

Особенности зависимости тока переполяризации в сегнетокерамике от взаимной ориентации вектора напряженности электрического поля и остаточной поляризации

Л.В. Жога¹, В.В. Коренева², Р.В. Диков¹

¹*Волгоградский государственный технический университет*

²*Волгоградская государственная академия физической культуры*

Аннотация: Приведены результаты анализа токов утечки в зависимости от времени в образцах поликристаллической сегнетоэлектрической керамики ЦТСНВ- 1 (твердых растворов титаната-цирконата свинца с примесями натрия и висмута) при условии приложения постоянного электрического поля. Рассматривались партии образцов, которые с разными условиями хранения, поэтому одна группа керамических образцов оказалась стандартной, а вторая – дефектной. В этих группах электрофизические параметры не имели отличий, за исключением большой разницы в значениях тангенса диэлектрических потерь - $\text{tg}\delta$. При измерении временных зависимостей флуктуаций тока была использована схема Мерца. Определен характер временных зависимостей тока утечки с ростом электрического поля, прикладываемого к образцам с отличными значениями $\text{tg}\delta$. Экспоненциальный спад сопровождается случайными скачками изменениями величины тока утечки.

Ключевые слова: мобильные роботы, поляризация, деполяризация, сегнетоэлектрики, ток поляризации, остаточная поляризация, диэлектрические потери, электрическая нагрузка, доменная структура, электрический пробой, механическое разрушение.

Введение

Мобильные роботы имеют широкое применение, в частности при выполнении работ в экстремальных условиях, преимущественно в открытом космосе. Поэтому исследования направлены на снижение массы микроробота, осуществление возможности его перемещения по неровным и криволинейным поверхностям [1].

Мобильный микроробот содержит подвижную платформу со средством ее перемещения, при этом средство перемещения платформы выполнено в виде изгибающихся под внешним воздействием элементов. Изгибающиеся элементы могут быть выполнены в виде различного вида микромеханических актюаторов - тепловых, пьезоэлектрических, биметаллических, с памятью формы. Условия эксплуатации поликристаллических диэлектриков, находящихся под воздействием внешних факторов (механические и

электрические поля) толкают исследователей к исследованию свойств таких керамик на предмет их способности выдерживать экстремальные нагрузки, которая сильно зависит от процессов переполяризации и динамики доменов [2, 3]. В условиях малых напряжений движение доменных стенок приводит к выравниванию перенапряжений структуры, а в условиях воздействия больших напряжений – к увеличению перенапряжений, что приводит к появлению микротрещин [4 – 6]. На кинетику разрушения оказывает влияние сегнетоэлектрическое состояние и межфазные границы или релаксация напряжений в результате переориентации 90° (пластическая деформация) [7].

Так как условия, в которых работают пьезокерамики сильно зависят от внешних воздействий, то возникают ситуации, при которых в керамике начинаются необратимые процессы (механическое разрушение, деполяризация, переполяризация и др.) [8]. По этой причине проводились исследования по влиянию механических и электрических воздействий на керамический материал цирконата титаната свинца с примесями Na и Bi (ЦТСНВ-1 – твердых растворов титаната-цирконата свинца с примесями натрия и висмута) для двух партий – стандартной (СП) и дефектной из-за большого тангенса диэлектрических потерь (ДП) образцов.

Характер влияния электрических полей, механических нагрузок на доменную структуру при исследовании проблемы прочности керамики играет немаловажную роль в процессе эксплуатации сегнетокерамик.

Методика эксперимента и образцы

Керамические образцы были изготовлены на заводе «Аврора», причем условия хранения двух групп образцов стандартной (СП) и дефектной (ДП) значительно отличались. Это привело к сильной разнице по значениям диэлектрических потерь в двух группах, хотя остальные электрические параметры образцов не отличались.

Временные зависимости флуктуаций тока в СП и ДП были измерены при помощи схемы Мерца [9]. Для испытаний использовались образцы толщиной 12 мм и диаметром 30 мм как из дефектной, так и стандартной партий:

1. поляризация по полю ($\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}_r \vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}_r$);

2. поляризация против поля ($\vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}_r \vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}_r$);

ЦТНСВ-1 модели имели толщину $h=12$ мм и диаметр вожженных электродов $d=30$ мм. Подача поля на образцы осуществлялась ступенчато. Электрические воздействия на СК осуществлялись при помощи выпрямителя высокого напряжения ВС-23 и через интерфейс MAXtexRS-232 фиксировали отклик на образце в момент включения электрической нагрузки. При постоянном напряжении на образце были измерены флуктуации тока при установлении тока утечки, которые представляют временной ряд, допускающий только статистическое описание [10, 11]

