26188374_66814095.pdf (дата обращения: 10.04.2023).
11. Абубакаров А.Г. Нетоксичные интеллектуальные материалы с участием ниобатов щелочных металлов и экологически безопасная технология их получения как основа производства высокоэффективных силовых электромеханических преобразователей / А.Г. Абубакаров, И.А. Вербенко, Л.А. Шилкина и др. // Экология промышленного производства. — 2015. — № 4(92). — С. 43-47. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25654893_73138101.pdf (дата обращения: 10.04.2023).

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sadykov H.A. Vliyanie ionov perehodnyh 3d-metallov na formirovanie elektrofizicheskikh svoystv polikristallicheskih materialov na osnove niobatov shelochnykh metallov [Effect of 3D Transition Metal Ions on the Formation of Electrophysical Properties of Polycrystalline Materials Based on Alkali Metal Niobates] / H.A. Sadykov, I.A. Verbenko, L.A. Reznichenko et al. // Izvestija Rossijskoj Akademii Nauk. Serija fizicheskaja [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. — 2013. — Vol. 77. — № 9. — P. 1253-1255. — DOI: 10.7868/S0367676513090391. [in Russian]
2. Abubakarov A.G. Radiopogloschajusche svojstva v 4-h komponentnoj sisteme 0.98 (XPBTIO₃ – YPBZRO₃ – ZPBNB₂/3MG₁/3O₃) – 0.02PBGE₃ [Microwave Properties of Four Component System 0.98 (XPBTIO₃ – YPBZRO₃ – ZPBNB₂/3MG₁/3O₃) – 0.02PBGE₃] / A.G. Abubakarov, A.A. Pavelko, L.A. Shilkina et al. // CHetvyortyj mezhdunarodnyj mezhdisciplinarnyj molodezhnyj simpozium "Fizika bessvincovykh p'ezoaktivnykh i rodstvennykh materialov (analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektivy razvitiya)" [Fourth International Interdisciplinary Youth Symposium "Physics of Piezoactive and Relative Materials (analysis of the modern state and development prospects)"]. — Rostov-on-Don: South Federal University, 2015. — P. 39-43. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_24026688_79806802.pdf (accessed: 10.04.2023). [in Russian]
3. Storchevoi V.F. Elektrooborudovanie transportno-tekhnologicheskikh sredstv i sistem: Uchebnoe posobie k laboratornym rabotam [Electrical Equipment of Transport and Technological Facilities and Systems: A manual for laboratory work] / V.F. Storchevoi, S.V. Suchugov, P.M. Umansky. — Moscow: Editorial Board of the journal "Mechanization and Electrification of Agriculture", 2017. — 122 p. [in Russian]
4. Tolmachev G.N. Issledovanie plenok Ba-Sr-Nb-O (BSN), prigotovlennykh pri pomoschi razrjada s ubegajuschimi elektronami [Investigation of Ba-Sr-Nb-O (BSN) Films Prepared by Runaway Electron Discharge] / G.N. Tolmachev, I.M. Aliev, A.P. Kovtun et al. // Vestnik Juzhnogo nauchnogo centra RAN [Bulletin of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. — 2014. — № 4. — P. 29-33. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22670694> (accessed 10.04.2023). [in Russian]
5. Aliev I.M. Metod kontrolja opticheskikh harakteristik tonkih prozrachnykh plenok s ispol'zovaniem uglovoj opticheskoy reflektometrii [A Method for Controlling the Optical Characteristics of Thin Transparent Films Using Angular Optical Reflectometry] / I.M. Aliev, S.P. Zinchenko, A.P. Kovtun et al. // Zhurnal tehnicheckoj fiziki [Journal of Technical Physics]. — 2015. — № 10. — P. 145-147. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24196229> (accessed: 10.04.2023). [in Russian]
