**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

УДК 669. /539.5 – 536.6/

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ANANBO3 + BKNBO3 + CCUNB2O6. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 25 °С

#### ССД СНГ 359–2021 (ГСССД 359–2019)

(**ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, ШИФР ТЕМЫ:** [**RU.3.008-20**](http://www.mgs.gost.ru/TKSUGGEST/mgsprogact.nsf/ByUNID/E336D4892C3CC6BF44257BCE003A3FE5?OpenDocument&CountryCode=RU&ViewName=ByMTCOfSelectedCountry&Category=RU%20180&Start=1&Count=12)**21)**

РАЗРАБОТАНЫ Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК-180 «Межгосударственная служба стандартных справочных данных»

ВНЕСЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

АВТОРЫ: Л.А. Резниченко, И.А. Вербенко, М. В. Таланов, А.В. Павленко, С.И. Дудкина

СОГЛАСОВАНЫ С национальными органами по стандартизации стран СНГ:

РЕКОМЕНДОВАНЫ Научно-технической комиссией по метрологии Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации

ПРИНЯТЫ Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 2021 г., № –2021)

УДК 669. /539.5 – 536.6/

**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

|  |  |
| --- | --- |
| **Таблицы стандартных справочных данных** |  |
| Пьезокерамические материалы aNaNbO3 + bKNbO3 + cCuNb2O6. Диэлектрические и пьезоэлектрические характеристики при температуре 25 °С | **ССД СНГ**  **359–2021**  **ГСССД**  **359–2019** |
| **Tables of Standard Reference Data** |  |
| Piezoceramic materials aNaNbO3+bKNbO3 + cCuNb2O6. Dielectric and piezoelectric characteristics at the temperature 25 °C | **SSD CNG**  **359–2021**  **GSSSD**  **359–2019** |

**АННОТАЦИЯ**

В таблицах представлены стандартные справочные данные о диэлектрических и пьезоэлектрических характеристиках сегнетоэлектриков на основе ниобатов натрия, калия и меди при температуре 25 оС, не содержащие в своей структуре токсичные элементы (в частности, свинец). Данные материалы обладают высокими значениями механической добротности (более 1000), коэффициента электромеханической связи планарной моды колебаний (более 0,15), пьезоэлектрического коэффициента d33 (более 50 пКл/Н), пьезоэлектрического коэффициента |d31| (более 10 пКл/Н), относительной диэлектрической проницаемости (более 300) и могут быть использованы в силовых и высокочастотных ультразвуковых устройствах.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Основная часть 6

Приложение А 9

2. Методы получения образцов 11

3. Методы исследования образцов 12

4. Экспериментальные результаты. Обсуждение 17

5. Оценка достоверности справочных данных 21

6. Оценка стандартного отклонения среднего значения 22

Список литературы 23

**1. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Настоящие таблицы стандартных справочных данных (ССД) являются новыми и распространяются на диэлектрические и пьезоэлектрические характеристики пьезокерамических материалов aNaNbO3 + bKNbO3 + cCuNb2O6 при температуре 25 °С. Основой для составления таблиц явились данные, приведенные в таблицах А2-А3 приложения А.

Табличные данные рассчитаны согласно ОСТ 11 0444-87 [1] с применением методики ГСССД 183-2011 [2] отображают значения следующих характеристик пьезокерамических материалов при температуре *Т* = 25 оС.

1. Относительная диэлектрическая проницаемость (ε/ε0) – отношение индуцированного в электрическом поле заряда на обкладках конденсатора, заполненного диэлектриком, к заряду, индуцированному в том же поле на обкладках того же конденсатора с вакуумным промежутком. Расчеты проводили по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1) |

где *С*0  – емкость образца (Ф); *d*- диаметр образца (м); *t*- толщина образца (м);

ε0 – диэлектрическая постоянная, равная 8.85·10-12 Ф/м.

1. Относительная диэлектрическая проницаемость, , поляризованного образца в форме диска в направлении, параллельном его оси поляризации, в условиях постоянного давления.
2. Тангенс угла диэлектрических потерь (tg*δ*) – тангенс угла между векторами плотностей переменного тока проводимости и тока смещения диэлектрика на комплексной плоскости.
3. Коэффициент электромеханической связи планарной моды колебаний (*Kp*) – показатель эффективности преобразования электрической энергии в механическую энергию или преобразования механической в электрическую. Расчеты проводили по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (2) |

где *fr1,* *fa1* – частоты резонанса и антирезонанса для первой гармоники (Гц),

*fr3* –частота резонанса для третьей гармонике (Гц),

σ и η – планарный коэффициент Пуассона и наименьший положительный корень частотного уравнения Бесселя, соответственно в соответствие с ОСТ 11 0444-87 [1].

