

УДК 53.097:537.226.4

НЕЛИНЕЙНЫЕ И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПЬЕЗОКЕРАМИКЕ В ОБЛАСТИ СЛАБЫХ ПОСТОЯННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

© 2023 г. Н. А. Швецова^{1, *}, И. А. Швецов¹, Е. И. Петрова¹, А. Н. Резниченко¹, А. Н. Рыбьянец¹

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Южный федеральный университет”, Научно-исследовательский институт физики, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: nashvecova@sfedu.ru

Поступила в редакцию 14.04.2023 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принята к публикации 29.05.2023 г.

Изучены эффекты пьезоэлектрического гистерезиса и релаксации, индуцированные слабым постоянным электрическим полем в сегнетоэлектрической керамике. С использованием метода и программы пьезоэлектрического резонансного анализа выполнены прецизионные измерения спектров импеданса для толщинных и радиальных колебаний тонких пьезокерамических дисков при различных поляриностях приложенного постоянного электрического поля и поляризации пьезокерамики. Проведен анализ полевых и временных зависимостей комплексных пьезоэлектрических констант пьезокерамики, полученных путем обработки последовательно измеренных спектров импеданса, и предложена физическая интерпретация результатов.

DOI: 10.31857/S0367676523702393, EDN: AERNED

ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов доменных переориентаций в сегнетоэлектрической керамике и кристаллах под действием постоянного электрического поля чрезвычайно важно как для оценки свойств материалов, так и для практического использования этих материалов в ультразвуковых преобразователях, пьезоэлектрических сенсорах и актюаторах [1]. Изучение зависимостей упругих, пьезоэлектрических и электромеханических параметров сегнетокерамики от электрического поля представляет собой сложную и неоднозначную задачу из-за временных изменений параметров, вызванных переходными процессами (релаксация пространственного заряда, процессы доменной ориентации и др.). Стандартные методы исследования полевых зависимостей свойств сегнетоэлектриков (измерение петель гистерезиса и тока, обратной диэлектрической проницаемости и др.) широко используются для оценки спонтанной и остаточной поляризации, а также для изучения процесса доменных переориентаций в сильных электрических полях [2, 3]. Современные ультразвуковые методы, а также электронная (СЭМ) и атомно-силовая (АСМ) микроскопия позволяют оценить доменную структуру сегнетоэлектриков и ее эволюцию под внешними воздействиями [4–6]. Однако эти методы явно не работают при изучении нелинейных

процессов и релаксационных явлений в сегнетокерамике под действием слабых постоянных электрических полей. Кроме того, эти методы не позволяют оценить комплексные параметры сегнетокерамики, ответственные за несинфазный отклик материала на внешние воздействия, а также их зависимости от электрического поля.

В наших предыдущих работах [7, 8] мы предложили новый метод исследования релаксационных и переходных процессов в сегнетоэлектрической керамике при внешних воздействиях, основанный на измерении и анализе спектров импеданса. Последовательные прецизионные измерения и анализ пьезорезонансных спектров толщинной и радиальной мод колебаний тонких пьезокерамических дисков позволили получить временные и полевые зависимости комплексных диэлектрических параметров сегнетокерамики под действием слабых постоянных электрических полей.

В настоящей работе исследовались эффекты пьезоэлектрического гистерезиса и релаксации в сегнетоэлектрической керамике, индуцированные слабым постоянным электрическим полем. Прецизионные измерения импедансных спектров толщинных и радиальных колебаний тонких пьезокерамических дисков при различных поляриностях приложенного постоянного электрического поля проводились с использованием метода и программы пьезоэлектрического резонансного анализа (PRAP) [9].

