

ФІЗИЧНІ, ХІМІЧНІ ТА ІНШІ ЯВИЩА, НА ОСНОВІ ЯКИХ МОЖУТЬ БУТИ СТВОРЕНІ СЕНСОРИ

PHYSICAL, CHEMICAL AND OTHER PHENOMENA, AS THE BASES OF SENSORS

УДК 537.226:678.01

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРАХ, ПОЛЯРИЗОВАННЫХ В КОРОННОМ РАЗРЯДЕ

*А. Е. Сергеева¹, С. Н. Федосов¹, В. И. Солошенко²,
А. Ф. Бутенко³, В. В. Вальдман³*

¹ Одесская национальная академия пищевых технологий, кафедра физики,
fedosov@optima.com.ua

² Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова,
кафедра физики твердого тела и твердотельной электроники

³ Одесская национальная академия пищевых технологий, кафедра физики, 68-94-76

Аннотация

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ И РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРАХ, ПОЛЯРИЗОВАННЫХ В КОРОННОМ РАЗРЯДЕ

А. Е. Сергеева, С. Н. Федосов, В. И. Солошенко, А. Ф. Бутенко, В. В. Вальдман

На основе комплексного экспериментального исследования выявлены особенности формирования поляризованного состояния и его релаксации в пленках ПВДФ и его сополимера, электризованных в коронном разряде и предназначенных для изготовления пьезоэлектрических сенсоров. Установлено, что поляризация и объемный заряд взаимосвязаны, образуя самосогласованную систему, стабильность которой в основном определяется захваченными в объеме зарядами. Показано, что захват зарядов происходит в макроскопических переходных областях, находящихся на границах полностью поляризованных частей объема. Захваченные заряды играют важную роль в стабильности поляризации, так как они нейтрализуют деполяризующее поле.

Ключевые слова: ПВДФ, поляризация, объемный заряд, коронный разряд

Анотація

ФОРМУВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ І РЕЛАКСАЦІЙНІ ЯВИЩА В СЕГНЕТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІМЕРАХ, ПОЛЯРИЗОВАНИХ У КОРОННОМУ РОЗРЯДІ

А. Є. Сергєєва, С. Н. Федосов, В. І. Солошенко, О. Ф. Бутенко, В. В. Вальдман

На основі комплексного експериментального дослідження виявлені особливості формування поляризованого стану і його релаксації в плівках ПВДФ і його сополімеру, електризованих у коронному розряді і призначених для виготовлення піро- та п'єзоелектричних сенсорів. Встановлено, що поляризація та об'ємний заряд є взаємозалежними, утворюючи самоузгоджену систему, стабільність якої в основному визначається захопленнями в об'ємі зарядами. Показано, що захоплення зарядів відбувається в макроскопічних перехідних областях, які знаходяться на границях цілком поляризованих частин об'єму. Захоплені заряди відіграють важливу роль у стабільності поляризації, тому що вони нейтралізують деполаризуюче поле.

Ключові слова: ПВДФ, поляризація, об'ємний заряд, коронний розряд

Abstract

POLARIZATION BUILD-UP AND RELAXATION PHENOMENA IN CORONA POLED FERROELECTRIC POLYMERS

A. E. Sergeeva, S. N. Fedosov, V. I. Soloshenko, A. F. Butenko, V. V. Valdman

Peculiarities of the polarization build-up and its relaxation in corona poled PVDF films meant for manufacturing of pyro- and piezoelectric sensors have been revealed from the complex experimental investigation of the polymer. It has been found that the polarization and the space charge are interrelated forming a self-balanced system. Its stability depends mainly on charges trapped in the volume. It has been shown that the charge trapping occurs in macroscopic zones positioned at the borders of completely polarized parts of the volume. The trapped charges play an important role in stability of the ferroelectric polarization, since they neutralize the depolarizing field.

Key words: PVDF, polarization, space charge, corona poling

Введение

Одним из перспективных направлений развития сенсорной электроники является применение сегнетоэлектрических полимеров типа поливинилиденфторида (ПВДФ) для изготовления пьезоэлектрических и пьезоэлектрических датчиков. По сравнению с неорганическими материалами полимеры обладают прекрасными механическими свойствами, что позволяет изготавливать сенсоры большой площади. В то же время, для повышения их конкурентоспособности необходимо обеспечить высокую стабильность остаточной поляризации.