1. Пьезоэлектрический модуль (*dij*,пКл/Н) – наведенная поляризация в направлении *i* на единицу механического давления, приложенного в направлении *j,* или величина деформации в направлении *i* на единицу напряженности электрического поля, приложенного в направлении *j*; направление 3 – параллельно оси поляризации, 1 – перпендикулярно оси поляризации. Расчеты проводили по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (3) |

где *ρ* – измеренная плотность образца, определяемая методом гидростатического взвешивания в октане (г/м3);

*r* – радиус образца (м).

*d33 –* измеряли квазистатическим методом с помощью YE2730A d33 METER.

1. Механическая добротность планарной моды колебаний (*Qm*) – отношение реактивного сопротивления к сопротивлению последовательной электрической цепи, эквивалентной пьезокерамическому элементу. Расчеты проводили по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (4) |

где *R* – сопротивления образца (Ом), измеренное на частоте резонанса первой гармоники.

В таблице 1 приводятся стандартные справочные данные диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик пьезокерамических материалов NKCNO-1 и NKCNO-2 при *Т* = 25 оС.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Таблица 1 – Cтандартные справочные данные о диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик материалов при *Т* = 25 оС. | | |
| Параметр | NKCNO-1 | NKCNO-2 |
| Na2O, масс % | 13,87 | 14,87 |
| K2O,масс % | 5,62 | 4,93 |
| Nb2O5, масс % | 79,32 | 79,51 |
| CuO, масс % | 1,19 | 1,19 |
| *ε*тзз/*ε*о | 300 | 305 |
| *К*р | 0,17 | 0,17 |
| |*d*31|, пКл/Н | 13 | 14 |
| *d*33,,пКл/Н | 50 | 53 |
| *Q*M | 1050 | 1045 |
| *T*c (*f*=1 кГц), °C | 395 | 392 |

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

(справочное)

Пьезоэлектрические Pb-содержащие керамические материалы находят широкое применение в устройствах медицинской диагностики, нефтегазовой отрасли, СВЧ технике, а в последнее десятилетие – и в микроэлектромеханических система (МЭМС). Это обусловлено, прежде всего, реализации в них высоких значений диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик. Однако, усиление требований экологической безопасности в данном направлении физического материаловедения (Директива 2002/95/EC Европейского парламента с пересмотром от 27 января 2003 года об использовании опасных материалов в электронике и электронных приборах) привело к необходимости создания новых экологически чистых функциональных пьезоэлектрических материалов, которые могут эффективно использоваться в современной технике. В связи с этим в последнее десятилетие ведущими мировыми разработчиками пьезоэлектрических материалов, в том числе и сотрудниками отдела интеллектуальных материалов и нанотехнологии Научно-исследовательского института физики Южного федерального университета, ведутся интенсивные работы в данном направлении.

В частности, в ходе изучения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик пьезокерамических материалов состава aNaNbO3 + bKNbO3 + cCuNb2O6 были выделены твердые растворы, которые обладали высокими значениями механической добротности, Qm, (более 1000), коэффициента электромеханической связи планарной моды колебаний, Kp, (более 0.15), пьезоэлектрического коэффициента d33 (более 50), пьезоэлектрического коэффициента |d31| (более 10), относительной диэлектрической проницаемости, ε33Т/ε0, (300…500). Совокупность полученных параметров делает их перспективными для использования в силовых и высокочастотных ультразвуковых устройствах, в частности ультразвуковых пьезодвигателях и промышленных измельчителях.

Однако на данный момент для них отсутствуют аттестованные справочные данные при комнатной температуре.

В НИИ физики ЮФУ были проведены обширные исследования свойств керамик в соответствии с ОСТ 11 0444-87 [1] с использованием аттестованных методик ГСССД МЭ 183-2011 [2] и МЭ 184-2011 [3]. Для разработки ССД были отобраны результаты исследований характеристик восьми образов каждого из аттестуемых составов, полученных с использованием одинаковых регламентов синтеза и спекания (температура, Т, время, τ) (таблица А1).

