**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

УДК 669. /539.5 – 536.6**/**

**ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ**

#### СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ РЕЛАКСОРЫ НА ОСНОВЕ ТРЕХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ НИОБАТЫ НАТРИЯ, КАЛИЯ, КАДМИЯ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ 25 оС

#### ССД СНГ 350–2021 (ГСССД 350–2019)

(**ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, ШИФР ТЕМЫ:** [**RU.3.004-20**](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, К.П. Андрюшин, А.В. Павленко, И.Н. Андрюшина, И.А. Вербенко

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** |  |
| Сегнетоэлектрики релаксоры на основе трехкомпонентной системы, содержащей ниобаты натрия, калия, кадмия. Диэлектрические и пьезоэлектрические характеристики при температуре 25 оС | **ССД СНГ**  **350–2021**  **ГСССД**  **350–2019** |
| **Tables of Standard Reference Data** |  |
| Ferroelectric relaxors bassed on a three-component system containing sodium, potassium, cadmium niobates. Dielectric and piezoelectric properties at the temperature 25 оС | **SSD CNG**  **350–2021**  **GSSSD**  **350–2019** |

**АННОТАЦИЯ**

В таблицах представлены стандартные справочные данные о диэлектрических и пьезоэлектрических характеристиках сегнетоэлектриков релаксоров на основе ниобатов натрия, калия и кадмия при температуре 25 оС, не содержащие в своей структуре токсичные элементы (в частности, свинец). Данные материалы обладают средними значениями относительной диэлектрической проницаемости (1220-1770), пьезочувствительности (9,25-14,81 мВ·м/Н), низкими значениями механической добротности (100-120) и могут быть использованы в устройствах и датчиках высокочастотной техники.

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. Основная часть 6

Приложение А 9

2 Методы получения образцов 11

3 Методы исследования образцов 12

4 Экспериментальные результаты. Обсуждение 16

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 сегнетоэлектриков релаксоров на основе ниобатов натрия, калия и кадмия при температуре 25 оС . 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 состава 0,75NaNbO3 – 0,15KNbO3 – 0,10 Cd0.5NbO3 (NKC-1) и 0,70NaNbO3 – 0,20KNbO3 – 0,10 Cd0.5NbO3 (NKC-2) 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, 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.

1. Скорость звука - *V*1E
2. Электрические константы по напряжению (пьезочувствительность)

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Таблица 1 – Стандартные справочные данные о диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик материалов при *Т* = 25 оС | | |
| Параметр | NKC-1 | NKC-2 |
| Na2O, масс % | 13,70 | 12,73 |
| K2O,масс % | 4,17 | 5,53 |
| Nb2O5, масс % | 78,35 | 77,98 |
| CdO, масс % | 3,78 | 3,77 |
| *ε*тзз/*ε*о | 1220 | 1770 |
| *К*р | 0,24 | 0,25 |
| |*d*31|, пКл/Н | 53 | 60 |
| *d*33,,пКл/Н | 160 | 145 |
| *Q*M | 120 | 100 |
| *V*1E \*10-3, м/с | 4,640 | 4,51 |
| *g*33 мВ·м/Н | 14,81 | 9,25 |
| *T*c (*f*=1 кГц), K | 547 | 487 |
| tg δ | 3,32 | 2,98 |

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

(справочное)