Результаты опытов и обсуждение

Представленные на рис. 1-3 данные измерений эксперимента, получены при следующих условиях, для десяти образцов сегнетокерамики каждой партии: образцы находятся под действием равной механической нагрузки и постоянного электрического поля напряженностью $E=0,08$ МВ/м, через некоторое время снимали электростатическую нагрузку, затем подавая на образцы увеличенную напряженность постоянного электрического поля $E=0,25$ МВ/м и так же для $E=0,42$ МВ/м. Установлена разница в величинах значений токов для СП и ДП в момент подачи напряжения величиной 1, 3 и 5 кВ и в скорости спадания тока при выдержке образца под постоянным напряжением (рис.1-3) причем изменение характеристики сопровождается всплесками и скачками её величины.

Таблица 1.

Средние значения, по полю и против поля вектора поляризации, токов образцов СП и ДП.

Образцы		$E, \text{МВ/м}$	$I_{\text{max}} \text{ мКл/м}$	$\Delta t, \text{с}$
СП	$\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}$	0,25МВ/м	0,002	4
СП	$\vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}$	0,25МВ/м	0,017	1,5
СП	$\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}$	0,42МВ/м	0,012	2
СП	$\vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}$	0,42МВ/м	0,0175	1,2
ДП	$\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}$	0,25МВ/м	0,0065	15
ДП	$\vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}$	0,25МВ/м	0,0175	2,5
ДП	$\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}$	0,42МВ/м	0,01	10
ДП	$\vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}$	0,42МВ/м	0,022	10

Сравнивая, по полю и против поля, средние значения токов пяти СП образцов, при нагрузке полем 0,25 МВ/м против вектора поляризации, наблюдаем резкий скачок тока (рис.1) от нуля до 0,017 мКл/м, затем за короткое время спад к нулю. Среднее значение токов по пяти СП образцам в поле 0,25 МВ/м, направленное по вектору поляризации значительно меньше. Аналогичную ситуацию для СП, (рис.2) наблюдаем и при электрической нагрузке $E=0,42\text{МВ/м}$.

Для ДП образцов в нагрузке $E=0,25\text{МВ/м}$ против вектора поляризации (рис.3) ток средних значений данных образцов достигает до 0,017мКл/м, затем спадает до нуля в среднем за 2,5 секунды. При нагрузке $E=0,25\text{МВ/м}$ по вектору поляризации (рис.3) ток достигает 0,6 мКл/м и в течение 30 секунд спадает до нуля.

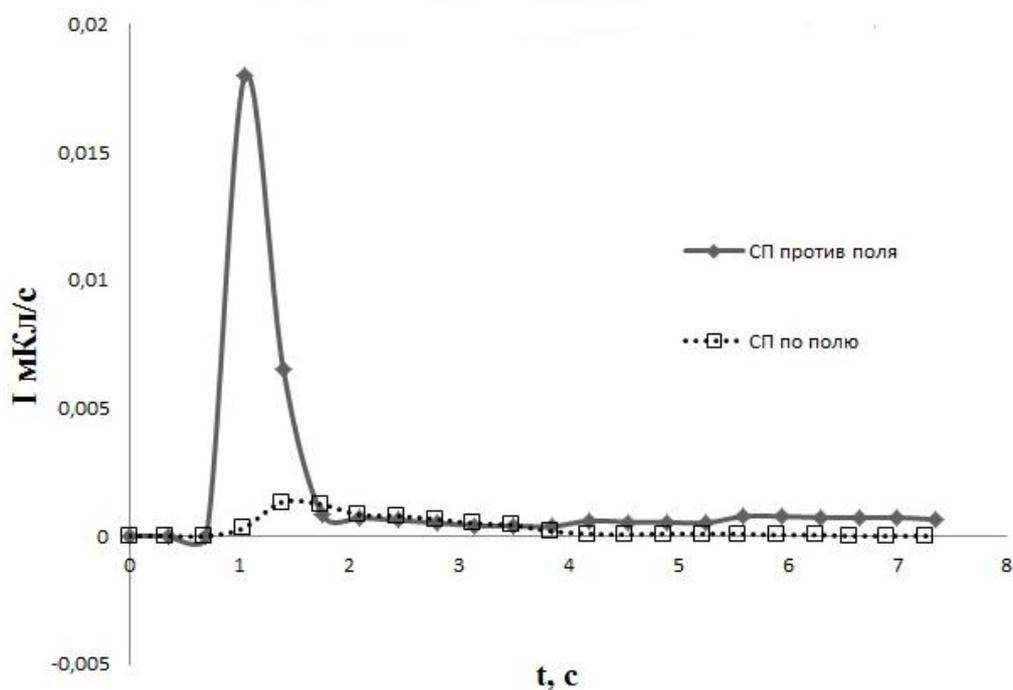


Рис. 1. – Сравнение, по полю и против поля, средних значений токов образцов СП при нагрузке 3кВ