Таблица А1 – Концентрации компонентов, регламенты синтеза и спекания аттестуемых керамик

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметр | NKCNO-1 | NKCNO-2 |
| Na2O, масс % | 13,87 | 14,87 |
| K2O,масс % | 5,62 | 4,93 |
| Nb2O5, масс % | 79,32 | 79,51 |
| CuO, масс % | 1,19 | 1,19 |
| Tсинт., °C  τсинт.,ч. | 700-1050  5 | |
| Тспек., °C  τспек., ч. | 1050-1130  2 | |

**2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ**

*Регламенты синтеза и спекания*

Материал изготавливался по обычной керамической технологии следующим образом. В качестве исходных реагентов использовались гидрокарбонаты, карбонаты и оксиды следующих квалификаций: Na2O – «чда», K2O– «ч», Nb2O5 – «НбО-ПT», CuO – «хч».

*1. Пример изготовления пьезоэлектрического материала NKCNO-1*

Синтез осуществлялся путем однократного обжига смесей, предварительно полученных ниобатов NaNbO3 и KNbO3 и колумбита CuNb2O6. В качестве исходных реагентов выступали оксиды, мас.%: Na2O = 13.87, K2O = 5.62, Nb2O5 = 79.32, CuO = 1.19. Температура обжига *Т*синт.= (750-1050)°C, при длительности изотермической выдержки τ=5ч. Спекание образцов в виде столбиков ⌀12мм, высотой 15÷18 мм осуществлялся при *Т*сп.=(1050-1130)°C, длительность изотермической выдержки τ = 2ч. Металлизация (нанесение электродов) производилось путем нанесения на плоские поверхности предварительно сошлифованных до толщины 1 мм образцов серебросодержащей пасты и последующего ее вжигания при температуре *Т*вжиг.= 800 °C в течение 0.5 ч. Образцы поляризовали в полиэтиленсилоксановой жидкости при температуре 410 K в течение 40 мин. в постоянном электрическом поле напряженностью 3 кВ/см.

*2. Пример изготовления пьезоэлектрического материала NKCNO-2*

Синтез осуществлялся путем однократного обжига смесей, предварительно полученных ниобатов NaNbO3 и KNbO3 и колумбита CuNb2O6. В качестве исходных реагентов выступали оксиды, мас.%: Na2O = 14.87, K2O = 4.93, Nb2O5 = 79.51, CuO = 1.19. Температура обжига *Т*синт.= (750-1050)°C, при длительности изотермической выдержки τ=5ч. Спекание образцов в виде столбиков ⌀12мм, высотой 15÷18 мм осуществлялся при *Т*сп.=(1050-1130)°C, длительность изотермической выдержки τ = 2ч. Металлизация (нанесение электродов) производилось путем нанесения на плоские поверхности предварительно сошлифованных до толщины 1 мм образцов серебросодержащей пасты и последующего ее вжигания при температуре *Т*вжиг.= 800 °C в течение 0.5 ч. Образцы поляризовали в полиэтиленсилоксановой жидкости при температуре 410 K в течение 40 мин. в постоянном электрическом поле напряженностью 3 кВ/см.

**3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ**

*Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы*

Рентгенографические исследования проводили в отделе интеллектуальных материалов и нанотехнологий НИИ физики ЮФУ методом порошковой дифракции на модернизированном дифрактометре ДРОН-3 при комнатной температуре. Использовалось излучение, геометрия съемки - Брэгга - Брентано. Исследовали синтезированные порошки и измельченные керамические объекты, что позволило исключить влияние поверхностных эффектов, напряжений и текстур, возникающих в процессе получения керамик. Расчет структурных параметров производили по стандартным методикам. Точность определения параметров перовскитной ячейки: линейных δ*а* = δ*с* = δ*b* = ± 0,05 %; угловых δα = δβ = ± 5 %; объема δ *V* = ± 0,07 %.

*Определение плотностей (измеренной, рентгеновской, относительной)*

Определение измеренной (*ρ*изм.) плотности образцов осуществляли методом гидростатического взвешивания, где в качестве жидкой среды использовали октан. Плотность рассчитывали по формуле:

*ρ*изм. *=*(*ρ*октm1)/(m2 - m3 + m4),

где *ρ*окт – плотность октана;

m1 – масса сухой заготовки;

m2 – масса заготовки, насыщенной октаном;

m3 – масса насыщенной заготовки, взвешенной в октане с подвесом;

m4 – масса подвеса без заготовки.