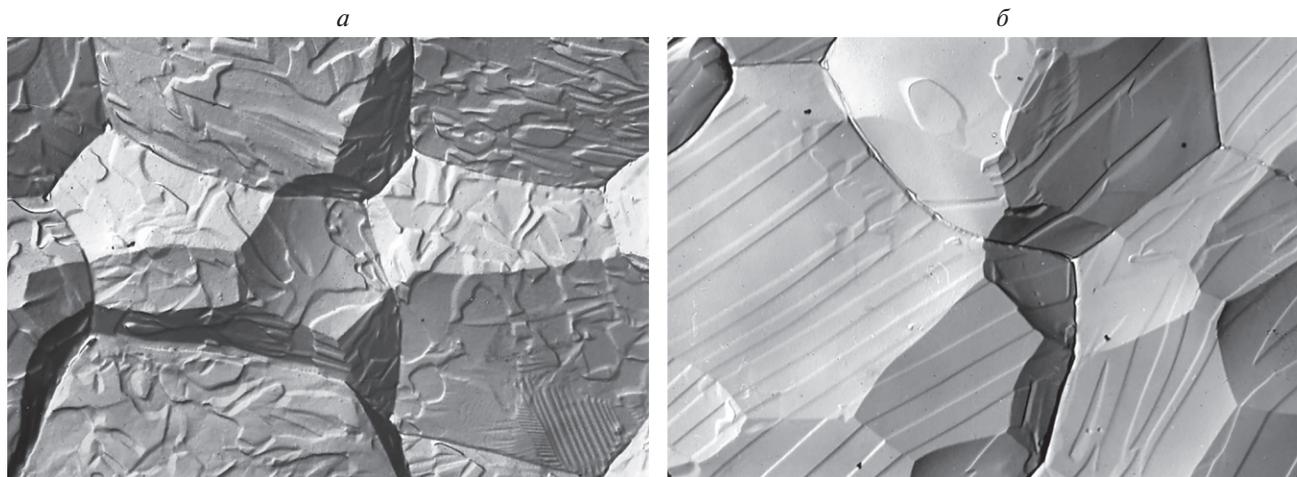


Рис. 1. Микрофотография доменной структуры зерен пьезокерамики $\text{PbTi}_{0.45}\text{Zr}_{0.53}(\text{W}_{1/2}\text{Cd}_{1/2})_{0.02}\text{O}_3$, выявленной термическим травлением, до (а) и после (б) поляризации.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Последовательные прецизионные измерения и анализ спектров пьезоэлектрического резонанса при воздействии постоянного электрического поля были выполнены с использованием анализатора импеданса Agilent 4294A с интегрированным модулем постоянного напряжения (± 40 В). Модуль сбора данных PRAP для временного сканирования в постоянном электрическом поле использовался для получения и анализа спектров пьезоэлектрического резонанса. Измерения проводились в области слабых постоянных электрических полей, значительно меньших коэрцитивного поля. Шаг изменения постоянного напряжения был установлен равным 20 В при числе циклов, равным 5. Время выборки импедансных спектров было выбрано равным 3 с.

Объектом исследования была выбрана сегнетомягкая пьезокерамика на основе ЦТС состава $\text{PbTi}_{0.45}\text{Zr}_{0.53}(\text{W}_{1/2}\text{Cd}_{1/2})_{0.02}\text{O}_3$ [10], принадлежащая к ромбоэдрической границе области морфотропного фазового перехода, характеризующаяся малым коэрцитивным полем E_C (7.5 кВ/см при частоте 50 Гц) и наличием как 90° - и 180° -ых тетрагональных, так и 180° -, 109° - и 71° -ных ромбоэдрических доменов. Для экспериментов использовались тонкие диски, изготовленные из горячепрессованной пьезокерамики, диаметром 6 мм и толщиной 0.21 мм. Пьезокерамические элементы поляризовались на воздухе путем приложения к серебряным электродам постоянного электрического поля (~ 1 кВ/мм) при нагреве выше температуры Кюри ($\sim 340^\circ\text{C}$) и охлаждении до комнатной температуры. Микроструктуру и доменную структуру образцов пьезокерамики ис-

следовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (JEOL JSM-6390LA).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены микрофотографии доменной структуры зерен пьезокерамики $\text{PbTi}_{0.45}\text{Zr}_{0.53}(\text{W}_{1/2}\text{Cd}_{1/2})_{0.02}\text{O}_3$ до и после поляризации, выявленной термическим травлением, полученные с помощью электронного микроскопа с использованием техники реплик. На микрофотографии представлен вид сверху пьезокерамического диска в направлении приложения поляризующего поля.

Поверхность кристаллитов у выхода положительного конца 180° -ных доменов травится быстрее, чем отрицательных, а скорость травления 90° -ных доменов оказывается промежуточной. Как видно из рисунка, поляризация приводит к полной реализации всех 180° -ных доменных поворотов и исчезновению встречных 180° -ных доменов (рис. 1а). Доменная структура зерен поляризованной пьезокерамики характеризуется наличием пластинчатых 90° -ных тетрагональных, а также 109° - и 71° -ных ромбоэдрических доменов (рис. 1б).

