

УДК 532.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНО-ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ ЦТС В ДИАПАЗОНЕ НИЗКИХ ЧАСТОТ

ЗОЛОТАРЕВСКИЙ А.И. ст. лаборант кафедры физики ЗНТУ, Запорожье, Украина, e-mail: alex-goldenman2016@gmail.com;

ЛУЩИН С.П. канд. физ.-матем. наук, доцент кафедры физики ЗНТУ, Запорожье, Украина
e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

Цель работы. Исследовать частотно-температурную зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС в диапазоне низких частот

Методы исследования. Для получения частотно-температурной зависимости диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС использовалась методика определения емкости конденсатора, между обкладками которого размещался исследуемый образец. По полученному значению емкости конденсатора вычислялось значение диэлектрической проницаемости образца

Полученные результаты. Авторами получена частотно-температурная зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС в диапазоне низких частот. При низкой температуре диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты переменного напряжения, с увеличением температуры ее значение возрастает и наблюдается зависимость от частоты. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС удовлетворительно описывается экспоненциальной функциональной зависимостью в диапазоне низких температур. Из графика зависимость логарифма диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС от обратной температуры определена энергия активации поляризации. Различные значения энергии активации для двух температурных участков свидетельствуют о существовании различных механизмов поляризации пьезокерамики ЦТС в исследованном температурном диапазоне.

Научная новизна. Авторами исследована частотно-температурная зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС в диапазоне низких частот. Установлено, что температурная зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС удовлетворительно описывается экспоненциальной функциональной зависимостью в диапазоне низких температур. Определена энергия активации поляризации для двух температурных участков.

Практическая ценность. Результаты исследований могут быть использованы для изучения механизма поляризации пьезокерамических материалов ЦТС, эксплуатируемых в электротехнических и электронных изделиях при воздействии переменных электрических полей различных частот и изменении температуры

Ключевые слова: частотно-температурная зависимость; диэлектрическая проницаемость; пьезокерамика ЦТС; диапазон низких частот

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование механизма поляризации диэлектриков в электрическом поле и определение их электрофизических параметров является одним из важнейших направлений развития современной электротехники и электроники. В результате поляризации диэлектриков возникает ряд эффектов, которые представляют особый интерес ввиду их практического использования. Большое внимание уделяется исследованию поляризации полярных диэлектриков, которые обладают дипольной поляризацией. Одним из наиболее перспективных материалов, широко применяемым в промышленности является функциональная керамика со структурой перовскита – пьезокерамика на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца (ЦТС) $Pb(Zr,Ti)O_3$. Такая керамика имеет ряд уникальных свойств: высокое значение диэлектрической проницаемости, способность легко поляризоваться и реагировать на различные внешние

воздействия [1]. В настоящее время пьезокерамика ЦТС является базовым промышленным материалом и используется для создания генераторов, датчиков, актюаторов, преобразователей и различных комбинированных систем. Определенный интерес для исследования поляризации диэлектрических материалов представляет дисперсия диэлектрической проницаемости при различных температурах в диапазоне низких частот, в котором происходит уменьшение диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков до насыщения.

II. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Согласно теории Дебая молекулярные диполи ориентируются в направлении электрического поля, и положение полярных молекул приобретает некоторую упорядоченность [2]. С увеличением частоты переменного напряжения в области низких частот диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков остается постоянной до тех пор, пока время релакса-

ции дипольных молекул остается меньше полупериода приложенного электрического поля. За это время молекулярные диполи успевают ориентироваться по полю. При дальнейшем увеличении частоты, начиная с критической частоты ω_0 , при которой поляризация не успевает устанавливаться, диэлектрическая проницаемость уменьшается вплоть до значений, определяемых электронной поляризацией [2]. При более высоких частотах дипольная поляризация отсутствует, так как молекулярные диполи не успевают ориентироваться в электрическом поле [2]–[4].

При повышении температуры значение критической частоты для полярных диэлектриков должно возрасти [2]. Соответственно, спектральные зависимости диэлектрической проницаемости должны смещаться в область более высоких частот. Такой характер дисперсии диэлектрической проницаемости приводится в литературе для ряда полярных диэлектриков [2]–[4].

В последнее время для исследования механизма поляризации диэлектриков получил значительное развитие метод диэлектрической спектроскопии, который позволяет получить обширную информацию о молекулярной структуре, кинетике и механизме молекулярных процессов в электрических полях [5].