Расчет рентгеновской плотности (*ρ*рентг.) производили по формуле:

*ρ*рентг.=1.66M/V,

где М ‑ вес формульной единицы в граммах;

V – объем перовскитной ячейки в Å.

Относительную плотность (*ρ*отн.) рассчитывали по формуле

(*ρ*изм./ *ρ*рентг.)·100%.

*Измерения диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик при температуре Т* = 25 оС

Измерения диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик керамических образцов, представляющих собой конденсаторные структуры, проводили в соответствии с методическим подходом, представленном в ГСССД МЭ 183-2011 [2]. На рис. А1 представлена блок-схема измерительного стенда, сформированного на основе прецизионного анализатора импеданса Wayne Kerr 6500 B, с помощью которого осуществлялись измерения необходимых параметров.

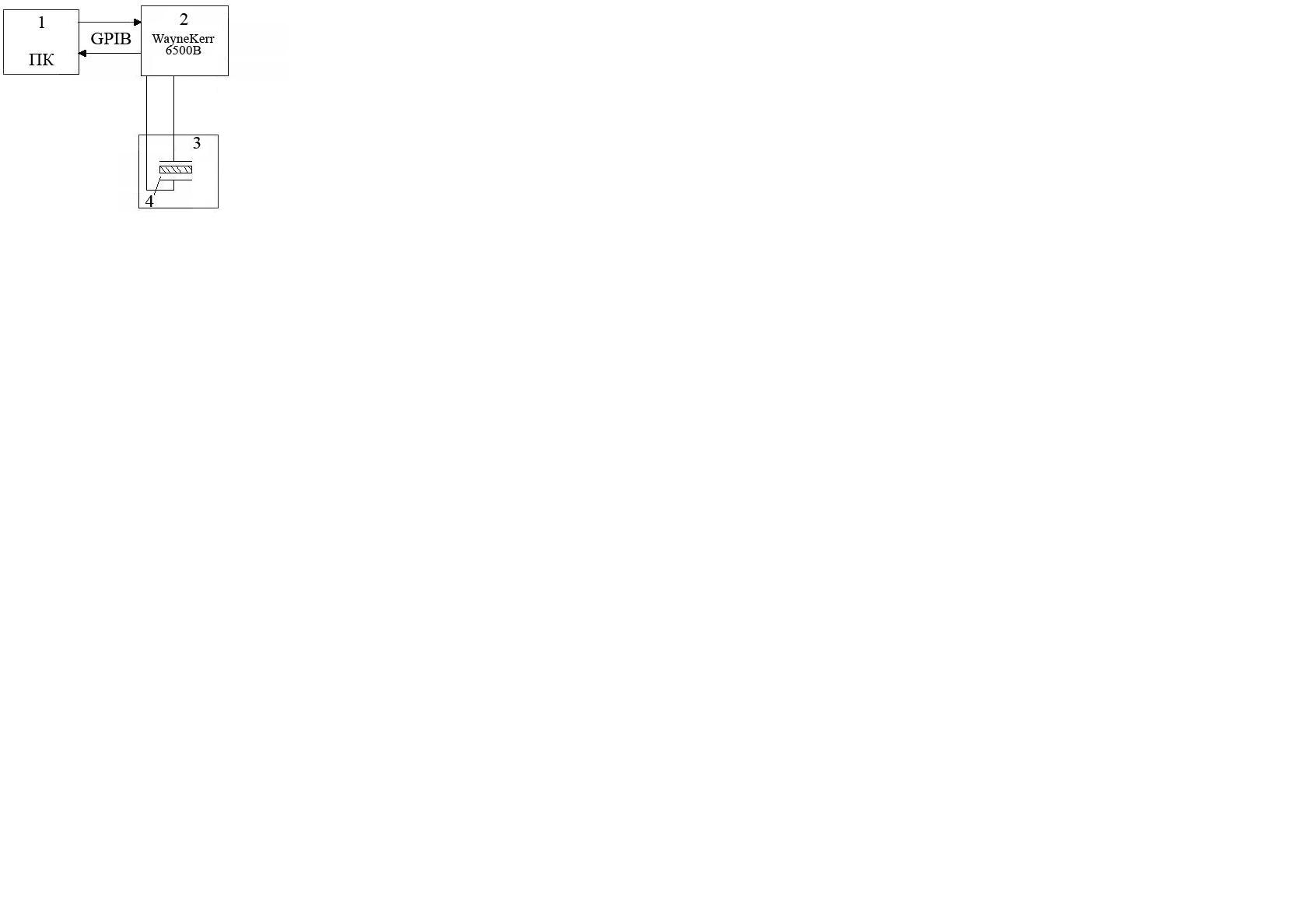


Рисунок А1 – Схема измерительного комплекса для измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик различных пьезокерамических материалов

**Обозначения**

1 – блок управления (персональный компьютер с программным обеспечением);

2 – прецизионный анализатор импеданса Wayne Kerr 6500 B;

3 – измерительная камера;

4 – измерительный образец.

