

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ**

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ
(ГСССД)**

Разрешаю на депонирование
Генеральный директор
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
_____ А. А. Коровайцев

«31» октября 2013 г.

УДК 669./539.5 -536.6/

ТАБЛИЦЫ СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

**БЕССВИНЦОВЫЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ
МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ (Na, K, Cd_{0.5}) NbO₃.
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ, ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И УПРУГИЕ
СВОЙСТВА ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

ГСССД 280 – 2013

(ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, тема RU.3.051-2014)

Москва – 2013

РАЗРАБОТАНЫ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» с участием специалистов Научно – исследовательского института физики Южного федерального университета д-ра. физ.-мат. наук Л. А. Резниченко, канд. физ.-мат. наук К. П. Андрюшина, канд. физ.-мат. наук И. Н. Андрюшина, А. В. Павленко.

ОДОБРЕНЫ экспертной комиссией в составе:

до-ра. физ.-мат. наук Е. М. Панченко,
канд. физ.-мат. наук С. В. Титова,
канд. физ.-мат. наук А. А. Есиса,
канд. техн. наук П. В. Попова

ПОДГОТОВЛЕНЫ к утверждению Российским научно-техническим центром информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»)

УТВЕРЖДЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии **«31» октября 2013 г. (протокол № 3)**

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА
СТАНДАРТНЫХ СПРАВЧНЫХ ДАННЫХ**

Таблицы стандартных справочных данных

Бессвинцовые керамики на основе
многокомпонентной системы (Na, K, Cd_{0.5})NbO₃.
Диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие
свойства при комнатной температуре

**ГСССД
280 — 2013**

Tables of Standard Reference Data

Lead free ceramics based on multicomponent
system (Na, K, Cd_{0.5})NbO₃. Dielectric, piezoelectric
and elastic properties at the room temperature





**GSSSD
280—2013**

ДЕПОНИРОВАННАЯ РУКОПИСЬ

УДК 669./539.5 – 536.6/

Таблицы стандартных справочных данных ГСССД 280 — 2013. Бессвинцовые керамики на основе многокомпонентной системы (Na, K, Cd_{0.5}) NbO₃. Диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие свойства при комнатной температуре / Л.А. Резниченко, К.П. Андрюшин, А.В. Павленко, И.Н. Андрюшина ; Росс. научн.–технич. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ”– М., 2013, - 25 с.:Ил. – 5. Библиогр. 3 назв. Депонированы в ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ” 31.10.2013 г., № 872 – 2013 кк.

В таблицах представлены стандартные справочные данные о диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих свойствах керамик на основе многокомпонентной системы (Na, K, Cd_{0.5}) NbO₃ при комнатной температуре.

Авторы :  Л.А. Резниченко
 К.П. Андрюшин
 И.Н. Андрюшина
 А.В. Павленко

Настоящие таблицы стандартных справочных данных (ССД) являются новыми и распространяются на диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие свойства керамик на основе многокомпонентной системы (Na, K, Cd_{0.5})NbO₃ при комнатной температуре.

Основой для составления таблиц явились данные, приведенные в таблицах A2-A17 приложения А.

Табличные данные рассчитаны согласно ОСТ 11 0444-87 [1] с применением методики ГСССД 183-2011 [2] и отображают значения следующих характеристик керамик на основе многокомпонентной системы (Na, K, Cd_{0.5})NbO₃ при комнатной температуре:

1. Относительная диэлектрическая проницаемость ($\varepsilon/\varepsilon_0$) – 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:

$$\varepsilon / \varepsilon_0 = \frac{14.4 \cdot C_0 \cdot d}{t}, \quad (1)$$

где C_0 - емкость образца; d - диаметр образца; t - толщина образца; ε_0 - диэлектрическая постоянная, равная $8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

2. Относительная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$, поляризованного образца в форме диска в направлении, параллельном его оси поляризации, в условиях постоянного давления;

3. Тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) – угол между векторами плотностей переменного тока проводимости и тока смещения диэлектрика на комплексной плоскости;

4. Коэффициент электромеханической связи планарной моды колебаний (K_p) – показатель эффективности преобразования электрической энергии в механическую энергию или преобразования механической в электрическую. Расчеты проводили по формуле:

$$K_p = \sqrt{\frac{\eta^2 - 1 + \sigma^2}{2(1 + \sigma)}} \left(1 - \frac{f_{r1}^2}{f_{a1}^2}\right), \quad (2)$$

где f_{r1} , f_{a1} – частоты резонанса и антирезонанса для первой гармоники, f_{r3} – частота резонанса для третьей гармоники, соответственно (Гц), σ – планарный коэффициент Пуассона из [1], который выбирается в соответствии с рассчитанным β , η – наименьший положительный корень частотного уравнения Бесселя из [1], выбирается в соответствии с рассчитанным β , где $\beta = \frac{f_{r3}}{f_{r1}}$;

5. Пьезоэлектрический модуль (d_{ij}) – 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:

$$d_{31} = \frac{0.188 \cdot K_p \cdot 10^{-5}}{rf_{r1}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0}{\rho}}, \quad (3)$$

где ρ – измеренная плотность образца, определяемая методом гидростатического взвешивания в октане (г/см³), r – радиус образца;

d_{33} – измеряли квазистатическим методом с помощью YE2730A d₃₃ METER.

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

$$Q_m = \frac{f_{a1}^2 \cdot 10^{12}}{2\pi r \cdot R \cdot f_{r1} (f_{a1}^2 - f_{r1}^2)}, \quad (4)$$

где R – сопротивления образца, измеренное на частоте резонанса первой гармоники;

7. Пьезоэлектрический коэффициент по напряжению (пьезочувствительность) (g_{ij}) – величина генерируемого электрического поля в направлении i к единице механического давления в направлении j . Расчеты проводили по формуле:

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^T}, \quad (5)$$

8. Модуль Юнга (Y_{11}^E) – отношение величины приложенного давления к величине результирующей деформации в том же направлении. Расчеты проводили по формуле:

$$Y_{11}^E = \frac{0.4\pi^2}{\eta^2} f_{r1}^2 r^2 \rho (1 - \sigma^2), \quad (6)$$

9. Скорость звука по радиальной моде колебаний (V_1^E) – скорость распространения звуковой волны в образце в форме диска в направлении перпендикулярном оси поляризации и приложенному переменному электрическому полю. Расчеты проводили по формуле:

$$V_1^E = \frac{2\pi f_r}{100\eta} \sqrt{1 - \sigma^2}. \quad (7)$$

В таблице 1 приводятся стандартные справочные данные диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих свойств керамик на основе многокомпонентной системы (Na, K, Cd_{0.5})NbO₃ при комнатной температуре.

Таблица 1.

Стандартные справочные данные о диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих свойствах керамик на основе многокомпонентной системы (Na, K, Cd_{0.5})NbO₃ при комнатной температуре.

Номер состава	1	2
Na ₂ O	14.6107	12.5389
K ₂ O	1.3878	1.3612
Nb ₂ O ₅	78.3261	76.8225
CdO	5.6752	9.2772
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	2300	1740
tg δ , % (E = 50 В/см)	2.92	2.55
K_p	0.31	0.25
$ d_{31} $, пКл/Н	80	60
d_{33} , пКл/Н	205	80
g_{33} мВ·м/Н	3.96	3.96
Q_M	140	450
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.951	0.830
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.640	4.370

Приложение А.