Кислородосодержащие керамические материалы со структурой перовскита, в частности цирконат-титанат свинца, характеризуются комплексом специфических электрофизических свойств и занимают особое место в современной электротехнике и электронике. Они имеют достаточно высокие значения диэлектрической проницаемости, способны легко поляризоваться в электрическом поле вследствие значительной подвижности поверхностных атомов в кристаллической решетке [6]–[7]. Данные по изучению механизма поляризации кислородосодержащих керамических диэлектриков со структурой перовскита, в частности сегнетокерамики ЦТС, приводятся в ряде работ [8]–[12]. В них приводятся дисперсионные зависимости диэлектрической проницаемости сегнетокерамических материалов. В работе [13] приводятся спектральные зависимости диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС в диапазоне низких частот, и обсуждается механизм поляризации полярных диэлектриков. Существует проблема расчета и измерения электрической емкости и угла диэлектрических потерь изоляционных материалов высоковольтных аппаратов при диагностике в условиях высокого уровня эксплуатационных помех в диапазоне частот выше 100 кГц [14]. Для ее решения также необходимо учитывать механизмы поляризации диэлектриков, используемых в качестве электроизоляционных материалов. Анализ исследований и публикаций показывает необходимость исследования зависимости диэлектрической проницаемости пьезокерамических материалов системы ЦТС от частоты переменного напряжения и температуры в диапазонах, соответствующих условиям эксплуатации. Такие исследования

дают возможность судить о механизме поляризации полярных диэлектриков.

III. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ввиду широкого использования пьезокерамических материалов системы ЦТС в различных условиях эксплуатации целью данной работы является исследование частотно-температурной зависимости диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС в диапазоне низких частот. Эксплуатация пьезокерамических преобразователей в наших условиях происходит при температурах, соответствующих климатическому поясу Украины, что и послужило основанием для выбора диапазона исследуемых температур. Изучение характера изменения диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков в этой области частот и температур дает возможность судить о вероятном механизме процессов поляризации.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Нами исследовалась частотно-температурная зависимость диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика на основе твердых растворов оксидов цирконата-титаната свинца-пьезокерамики ЦТС-22 в диапазоне низких частот. Для измерений диэлектрической проницаемости была выбрана схема, позволяющая определить емкость конденсатора, между обкладками которого размещался исследуемый образец [5].

Для проведения эксперимента использовалась экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Экспериментальная установка состояла из генератора переменного тока, ячейки для измерения емкости, диодных мостиков, вольтметра и микроамперметра. Частота генератора изменялась в диапазоне от 200 Гц до 20 кГц. Напряжение генератора составляло 80 В.

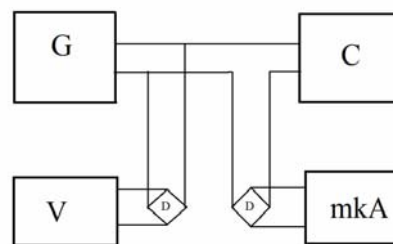


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки. G – генератор, C – ячейка для измерения емкости, D – диодные мостики, V – вольтметр, mkA – микроамперметр

Из рис. 1 видно, что от генератора переменный электрический ток подавался на ячейку для измерения емкости, которая представляла собой конденсатор,

между обкладками которого помещался образец. На поверхность пьезокерамики ЦТС по промышленной технологии были нанесены серебряные электроды путем вжигания серебряносодержащей пасты. Образец пьезокерамики представлял собой диск толщиной 6 мм и диаметром 38 мм. Величину напряжения и тока на обкладках конденсатора после выпрямления диодными мостиками измеряли с помощью вольтметра и микроамперметра соответственно. Для расчетов использовалась формула плоского конденсатора. Из экспериментальных данных находилось реактивное сопротивление, после этого, зная частоту переменного тока, находилась емкость конденсатора и диэлектрическая проницаемость пьезокерамики ЦТС-22.

Зависимости диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты переменного напряжения были получены при температурах $T_1 = 273$ К, $T_2 = 290$ К, $T_3 = 313$ К. Получена также температурная зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 в диапазоне температур 273 К $\leq T \leq 443$ К.

На рис. 2 приведены зависимости диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты переменного напряжения при различных температурах.