Исследуемый керамический образец (4), расположенный специальном в образец-держателе, помещали в измерительную камеру (3). Далее на него подавали переменное измерительное электрическое поле (U) амплитудой 40 мВ заданной частоты *f* и производили автоматическое измерение параметров. При этом данные с (2) передаются в (1), где происходит их дальнейшая обработка и запись. Далее в (1) происходит изменение *f* и процедура измерения повторяется через заданный частотный шаг, минимальное значение которого составляет 1 Гц. Из частотных зависимостей адмитанса (*Y*(*f*)), согласно [2], определяли частоты резонанса выбранной гармоники (первой, третьей или пятой). Частоте резонанса (*fr*) соответствует максимум действительной части частотной зависимости *Y*'(*f*), при последовательной схеме замещения. Частоте антирезонанса (*fa*) соответствует минимум *Y*'(*f*), при параллельной схеме замещения. При *f = fr* также производится измерение сопротивления образца R, а на частоте 1кГц производили измерения емкости (С) и тангенса угла диэлектрических потерь (tg *δ*).

Для обработки и расчета необходимых диэлектрических, пьезоэлектрических характеристик аттестуемых керамических образцов использовалась специализированная программа «Kalipso 2.0.0.27», рабочее окно которой представлено на рис. A2.

В соответствующие ячейки рабочего окна вводятся номер экспериментального образца, его геометрические размеры (толщина, t, и диаметр, d, в сантиметрах, соответственно), значения диэлектрических параметров до и после поляризации (емкость, С в пФ и тангенса угла диэлектрических потерь, tg*δ*), *fr* (для первой и третьей гармоник), *fa* (для первой гармоники), а также R и значения *ρ*изм.. Для запуска процесса расчета необходимо нажать на кнопку «compute». Для сохранения полученных результатов в формате Microsoft Office Excel 2007 «xlsx» необходимо зайти в основное меню программы «Файл», выбрать опцию «Сохранить как», директорию и имя файла, в котором будут сохранены рассчитанные данные.

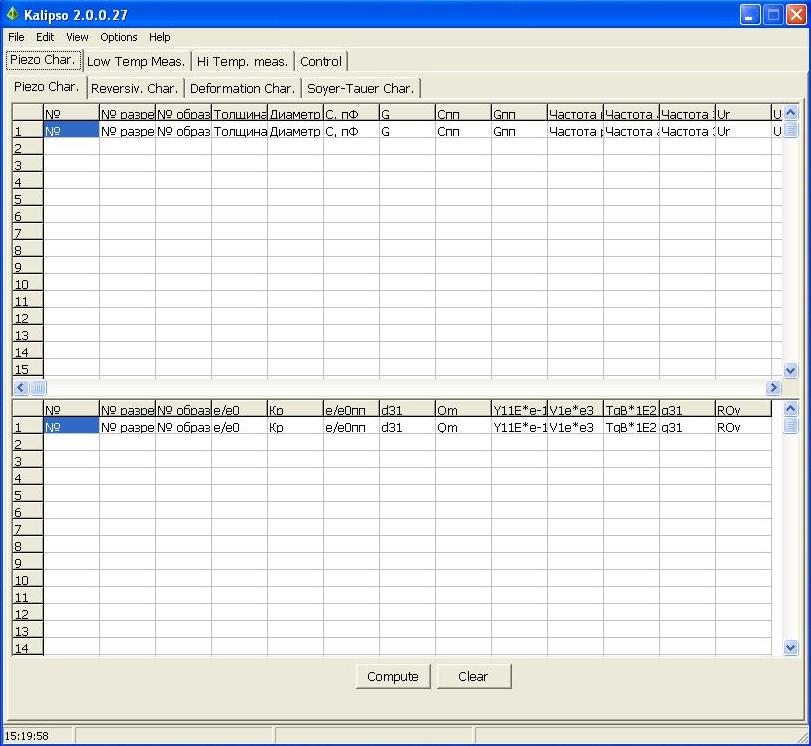


Рисунок А2 – Рабочее окно программы «Kalipso 2.0.0.27»

Последовательность операций продемонстрирована на рис. A3

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | → |  | → |  |
|  | | | | |
| Рисунок А3 – Последовательность операций для сохранения данных | | | | |

Применение рентгенофазового контроля на всех стадиях получения аттестуемых объектов и определение плотностей в совокупности с измерением диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик позволили выбрать оптимальные регламенты синтеза и спекания аттестуемых объектов.