Примеры импедансных спектров (зависимости импеданса и фазы от частоты) для радиальной (а) и толщинной (б) мод колебаний тонкого пьезокерамического диска ПКР-1 приведены на рис. 2.

Анализ полученных пьезорезонансных спектров с использованием программы PRAP позволяет получить соответствующие комплексные упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические параметры исследованных образцов поляризованной пьезокерамики. Последовательные измерения и анализ спектров пьезоэлектрического резо-

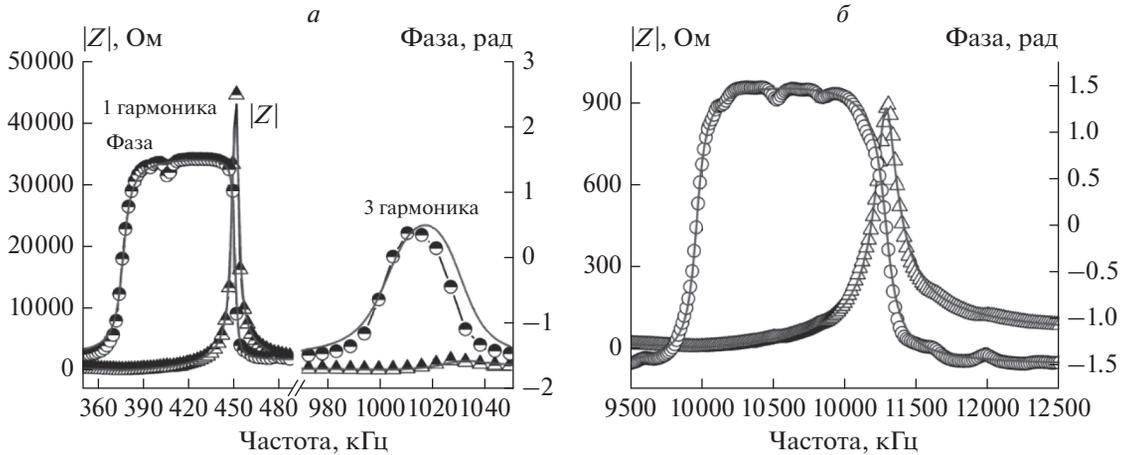


Рис. 2. Экспериментальные спектры импеданса и аппроксимации PRAP для радиальной (а) и толщинной (б) колебательных мод пьезокерамического диска.

нанса при воздействии постоянного электрического поля позволяет получить полевые зависимости комплексных параметров пьезокерамики.

В табл. 1 приведены комплексные параметры исследуемой пьезокерамики, полученные с помощью PRAP анализа импедансного спектра, измеренного до приложения постоянного электрического поля, для радиальной моды колебаний тонких пьезокерамических дисков (рис. 2а). Резонансная частота элемента пьезокерамики составляла 374.8 кГц. Приведенные в таблице параметры использованы для расчета и анализа поперечного пьезомодуля d_{31} :

$$d_{31} = \epsilon_{33}^T g_{31} = e_{31} (S_{11}^E + S_{12}^E) + e_{33} S_{13}^E,$$

где e_{31} , e_{33} – пьезоконстанты механического напряжения, ϵ_{33}^T – диэлектрическая проницаемость механически свободного образца, g_{31} – пьезоконстанта электрического напряжения, S_{11}^E , S_{12}^E , S_{13}^E –

компоненты тензора упругих податливостей при постоянном электрическом поле.

Комплексные параметры исследуемой пьезоэлектрической керамики, полученные с использованием анализа пьезорезонансных спектров, измеренных до приложения постоянного электрического поля, для толщинной моды колебаний (рис. 2б) приведены в табл. 2. Резонансная частота пьезокерамического элемента составляла 11.3 МГц. Приведенные в таблице параметры использованы для расчета и анализа пьезоконстанты механического напряжения e_{33} :

$$e_{33} = h_{33} \epsilon_{33}^S = 2d_{31} C_{13}^E + d_{33} C_{33}^E,$$

где e_{33} – пьезоконстанта механического напряжения, h_{33} – пьезоконстанта деформации, ϵ_{33}^S – диэлектрическая проницаемость механически зажатого образца, d_{31} – поперечный пьезоэлектрический

Таблица 1. Комплексные электромеханические параметры пьезокерамики $\text{PbTi}_{0.45}\text{Zr}_{0.53}(\text{W}_{1/2}\text{Cd}_{1/2})_{0.02}\text{O}_3$, измеренные на радиальной моде колебаний при нулевом постоянном электрическом поле