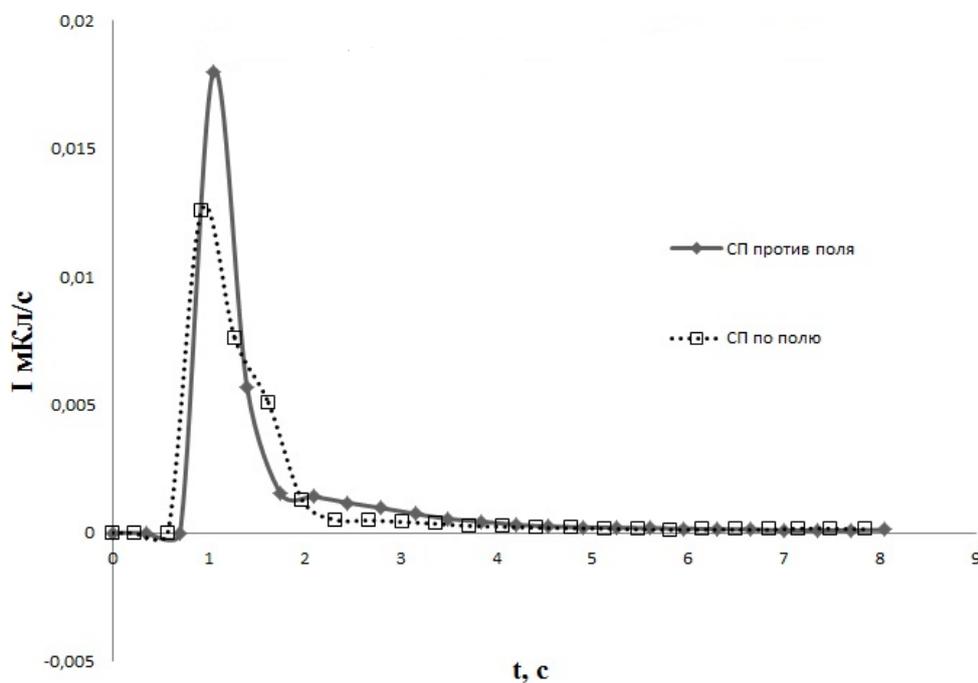


Рис. 2. – Сравнение, по полю и против поля, средних значений токов образцов СП при нагрузке 5кВ

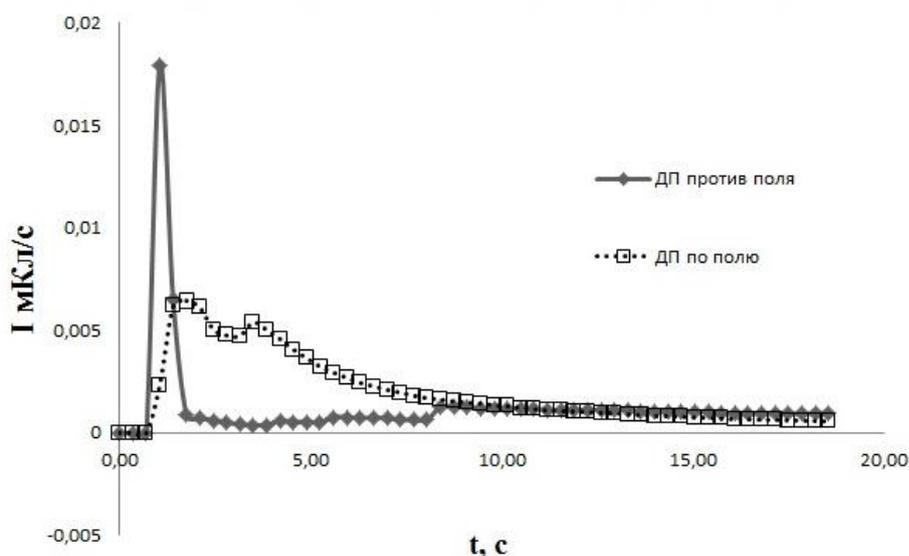


Рис. 3. – Сравнение, по полю и против поля, средних значений токов образцов ДП при нагрузке 3кВ

Используя уравнение Гинзбурга-Ландау [12], получим уравнение для макроскопической поляризации образца в следующем виде:

$$\tau \dot{p} + \frac{\partial F(p)}{\partial p} = \varepsilon_0 \chi E,$$

где τ - время релаксации доменных границ, ε_0 – диэлектрическая постоянная, χ – статическая диэлектрическая восприимчивость, обусловленная доменным вкладом.

