

УДК 539.37:537.226.4

©1993

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ NaNO_2

В.И. Николаев, Б.И. Смирнов

Экспериментально изучалось влияние переменного электрического поля на сопротивление деформированию сегнетоэлектрических кристаллов нитрита натрия. Установлено, что действие знакопеременяющихся коротких импульсов поля различной длительности приводит к появлению качественных особенностей электропластического поляризационного эффекта (ЭППЭ) по сравнению с ЭППЭ в постоянном поле. Если постоянное поле вызывает лишь кратковременный спад напряжений течения образца в момент его включения (переключения), то эффект переменного поля качественно зависит от частоты и длительности импульсов поля. В частности, в переменном поле определенной частоты наблюдается уменьшение напряжений течения на все время действия поля. Наблюдаемые эффекты находят объяснение на основе модели взаимодействующих подвижных дислокаций и доменных стенок.

Ранее нами [1] при исследовании влияния внешнего электрического поля на кривую деформирования сегнетоэлектрических монокристаллов нитрита натрия был обнаружен и изучен своеобразный электропластический эффект (ЭПЭ), заключающийся в резком уменьшении и быстром восстановлении напряжений течения τ при первом включении поля или при его переключении (смене знака). Эффект наблюдается только в сегнетоэлектрической фазе и обусловлен взаимодействием подвижных дислокаций и перестраивающейся при реполяризации 180° доменной структуры. В связи с его проявлением и природой эффект был назван электропластическим поляризационным эффектом (ЭППЭ) для отличия от обычных ЭПЭ, обусловленных воздействием поля на заряженные дислокации в полупроводниковых [2], щелочно-галоидных [3,4] и тех же сегнетоэлектрических кристаллах [5,6].

Иначе говоря, ЭППЭ связан не с самим фактом наличия электрического поля, а с переключением полярности последнего. Соответственно падение напряжений течения после включения поля происходит в течение времени $t_1 \approx t_s$ (t_s — время реполяризации), а их восстановление — уже за время $t_2 > t_s$ (t_2 включает в себя t_1 и дополнительно определяется жесткостью машины и скоростью перемещения захватов). Если же длительность приложенного поля недостаточна для полной поляризации образца ($t < t_s$), то при повторном включении поля той же полярности можно снова наблюдать скачок напряжения на диаграмме (продолжение ЭППЭ), и эффект будет повторяться при каждом последующем включе-

нии, пока весь объем образца не будет поляризован в одном направлении [7].

В связи с тем что ЭППЭ обусловлен не наличием поля, а его первым включением или изменением знака, естественно, возникает интерес к изучению указанного эффекта в переменном электрическом поле. Ранее ЭПЭ в переменном поле изучался в щелочно-галогидных кристаллах [8], и оказалось, что качественно он не отличается от такового в случае постоянного поля. В настоящей работе мы исследовали влияние переменного электрического поля на сопротивление деформированию сегнетоэлектрических кристаллов NaNO_2 . В результате было установлено, что действие знакопеременных коротких импульсов поля различной длительности приводит к появлению качественных особенностей ЭППЭ, находящих объяснение в рамках модели взаимодействующих подвижных дислокаций и доменных стенок.

1. Экспериментальная методика

Использовались монокристаллы NaNO_2 , выращенные способом Киропулоса с пределом текучести $\tau_y = 2$ МПа. Рабочие образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размером $3 \times 3 \times 6$ мм выкалывались по плоскостям спайности (101) и вырезались нитяной пилой так, чтобы торцы образцов совпадали с этими плоскостями, а боковые грани попарно соответствовали плоскостям (010) и примерно (307) [9]. При этом плоскости и направление скольжения в системе (001) [100] располагались под углом 33.4° к оси образца и были перпендикулярны доменным стенкам. Образцы деформировались сжатием на машине с постоянной скоростью перемещения захватов $\dot{s} = 1.6 \cdot 10^{-3}$ мм \cdot с $^{-1}$. Температура опытов могла изменяться в интервале температур $T = 290 \div 450$ К (кристалл NaNO_2 является сегнетоэлектриком при $T < 437$ К).