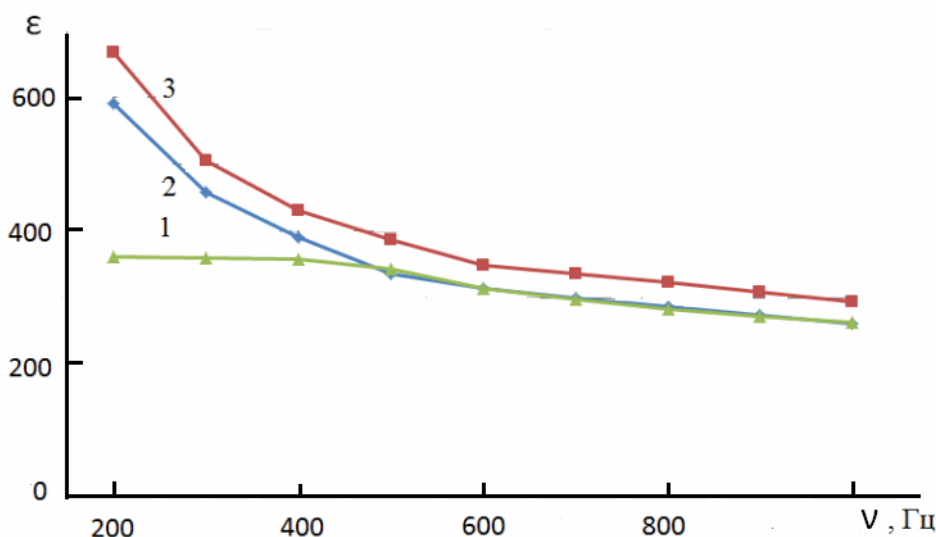


Рисунок 2. Зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 от частоты переменного напряжения при температурах 1- $T_1 = 273$ К; 2- $T_2 = 290$ К; 3- $T_3 = 313$ К.

Анализ полученных зависимостей диэлектрической проницаемости от частоты переменного напряжения при различных температурах показал, что для всех трех исследованных температур в диапазоне частот от 200 Гц до 1 кГц диэлектрическая проницаемость пьезокерамики ЦТС монотонно уменьшалась. При достижении значения частоты 1 кГц уменьшение диэлектрической проницаемости прекращалось, и при частотах $\nu > 1$ кГц ее значение выходило на насыщение (рис 2). При низкой температуре $T_1 = 273$ К диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты переменного напряжения и имеет самые низкие значения. При увеличении температуры значение диэлектрической проницаемости возрастает и наблюдается ее зависимость от частоты переменного напряжения. Такой характер частотно-температурной зависимости диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС объясняется тем, что у полярных диэлектриков при низких температурах за счет усиления межмолекулярных связей и резкого уменьшения подвижности молекул ориентация диполей затруднена, и

дипольная поляризация значительно ослаблена. При повышении температуры возможность ориентации диполей облегчается, дипольная поляризация увеличивается, что приводит к увеличению диэлектрической проницаемости пьезокерамики.

На рис. 3 приведена температурная зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 на частоте переменного напряжения 50 Гц. Характер температурной зависимости диэлектрической проницаемости соответствует дипольной поляризации полярных диэлектриков. Диэлектрическая проницаемость пьезокерамики ЦТС увеличивается с ростом температуры. Полученная температурная зависимость диэлектрической проницаемости удовлетворительно описываются уравнением:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{\frac{E_a}{kT}},$$

где ε_0 - диэлектрическая проницаемость при $T = 273$ К; E_a - энергия активации поляризации; k - постоянная Больцмана; T - температура.

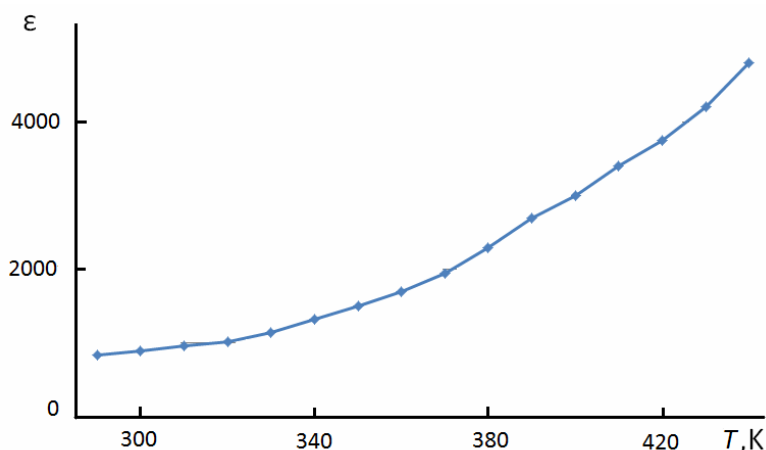


Рисунок 3. Зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 от температуры.