ПВДФ и некоторые его сополімери являются сегнетоэлектриками, т.к. в одном из кристаллических полиморфных состояний, называемом β -фазой [1,2] они обладают спонтан-

ной поляризацией, направление которой можно переключить, воздействуя внешним полем. Экспериментально было доказано, что пьезоэлектрические и пьезоэлектрические коэффициенты в ПВДФ пропорциональны величине остаточной поляризации [3]. В то же время, имеются свидетельства того, что инжектированный объемный заряд также влияет на специфические свойства сегнетоэлектрических полимеров [4-10]. Роль объемного заряда довольно широко обсуждалась в литературе, но согласия в этом вопросе не было достигнуто. Некоторые исследователи считают, что присутствие объемного заряда в ПВДФ является важным, в то время как другие считают его влияние незначительным [11]. Во многих случаях предполагается, что поляризация и объемный заряд не зависят друг от друга, од-

нако, по нашему мнению, взаимосвязь между ними должна быть обязательно учтена.

Известно, что переключение поляризации в сегнетоэлектриках сопровождается появлением деполяризующего поля, пытающегося восстановить первоначальное электрическое состояние сегнетоэлектрика с нулевой средней поляризацией [12]. Если это поле не скомпенсировано, то остаточная поляризация будет низкой и нестабильной. В обычных сегнетоэлектриках компенсация деполяризующего поля обычно осуществляется либо поверхностными зарядами, либо путем короткого замыкания образцов между металлическими электродами. В случае сегнетоэлектрических полимеров наблюдаются более сложные явления, т.к. сегнетоэлектрические кристаллиты распределены в неупорядоченной аморфной фазе. До настоящего времени не установлено, где локализованы компенсирующие заряды [13-15] и каким образом они могут быть распознаны и идентифицированы экспериментально.

Было установлено, что поляризованные пленки ПВДФ обладают меньшей электропроводностью, чем неполяризованные [5,16]. Измерение пространственного распределения поляризации показало, что имеет место инжекция зарядов в объем образца, которые вызывают неоднородность поляризации [6,7,9,13,14]. Мы предложили модель формирования поляризации в ПВДФ и в других сегнетоэлектрических полимерах, предполагая, что захваченные заряды и поляризация образуют самосогласованную сбалансированную систему [8,17-19]. В настоящей работе мы приводим дополнительные экспериментальные данные о захвате компенсирующих зарядов в пленках ПВДФ, поляризованных в коронном разряде. Показано, что захваченные компенсирующие заряды локализуются на границах макроскопических поляризованных зон.

Эксперимент

Исследование проводилось на одноосно ориентированных пленках ПВДФ толщиной 25 мкм, содержащих аморфную и кристаллическую фазы в соотношении 50:50. Кристаллиты состояли из сегнетоэлектрической β — фазы (56%) и неполярной α -фазы (44%). На одну поверхность образцов наносили электро-

ды путем испарения алюминия в вакууме. Электризацию проводили в коронном разряде с использованием управляющей сетки. Коронный разряд возбуждался заостренным вольфрамовым электродом, который поддерживался при постоянном потенциале — 20 кВ. Вибрирующая управляющая сетка использовалась для измерения эффективного электретного потенциала методом Кельвина как в процессе зарядки, так и после ее завершения [8].

В первой серии опытов были получены квазистационарные вольт-амперные характеристики путем ступенчатого увеличения отрицательного постоянного напряжения на управляющей сетке с шагом в 100 В в диапазоне 0,6...3 кВ. Образцы выдерживали в течение 15 мин при каждом напряжении до приложения следующей ступеньки напряжения, и измеряли зарядный ток. Эксперименты повторяли снова на уже поляризованных образцах.

Во второй серии опытов при комнатной температуре в течение 5 мин через образцы периодически пропускали постоянный ток плотностью 80 мкА/м², и вслед за этим с интервалом такой же продолжительности электризация образца прекращалась [20]. На сетке поддерживался постоянный потенциал –3кВ, в то время как напряжение на коронирующем электроде автоматически управлялось при помощи цепи обратной связи, так что полная зарядка образца достигалась за 11 циклов “зарядка-разрядка”. Формирование и спад электретного потенциала регистрировались в течение соответствующих фракций каждого цикла.