Сегнетоэлектрики–релаксоры - это класс сегнетоэлектрических материалов, в которых фазовый переход из параэлектрической в сегнетоэлектрическую фазу размыт в широкой области температур, а диэлектрическая поляризация в этой области этого перехода носит релаксационный характер [3, 4]. Их общей чертой является наличие широкого частотно-зависимого максимума на температурной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости *ε'* при температуре, соответствующей, *Tm.* Этот максимум, сдвигающийся в сторону высоких температур с увеличением частоты, обычно не связан с макроскопическим структурным ФП. Подавляющая часть таких материалов, используемых в функциональной пьезотехнике, базируется на композициях, содержащих в своей структуре токсичные элементы и, в частности, свинец (Pb). Однако, в связи с введение Директив 2002/95/EC и 2011/65/EC Европейского парламента об использовании опасных материалов в электронике и электронных приборах, в физическом материаловедении одним из наиболее приоритетных и стремительно развивающихся направлений стало создание, в том числе, нетоксичных релаксорных пьезоэлектрических материалов, которые могут использоваться (в том числе и заменить используемые Pb-содержащие материалы) в различных сферах современной техники как в виде активных элементов (пьезоэлемент и пр.), так и в качестве основ для создания функциональных элементов (многослойники и пр.). Одной из перспективных основ для создания данных структур являются твердые растворы на основе ниобатов натрия, калия и кадмия.

Представленные таблицы являются обобщением работ, проводимых в отделе интеллектуальных материалов и нанотехнологий научно-исследовательского института физики Южного федерального университета, по созданию и подготовке справочных данных диэлектрических и пьезоэлектрических характеристик новых, не содержащих в своем составе токсичных элементов сегнетоэлектриков-релаксоров. Данные керамические материалы обладают высокими значениями *K*p ~ 0,25, g33 ~ 9÷15 мВ·м/Н и низким значением *Q*м ~ 115 в сочетании с средним значением относительной диэлектрической проницаемости *ε*33Т/*ε*0 ~ 1200÷1700 и могут использоваться в среднечастотных радиоэлектронных устройствах, работающих в режиме приема, а также в высоковольтных актюаторах, лазерных адаптивных системах, компенсаторах вибрации, приборах точного позиционирования. 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 [5]. 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 | NKC-1 | NKC-2 |
| Na2O, масс % | 13,70 | 12,73 |
| K2O,масс % | 4,17 | 5,53 |
| Nb2O5, масс % | 78,35 | 77,98 |
| CdO, масс % | 3,78 | 3,77 |
| Tсинт.1, °C  τсинт.1,ч. | 1220  5 | 1220  5 |
| Tсинт.2, °C  τсинт.2,ч. | 1240  10 | 1240  10 |
| Тспек1., °C  τспек1., ч. | 1450  1,5 | 1470  2 |

**2. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ**

*Регламенты синтеза и спекания*

*1. Пример изготовления пьезоэлектрического материала NKC-1.*

Материал изготавливался по обычной керамической технологии следующим образом. В качестве исходных реагентов использовались гидрокарбонаты, карбонаты и оксиды следующих квалификаций: NaHCO3 – «чда», KHCO3 – «ч», Nb2O5 – «NbО-PT», CdO – «хч».

Синтез осуществлялся путем однократного обжига смесей сырьевых компонентов: NaHCO3, KHCO3, Nb2O5, CdO, взятых в количествах (масс %, в случае NaHCO3, KHCO3 в пересчете на соответствующие оксиды): Na2O = 13,70, K2O = 4,17, Nb2O5 =78,35, CdO = 3,78; с промежуточным помолом синтезированного продукта. Температуры обжига при синтезе *T*синт.1= 950°C, *T*синт.2= 970 °C, длительности изотермических выдержек τсинт.1= 5 ч, *τ*синт.2=10 ч. Спекание образцов в виде столбиков Ø12 мм, высотой 15÷18 мм осуществлялось при *Т*сп.=1180 °C, длительность изотермической выдержки τсп= 1,5 ч. Металлизация (нанесение электродов) производилась 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 150 °C в течение 15 мин. в постоянном электрическом поле напряженностью 3,6 кВ/см.

*2. Пример изготовления пьезоэлектрического материала NKC-2.*

Материал изготавливался по обычной керамической технологии следующим образом. В качестве исходных реагентов использовались гидрокарбонаты, карбонаты и оксиды следующих квалификаций: NaHCO3 – «чда», KHCO3 – «ч», Nb2O5 – «NbО-PT», CdO – «хч».