(справочное)

Данные таблицы являются обобщением работ, проводимых в отделе активных материалов НИИ физики ЮФУ, по созданию и подготовке справочных данных диэлектрических (ϵ/ϵ_0 , $\text{tg}\delta$), пьезоэлектрических (K_p , d_{ij} , g_{ij}) и упругих (Y_{11}^E , Q_M , V_1^E) характеристик новых бессвинцовых керамик на основе многокомпонентной системы (Na, K, $\text{Cd}_{0.5}$) NbO_3 . Керамики указанной системы могут быть использованы в низкочастотных приёмных устройствах – гидрофонах, микрофонах, сейсмоприёмниках, а также для создания низкочастотных электромеханических преобразователей, возбуждающих металлические резонаторы с высокой скоростью звука. Однако на данный момент для них отсутствуют аттестованные справочные данные при комнатной температуре.

В НИИ физики ЮФУ были проведены обширные исследования свойств керамик на основе многокомпонентной системы (Na,K,Cd_{0.5})NbO₃ с использованием аттестованной методики ГСССД МЭ 183-2011 [2] в соответствии с ОСТ 11 0444-87 [1]. Для разработки ССД были отобраны результаты исследований характеристик двух составов (по восемь керамических образцов для каждого) системы (Na, K, $\text{Cd}_{0.5}$)NbO₃, полученные с помощью специализированного автоматического измерительного комплекса. Аттестуемые образцы имели различный химический состав (различное количественное соотношение исходных компонентов), и были получены с использованием отличающихся регламентов синтеза и спекания (температура, Т, время, τ) (таблица А1).

Таблица А1.

Концентрации компонентов, регламенты синтеза и спекания аттестуемых составов

Номера состава	Состав, масс. %				$T_{\text{синт.1}}, \text{ К}$	$T_{\text{синт.2}}, \text{ К}$	$T_{\text{спек.}}, \text{ К}$
	Na_2O	K_2O	Nb_2O_5	CdO	$\tau_{\text{синт.1}}, \text{ ч.}$	$\tau_{\text{синт.2}}, \text{ ч.}$	$\tau_{\text{спек.}}, \text{ ч.}$
1	14.6107	1.3878	78.3261	5.6752	1220 5	1240 10	1470 1.5
2	12.5389	1.3612	76.8225	9.2772	1220 5	1240 10	1460 1.5

1. Метод получения образцов

Регламенты синтеза и спекания

Экспериментальные образцы ТР состава $(1-x-y)\text{NaNbO}_3 - x\text{KNbO}_3 - y\text{Cd}_{0.5}\text{NbO}_3$ получали твердофазным синтезом в две стадии и спекали по обычной керамической технологии (ОКТ) ($T_{\text{синт.1}} = 1220\text{ К}$, $\tau = 5$ ч., $T_{\text{синт.2}} = 1240\text{ К}$, $\tau = 10$ ч.; $T_{\text{спек.}} = (1460, 1470)\text{ К}$ в зависимости от состава, длительность изотермической выдержки, $\tau_{\text{сп}} = 1.5$ ч).

Механическая обработка.

Измерительные образцы изготавливали в виде дисков (10×1 мм или 10×0.5 мм). Обработку поверхностей производили алмазным инструментом по 6 классу точности.

Металлизация.

Электроды наносили двукратным вжиганием серебрясодержащей пасты при температуре 1070 К в течение 0.5 ч.

Поляризация.

Формирование поляризованного состояния в объектах осуществляли

методом "горячей" поляризации: образцы загружали в камеру с полиэтиленсилоксановой жидкостью ПЭС-5 при $\sim 300\text{K}$, в течение 0.5 ч. осуществляли плавный подъем температуры до 140°C , сопровождающийся увеличением создаваемого поля от 0 до 5-7 кВ/мм. В этих условиях образцы выдерживали 20-25 мин и затем охлаждали под полем до комнатной температуры.

2. Методы исследования образцов.

3.