На основании приведенной зависимости нами был получен температурный коэффициент диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС:

$$TK_{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dT} = 0,66 \cdot 10^{-2} 1/K.$$

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости исследована в работах методом построения графиков в полулогарифмических координатах [15]–[16].

На рис. 4 приведена зависимость логарифма диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 от обратной температуры, т.е.

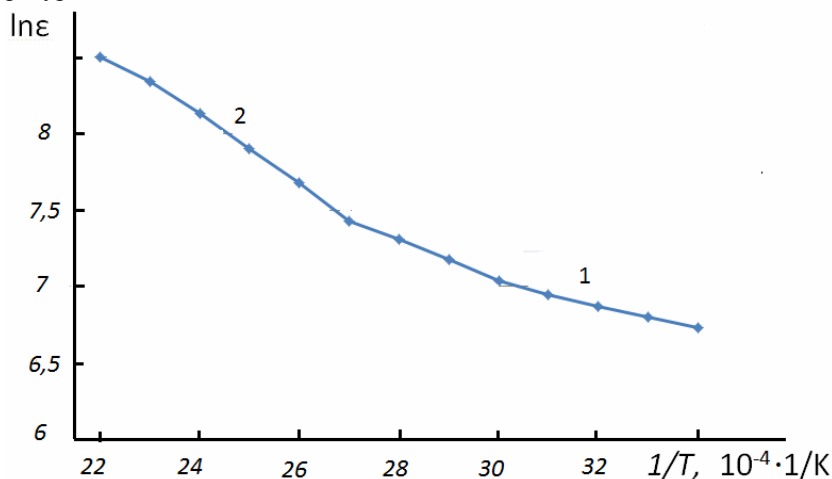


Рисунок 4. Зависимость логарифма диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 от обратной температуры. 1- область низких температур; 2- область высоких температур

Следовательно, тангенс угла наклона линейных участков на рис. 4 равен энергии активации поляризации. Ее значение для участка 1 в области температур $290 \text{ K} \leq T \leq 360 \text{ K}$ составило $E_a = 0,06 \text{ эВ}$, для участка 2 при температурах $390 \text{ K} \leq T \leq 440 \text{ K}$ - $E_a = 0,22 \text{ эВ}$. Проводя аналогию с температурной зависимости про-

$$\ln \varepsilon = f(1/T).$$

Анализ графика зависимости логарифма диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС от обратной температуры показывает, что на нем имеются две области, в которых он имеет линейный характер.

Логарифмируя уравнение (1), получим:

$$\ln \varepsilon = \ln \varepsilon_0 + \frac{E_a}{kT}.$$

водимости диэлектриков, можно говорить о существовании различных механизмов поляризации пьезокерамики ЦТС в исследованном температурном диапазоне и связи их с возникновением проводимости поляронного типа [19]. Энергия активации $E_a = 0,06 \text{ эВ}$ вероятно связана с процессом электронной поляриза-

ции за счет смещения электронов и перехода их с примесных уровней. Более высокое значение энергии активации $E_a = 0,22$ эВ при более высоких температурах может быть обусловлено тепловой ионной поляризацией за счет активации свободных или слабо связанных ионов.

Пьезокерамика ЦТС представляет собой ионный кристалл с плотноупакованной кристаллической решеткой со структурой перовскита [8]-[10]. Высокая поляризуемость керамики ЦТС обусловлена существованием различных механизмов поляризации: наряду с электронной, ионной и дипольной еще и доменной поляризацией [17]-[19]. Поэтому наличие на графике $\ln \varepsilon = f(1/T)$ участков с различной энергией активации и отражает возможные механизмы поляризации пьезокерамики ЦТС. В отличие от обычных диэлектриков диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков, и в частности пьезокерамики ЦТС, существенно зависит от внешних воздействий, что необходимо учитывать при эксплуатации ее в различных условиях.

V. ВЫВОДЫ

1. Частотно-температурная зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС в области низких частот имеет монотонно убывающий характер. При низкой температуре $T_1 = 273$ К диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты переменного напряжения электрического поля и имеет самые низкие значения. При увеличении температуры значение диэлектрической проницаемости возрастает и наблюдается ее зависимость от частоты переменного напряжения.

2. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС в области низких частот удовлетворительно описываются экспоненциальной функциональной зависимостью.

3. Из графика зависимость и логарифма диэлектрической проницаемости пьезокерамики ЦТС-22 от обратной температуры, т.е., определена энергия активации поляризации, значение которой в области температур $290 \text{ К} \leq T \leq 360 \text{ К}$ составило $E_a = 0,06$ эВ, а при $390 \text{ К} \leq T \leq 440 \text{ К}$ – $E_a = 0,22$ эВ. Наличие двух линейных участков на графике свидетельствует о существовании различных механизмов поляризации пьезокерамики ЦТС в исследованном температурном диапазоне.

4. При эксплуатации сегнетоэлектриков, и, в частности пьезокерамики ЦТС, необходимо учитывать существенную зависимость ее диэлектрической проницаемости от внешних воздействий

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Глозман, И.А. Пьезокерамика [Текст] / И.А. Глозман. - М.: Энергия, 1972. -288 с.
- [2] Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М.Тареев. - М.: Энергоиздат, 1982.-320 с.
- [3] Поплавко, Ю.М. Физика диэлектриков / К.: Вища школа, 1980. - 400 с.
- [4] Рез, И.С. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике / И.С. Рез, Ю.М. Поплавко. - М.: Радио и связь, 1989. - 288 с.
- [5] Гусев, Ю.А. Основы диэлектрической спектроскопии: учеб. пособие / Ю.А. Гусев. - Казань: Казан. гос. ун-т, 2008. - 112 с.
- [6] Александров К.С. Перовскиты, настоящее и будущее / К.С. Александров, Б.В. Безносиков. - Новосибирск: Изд-во Сиб. Отд-ние РАН, 2004. - 230 с.
- [7] Bell, A.J. Ferroelectrics: The role of ceramic Sci. and engineering / A.J. Bell // J. Eur. Ceraam. Soc. - 2008.-Vol.28. - P.1307-1317.
- [8] Веневцов, Ю.Н. Сегнетоэлектрики / Ю.Н. Веневцов. - Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. Ун-та, 1968. - С.155.
- [9] Лайнс, М. Сегнетоэлектрики и родственные материалы / М. Лайнс, А. Глас. - М.: Мир, 1981. - 736 с.
- [10] Смоленский Г.А. Физика сегнетоэлектрических явлений / Г.А. Смоленский, В.А. Боков, В.А. Исупов [и др.].-Л.: Наука, 1985. - 396 с.
- [11] Физика сегнетоэлектриков: современный взгляд / под ред. К.М. Рабе, Ч.Г. Ана, Ж.-М. Трискона; пер. с англ.-М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. - 440 с.
- [12] Физические основы, методы исследования и практическое применение пьезоматериалов / В.А. Головин, И.А. Каплунов, О.В. Малышкина и др.- М.: Техносфера. – 2013. - 272 с.
- [13] Золотаревский, А.И. Исследование спектральной зависимости диэлектрической проницаемости некоторых полярных диэлектриков в диапазоне низких частот / А.И. Золотаревский, С.П. Луцин // Электротехніка та електроенергетика. - 2017.- №1. - С.5-10. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-1>
- [14] Рассальский, А.Н. Методика измерения и обработки тока комплексной проводимости основной изоляции высоковольтной аппаратуры при диагностике под рабочим напряжением / А.Н. Рассальский, А.А. Сахно, С.П. Конограй, А.В. Козлов // Электротехніка та електроенергетика. – 2010 - №2. - С.12-17. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2010-2-3>
- [15] Малюшевская, А. Влияние состава и морфологии конденсаторных полимерных пленок на термостабильность их кратковременной электрической прочности / А. П. Малюшевская, С. О. Топоров // Электротехніка та електроенергетика. – 2016. – N 1. - С. 18-24. – Режим доступа : DOI : [10.15588/1607-6761-2016-1-3](https://doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-3).
- [16] Малюшевская, А. Долговременная электриче-

ская прочность полимерных пленок под воздействием электрического поля / А. П. Малюшевская, С. О. Топоров, В. И. Гунко // Электротехника и электроэнергетика. – 2017. – № 1. – С. 12-17. – Режим доступа: DOI : 10.15588/1607-6761-2017-1-2.