6. Abubakarov A.G. Osobennosti svch-pogloschenija elektromagnitnogo izluchenija segnetoelektricheskimi niobievymi slozhnymi oksidami [Features of Microwave Absorption of Electromagnetic Radiation by Ferroelectric Niobium Complex Oxides] / A.G. Abubakarov, L.A. Reznichenko, M.B. Manuilov et al. // Izvestija vuzov. Fizika [News from Universities. Physics]. — 2015. — Vol. 58. — № 10-3. — P. 88-90. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26459783_34477212.pdf (accessed: 10.04.2023). [in Russian]
7. Abubakarov A.G. Spektry pogloschenija svch-moschnosti v keramikah tverdykh rastvorov na osnove BIFEOJ i NANB₃O₇ [Microwave Power Absorption Spectra in Solid Solution Ceramics Based on BIFEOJ and NANB₃O₇] / A.G. Abubakarov, A.V. Pavlenko, L.A. Reznichenko et al. // Fizika bessvincovykh p'ezoaktivnykh i rodstvennykh materialov. Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektivy razvitiya (LFPM-2013) [Physics of Lead-free Piezoactive and Related Materials. Analysis of the Current Status and Development Prospects (LFPM-2013)] / edited by L.A. Reznichenko. — Rostov-on-Don: North Caucasus Research Centre of the Higher School of South Federal University, 2013. — P. 106-112. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35150774> (accessed: 10.04.2023). [in Russian]
8. Abubakarov A.G. Dissipativnye harakteristiki nestehiometricheskogo niobata natrija [Dissipative Characteristics of Nonstichiometric Sodium Niobate] / A.G. Abubakarov, Ju.M. Nojkin, M.B. Manuilov et al. // Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroenija [Fundamental Problems of Radio-electronic Instrument Making]. — 2014. — Vol. 14. — № 2. — P. 107-109. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_23420939_67849557.pdf (accessed: 10.04.2023). [in Russian]
9. Abubakarov A.G. Korreljatsionnye svjazi sostav – struktura – radiopogloschajusche svojstva v 4-komponentnoj sisteme 0,98 (XPBTIO₃-YPBZRO₃-ZPBNB₂/3MG₁/3O₃)-0,02PBGE₃ [Correlation Relations Composition – Structure – Radio Absorbing Properties in a 4-component System 0.98 (XPBTIO₃-YPBZRO₃-ZPBNB₂/3MG₁/3O₃)-0.02PBGE₃] / A.G. Abubakarov, A.A. Pavelko, L.A. Shilkina et al. // Oboronnyj kompleks – nauchno-tehnicheckomu progressu Rossii [Defense Complex – to the Scientific and Technical Progress of Russia]. — 2015. — № 4(128). — P. 43-47. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25593805_91209237.pdf (accessed: 10.04.2023). [in Russian]
10. Abubakarov A.G. SVCh-pogloschenie v sistemah tverdykh rastvorov PB(TI, ZR)₃O₇ i PBNB₂/3MG₁/3O₃-PBTIO₃ [Microwave Absorption in Systems of Solid Solutions PB(TI, ZR)₃O₇ and PBNB₂/3MG₁/3O₃-PBTIO₃] / A.G. Abubakarov, L.A. Reznichenko, M.B. Manuilov et al. // Oboronnyj kompleks – nauchno-tehnicheckomu progressu Rossii [Defense Complex – to the Scientific and Technical Progress of Russia]. — 2016. — № 1(129). — P. 65-69. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26188374_66814095.pdf (accessedL 10.04.2023). [in Russian]
11. Abubakarov A.G. Netoksichnye intellektual'nye materialy s uchastiem niobatov shelochnykh metallov i ekologicheski bezopasnaja tehnologija ih poluchenija kak osnova proizvodstva vysokoeffektivnykh silovykh elektromehanicheckih preobrazovatelej [Non-toxic Intelligent Materials with Participation of Alkali Metal Niobates and Environmentally Safe Technology for Their Production as the Basis for the Production of Highly Efficient Power Electromechanical Converters] / A.G. Abubakarov, I.A. Verbenko, L.A. Shilkina et al. // Jekologija promyshlennogo proizvodstva [Ecology of Industrial Production]. — 2015. — № 4(92). — P. 43-47. — URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_25654893_73138101.pdf (accessed: 10.04.2023). [in Russian]