Рентгеноструктурный анализ

Рентгенографические исследования проводили в отделе активных материалов НИИ физики ЮФУ (старший научный сотрудник Шилкина Л. А.) методом порошковой дифракции (ДРОН-3, $\text{CoK}\alpha$, 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 [3]. Точность определения параметров перовскитной ячейки: линейных $\delta a = \delta c = \delta b = \pm 0,05\%$; угловых $\delta \alpha = \delta \beta = \pm 5\%$; объема $\delta V = \pm 0,07\%$.

Определение плотностей (измеренной, рентгеновской, относительной)

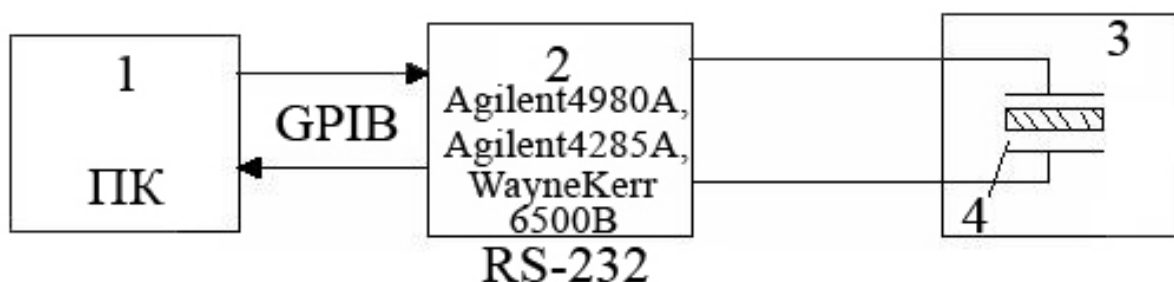
Определение измеренной ($\rho_{\text{изм.}}$) плотности образцов осуществляли методом гидростатического взвешивания, где в качестве жидкой среды использовали октан. Плотность рассчитывали по формуле:

$$\rho_{\text{изм.}} = (\rho_{\text{окт}} * m_1) / (m_2 - m_3 + m_4),$$

где $\rho_{\text{окт}}$ – плотность октана, m_1 – масса сухой заготовки, m_2 – масса заготовки, насыщенной октаном, m_3 – масса насыщенной заготовки, взвешенной в октане с подвесом, m_4 – масса подвеса для заготовки.

Расчет рентгеновской плотности ($\rho_{\text{рентг.}}$) производили по формуле: $\rho_{\text{рентг.}} = 1.66 * M / V$, где M – вес формульной единицы в граммах, V – объем перовскитной ячейки в Å. Относительную плотность ($\rho_{\text{отн.}}$) рассчитывали по формуле $(\rho_{\text{изм.}} / \rho_{\text{рентг.}}) * 100\%$.

Измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик проводили по методике ГСССД МЭ 183-2011 [2] с помощью разработанного автоматического измерительного комплекса (АИК). На рис. А1 представлена Блок- схема АИК.



- 1 - Блок управления (Персональный компьютер с программным обеспечением)
- 2 - LCR- измеритель
- 3 - Термокамера для нагрева и охлаждения образцов
- 4 - Исследуемый образец

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

1 – блок управления (персональный компьютер; 2 – LCR- измеритель; 3 – термокамера для нагрева и охлаждения образцов; 4 – исследуемый образец.

Исследуемый образец помещали в измерительную ячейку (4). На него подавали переменное электрическое измерительное поле амплитуды 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 ($Y(f)$)

определяли частоты резонанса выбранной гармоники (первой, третьей или пятой). Частоте резонанса (f_r) соответствует максимум действительной части частотной зависимости $Y(f)$, при последовательной схеме замещения. Частоте антирезонанса (f_a) соответствует минимум $Y(f)$, при параллельной схеме замещения. При частоте резонанса также производится измерение сопротивления образца, R . При частоте 1 кГц производили измерения емкости, C , и тангенса угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$, при амплитуде измерительного электрического поля 40 мВ.