Синтез осуществлялся путем однократного обжига смесей сырьевых компонентов: NaHCO3, KHCO3, Nb2O5, CdO, взятых в количествах (масс %, в случае NaHCO3, KHCO3 в пересчете на соответствующие оксиды): Na2O = 12,73, K2O = 5,53, Nb2O5 =77,98, CdO = 3,77; с промежуточным помолом синтезированного продукта. Температуры обжига при синтезе *T*синт.1= 950 °C, *T*синт.2= 970 °C, длительности изотермических выдержек τсинт.1= 5 ч, *τ*синт.2=10 ч. Спекание образцов в виде столбиков Ø12 мм, высотой 15÷18 мм осуществлялось при *Т*сп.=1200 °C, длительность изотермической выдержки τсп= 1,5 ч. Металлизация (нанесение электродов) производилась 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 150 °C в течение 15 мин. в постоянном электрическом поле напряженностью 3,6 кВ/см.

**3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ**

*Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализы*

Рентгенографические исследования проводили в отделе активных материалов НИИ физики ЮФУ (старший научный сотрудник Шилкина Л. А.) методом порошковой дифракции (ДРОН-3, , геометрия 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*окт·m1)/(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.=1.66 M/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 проводили в соответствии с методическим подходом, представленном в ГСССД МЭ 183-2011 [2]. На рис. А1 представлена Блок – схема измерительного комплекса на базе прецизионного анализатора импеданса Wayne Kerr 6500 B, с помощью которого осуществлялись измерения.