Коэффициент электромеханической связи радиальной моды колебаний		Диэлектрическая проницаемость механически свободного образца	
k_p'	k_p''	$\epsilon_{33}^T, \Phi/\text{м}$	$\epsilon_{33}^{T//}, \Phi/\text{м}$
0.594392	0.01071	$4.54 \cdot 10^{-9}$	$2.18 \cdot 10^{-10}$
Упругие податливости при постоянном электрическом поле			
$S_{11}^{E/}, \text{м}^2/\text{Н}$	$S_{11}^{E//}, \text{м}^2/\text{Н}$	$S_{66}^{E/}, \text{м}^2/\text{Н}$	$S_{66}^{E//}, \text{м}^2/\text{Н}$
$1.1 \cdot 10^{-11}$	$1.15 \cdot 10^{-13}$	$2.76 \cdot 10^{-11}$	$-1.38 \cdot 10^{-13}$
Поперечный пьезомодуль		Коэффициент Пуассона	
$ d_{31}' , \text{Кл}/\text{Н}$	$ d_{31}'' , \text{Кл}/\text{Н}$	σ^P	$\sigma^{P//}$
$8.08 \cdot 10^{-11}$	$4.2 \cdot 10^{-12}$	0.258513	0.006937

Таблица 2. Комплексные электромеханические параметры пьезокерамики $\text{PbTi}_{0.45}\text{Zr}_{0.53}(\text{W}_{1/2}\text{Cd}_{1/2})_{0.02}\text{O}_3$, измеренные на толщинной моде колебаний при нулевом постоянном электрическом поле

Коэффициент электромеханической связи		Диэлектрическая проницаемость	
k_t'	k_t''	$\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}^{S''}/\epsilon_0$
0.51	$4.86 \cdot 10^{-5}$	242.9	11.8
Модули упругости при постоянной индукции D		Модули упругости при постоянном электрическом поле E	
$C_{33}^{D'}$, Н/м ²	$C_{33}^{D''}$, Н/м ²	$C_{33}^{E'}$, Н/м ²	$C_{33}^{E''}$, Н/м ²
$1.80 \cdot 10^{11}$	$2.16 \cdot 10^9$	$1.32 \cdot 10^{11}$	$1.60 \cdot 10^9$
Пьезоконстанты			
e_{33}' , Кл/м ²	e_{33}'' , Кл/м ²	h_{33}' , В/м	h_{33}'' , В/м
10.09	0.185	$4.69 \cdot 10^9$	$1.42 \cdot 10^8$

модуль, d_{33} – продольный пьезоэлектрический модуль, C_{13}^E, C_{33}^E – компоненты тензора модулей упругости при постоянном электрическом поле.

На рис. 3 показан пример полевых зависимостей комплексного пьезоэлектрического модуля d_{31} пьезокерамики от постоянного поля. Положительные значения постоянного электрического поля E соответствуют противоположным направлениям начальной поляризации пьезокерамики P и приложенного поля E . Изменения действительной части пьезомодуля $|d_{31}'|$ в этом случае определяются, главным образом, частичной деполяризацией сегнетоэлектрической керамики и усилением пьезоэлектрического взаимодействия доменов в деполяризованной пьезокерамике.

Частичная деполяризация пьезоэлектрической керамики при противоположных направлениях остаточной поляризации P и приложенного постоянного поля E приводит к наблюдаемому увеличению $|d_{31}'|$ (рис. 3а) в результате обратимых 71°, 90°- и 109°-ных поворотов доменов. Реализуемые в этом случае доменные переориентации также вызывают снятие дополнительных механических напряжений, приводящее к падению $|d_{31}''|$ (рис. 3б).

В свою очередь, при совпадающих направлениях приложенного поля E и остаточной поляризации P (отрицательные значения приложенного поля E) происходит дополнительная поляризация сегнетоэлектрической керамики в результате обратимых 90°- (71°, 109°-ных) поворотов доменов, вызывающих дополнительные механические напряжения, что приводит к наблюдаемому увеличению $|d_{31}'|$ и $|d_{31}''|$ (рис. 3а и 3б).

Полученные зависимости имеют типичный гистерезисный характер, вызванный, в основном, процессами доменной релаксации, а наблюдаемые

наклоны и асимметрия петель гистерезиса обусловлены начальной поляризацией пьезоэлектрического элемента и направлением приложенного постоянного электрического поля.