**4** **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ. ОБСУЖДЕНИЕ**.

По данным рентгендифракционного анализа установлено, что получены беспримесные керамические образцы, которым свойственны достаточно высокие значения ρотн (92÷94 %), что приемлемо для материалов, изготовленных в рамках обычной керамической технологии [4].

На рисунке А5 приведен микроснимок зёренной структуры одного из аттестуемых керамических материалов.

|  |
| --- |
| 15т 2000х |
|  |
| Рисунок А4 – Микрофотография зеренной структуры керамики NKCNO-1. Маркер – 30 мкм |

Видно, что аттестуемой керамике свойственна плотная зёренная структура из кристаллитов, имеющих форму неправильных многогранников с преимущественно плоскими границами. Размер кристаллитов варьируется в широких пределах ­– от 5 мкм до 15 мкм.

Тот факт, что механический скол прошел преимущественно по объему зерна свидетельствует о более высокой прочности межзеренных границ в сравнении с самим зерном. Это обусловлено тем, введение в материал на основе Na2O, K2O и Nb2O5 оксида меди CuO приводит к образованию в процессе спекания керамики промежуточных Cu-содержащих соединений, в частности, K4CuNb8O23 с низкой температурой плавления (1050 °C [5]), с которыми связано формирование жидких фаз, «цементирующих» зерна, способствующих образованию композитоподобной микрокристаллической (зеренной) структуры и росту сегнетожесткости керамики. При этом рост механической добротности в заданном интервале концентраций не приводит к зажатию доменов а, напротив, обеспечивает снижение энергозатрат на преодоление внутреннего трения в материале.

На рисунке А5 приведены зависимости ε'/ε0(*Т*) керамик NKCNO-1 в частотном интервале *f*= (25÷106) Гц и диапазоне температур *Т* = (20÷400) °C.