[17] Фесенко, Е.Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество / Е.Г. Фесенко - М.: Атомиздат, 1972. - 248 с.

[18] Galasso F.S. Structure properties and Preparation of

Perovskite-type Compounds / F/S/ Galasso-New York: Pergamon Press, 1969.-364 p.

[19] Галиярова, Н.М. Простейшая классификация типов диэлектрического отклика, проводимости и шумов и ее фрактальные обобщения / Н.М. Галиярова // Известия РАН. Сер. физическая. -2014.- т.78. - №10. - С.1220-1227.

Стаття надійшла до редакції 19.03.2018

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНО-ТЕМПЕРАТУРНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ П'ЄЗОКЕРАМІКИ ЦТС В ДІАПАЗОНІ НИЗЬКИХ ЧАСТОТ

ЗОЛОТАРЕВСЬКИЙ О.І. Ст. лаборант кафедри фізики ЗНТУ, Запоріжжя, Україна, e-mail: alexgoldenman2016@gmail.com;

ЛУЩИН С.П. канд. фіз.-матем. наук, доцент кафедри фізики ЗНТУ, Запоріжжя, Україна, e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

Мета роботи. Дослідити частотно-температурну залежність діелектричної проникності п'єзокераміки ЦТС в діапазоні низьких частот.

Методи дослідження. Для отримання частотно-температурної залежності діелектричної проникності п'єзокераміки ЦТС використовувалася методика визначення ємності конденсатора, між обкладками якого розміщувався досліджуваний зразок. За отриманого значення ємності конденсатора обчислювалося значення діелектричної проникності зразка.

Отримані результати. Авторами отримано частотно-температурна залежність діелектричної проникності п'єзокераміки ЦТС в діапазоні низьких частот. При низькій температурі діелектрична проникність практично не залежить від частоти змінної напруги, зі збільшенням температури її значення зростає і спостерігається залежність від частоти. Температурна залежність діелектричної проникності п'єзокераміки ЦТС задовільно описується експоненціальною функціональною залежністю в діапазоні низьких температур. З графіка залежність логарифма діелектричної проникності п'єзокераміки ЦТС від зворотної температури визначена енергія активації поляризації. Різні значення енергії активації для двох температурних ділянок свідчать про існування різних механізмів поляризації п'єзокераміки ЦТС в дослідженому температурному діапазоні.

Наукова новизна. Авторами досліджено частотно-температурна залежність діелектричної проникності п'єзокераміки ЦТС в діапазоні низьких частот. Встановлено, що температурна залежність діелектричної проникності п'єзокераміки ЦТС задовільно описується експоненціальною функціональною залежністю в діапазоні низьких температур. Визначено енергія активації поляризації для двох температурних ділянок.

Практична цінність. Результати досліджень можуть бути використані для вивчення механізму поляризації п'єзокерамічних матеріалів ЦТС, експлуатованих в електротехнічних і електронних виробках при впливі змінних електричних полів різних частот і зміні температури.

Ключові слова: частотно-температурна залежність; діелектрична проникність; п'єзокераміка ЦТС; діапазон низьких частот.

INVESTIGATION OF THE FREQUENCY-TEMPERATURE RELATIONSHIP OF THE DIELECTRIC PERMITTIVITY OF THE PZT PIEZOCERAMICS IN THE LOW FREQUENCY RANGE

ZOLOTAREVSKIY A.I. Senior assistant of the department of physics of ZNTU, Zaporozhie, Ukraine e-mail: alexgoldenman2016@gmail.com;

LUSHCHIN S.P. Cand. phys-math. Sci., associate professor, department of physics, ZNTU, Zaporozhie, Ukraine e-mail: luschin@zntu.edu.ua;

Purpose. To investigate the frequency-temperature relationship of the dielectric permittivity of PZT piezoceramics

in the low frequency range.

Methodology. To obtain the frequency-temperature relationship of the dielectric permittivity of the PZT piezoceramics, a technique was used to determine the capacitance of the capacitor, between which plates the sample was placed. The value of the dielectric permittivity of the sample was calculated from the capacitor capacitance obtained.

Findings. The frequency-temperature relationship of the dielectric permittivity of the PZT piezoceramics in the low frequency range has been obtained by the authors. The dielectric permittivity is not practically related to the frequency of the alternating voltage at a low temperature, with increasing in temperature its value increases and frequency relationship is observed. The temperature relationship of the dielectric permittivity of the PZT piezoceramics is satisfactorily described by the exponential functional dependence in the low-temperature range.