Процессы релаксации объемного заряда, отмеченные в [11–13], в настоящем случае являются малосущественными из-за используемых значений постоянного электрического поля и времени выборки (~3 с) последовательных импедансных спектров.

Полевые зависимости действительной e_{33}' и мнимой e_{33}'' частей пьезоэлектрической константы e_{33} приведены на рис. 3в и 3г. Положительные значения E в данном случае соответствуют противоположным направлениям приложенного постоянного электрического поля E и начальной поляризации P пьезокерамики. Зависимость e_{33} в нашем случае аномальна (увеличение пьезоконстанты при частичной деполяризации пьезокерамики) и определяется рядом факторов: усилением пьезоэлектрического взаимодействия доменов, вызванным обратимыми 90°, 109°- и 71°-ными поворотами доменов, а также аномальным увеличением диэлектрической проницаемости керамики ϵ_{33}^S .

Пьезоэлектрическая постоянная e_{33} может быть выражена следующим образом [2]:

$$e_{33} = k_t (C_{33}^D)^{1/2} \epsilon_{33}^S,$$

где C_{33}^D – модуль упругости при постоянной электрической индукции D , ϵ_{33}^S – диэлектрическая проницаемость механически зажатого образца, а k_t – коэффициент электромеханической связи толщинной моды колебаний. Поскольку C_{33}^D и k_t очевидно уменьшаются при деполяризации пьезокерамики [11], наблюдаемое увеличение дей-