Для расчета диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих свойств керамик на основе многокомпонентной системы $(\text{Na}, \text{K}, \text{Cd}_{0.5})\text{NbO}_3$ использовалась специализированная программа «Kalipso 2.0.0.27», рабочее окно которой представлено на рис. А2.

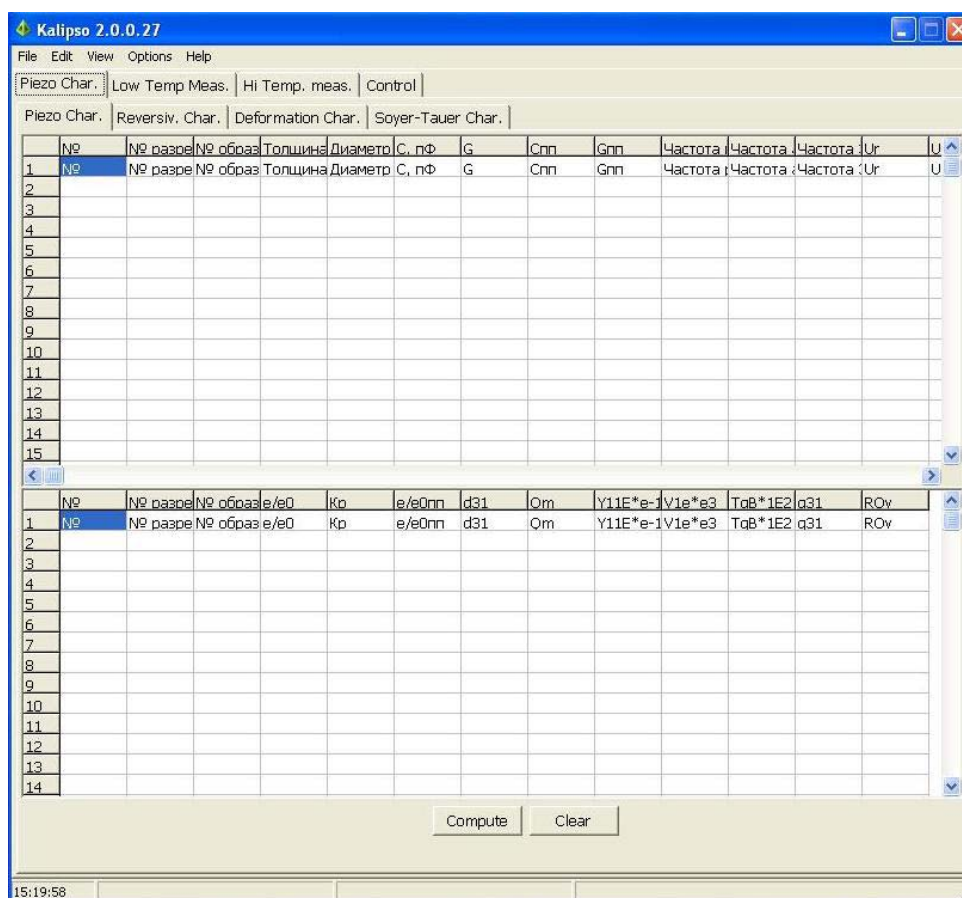
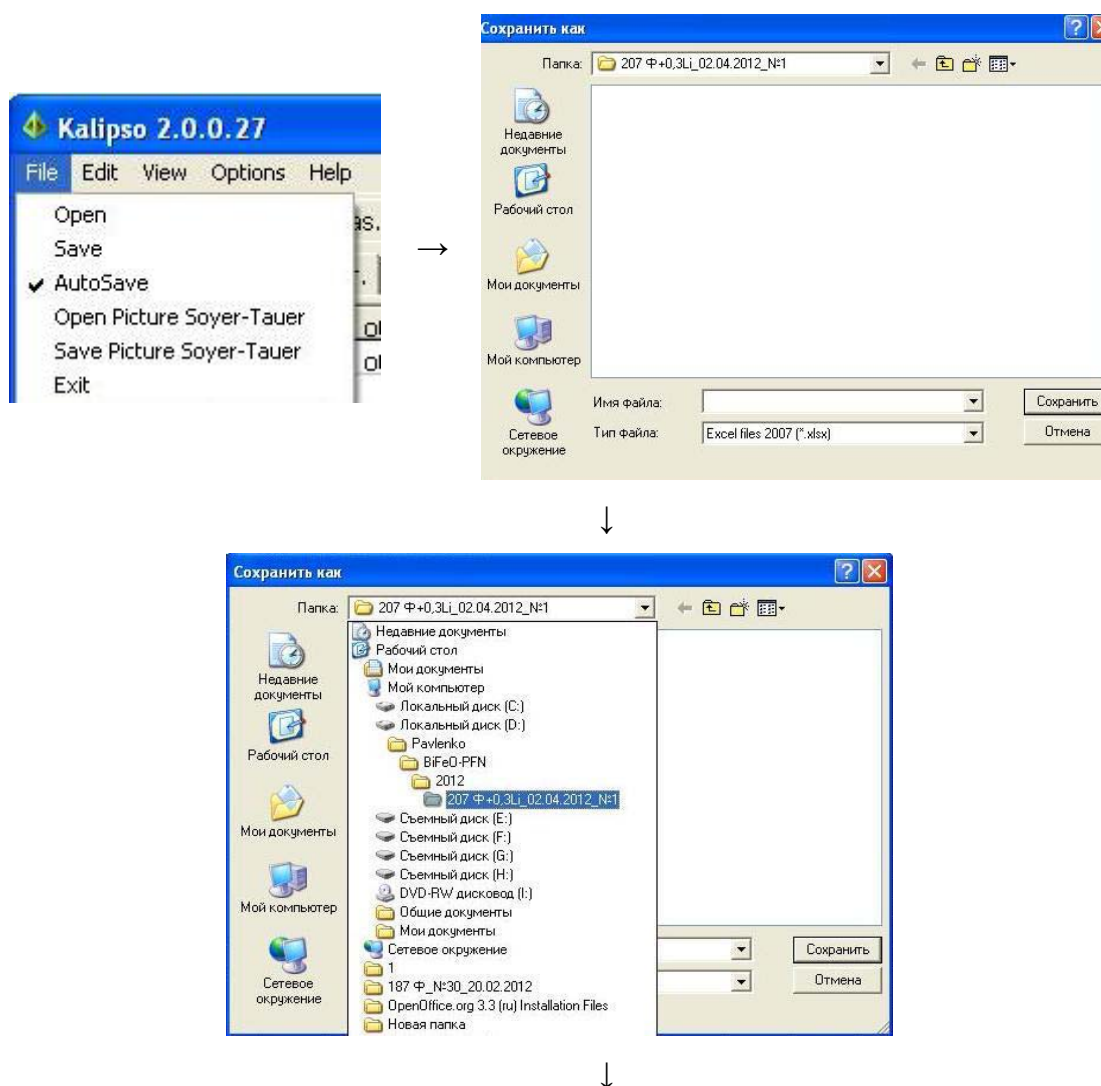