The activation energy of the PZT piezoceramics polarization is determined from the graph of the dependence of the logarithm of the dielectric permittivity upon the inverse temperature. Different values of the activation energy for the two temperature regions prove on the existence of different mechanisms of the PZT piezoceramics polarization in the temperature range being investigated.

Originality. The authors investigated the frequency-temperature relationship of the dielectric permittivity of the PZT piezoceramics in the low-frequency range. It is established that the temperature relationship of the dielectric permittivity of the PZT piezoceramics is satisfactorily described by an exponential functional relationship in the low-temperature range. The activation energy of polarization is determined for two temperature sections.

Practical value. The research results can be used to study the mechanism of polarization of PZT piezoceramic materials operating in electrical and electronic products under the influence of alternating electric fields of different frequencies and temperature changes.

Keywords: frequency-temperature relationship; dielectric permittivity; PZT piezoceramics; low-frequency range

REFERENCES

- [1] Glozman, I.A. (1972). P'ezokeramika, M, Jenergija, 288. [in Russian]
- [2] Tareev, B.M. (1982). Fizika dijelektricheskikh materialov, M, Jenergoizdat, 320. [in Russian]
- [3] Poplavko, Ju.M. (1980). Fizika dijelektrikov, K, Vishha shkola, 400. [in Russian]
- [4] Rez, I.S. (1989). Dijelektriki. Osnovnye svojstva i primeneniye v jelektronike, M, Radio i svjaz', 288. [in Russian]
- [5] Gusev, Ju.A. (2008). Osnovy dijelektricheskoy spektroskopii, Kazan', Kazan. gos. un-t, 112. [in Russian]
- [6] Aleksandrov, K. S. (2004). Perovskity, nastojashhee i budushhee, Novosibirsk, Izd-vo Sib. Otd-nie RAN, 230. [in Russian]
- [7] Bell, A.J. (2008). Ferroelectrics: The role of ceramic Sci. and engineering, J. Eur. Ceraam. Soc, 28, 1307-1317. [in Russian]
- [8] Venecov, Ju.N. (1968). Segnetojelektriki, Rostov-na-Donu, Izd-vo Rost. Un-ta, 155. [in Russian]
- [9] Lajns, M. (1981). Segnetojelektriki i rodstvennye materialy, M, Mir, 736. [in Russian]
- [10] Smolenskij, G.A. (1985). Fizika segnetojelektricheskikh javlenij, L, Nauka, 396. [in Russian]
- [11] Rabe, K.M. (2011). Fizika segnetojelektrikov: sovremennyj vzgljad, M, BINOM. Laboratorija znaniy, 440. [in Russian]
- [12] Golovnin, V.A. (2013). Fizicheskie osnovy, metody issledovaniya i prakticheskoe primeneniye p'ezomaterialov, M, Tehnosfera, 272. [in Russian]
- [13] Zolotarevskiy, A., & Lushchin, S. (2017). The study of the spectral relationship of the dielectric permittivity of polar dielectrics in the low frequency range. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 6-11. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-1> [in Russian]
- [14] Rassalsky, A., Sakhno, A., Konogray, S., & Kozlov, A. (2010). Measuring and processing technique of complex conduction current of 110–750 kV high-voltage equipment basic insulation at diagnostics under operating voltage. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 12-17. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2010-2-3> [in Russian]
- [15] Malyushevskaya, A., & Toporov, S. (2016). Composition and morphology of capacitor polymer films' influence on the thermostability of their short-term electric strength. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 18-24. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-3> [in Ukraine]
- [16] Malyushevskaya, A., Toporov, S., & Gunko, V. (2017). Long-term electrical strength of polymer films under the electrical field influence. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 12-17. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-2> [in Ukraine]
- [17] Fesenko, E.G. (1972). Semejstvo perovskita i segnetojelektrichestvo, M, Atomizdat, 248. [in Russian]
- [18] Galasso, F.S. (1969). Structure properties and Preparation of Perovskite-type Compounds, Galasso-New York, Pergamon Press, 364. [in Russian]
- [19] Galijarova, N.M. (2014). Prostejshaja klassifikacija tipov dijelektricheskogo otklika provodimosti i shumov i ee fraktal'nye obobshhenija. *Izvestija RAN. Ser. Fizicheskaja*, 78, 10, 1220-1227. [in Russian]