В третьей серии опытов в процессе электризации образцов температура линейно увеличивалась от 20 °С до 100 °С при скорости нагрева 3 К/мин, в то время как потенциал на сетке (и соответствующий электретный потенциал) поддерживался постоянным. Затем образцы охлаждали до комнатной температуры без выключения приложенного поля, и эксперимент при таких же условиях повторялся снова. В описании экспериментальных результатов использована концепция эффективной проводимости g , которая определялась как $g = I \cdot x_0 / (V \cdot A)$, где I — измеряемый ток, V — приложенное напряжение, x_0 — толщина образца, A — площадь поверхности образца.

Результаты и их обсуждение

На вольт-амперных характеристиках образцов (рис.1) наблюдались три области, соответствующие трем стадиям начальной электризации. На первой стадии, пока эффективная проводимость не достигла максимума при поляризующем поле 55 МВ/м, ток растет быстрее приложенного напряжения. Указанная величина является очень близкой к значению коэрцитивного поля для ПВДФ [21]. На второй стадии проводимость резко уменьшается до минимума при напряженности поля 110 МВ/м, а затем происходит ее слабое увеличение при более высоких напряжениях. Повторные измерения на тех же образцах показали, что в поляризованных образцах низкие значения эффективной проводимости сохраняются, указывая на необратимость изменений, возникающих в процессе поляризации. На второй стадии электризации поле выше коэрцитивного значения, поэтому именно на этой стадии формируется основная часть сегнетоэлектрической поляризации. Поскольку уменьшение проводимости и формирование поляризации наблюдалось в одном и том же диапазоне поляризующих полей, то, вероятно, эти два явления взаимосвязаны.

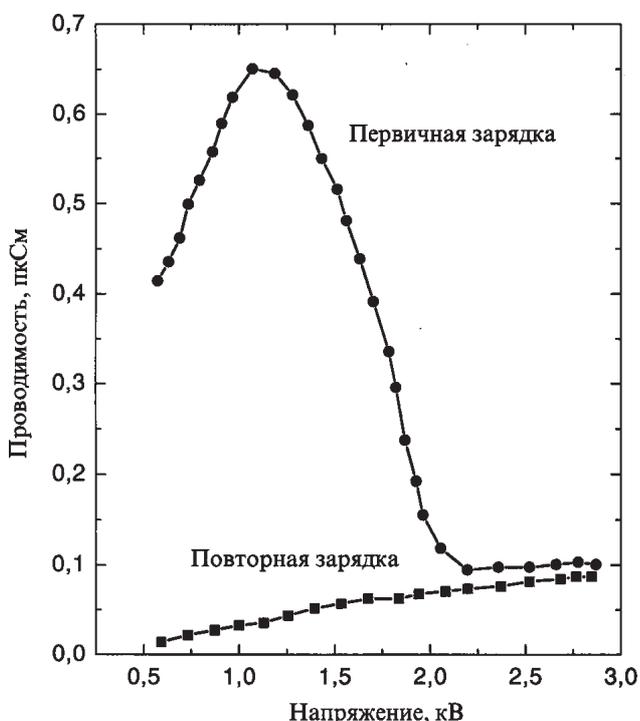


Рис.1 Зависимость эффективной проводимости от приложенного напряжения. Эксперимент был повторен на поляризованных образцах после завершения первичной поляризации.

Во второй серии экспериментов условия электризации были изменены так, что постоянный ток зарядки прикладывался периодически. Из рис.2 видно, что после завершения первого цикла зарядки электретный потенциал падает почти до нуля с постоянной времени около 200 с, соответствующей времени максвелловской релаксации для ПВДФ при комнатной температуре [22]. С увеличением количества циклов зарядки электретный потенциал становится более стабильным. Например, после 11 циклов поляризации постоянная времени релаксации достигало значения 1300 с, указывая на уменьшение эффективной проводимости в процессе поляризации в 6,5 раз.