Рисунок А2 – Рабочее окно программы «Kalipso 2.0.0.27»

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, C в пФ и тангенса угла диэлектрических потерь, $\text{tg}\delta$), f_r (для первой и третьей гармоник), f_a (для первой гармоники), а также R и значения $\rho_{\text{изм.}}$. Для запуска процесса расчета необходимо нажать на кнопку «compute». Для сохранения полученных результатов необходимо зайти в основное меню программы «Файл», выбрать опцию «Сохранить как», директорию и имя файла, в котором будут сохранены рассчитанные данные (по умолчанию, программа Kalipso 2.0.0.27 сохраняет файлы только в формате Microsoft Office Excel 2007 «xlsx»).

Последовательность операций продемонстрирована на рис. А3.



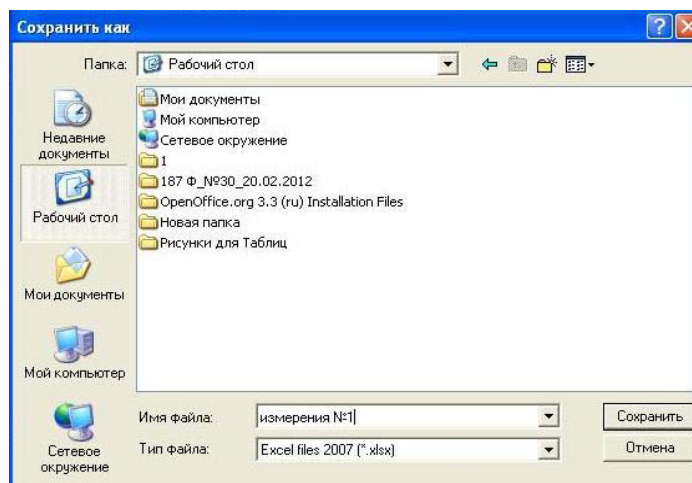


Рисунок А3 – Последовательность операций для сохранения данных.

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.

Экспериментальные данные

Результаты измерения диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик керамик на основе многокомпонентной системы (Na,K,Cd_{0.5})NbO₃ приведены в таблицах А2-А17.

Таблица А2. Состав 1. Образец 1.

$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	2315
$\text{tg} \delta, \% (E = 50 \text{ В/см})$	2.57
K_p	0.31
$ d_{31} , \text{ пКл/Н}$	80
$d_{33}, \text{ пКл/Н}$	200
$g_{33} \text{ мВ} \cdot \text{м/Н}$	3.94
Q_M	137
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}, \text{ Н/м}^2$	0.950
$V_1^E \cdot 10^{-3}, \text{ м/с}$	4.633

Таблица А3. Состав 1. Образец 2.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	2310
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.56
K_p	0.31
$ d_{31} $, пКл/Н	82
d_{33} , пКл/Н	202
g_{33} мВ·м/Н	3.99
Q_M	139
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.955
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.634

Таблица А4. Состав 1. Образец 3.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	2310
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.57
K_p	0.32
$ d_{31} $, пКл/Н	81
d_{33} , пКл/Н	204
g_{33} мВ·м/Н	3.98
Q_M	137
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.941
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.653

Таблица А5. Состав 1. Образец 4.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	2291
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.53
K_p	0.31
$ d_{31} $, пКл/Н	82
d_{33} , пКл/Н	207
g_{33} мВ·м/Н	3.98
Q_M	145
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.955
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.655

Таблица А6. Состав 1. Образец 5.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	2293
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.53
K_p	0.3
$ d_{31} $, пКл/Н	80
d_{33} , пКл/Н	206
g_{33} мВ·м/Н	3.92
Q_M	145
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.954
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.641

Таблица А7. Состав 1. Образец 6.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	2315
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.54
K_p	0.31
$ d_{31} $, пКл/Н	78
d_{33} , пКл/Н	206
g_{33} мВ·м/Н	3.96
Q_M	140
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.951
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.634

Таблица А8. Состав 1. Образец 7.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	2254
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.56
K_p	0.31
$ d_{31} $, пКл/Н	78
d_{33} , пКл/Н	205
g_{33} мВ·м/Н	3.91
Q_M	141
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.950
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.641

Таблица А9. Состав 1. Образец 8.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	2314
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.54
K_p	0.32
$ d_{31} $, пКл/Н	81
d_{33} , пКл/Н	207
g_{33} мВ·м/Н	3.99
Q_M	136
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.950
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.630

Таблица А10. Состав 2. Образец 1.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1735
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.57
K_p	0.25
$ d_{31} $, пКл/Н	59
d_{33} , пКл/Н	82
g_{33} мВ·м/Н	3.97
Q_M	445
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.828
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.37