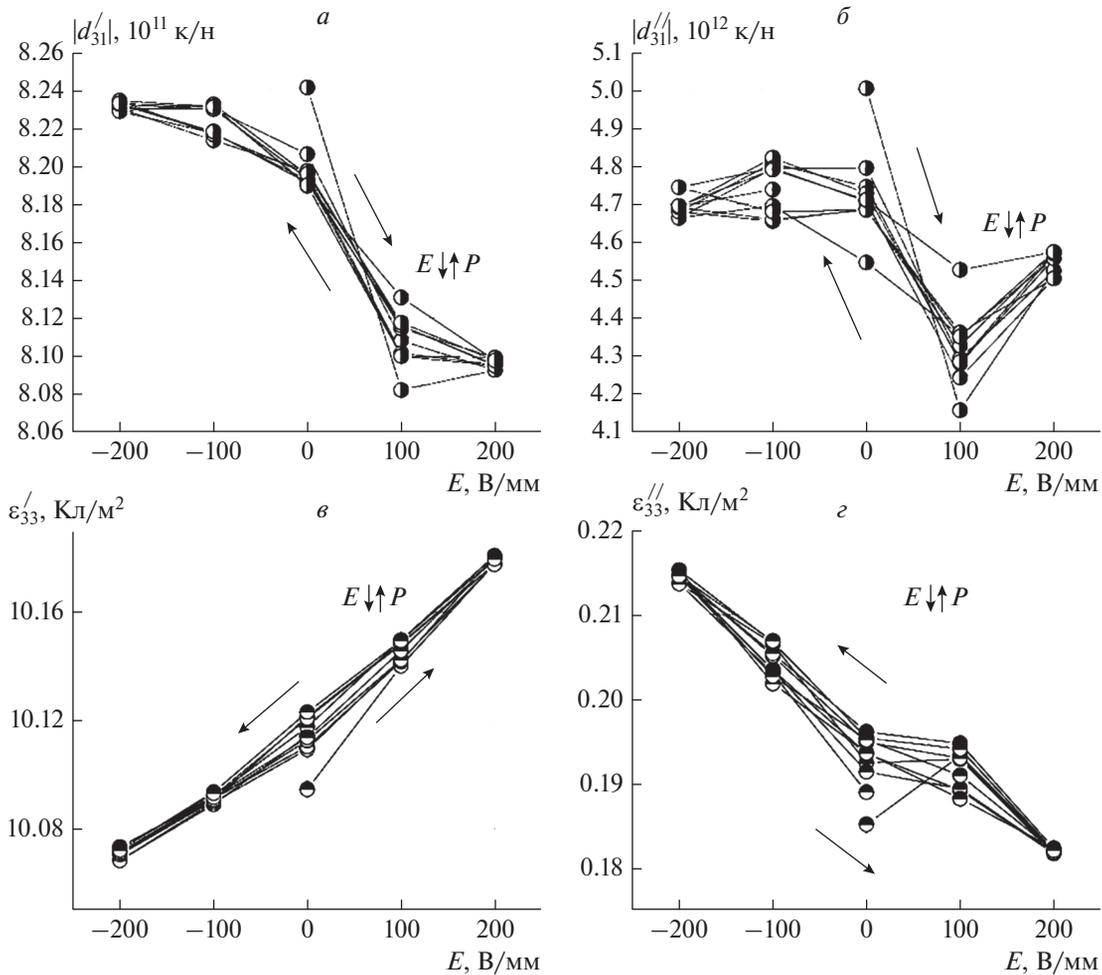


Рис. 3. Экспериментальные зависимости действительной $|d'_{31}|$ (а) и мнимой $|d''_{31}|$ (б) частей пьезоэлектрического модуля d_{31} , а также действительной e'_{33} (в) и мнимой e''_{33} (г) частей пьезоконстанты e_{33} от постоянного электрического поля E для толщинной и радиальной мод колебаний пьезокерамического диска, полученные в результате анализа последовательных спектров импеданса.

ствительной части e'_{33} при противоположных направлениях E и P (рис. 3в) обусловлено, главным образом, указанным ростом диэлектрической проницаемости ϵ_{33}^S при деполяризации керамики (диэлектрическая проницаемость исследованной пьезокерамики ϵ_{33}^S существенно возрастает при деполяризации ($\epsilon \gg \epsilon_{33}^S$) [10]).

Частичная деполяризация пьезокерамики в этом случае приводит также к снятию механических напряжений в результате обратимых 90° -, 71° -, и 109° -ных доменных поворотов и обуславливает наблюдаемое уменьшение мнимой части e''_{33} (рис. 3г).

В свою очередь, дополнительная поляризация пьезокерамики при совпадающих направлениях приложенного электрического поля E и исход-

ной поляризации P приводит к уменьшению e'_{33} и росту e''_{33} из-за обратимых 90° -, 71° - и 109° -ных поворотов доменов, появления механических напряжений и ослабления “зажатия” (пьезоэлектрического взаимодействия) доменов [1, 11].

Примеры временных зависимостей действительной e'_{33} и мнимой e''_{33} частей пьезоэлектрической константы e_{33} , полученные путем анализа последовательно измеренных импедансных спектров в постоянном электрическом поле различной полярности $E = \pm 200$ В/мм показаны на рис. 4. Следует отметить, что пьезокерамические образцы предварительно поляризовались в сильном постоянном электрическом поле, поэтому воздействие слабого электрического поля может приводить лишь к незначительным изменениям пьезоэлектрических постоянных пьезокерамики.