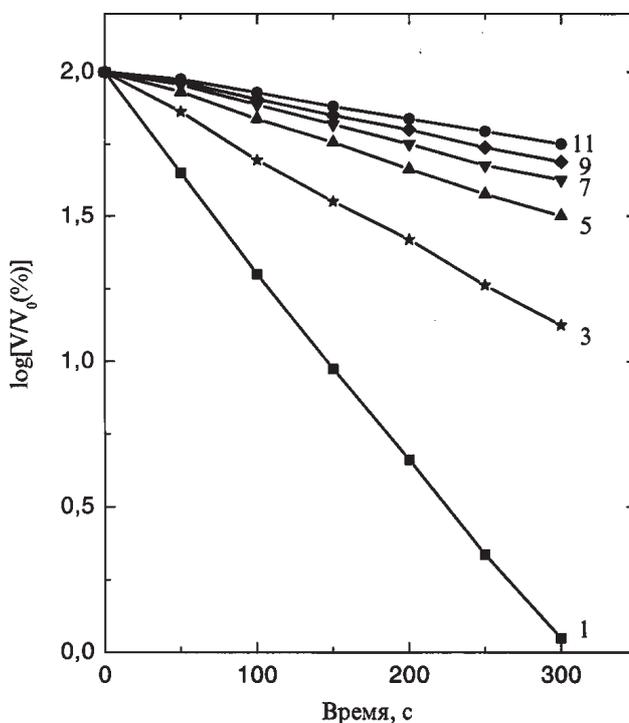


Рис.2 Спад электретного потенциала в интервалах между периодическими пропусками постоянного тока зарядки. Номера циклов зарядки указаны возле каждой кривой.

В третьей серии опытов наблюдалось аномальное поведение токов электризации в процессе линейного увеличения температуры при постоянном приложенном напряжении. Как видно из рис.3, эффективная проводимость уменьшается или остается постоянной в процессе зарядки в зависимости от величины приложенного напряжения. В то же время, из наклона графиков рис.3 следует, что энергия активации эффективной проводимости не изме-

няется и имеет порядок 0,8 эВ для поляризованных и неполяризованных образцов.

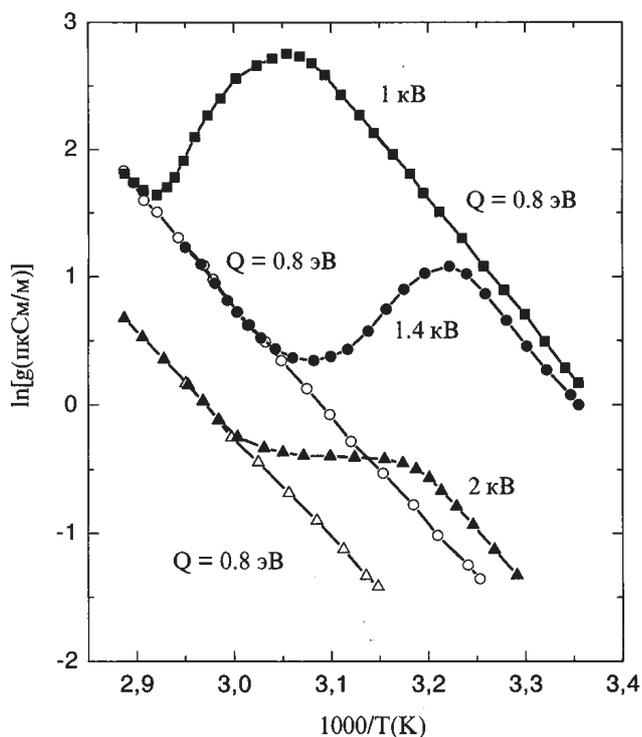


Рис.3. Динамика эффективной проводимости в процессе начальной термостимулированной поляризации (сплошные точки) и при повторных экспериментах на поляризованных образцах (полые точки). Указаны также поляризующее напряжение и энергия активации.

Температурная зависимость проводимости в диэлектриках обычно подчиняется закону Аррениуса

$$g = e\mu n_0 \exp[-Q/kT], \quad (1)$$

где Q — энергия активации; k — постоянная Больцмана; T — температура; e — элементарный заряд; μ — подвижность носителей заряда. Поскольку величины e и μ являются постоянными, то уменьшение проводимости, как следует из формулы (1), обусловлено уменьшением концентрации свободных носителей заряда в процессе поляризации, как если бы носители заряда захватывались на глубокие ловушки.

Хотя условия зарядки были разными в трех сериях опытов, однако полученные результаты имеют две общие особенности. Во-первых, эффективная проводимость резко уменьшалась в то время, когда увеличивалась сегнетоэлектрическая поляризация. Во-вторых, независимо от условий поляризации проводимость уменьшалась необратимо.

Известно, что полный ток зарядки $i(t)$ имеет три компоненты, называемые емкостным током, поляризационным током и током проводимости, и описывается следующим уравнением

$$i(t) = \epsilon\epsilon_0 \frac{dE}{dt} + \frac{dP}{dt} + gE, \quad (2)$$

где $i(t)$ — плотность тока; ϵ_0 — электрическая постоянная; ϵ — диэлектрическая проницаемость; E — напряженность электрического поля; P — сегнетоэлектрическая поляризация.