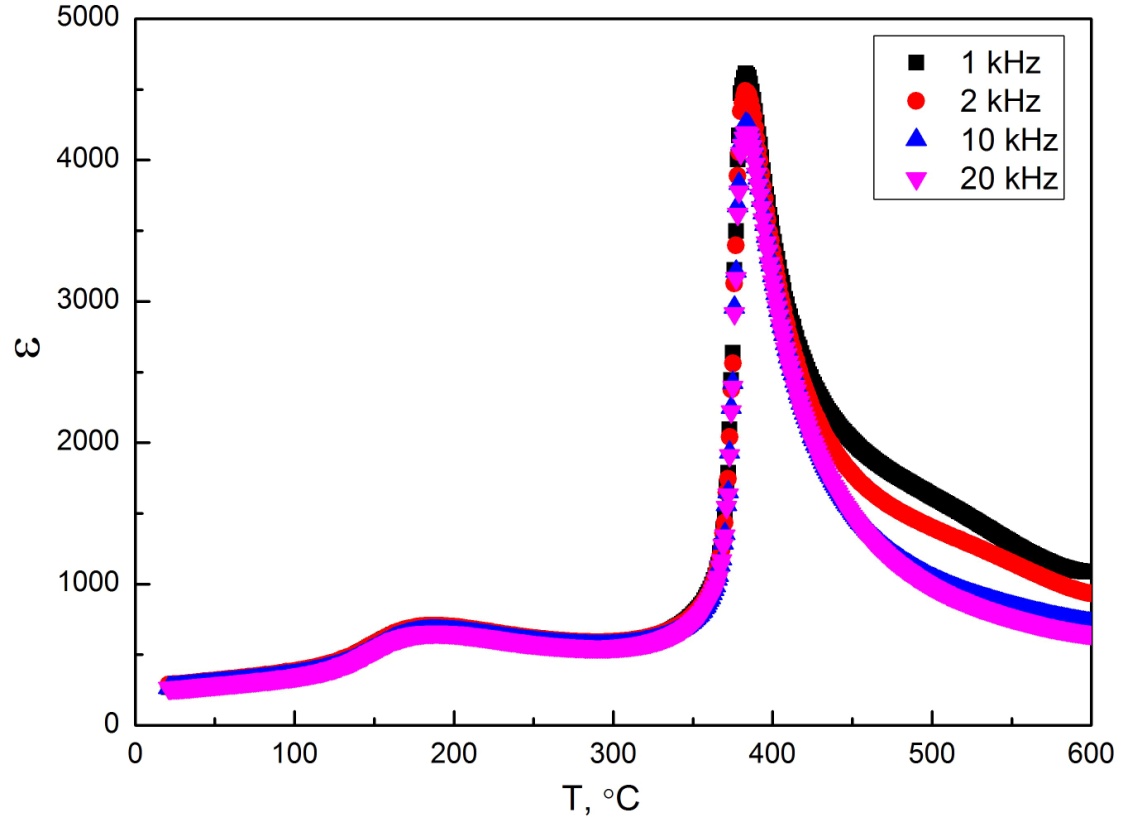
**

Рисунок А5 – Зависимости ε'/ε0(*Т*) и ε''/ε0(*Т*) в частотном интервале *f*= (1÷20) кГц

Видно, что в керамике NKCNO-1 дисперсия диэлектрической проницаемости в интервале температур *Т* = (20 ÷ 390) °C, что свидетельствует о высоком качестве объекта, а температура фазового перехода из сегнетоэлектрической в параэлектрическую фазу (TC) составляет ~390 °C. Это говорит о достаточно широком рабочем температурном интервале, в котором могут быть использованы данные материалы

Результаты измерения диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик аттестуемых составов при температуре 25 оС приведены в таблицах А2-А3.

Таблица А2. – Основные электрофизические характеристики керамики NKCNO-1

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Na2O, масс % | 13,87 | 13,87 | 13,87 | 13,87 | 13,87 | 13,87 | 13,87 |
| K2O,масс % | 5,62 | 5,62 | 5,62 | 5,62 | 5,62 | 5,62 | 5,62 |
| Nb2O5, масс % | 79,32 | 79,32 | 79,32 | 79,32 | 79,32 | 79,32 | 79,32 |
| CuO, масс % | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 |
| *ε*тзз/*ε*о | 300 | 301 | 301 | 300 | 301 | 299 | 300 |
| *К*р | 0,17 | 0,17 | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| |*d*31|, пКл/Н | 13 | 12 | 13 | 13 | 13 | 12 | 13 |
| *d*33,,пКл/Н | 50 | 50 | 50 | 51 | 51 | 50 | 51 |
| *Q*M | 1050 | 1039 | 1052 | 1050 | 1048 | 1045 | 1050 |
| *T*c (*f*=1 кГц), °C | 395 | | | | | | |
| tgδ, % | 2 | 2,2 | 2,1 | 2 | 1,9 | 2 | 2,3 |

Таблица А3. – Основные электрофизические характеристики керамики NKCNO-2

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Na2O, масс % | 12,73 | 12,73 | 12,73 | 12,73 | 12,73 | 12,73 | 12,73 |
| K2O,масс % | 5,53 | 5,53 | 5,53 | 5,53 | 5,53 | 5,53 | 5,53 |
| Nb2O5, масс % | 77,98 | 77,98 | 77,98 | 77,98 | 77,98 | 77,98 | 77,98 |
| CdO, масс % | 3,77 | 3,77 | 3,77 | 3,77 | 3,77 | 3,77 | 3,77 |
| *ε*тзз/*ε*о | 305 | 304 | 305 | 303 | 305 | 305 | 304 |
| *К*р | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,18 | 0,17 | 0,17 |
| |*d*31|, пКл/Н | 14 | 14 | 13 | 13 | 14 | 14 | 14 |
| *d*33,,пКл/Н | 53 | 53 | 51 | 52 | 53 | 54 | 53 |
| *Q*M | 1045 | 1047 | 1042 | 1043 | 1046 | 1045 | 1045 |
| *T*c (*f*=1 кГц), °C | 392 | | | | | | |
| tgδ, % | 1,5 | 1,8 | 2,4 | 2,1 | 1,6 | 1,8 | 1,5 |