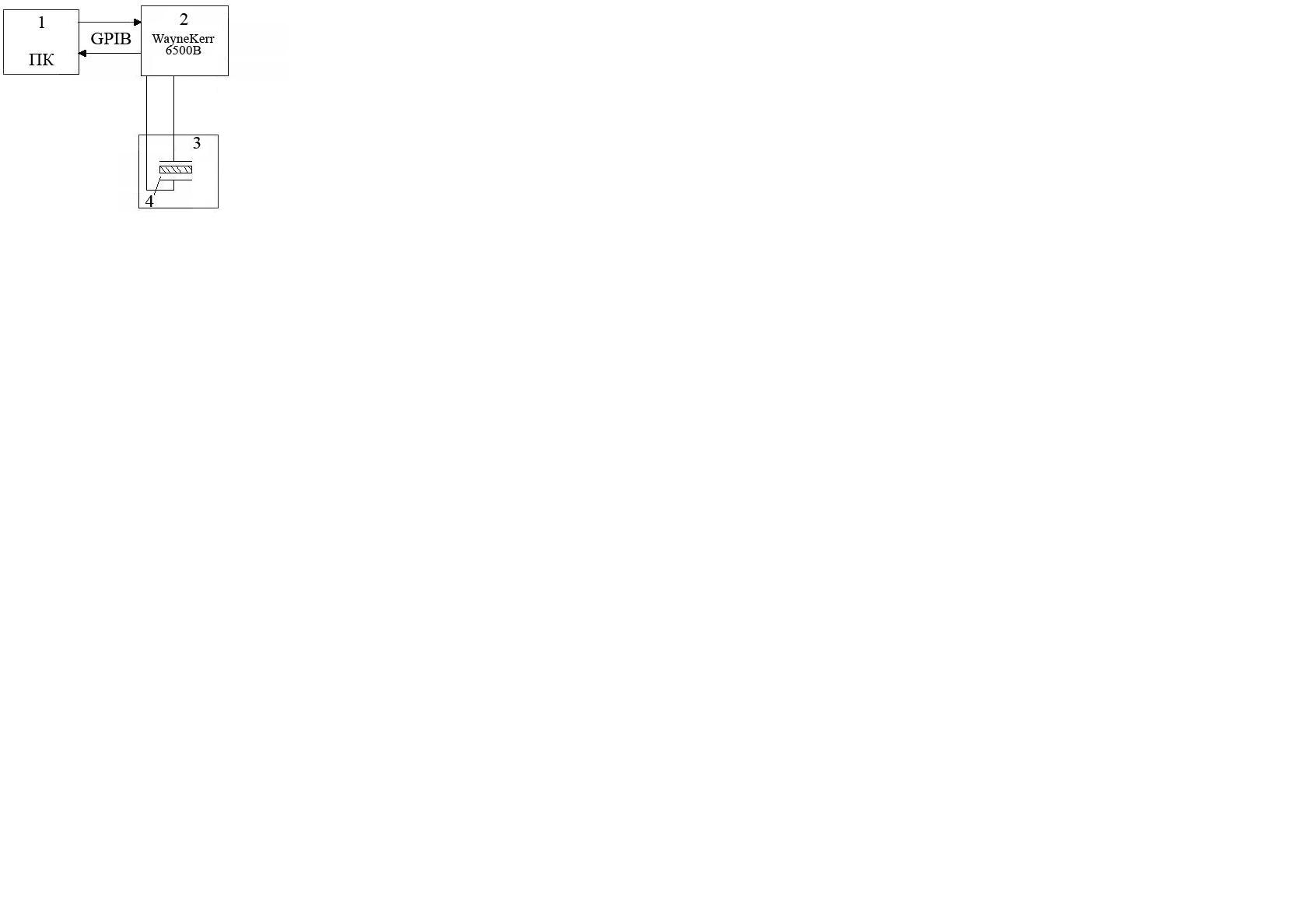


Рисунок А1 – Схема измерительного комплекса для измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик различных пьезокерамических материалов. 1 – блок управления (персональный компьютер с программным обеспечением); 2 - прецизионный анализатор импеданса Wayne Kerr 6500 B; 3 – измерительная камера; 4 – измерительный образец.

Измерительный образец (4), закрепленный в образец-держателе, помещали в измерительную камеру (3). Далее на него подавали переменное электрическое измерительное поле амплитудой 40 мВ заданной частоты *f* и производили автоматическое измерение диэлектрических 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 частоте резонанса 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 и упругих 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.

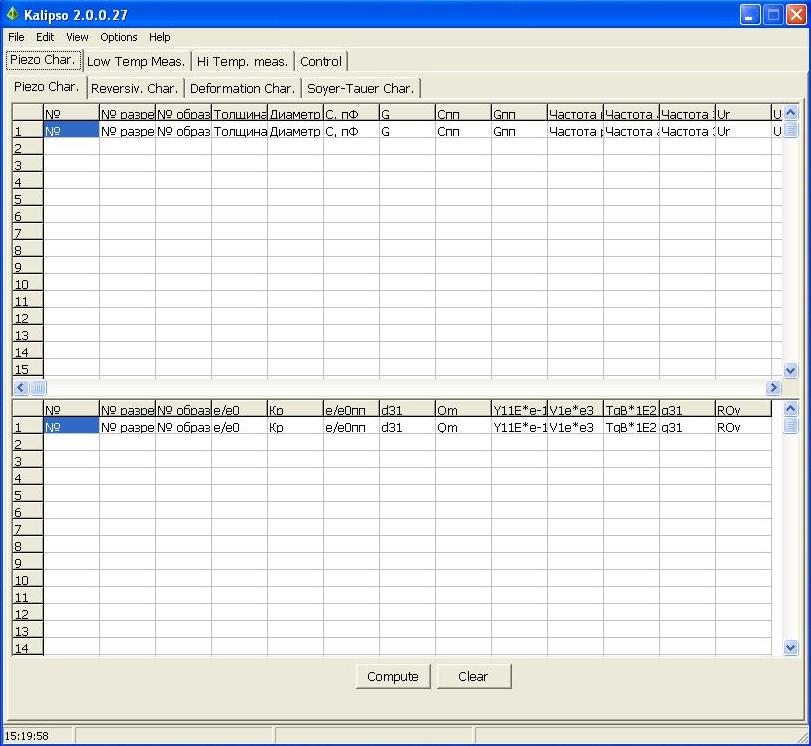


Рисунок А2 – Рабочее окно программы «Kalipso 2.0.0.27»

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 рентгенофазового анализа установлено, что получены беспримесные керамические образцы NKC-1 и NKC-2, которым свойственны достаточно высокие значения ρотн (95÷96 %), что приемлемо для материалов, изготовленных по ОКТ [6]. На рисунке А4 приведены микроснимки зеренной структуры аттестуемых керамических материалов.