Емкостной компонентой тока, соответствующей первому члену правой части уравнения (2) можно пренебречь, т.к. в первой и в третьей сериях опытов к образцу прикладывалось постоянное поле, в то время как во второй серии опытов напряжение (электретный потенциал) изменялось достаточно медленно. Вклад поляризационной составляющей в полный ток зарядки невозможно точно рассчитать, но можно оценить его величину, сравнивая интеграл полного тока с наибольшим теоретически возможным значением остаточной поляризации в ПВДФ. Наши расчеты показали, что интеграл под пиком тока в процессе термически стимулированной электризации при напряжении 1 кВ равен $260 \text{ мКл}/\text{м}^2$, в то время как максимально возможная величина поляризации в ПВДФ составляет всего $65 \text{ мКл}/\text{м}^2$. Из сравнения этих величин видно, что поляризационная компонента полного тока составляет только 25% от полного тока. Таким образом можно сделать вывод, что основной вклад в измеряемый ток вносит ток проводимости.

Эффективная проводимость g зависит от плотности свободных зарядов, которая, в свою очередь, состоит из плотности собственных зарядов n_0 и инжектированных зарядов n_i . Считая, что проводимость обусловлена подвижными носителями заряда одного знака, можно записать

$$g = e\mu(n_0 + n_i). \quad (3)$$

В то время как n_0 зависит главным образом от температуры, n_i зависит от условий зарядки. Из данных первой серии опытов можно предположить, что заряды инжектируются в объем образца в течение первой стадии зарядки, а их захват на ловушки совпадает по времени с началом формирования сегнетоэлектрической поляризации. Рассчитаем плотность

компенсирующих зарядов, предполагая, что их захват наиболее вероятен на границах поляризованных кристаллитов [15,19]. Учитывая, что ПВДФ имеет кирпичеподобную структуру [23], получаем для плотности зарядов

$$n'_c = abP_s / eV_c, \quad (4)$$

где $a = 7,5$ нм и $b = 3,5$ нм — средняя длина и ширина кристаллита [23], $V_c = 1,2 \cdot 10^{-25} \text{ м}^3$ — объем, занимаемый одним кристаллитом вместе с окружающей его аморфной фазой; $P_s = 0,14$ Кл/м² [2, 12] — спонтанная поляризация в кристаллитах. Расчеты дают величину $n'_c = 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, в то время как реальная плотность свободных зарядов, которые могут быть захвачены, составляет всего $n_c = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$, что типично для эффективной проводимости ($10^{-10} \dots 10^{-12} \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$) в ПВДФ при учете подвижности носителей заряда $2 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ [24]. Различие в величинах n_c и n'_c настолько велико, что даже массивная инжекция зарядов не обеспечит достаточного числа носителей заряда для захвата на границах всех кристаллитов. Из этого следует, что компенсирующие заряды не локализируются на границах всех кристаллитов. Для ответа на вопрос, каким образом компенсируется деполяризующее поле в кристаллитах, необходимо учесть уравнение Пуассона

$$\epsilon\epsilon_0 \frac{dE}{dx} = \rho(x) + \frac{dP}{dx}, \quad (5)$$

где $\rho(x)$ — объемная плотность пространственного заряда; x — координата в направлении толщины. В короткозамкнутом поляризованном образце поле в объеме стремится к нулю благодаря перераспределению движущихся зарядов, причем характеристическое время этого процесса имеет порядок времени максвелловской релаксации τ . С учетом этого из уравнения (5) при $E = 0$ получаем

$$\rho(x) = -\frac{dP}{dx}, \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что заряды скапливаются в переходных зонах, где поляризация неоднородна и $\frac{dP}{dx} \neq 0$.

Следовательно, условия для захвата заряда благоприятны не только на границах кристал-

литов, но также и в макроскопических переходных зонах, разделяющих поляризованную часть объема от неполяризованной, как схематически показано на рис. 4.