При поляризации сегнетокерамики возникают механические напряжения σ между зёрнами керамики, согласно принципу Ле Шателье, препятствующие изменению поляризации [13].

С учетом пьезоэлектрического и электромеханического эффектов:

$$\tau \dot{p} + \frac{\partial F(p)}{\partial p} = \varepsilon_0 \chi E - \gamma \sigma \pm \beta E \sigma,$$

где γ – пьезоэлектрический коэффициент, β – электромеханический коэффициент, знак перед электромеханическим коэффициентом определяется взаимной ориентацией вектора напряженности электрического

поля и вектором силы механических напряжений: знак «+» в случае $\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}_r$ и знак «-» в случае $\vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}_r$.

Так как τ время релаксации доменных границ обратно пропорционально эффективному коэффициенту квазиупругой силы то, следовательно

$$\tau_{\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}_r} < \tau_{\vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}_r}, \text{ что и наблюдается в эксперименте.}$$

Введем обозначения $\tau_+ = \tau_{\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}_r}$ и $\tau_- = \tau_{\vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}_r}$ и запишем уравнения для изменение поляризации сегнетокерамики под действием электрического поля в случае $\vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}_r$ и в случае $\vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}_r$

$$\tau_+ \dot{p} + p = \epsilon_0 \chi E - \gamma \sigma - \beta E \sigma \quad \text{в случае } \vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}_r$$

$$\tau_- \dot{p} + p = \epsilon_0 \chi E - \gamma \sigma + \beta E \sigma \quad \text{в случае } \vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}_r$$

Учитывая, что ток переполаризации $I = \dot{p}$ получаем решение в аналитическом виде:

$$I_+(t) = \frac{\epsilon_0 \chi E - \beta E \sigma}{\tau_+} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_+}} \Phi(t-t_0) \quad \text{в случае } \vec{E} \uparrow \uparrow \vec{P}_r \quad (1)$$

$$I_-(t) = \frac{\epsilon_0 \chi E + \beta E \sigma}{\tau_-} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_-}} \Phi(t-t_0) \quad \text{в случае } \vec{E} \uparrow \downarrow \vec{P}_r \quad (2)$$

где t_0 – момент времени включения электрического поля.

Как видно из (1) и (2) пик тока переполаризации $I_- > I_+$ (рис. 1-3), что и наблюдается в эксперименте, при выполнении условия $\frac{\epsilon_0 \chi E + \beta E \sigma}{\epsilon_0 \chi E - \beta E \sigma} \cdot \frac{\tau_+}{\tau_-} > 1$ и является следствием проявления электромеханического эффекта.

Заключение

Можно предположить, что при более высоком напряжении стабилизируется состояние доменных областей, в результате чего происходит утечка тока при деполяризующем поле, так как доменная система сохраняет более жёсткую свою конфигурацию. Уменьшение прочности в условиях влияния постоянного электрического поля, приложенного противоположно поляризации образцов, вызвано ростом внутренних напряжений при переключении поляризации доменов в СК. Воздействие внешним полем на СК, которое превышает коэрцитивное и приводящее к изменению ориентации доменов, а также имеющие место электрострикция и обратный пьезоэффект приводят к разности деформации структуры кристаллита, что приводит к возникновению на границах доменов механических напряжений [14].

Литература

1. Чернухин Ю.В., Бутов П.А. Синтез тормозных квазиполей препятствий для бортовой системы автономного планирования траектории движения малогабаритных мобильных роботов // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2382
2. Фиговский О.Л. Нанотехнологии для новых материалов // Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1048
3. Панич А.А., Мараховский М.А., Мотин Д.В. Кристаллические и керамические пьезоэлектрики // Инженерный вестник Дона, 2011, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/325
4. Бобцов А.А., Бойков В.И., Григорьев В.В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. Санкт-Петербург: СПб ГУ ИТМО, 2011. 131 с.

5. Шмалий Ю.С. Особенности «старения» спектра собственных колебаний вакуумированных кварцевых резонаторов АТ-среза // Журнал технической физики. 1995. Т. 5., Вып. 7. С. 81-86.