а

|  |
| --- |
| б |
|  |
| Рисунок А4 – Микрофотографии зеренной структуры керамик NKC-1 (а) и NKC-2 (б) |

Видно, что обоим аттестуемым керамическим материалам свойственна однородная плотная зёренная структура из кристаллитов, имеющих форму неправильных многогранников с преимущественно плоскими границами. Размер кристаллитов в обоих случая варьируется в пределах 1-8 мкм.

На рисунке А5 приведены зависимости ε'/ε0(*Т*) и ε''/ε0(*Т*) керамик NKC-1 и NKC-2 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*= (25÷106) Гц

Видно, что в керамике NKC-1 при температурах (280 ÷ 300) °C, а в NKC-2 – при *Т* = (200 ÷ 240) °C формируются максимумы (*T*m), сдвигающиеся в область более высоких температур по мере увеличения частоты измерительного электрического поля *f*, связанных с размытым фазовым переходом сегнетоэлектрик релаксор – параэлектрик. При аппроксимации зависимости *T*m(*f*) в обоих случаях наилучшие результаты были достигнуты в случае использования соотношения Фогеля-Фулчера

|  |  |
| --- | --- |
| *f* = *f*0 exp(Eact/(k∙(*T*m–*T*f))), | (5) |

где *f*0 – частота попыток преодоления потенциального барьера Eact;

k – постоянная Больцмана,

*T*f - температура Фогеля-Фулчера, интерпретируемая как температура "статического замораживания" электрических диполей или перехода в состояние дипольного стекла.

Результаты измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик аттестуемых составов NKC-1 и NKC-2 при температуре 25 оС приведены в таблицах А2-А3.

Таблица А2 – Основные электрофизические характеристики керамики NKC-1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Na2O, масс % | 13,70 | 13,70 | 13,70 | 13,70 | 13,70 | 13,70 | 13,70 | 13,70 |
| K2O,масс % | 4,17 | 4,17 | 4,17 | 4,17 | 4,17 | 4,17 | 4,17 | 4,17 |
| Nb2O5, масс % | 78,35 | 78,35 | 78,35 | 78,35 | 78,35 | 78,35 | 78,35 | 78,35 |
| CdO, масс % | 3,78 | 3,78 | 3,78 | 3,78 | 3,78 | 3,78 | 3,78 | 3,78 |
| *ε*тзз/*ε*о | 1221 | 1220 | 1225 | 1220 | 1215 | 1215 | 1228 | 1216 |
| *К*р | 0,24 | 0,23 | 0,25 | 0,24 | 0,24 | 0,23 | 0,25 | 0,24 |
| |*d*31|, пКл/Н | 53 | 50 | 55 | 55 | 55 | 52 | 52 | 52 |
| *d*33,,пКл/Н | 158 | 160 | 162 | 162 | 162 | 158 | 158 | 160 |
| *Q*M | 120 | 120 | 115 | 120 | 125 | 120 | 118 | 122 |
| *V*1E \*10-3, м/с | 4,1 | 4,05 | 4,05 | 4,10 | 4,15 | 4,15 | 4,10 | 4,1 |
| *g*33, мВ·м/Н | 15,00 | 14,81 | 14,94 | 15,00 | 15,06 | 14,69 | 14,53 | 14,86 |
| tgδ, % | 3,32 | 3,31 | 3,31 | 3,32 | 3,33 | 3,33 | 3,32 | 3,32 |