Таблица А11. Состав 2. Образец 2.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1739
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.56
K_p	0.25
$ d_{31} $, пКл/Н	59
d_{33} , пКл/Н	84
g_{33} мВ·м/Н	3.97
Q_M	447
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.829
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.365

Таблица А12. Состав 2. Образец 3.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1742
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.57
K_p	0.24
$ d_{31} $, пКл/Н	61
d_{33} , пКл/Н	82
g_{33} мВ·м/Н	3.96
Q_M	449
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.834
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.375

Таблица А13. Состав 2. Образец 4.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1743
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.53
K_p	0.25
$ d_{31} $, пКл/Н	60
d_{33} , пКл/Н	78
g_{33} мВ·м/Н	3.95
Q_M	454
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.831
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.372

Таблица А14. Состав 2. Образец 5.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1742
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.53
K_p	0.26
$ d_{31} $, пКл/Н	61
d_{33} , пКл/Н	78
g_{33} мВ·м/Н	3.94
Q_M	453
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.83
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.359

Таблица А15. Состав 2. Образец 6.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1743
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.54
K_p	0.26
$ d_{31} $, пКл/Н	61
d_{33} , пКл/Н	78
g_{33} мВ·м/Н	3.97
Q_M	453
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.831
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.368

Таблица А16. Состав 2. Образец 7.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1735
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.56
K_p	0.24
$ d_{31} $, пКл/Н	60
d_{33} , пКл/Н	79
g_{33} мВ·м/Н	3.94
Q_M	451
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.832
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.371

Таблица А17. Состав 2. Образец 8.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1739
$\operatorname{tg}\delta$, % (E = 50 В/см)	2.54
K_p	0.25
$ d_{31} $, пКл/Н	59
d_{33} , пКл/Н	79
g_{33} мВ·м/Н	3.95
Q_M	450
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}$, Н/м ²	0.830
$V_1^E \cdot 10^{-3}$, м/с	4.373

Оценка достоверности данных

Суммарные погрешности измерений диэлектрических, пьезоэлектрических и упругих характеристик аттестуемых объектов представлены в таблице А18.

Таблица А18.

Суммарные погрешности измерений электрофизических параметров

Параметры		$\Delta A/A, \%$
Наименование	Значение А	
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	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} \cdot 10^{12}, \text{ КЛ/Н}$	20÷30	5.0
	30÷40	2.0
$d_{33} \cdot 10^{12}, \text{ КЛ/Н}$	40÷100	3.0
	100÷700	2.0
$ g_{31} \cdot 10^3, \text{ В} \cdot \text{м/Н}$	8÷17	2.0
$g_{33} \cdot 10^3, \text{ В} \cdot \text{м/Н}$	16÷40	2.0
Q_M	50÷60	10
	600÷5000	20
$\text{tg} \delta \cdot 10^2$	0.3÷20.0	5.0
$Y_{11}^E \cdot 10^{-11}, \text{ Па}$	0.55÷1.20	0.7
$V_1^E \cdot 10^{-3}, \text{ м/с}$	2.6÷4.0	0.3

Список используемой литературы

1. ОСТ 11 0444-87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. Группа Э10. Введен 01.01.88. -140с.
2. Резниченко Л.А. Методика 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 интервале температур (10÷1000)К. / Л.А. Резниченко, К.П. Андрюшин, И.Н. Андрюшина, И.А. Вербенко, С.П. Кубрин А.А. Павелко, А.В. Павленко, Ю.И. Юрасов // Рос. н-техн. центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия. М. 2011. Деп. в ФГУП “СТАНДАРТИНФОРМ”. 03.05.2011. № 875а-2011 к.к. УДК. 621.315.612.
3. Хаякава С. Электронно-техническая керамика: Симпозиум по электротехнической и электронной технике при выставке электронной техники / С. Хаякава //М. 1975. 56 с.