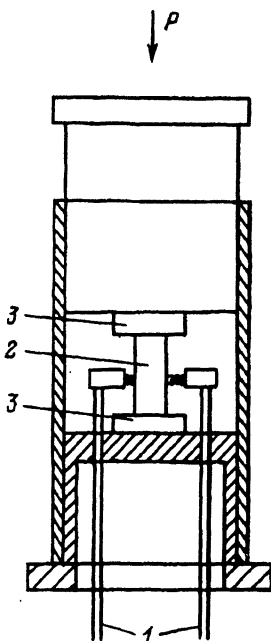


Рис. 1. Схема камеры для изучения электропластического эффекта.

- 1 — электроды,
- 2 — образец с нанесенными контактами,
- 3 — сапфировые шайбы.

Внешнее электрическое поле прикладывалось к деформируемому образцу вдоль его полярной оси через электроды из индиевой амальгамы, которые наносились на грани (010). Опыты проводились в специальной камере, которая для избежания пробоя помещалась в полиметилсилоксановую жидкость (рис. 1). Включение электрического поля осуществлялось замыканием механических ключей в цепи высокого напряжения. Максимальная напряженность электрического поля достигала $E = 30 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$. Для работы с импульсными полями был изготовлен двухполярный коммутатор высокого напряжения до 2 кВ с частотой следования импульсов до 5 Гц.

Экспериментально наблюдалось изменение напряжений течения деформируемого образца в результате включения постоянного или переменного электрического поля. При этом одновременно осуществлялось слежение за током переключения образца по схеме, аналогичной [10].

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 2 демонстрируется изменение напряжений течения τ и тока переключения i_s при включении электрического поля E в процессе активного нагружения образца. Видно, что включение поля приводит к синхронному изменению значений τ и i_s . Спад напряжений начинается как раз при появлении тока переключения, причем время разупрочнения t_1 приблизительно равно времени переключения t_s . Последующее восстановление напряжений происходит уже в переполаризованном образце, т.е. при $t > t_s$. Выключение поля не приводит к каким-либо изменениям диаграммы нагружения.

Величина падения напряжений $\Delta\tau$ при включении поля зависит от его напряженности E и температуры. Изменение $\Delta\tau$ в зависимости от E для двух температур показано на рис. 3. Видно, что эффект существенно нарастает при увеличении поля до критических значений E_s и становится достаточно большим при полной переполаризации образца.

При исследовании эффекта переменного электрического поля (опыты проводились при 293 К и $E > E_s$) оказалось, что действие знаменующихся импульсов поля приводит к появлению новых качественных

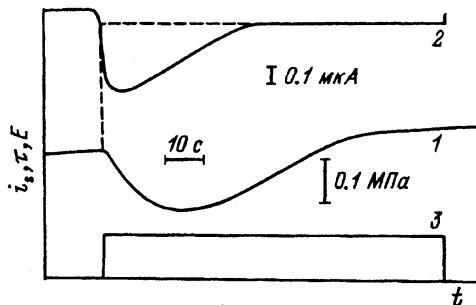


Рис. 2. Изменение напряжений течения τ (1) и тока включения i_s (2) при включении электрического поля E (3) в процессе активного нагружения образца.

Показаны масштабы напряжений, тока и времени. Скорость пластической деформации $\dot{\gamma} \approx 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

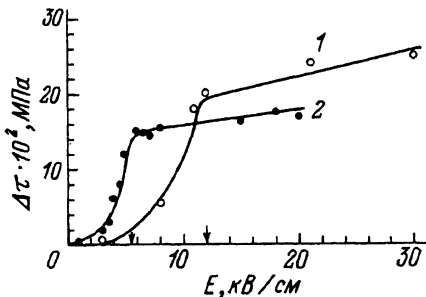


Рис. 3. Зависимость $\Delta\tau$ от напряженности поля E в процессе деформирования образца при 290 (1) и 370 К (2). Стрелками отмечены значения E_s для соответствующих температур.