Высокие значения Qm и Kр материалов определяют их основное назначение – использование в силовых и высокочастотных ультразвуковых устройствах, в частности в ультразвуковых пьезодвигателях и промышленных измельчителях. При условии согласования преобразователя с нагрузкой (Ri=RH) (обычно реализуемое в выпускаемой промышленностью радиоэлектронной аппаратуре выходное сопротивление RH ~ 50 Ом для высоких частот), используя формулу для емкостного сопротивления преобразователя: Ri=1/ωC, где Ri-емкостное сопротивление преобразователя, Ом; ω-круговая частота, Рад/с; С-емкость, Ф;

Можно приблизительно оценить интервалы значений емкости С=1/2πfRi для указанных диапазонов частот, а, следовательно, и относительной диэлектрической проницаемости поляризованных элементов, *ε*тзз/*ε*о= k\* С, где k - коэффициент, зависящий от размеров элементов. Таким образом, повышение значения позволяет понизить рабочую частоту целевых ультразвуковых устройств для более эффективного их использования.

Высокие значения *T*С в аттестуемых объектах свидетельствует о том, данные материалы могут быть использованы в широком диапазоне температур.

**5 ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

Суммарные погрешности измерений диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик аттестуемых объектов представлены в таблице А4.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Таблица А4 – Суммарные погрешности измерений электрофизических параметров | | |
| Параметры | | ΔA/А,% |
| Наименование | Значение А |
| *ε*33*Т*/*ε*0 | 250÷5000 | 1,0 |
| *K*p | 0,2÷0,3 | 5,0 |
| 0,3÷0,4 | 2,0 |
| 0,4÷0,5 | 1,5 |
| 0,5÷0,7 | 1,0 |
| |*d*31|, пКл/Н | 20÷30 | 5,0 |
| 30÷40 | 2,0 |
| *d*33, пКл/Н | 40÷100 | 3,0 |
| 100÷700 | 2,0 |
| QM | 50÷60 | 10 |
| 600÷5000 | 20 |
| tg*δ*·102 | 0,3÷20,0 | 5,0 |

6. ОЦЕНКА СТАНДАРТНОГО ОТКЛОНЕНИЯ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ

В связи с тем, что все аттестуемые характеристики являются рассчитываемые величинами (погрешности определения приведены в таблице А5), для каждой из них была проведена оценка экспериментального стандартного отклонения от среднего значения по формулам (6-7) в соответствии с [6], приведенные в таблице A6:

|  |  |
| --- | --- |
| , | (6) |

|  |  |
| --- | --- |
| , | (7) |

где  - измеряемая величина,

k – номер измерения,

- среднее арифметическое, экспериментальное стандартное отклонение среднего значения величины 

Таблица А.5 – Экспериментальное стандартное отклонение среднего значения величины электрофизических параметров

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **NKCNO-1** | **NKCNO-2** |
| εтзз/εо | 0,75 | 0,78 |
| Кр | 0,003 | 0,004 |
| |d31|, пКл/Н | 0,48 | 0,49 |
| d33,пКл/Н | 0,53 | 0,95 |
| QM | 4,42 | 1,7 |
| tg δ | 0,13 | 0,33 |

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия
2. ГСССД МЭ 183-2011. Методика экспериментального определения пьезоэлектрических и упругих характеристик: пьезомодулей, коэффициентов электромеханической связи, механической добротности, модуля Юнга, скорости звука, пьезоэлектрического коэффициента (пьезочувствительности)–различных сегнетопьезоэлектрических материалов в широком диапазоне температур (10-1000) K. (Резниченко Л.А., Андрюшин К.П., Павленко А.В., Дудкина С.И., Вербенко И.А., Павелко А.А., Андрюшина И.Н., Кубрин С.П., Юрасов Ю.И.)
3. ГСССД МЭ 184-2011. Методика экспериментального определения комплексной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь, температуры Кюри диэлектрических материалов в широком диапазоне температур (10-1000) K, частот (10-3-15٠106) Гц электрического измерительного поля. (Резниченко Л.А., Андрюшин К.П., Андрюшина И.Н., Вербенко И.А., Кубрин С.П., Павелко А.А., Павленко А.В., Юрасов Ю.И.).
4. Фесенко Е.Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество М.: Атомиздат, 1972. – 248с.
5. Matsubara М., Yamaguchi Т., Sakamoto W., Kikuta К., Yogo Т., Hirano S.-I. Processing and Piezoelectric Properties of Lead-Free (K,Na)(Nb,Ta)О3 Ceramics // J. Am. Ceram. Soc. 2005. V. 88. № 5. P. 1190-1196.
6. ГОСТ Р 54500.3-2011. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Группа Т80.