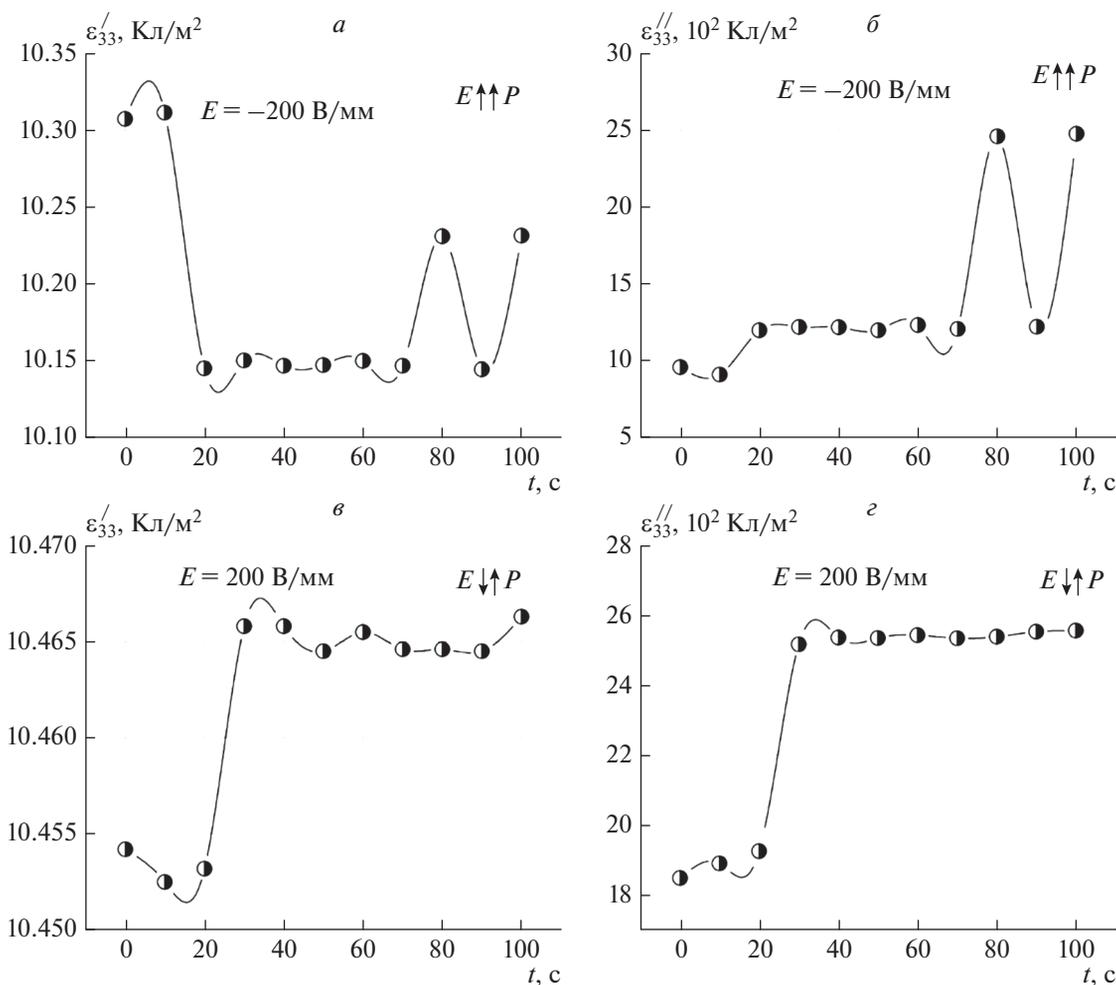


Рис. 4. Временные зависимости действительной e'_{33} и мнимой e''_{33} частей пьезоконстанты e_{33} , полученные из анализа последовательных импедансных спектров тонкого пьезокерамического диска при приложении отрицательного $E = -200$ В/мм (а, б) и положительного $E = 200$ В/мм (в, г) электрического поля.

Дополнительная поляризация предварительно поляризованной пьезоэлектрической керамики в соответствии с анализом полевых зависимостей (рис. 3) в нашем случае должна приводить к уменьшению пьезоэлектрической постоянной e'_{33} , а ее частичная деполяризация – к росту e'_{33} . Экспериментально наблюдаемые изменения e'_{33} (рис. 4а и 4в) зависят от полярности приложенного постоянного электрического поля и определяются обратимыми 90°, 71°, и 109°-ными доменными поворотами, а также движением носителей объемного заряда в пьезокерамике [11–13].

В случае приложения отрицательного электрического поля направления остаточной поляризации пьезокерамики P и поля E совпадают. Дополнительная поляризация пьезокерамики в результате обратимых 90°, 109°- и 71°-ных поворотов доменов приводит к резкому, приблизительно в течение 20 секунд, убыванию действи-

тельной части пьезоконстанты e'_{33} (рис. 4а). Наблюдаемое падение e'_{33} сопровождается увеличением мнимой части пьезоконстанты e''_{33} (рис. 4б), связанным с возникновением механических напряжений, вызванными обратимыми 90°, 109°- и 71°-ными доменными переориентациями.

Релаксация e'_{33} к установившемуся значению, следующая за ее резким падением, обусловлена отдельными обратимыми 90°, 71°- и 109°-ными доменными поворотами в исходное положение, вызванными механическими напряжениями и экранированием приложенного электрического поля носителями объемного заряда, препятствующими дальнейшему изменению остаточной поляризации керамики. Наблюдаемая релаксация мнимой части пьезоэлектрической постоянной e''_{33} обусловлена отмеченным выше e'_{33} частичным снятием неоднородных механических напряже-

ний вследствие обратимых 90°-, 109°- и 71°-ных поворотов доменов. Пульсации зависимостей e_{33}' и e_{33}'' , наблюдаемые на графиках, обусловлены отдельными актами переориентаций доменов.

При приложении положительного электрического поля E , направление которого противоположно направлению остаточной поляризации пьезокерамики P (частичная деполяризация), наблюдается резкий рост действительной части пьезоконстанты e_{33}' (рис. 4в) в течение примерно 20 с из-за частичной деполяризации пьезокерамики, вызванной 90°-, 109°- и 71°-ными обратимыми поворотами доменов.