Таблица А3. – Основные электрофизические характеристики керамики NKC-2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Параметр | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Na2O, масс % | 12,73 | 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 | 5,53 |
| Nb2O5, масс % | 77,98 | 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 | 3,77 |
| *ε*тзз/*ε*о | 1768 | 1770 | 1772 | 1772 | 1768 | 1770 | 1770 | 1770 |
| *К*р | 0,25 | 0,26 | 0,25 | 0,24 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| |*d*31|, пКл/Н | 59 | 60 | 61 | 58 | 60 | 60 | 61 | 61 |
| *d*33,,пКл/Н | 144 | 145 | 144 | 145 | 145 | 146 | 145 | 146 |
| *Q*M | 100 | 100 | 105 | 100 | 95 | 100 | 99 | 101 |
| *V*1E \*10-3, м/с | 4,51 | 4,5 | 4,51 | 4,52 | 4,51 | 4,5 | 4,51 | 4,52 |
| *g*33 мВ·м/Н | 9,20 | 9,25 | 9,18 | 9,24 | 9,26 | 9,32 | 9,25 | 9,32 |
| tgδ, % | 2,98 | 2,98 | 2,96 | 2,98 | 3,00 | 2,97 | 2,99 | 2,98 |

Среднее значение относительной диэлектрической проницаемости *ε*33Т/*ε*0~ 1500 данных материалов определяет их основное назначение – использование в высокочастотных преобразователях, работающих в диапазоне частот (2,0 ÷ 3,5) МГц. Это следует, прежде всего, из того, твердые растворы на основе ниобатов щелочных металлов могут использоваться в качестве резонансных элементов пьезоэлектрических преобразователей в высокочастотных и очень высокочастотных диапазонах. Высокие значения g33 ~ 9÷15 мВ·м/Н и низким значением *Q*м ~ 115 в сочетании с средним значением относительной диэлектрической проницаемости *ε*33Т/*ε*0 ~ 1200÷1700 позволяют применять данные материалы в среднечастотных радиоэлектронных устройствах, работающих в режиме приема, а также в высоковольтных актюаторах, лазерных адаптивных системах, компенсаторах вибрации, приборах точного позиционирования.

Высокие значения *T*m в NKC-1 и NKC-2 на фоне достаточно хорошей температурной стабильности (рисунок А6) их характеристики свидетельствует о том, данные материалы могут быть использованы в широком диапазоне температур. Проведенные исследования подтвердили, что в обоих материалах диэлектрические потери при повышении температуры вплоть до *T*m остаются на низком уровне (рисунок А5), а термическая деполяризация образцов происходит лишь при нагревании до температур ~ 280 °C (NKC-1) и 240 °C (NKC-2).

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок А6 – Зависимости *ε*тзз/*ε*о(*Т*), *К*р(*Т*), *Q*M(*Т*) и |*d*31|(*Т*) керамики NKC-2 |

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 |
| *g*33, мВ·м/Н | 16÷40 | 2,0 |
| QM | 50÷60 | 10 |
| 600÷5000 | 20 |
| tg*δ*·102 | 0,3÷20,0 | 5,0 |
| *V*1*E*·10-3, м/с | 2,6÷4,0 | 0,3 |

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 [7], 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

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Параметр | NKC-1 | NKC-2 |
| εтзз/εо | 55,15 | 5,65 |
| Кр | 0,00014 | 0,00007 |
| |d31|, пКл/Н | 8,48 | 2,82 |
| d33,пКл/Н | 8,48 | 1,41 |
| QM | 20,50 | 18,38 |
| V1E•10-3, м/с | 0,0035 | 0,0001 |
| g33, мВ·м/Н | 0,079 | 0,006 |
| tg δ | 0,000141 | 0,000353 |

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. Samara G.A. The relaxational properties of compositionally disordered ABO3 perovskites // J. Phys.: Condens. Matter. 2003. V.15. P. 367–411.
4. Исупов В.А. Природа физических явлений в релаксорах // ФТТ. 2003. Т.45. № 6. С.1056-1060.
5. 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.).
6. Фесенко Е.Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество М.: Атомиздат, 1972. – 248с.
7. ГОСТ Р 54500.3-2011. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Группа Т80.