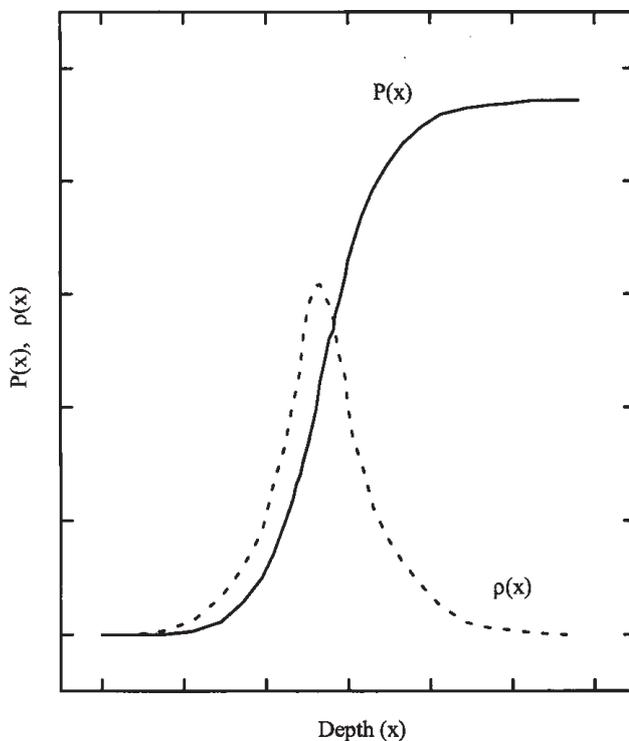


Рис.4. Типичное схематическое распределение поляризации и объемного заряда в направлении толщины образца согласно уравнению Пуассона. Заряды локализованы в переходной зоне, которая отделяет поляризованную часть объема от неполяризованной.

Можно показать, что заряды, захваченные в переходных зонах, компенсируют деполяризующее поле в кристаллитах поляризованной области. При этом плотность заряда, пересчитанная на единицу площади поверхности, не зависит от толщины переходной зоны и равна максимальной величине поляризации.

Расчет показывает, что при толщине образца $x_0 = 20$ мкм и степени кристалличности 50% объемная плотность n_v захваченных зарядов, необходимых для компенсации деполяризующего поля в поляризованных кристаллитах, должна составлять $n_v = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что значительно меньше плотности собственных носителей заряда. Этот результат указывает на то, что в процессе формирования поляризации должен существовать источник свободных зарядов, которые в дальнейшем могли бы быть захвачены в переходных зонах для компенсации деполяризующего поля в кристаллитах.

Заряды могут инжектироваться в объем, как в случае зарядки в коронном разряде, или быть термически генерированы в образце. Например, как показывает расчет, требуемый заряд может быть инжектирован в течение 15 мин, если зарядка проводится при комнатной температуре и постоянной плотности тока зарядки 160 мкА/м^2 .

Известно, что пленки ПВДФ, электризованные при повышенных температурах, обладают более высокой остаточной поляризацией, чем поляризованные при комнатной температуре. Поэтому можно предположить, что термическая активация не только улучшает упорядочение диполей, как в случае обычных полярных электретов, но также обеспечивает высокую плотность свободных зарядов, необходимых для последующей компенсации деполяризующего поля.

Выводы

Приведены экспериментальные свидетельства взаимосвязи поляризации и объемного заряда в ПВДФ и показано, что деполяризующее поле компенсируется зарядами, захваченными в макроскопических переходных зонах, которыми поляризованные части объема отделены от неполяризованных. Вначале компенсирующие заряды инжектируются в объем или генерируются благодаря термической эмиссии, а затем захватываются на ловушки при формировании сегнетоэлектрической поляризации. Иногда считают, что само поляризующее поле создается захваченными зарядами [11]. Однако из приведенных нами результатов следует, что захват зарядов в ПВДФ и, вероятно, в других сегнетоэлектрических полимерах является не причиной, а следствием формирования поляризации.