Пульсирующая релаксация e_{33}' к стационарному значению, следующая за резким ростом пьезоконстанты, вызвана отдельными обратными 90°-, 109°- и 71°-ными доменными переориентациями и экранированием приложенного электрического постоянного поля носителями объемного заряда, которые закрепляют доменные стенки [11]. Рост пьезоэлектрической постоянной e_{33}' сопровождается резким увеличением ее мнимой части e_{33}'' (рис. 4г), вызванным механическими напряжениями в результате отмеченных выше доменно-ориентационных процессов, обусловленных частичной деполяризацией пьезоэлектрической керамики и последующей осциллирующей релаксацией к установившемуся значению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют заключить, что экспериментально наблюдаемый гистерезис полевых зависимостей, а также релаксационный характер временных зависимостей комплексных характеристик сегнетомягкой пьезокерамики на основе ЦТС состава $\text{PbTi}_{0.45}\text{Zr}_{0.53}(\text{W}_{1/2}\text{Cd}_{1/2})_{0.02}\text{O}_3$ при воздействии слабых постоянных электрических полей, меньших коэрцитивного, обусловлен обратимыми переориентациями 90°- (71°-, 109°-ных) доменов, приводящими к изменению остаточной поляризации, и процессами экранирования приложенного электрического поля носителями объемного заряда.

Полученные результаты показали, что метод пьезорезонансного анализа обеспечивает высо-

кую точность определения комплексных констант пьезоэлектрических материалов и их изменений в слабых электрических полях и позволяет уточнить механизмы релаксационных и переходных процессов в сегнетоэлектрической керамике с учетом несинфазной реакции материала на внешние воздействия. Разработанный метод позволяет регистрировать изменения измеряемых величин, не превышающие 0.2%, недостижимые для стандартных методов измерения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное ассигнование в сфере научной деятельности № FENW-2023-0015/ГЗ0110/23-08-ИФ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao D., Lenz T., Gelinck G.H. et al. // Nature Commun. 2019. V. 10. No. 6. Art. No. 2547.
2. IEEE Standard on piezoelectricity. ANSI/IEEE Std. 176-1987. New York: IEEE 1987. 176 p.
3. Kwok K.W., Chan H.L.W., Choy C.L. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1997. V. 44. No. 4. P. 733.
4. Esin A.A., Alikin D.O., Turygin A.P. et al. // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. No. 7. Art. No. 074101.
5. Turygin A.P., Alikin D.O., Abramov A.S. et al. // Ferroelectrics. 2017. V. 508. No. 1. P. 77.
6. Rybaniets A., Motsarenko T., Goland V., Kushkuley L. // Proc. USE2007 (Tsukuba, 2007). P. 1909.
7. Швецов И.А., Луговая М.А., Швецова Н.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 8. С. 14; Shvetsov I.A., Lugovaya M.A., Shvetsova N.A. et al. // Tech. Phys. Lett. 2020. V. 46 No. 4. P. 368.
8. Shvetsova N.A., Shcherbinin S.A., Shvetsov I.A. et al. // Ferroelectrics. 2021. V. 576. No. 1. P. 100.
9. <https://www.tasitechnical.com/prap>.
10. Konstantinov G.M., Rybaniets A.N., Konstantinova Y.B. et al. // In: Advanced materials: manufacturing, physics, mechanics and applications. N.Y.: Springer Proc. Phys, 2016. P. 229.
11. Berlincourt D.A., Curran D.R., Jaffe H. Physical acoustics. N.Y.: Academic Press, 1964. P. 169.
12. Shen L.C., Kong J.A. Applied electromagnetism. Boston: PWS Engineering, 1983.
13. Rybaniets A.N., Chang S.-H., Theerakulpisut S. // In: Advanced materials – studies and applications. N.Y.: Nova Science Publishers Inc., 2015. P. 147.

Nonlinear and relaxation processes in piezoceramics in weak electric fields

N. A. Shvetsova^a, *, I. A. Shvetsov^a, E. I. Petrova^a, A. N. Reznichenko^a, A. N. Rybaniets^a

^aInstitute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia

*e-mail: nashvecova@sfnu.ru

We study the effects of piezoelectric hysteresis and relaxation induced by a weak constant electric field in ferroelectric ceramics. Using the piezoelectric resonance analysis method and program, precision measurements of the impedance spectra for thickness and radial vibrations of thin piezoceramic disks were performed for various polarities of the applied constant electric field and polarization of the piezoceramic. An analysis of the field and time dependences of the complex piezoelectric constants of piezoceramics obtained by processing sequentially measured impedance spectra is carried out, and a physical interpretation of the results is proposed.