6. Lee Dong Hyun, Lee Younghwan, Yang Kun, Park Ju Yong, Kim Se Hyun, Reddy Pothala Reddi Sekhar, Materano M., Mulaosmanovic H., Mikolajick T., Jones J. L., Schroeder U., Park Min Hyuk. Domains and domain dynamics in fluorite-structured ferroelectrics // Applied Physics Reviews, 2021, 8:021312 URL: aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0047977

7. Жога Л.В., Шпейзман В.В. Кинетика хрупкого разрушения материалов в электрических и механических полях. Волгоград: ВолгГАСУ, 2008. 198 с.

8. Коренева В.В. Исследование разрушения сегнетокерамики при одновременном действии электрического поля и механических напряжений: специальность 01.04.04 Физическая электроника : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. ВолгГТУ. Волгоград, 2014. 16 с.

9. Merz W.J. Domain Properties in BaTiO₃ // Phys. Rev., 1952. №88. P. 421-425.

10. Тимашев С.Ф., Встовский Г.В. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических временных рядов динамических переменных и проблема отношения «сигнал-шум» // Электрохимия. 2003. Т.39., №2. С.149-162.

11. Картунова Е.И., Габриэлян А.В., Жога Л.В. Флуктуации тока в поликристаллической сегнетокерамике // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т.82., №3. С. 350-352. DOI 10.7868/S0367676518030183.

12. Струков Б.А., Леванюк А.П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. М.: Наука. Физматлит. 1983. 240 с.

13. Тополов В.Ю., Турик А.В. Новая моноклинная фаза и упругие эффекты в твердых растворах $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$ // Физика твердого тела. 2001. Т43., Вып 8. С. 1525-1527.

14. Жога Л.В., Жарников Д.И. Механическое разрушение сегнетокерамики в электрическом поле // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2012. Т. 12., № 2. С. 118-120.

References

1. Chernukhin Yu.V., Butov P.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2382

2. Figovsky O.L. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/1048

3. Panich A.A., Marakhovsky M.A., Motin D.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2011, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2011/325

4. Bobcov A.A., Bojkov V.I., Grigor'ev V.V. Iсполnitel'nye ustrojstva i sistemy dlja mikroperemeshhenij [Actuators and systems for micro-movements]. Sankt-Peterburg: SPB GU ITMO, 2011. 131 p.

5. Shmalij Ju.S. Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 1995. Т. 5, №. 7. pp. 81-86.

6. Lee Dong Hyun, Lee Younghwan, Yang Kun, Park Ju Yong, Kim Se Hyun, Reddy Pothala Reddi Sekhar, Materano M., Mulaosmanovic H., Mikolajick T., Jones J. L., Schroeder U., Park Min Hyuk. Domains and domain dynamics in fluorite-structured ferroelectrics. Applied Physics Reviews, 2021, 8:021312 URL: aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0047977

7. Zhoga L.V., Shpejzman V.V. Kinetika hrupkogo razrusheniya materialov v jelektricheskikh i mehanicheskikh poljah [Kinetics of brittle fracture of materials in electric and mechanical fields]. Volgograd: VolgGASU, 2008. 198 p.

8. Koreneva V.V. Issledovanie razrusheniya segnetokeramiki pri odnovremennom dejstvii jelektricheskogo polja i mehanicheskikh naprjazhenij [Investigation of the destruction of ferroelectric ceramics under the simultaneous



action of an electric field and mechanical stresses]: special'nost' 01.04.04
Fizicheskaja jelektronika : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni
kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. VolgGTU. Volgograd, 2014. 16 p.

9. Merz W.J. Domain Properties in BaTiO₃. Phys. Rev., 1952. №88. pp. 421-425.

10. Timashev S.F., Vstovskij G.V. Jelektrohimiya. 2003. T.39., №2. pp.149-162.

11. Kartunova E.I., Gabrijeljan A.V., Zhoga L.V. Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Serija fizicheskaja. 2018. T.82., №3. pp. 350-352. DOI 10.7868/S0367676518030183.

12. Strukov B.A., Levanjuk A.P. Fizicheskie osnovy segnetojelektricheskikh javlenij v kristallah [Physical foundations of ferroelectric phenomena in crystals]. M.: Nauka. Fizmatlit. 1983. 240 p.

13. Topolov V.Ju., Turik A.V. Fizika tverdogo tela. 2001. T43., № 8. H. 1525-1527.

14. Zhoga L.V., Fundamental'nye problemy radiojelektronnogo priborostroenija. 2012. T. 12, № 2. pp. 118-120.