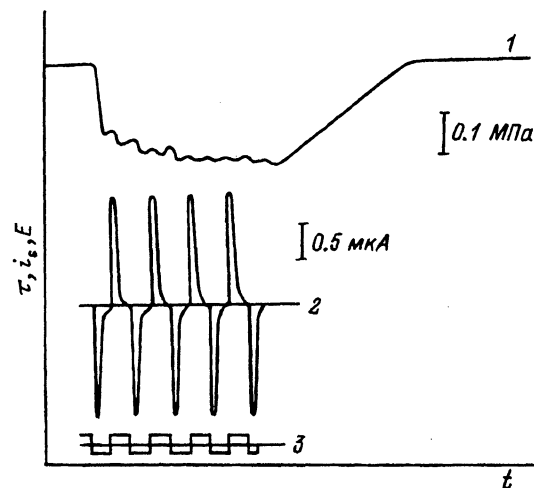


Рис. 4. Изменение напряжений течения (1) и тока переключения (2) в деформируемом образце под воздействием ряда знакопеременных импульсов поля (3).
 $E = 6.7 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}$ при $t_E = 6.5 \text{ с}$.

особенностей ЭППЭ, причем эффект зависит от длительности импульса поля t_E и его соотношения с временами t_s и t_2 .

На рис. 4 показано изменение напряжений течения при знакопеременном поле в случае $t_s < t_E < t_2$. Видно, что в этом случае τ быстро падает и остается ниже первоначального уровня до тех пор, пока не прекратится воздействие поля на образец. При этом на фоне нового медленно меняющегося значения напряжений τ_E наблюдаются осцилляции, коррелирующие с током переключения, протекающим в образце при действии очередного импульса поля. Очевидно, что осцилляции τ_E связаны с тенденцией к восстановлению напряжений течения в кристалле после завершения процесса переполаризации, который срывается с приходом следующего импульса поля противоположной полярности.

Как оказалось, амплитуда осцилляции τ_E зависит от частоты следования импульсов поля и падает с ее увеличением, если процесс переключения в каждом цикле не успевает пройти до конца.

Дальнейшее уменьшение длительности импульсов поля t_E и рост частоты их следования приводят к исчезновению эффекта. Так, в переменном электрическом поле с частотой 50 Гц (когда $t_E \ll t_s$) уровень напряжений течения остается неизменным при любой скорости деформирования в интервале $10^{-3} - 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. При этом тока в цепи образца также не наблюдается, поскольку при комнатной температуре величина t_s даже в максимальных полях, близких к пробое, намного превосходит период колебаний внешнего поля и переполаризации образца не происходит.

При уменьшении частоты следования импульсов изменяются не только частота и амплитуда осцилляций $\Delta\tau_E$, но и средний уровень напряжений τ_E в поле. При этом важно не только соотношение t_E и t_s , но и t_E с временем t_2 , характеризующим время до восстановления напряжений. Это проиллюстрировано на рис. 5, где приведены примеры возможных видов диаграмм нагружения в переменном электрическом поле. Видно, что средний уровень напряжений течения в поле τ_E может быть даже выше уровня τ на диаграмме без поля.

Рассмотрим возможную природу наблюдаемых эффектов. Как уже отмечалось выше, исходя из имеющихся экспериментальных данных логично предположить, что ЭППЭ при включении (переключении) электриче-

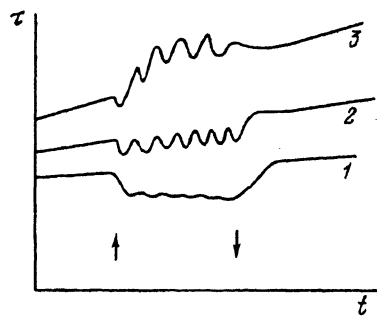


Рис. 5. Различные виды диаграмм нагружения в знакопеременном электрическом поле.

Стрелками отмечены моменты включения и выключения поля. $t_s < t_E < t_2$ (1), $t_E \approx t_2$ (2), $t_E > t_2$ (3).

ского поля обусловлен взаимодействием движущихся 180° доменных стенок и подвижных дислокаций, которые в сегнетоэлектриках могут иметь собственный электрический заряд [11]. При этом следует подчеркнуть, что важны именно движущиеся стенки, поскольку неподвижные границы доменов практически не оказывают влияния на сопротивление движению дислокаций [7]. Более того, ранее было показано [12], что в полях с напряженностью $E \geq E_s$, в которых и наблюдается ЭППЭ, процесс переполаризации идет в основном за счет образования новых доменов и их прорастания в глубь материала при весьма незначительном боковом движении доменных стенок. Поэтому естественно считать, что важен прежде всего эффект воздействия на дислокации движущейся вершины домена, что может быть связано с наличием вблизи вершины больших локальных полей.