Литература

1. Lovinger A.J. Poly(vinylidene fluoride) // *Development in Crystalline Polymers*. — Applied Science Publications, London and New Jersey.: ed. by D.C. Bassett, 1992. — P. 195-273.
2. Furukawa T. Ferroelectric Properties of Vinylidene Fluoride Copolymers // *Phase Transition*. — 2003. — V.18. — №2. — P. 143-211.
3. Kepler R.G. Piezoelectricity, Pyroelectricity and Ferroelectricity in Organic Materials // *Ann. Rev. Chem. Phys.* — 1998. — V.29. — №3. — P. 497-518.
4. Murayama N. Persistent Polarization in Poly(vinylidene fluoride) I. Surface Charges and Piezoelectricity of Poly(vinylidene fluoride) Thermoelctrets // *J. Polym. Sci., Polym. Phys.* — 2001. — V.13. — №7. — P. 929-946.
5. Pfister G., Abkowitz M. Crystal Pyroelectricity in Polyvinylidene fluoride // *J. Appl. Phys.* — 1998. — V.74. — №5. — P. 2064-2071.
6. Eisenmenger W. and Haardt M. Observation of Charge Compensated Polarization Zones in Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Films by Piezoelectric Acoustic Step-wave Response // *Solid State Comm.* — 2002. — V.41. — №10. — P. 917-920.
7. Womes M., Bihler E. and Eisenmenger W. Polarization dynamics in P(VDF-TrFE) // *IEEE Trans. El. Insul.* — 1999. — V.24. — №4. — P. 461-469.
8. Fedosov S.N. Deep trapping of injected carriers in ferroelectric polymers // *Phys. Stat. Solidi A*. — 1999. — V.115. — №1. — P. 293-300.
9. DeReggi A.S. and Broadhurst M.G. Model of polarization switching in PVDF // *Ferroelectrics*. — 1997. — V.73. — №3. — P. 351-359.
10. Ikeda S., Fukada T., Jimbo M., Koyama K. and Wada Y. Depolarizing field in ferroelectric polymers // *Jap. J. Appl. Phys.* — 1995. — V.24. — №6. — P. 865-871.
11. Sessler G.M., Das-Gupta D.K., DeReggi A.S., Eisenmenger W., Furukawa T., Giacometti J.A. and Gerhard-Multhaupt R. Piezo- and Pyroelectricity in Electrets // *IEEE Trans. Elec. Insul.* — 2002. — V.27. — №4. — P. 872-879.
12. Lines M.E. and Glass A.M. *Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials*. — Claredon, Oxford, 1997.
13. Haardt M. and Eisenmenger W. Polarization profiles in PVDF // *Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Diel. Phenom.* — 2002. — P. 46-54.
14. Bihler E., Neumann G., Eberle G., Eisenmenger W. *Ann. Rep. Conf. Electr. Insul. and Dielectr. Phen., Piscataway*. — 2000. — P. 140-146.
15. Fedosov S.N. Polarization build-up in ferroelectric polymers // *Mol. Cryst. Liquid Cryst.* — 2001. — V.230. — №1. — P. 61-68.
16. Fedosov S.N., Sergeeva A.E. and Korol'chak O.P. Electrical conductivity and surface potential decay in corona charged PVDF (polyvinylidene fluoride) // *J. Mat. Sci. Lett.* — 1999. — V.8. — №11. — P. 931-932.
17. Arkhipov V.I., Fedosov S.N., Khranchenkov D.V. and Rudenko A.I. Dispersive transport in Ferroelectric Polymers // *J. Electrostatics*. — 1999. — V.22. — №1. — P. 177-184.
18. Fedosov S.N. and Sergeeva A.E. Measuring of electrical relaxation parameters in polar polymer

- dielectrics //J. Electrostatics. — 1999. — V.30. — №5. — P. 327-333.
19. Fedosov S.N. and Sergeeva A.E. Model of Polarization Build-Up During Corona Charging of Ferroelectric Polymer //J. Electrostatics. — 2003. — V.30. — №1. — P. 39-45.
20. Sergeeva A., Fedosov S. and Pribbe S. A new method to study processes of corona charging and electrical relaxation in electrets // Proceedings of 8th international symposium on electrets (ISE-8). — Paris, France. — 1994. — Ch.174. — P. 43-48.
21. Furukawa T., Nakajima K., Koizumi T. and Date M. Measurement of Nonlinear Dielectricity in Ferroelectric Polymers // Jpn. J. Appl. Phys. — 1997. — V.26. — №11. — P. 1039-1045.
22. Electrets /ed. by G.M. Sessler //Vol. 1, Third Edition, Laplacian Press, Morgan Hill, 1999.
23. Lewis E.L.V. and Ward I.M. A Study of the Mechanical Anisotropy in High-draw, Low-draw and Voided Poly(vinylidene fluoride) //J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys. — 1999. — V.27. — №12. — P. 1375-1388.
24. Gross B., von Seggern H. and Gerhard-Multhaupt R. Mobility of charge carriers in PVDF //J. Phys. D: Appl. Phys. — 1995. — V.28. — №10. — P.2497-2503.