Исходя из вышесказанного, можно представить себе следующую схему ЭППЭ в NaNO_2 . В нагруженном кристалле скорость его пластической деформации определяется плотностью подвижных дислокаций и скоростью их перемещения. После включения (переключения) электрического поля вершины доменов в процессе поляризации начинают проходить через кристалл с высокой скоростью и, воздействуя на дислокации, облегчают их освобождение от локальных стопоров. При этом локальная плотность подвижных дислокаций в «каналах», проходимых вершинами доменов, возрастает и в них происходит дополнительная пластическая деформация. Если перемещение захватов не успевает компенсировать эту деформацию, то образец, естественно, разгружается. Последующее боковое движение доменных стенок оказывается не столь эффективным в смысле воздействия на дислокации, и поэтому уменьшение напряжений сначала замедляется, а после окончания процесса поляризации вообще прекращается. Подвижность дислокаций при этом падает и пластическая деформация также практически прекращается. В результате наступает стадия упругой деформации образца и напряжения вновь возрастают примерно до уровня, предшествующего включению поля.

Непрерывное движение доменов в знакопеременном электрическом поле существенно изменяет вид ЭППЭ. При определенном соотношении времен t_E и t_s переменное поле приводит к падению напряжения течения на все время действия импульсов поля. Исходя из предложенной модели, такое поведение образца следует связать с тем, что частое переключение поля постоянно создает в нем повышенную плотность подвижных дислокаций и процесс деформирования с заданной скоростью может протекать при меньших напряжениях. Если же длительность импульсов поля достаточно большая ($t_E \approx t_2$), то в течение импульса возможно частичное или

полное восстановление напряжений течения и диаграмма деформирования образца в поле может представлять собой кривую с периодически изменяющимся уровнем напряжений.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрировано, что действие знакопеременного электрического поля приводит к появлению качественных особенностей электропластического поляризационного эффекта в кристаллах нитрата натрия по сравнению с ЭППЭ в постоянном поле. Наблюдаемые эффекты качественно объясняются влиянием движущихся при переполяризации доменов на плотность подвижных дислокаций, обеспечивающих процесс пластической деформации.

Список литературы

- [1] Николаев В.И., Смирнов Б.И. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 11. С. 3369–3372.
- [2] Осипьян Ю.А., Петренко В.Ф. // ЖЭТФ. 1975. Т. 69. № 4. С. 1362–1371.
- [3] Whitworth R.W. // Phys. Stat. Sol. (a). 1976. V. 38. N 1. P. 299–304.
- [4] Куличенко А.Н., Смирнов Б.И. // ФТТ. 1981. Т. 23. № 4. С. 1029–1033.
- [5] Николаев В.И., Перцев Н.А., Смирнов Б.И. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 10. С. 2996–3001.
- [6] Николаев В.И., Перцев Н.А., Смирнов Б.И. // ФТТ. 1991. Т. 33. № 1. С. 93–98.
- [7] Николаев В.И., Смирнов Б.И. // Тез. докл. XIII конф. по физике сегнетоэлектриков. Тверь, 1992. Т. 2. С. 71.
- [8] Brissenden S., Gardner J.W., Pllingworth J., Kovacevic I., Whitworth R.W. // Phys. Stat. Sol. (a). 1979. V. 51. N 2. P. 521–526.
- [9] Николаев В.И., Смирнов Б.И., Иванцов В.А. // ФТТ. 1985. Т. 27. № 8. С. 2519–2521.
- [10] Hamano K. // J. Phys. Soc. Japan. 1973. V. 35. N 1. P. 157–163.
- [11] Перцев Н.А. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 9. С. 2805–2814.
- [12] Иванцов В.А., Николаев В.И., Попов И.Н. // ФТТ. 1987. Т. 29. № 6. С. 1855–1857.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
19 мая 1993 г.