

Из уравнений (8) — (12) по экспериментально измеренным величинам $t^* = 20$ с, $\tau_c = 13$ с, $x_o = 10$ мкм, $I_{max} = 1,7$ нА, $S = 0,96$ см², $U = 450$ В рассчитаны значения $\tau = 50$ с, $\tau_o = 25$ с, $\mu = 5 \cdot 10^{-15}$ м²/В·с, $n_o = 1,5 \cdot 10^{18}$ м⁻³.

Заключение. По литературным данным [3] стационарная подвижность дырок в ПТФЭ с учетом захватов, определенная другими методами, составляет $10^{-13} \dots 10^{-15}$ м²/В·с, а подвижность электронов порядка 10^{-21} м²/В·с. Судя по полученному нами значению μ , подвижными носителями заряда при облучении ультрафиолетом являются дырки, как и предполагалось в модели. Низкая концентрация акцепторных примесных центров и их глубокое залегание обуславливает чрезвычайно низкую проводимость полимерных пленок ПТФЭ.

Литература

1. Collins, R. E. Analysis of Spatial Distribution of Charge and Dipoles in Electrets by a Transient Heating Technologies [Text] / R. E. Collins // J. Appl. Phys.—1976.— Vol. 47, Issue 11. — P. 4804–4808.
2. Collins, R. E. The Thermal Pulsing Technologies Applied to Polymer [Text] / R. E. Collins // Ferroelectrics. — 1981.—Vol. 33, Issue 1–4. — P. 65–74.
3. Сергеева, А. Е. Поляризация и пространственный заряд в сегнетоэлектрических полимерах [Текст] / А. Е. Сергеева, С. Н. Федосов. — Одесса: ТЭС, 2014. — 347 с.

УДК 621.319.2

ПЕРЕХОДНЫЕ ТОКИ В НЕПОЛЯРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕКТРЕТАХ

Сергеева А. Е., д-р физ.-мат. наук, профессор, Федосов С. Н. д-р физ.-мат. наук, профессор
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Экспериментально установлено, что при освещении односторонне металлизированных короноэлектретов из политетрафторэтилена (ПТФЭ) возникают обратимые фототоки смещения, направление которых противоположно току, обусловленному движением поверхностных зарядов при тепловом расширении. Особенности фототоков объяснены наличием в пленках внутренней поляризации (гетерозаряда), возникающей в сильном поле, создаваемом захваченным на поверхности гомозарядом. Наличие в неполярных пленках гетерозаряда указывает на принципиальную возможность создания стабильных электретов, в которых постоянство электретного потенциала поддерживается за счет медленной самосогласованной релаксации гомо- и гетерозаряда.

It has been found experimentally that the reversible displacement photo-currents appear during irradiation of metallized from one side and corona poled polytetrafluoroethylene (PTFE) electret films. Direction of the current was opposite to that of the current caused by motion of the surface charges due to the thermal expansion. The features of the current are explained by presence of the internal polarization (heterocharge) in the bulk of the film. The polarization appears in high field created by the homocharge trapped on the surface. Existence of the heterocharge in non-polar films indicates that there is a possibility to develop stable electrets where stability of the electret potential is maintained as the result of a slow self-controlled relaxation of the homocharge and the heterocharge.

Ключевые слова: переходные токи, полимерные электреты, гомозаряд, гетерозаряд, ПТФЭ.

Введение. Исследование переходных фототоков широко применяется для изучения электретного состояния диэлектриков и диагностики объемного заряда в них [3, 4]. В обычной методике на обе поверхности плоского заряженного диэлектрика наносят электроды, закорачивают их и регистрируют ток, возникающий при облучении одного из электродов. Переходной ток обычно является результатом движения теплового импульса через объем диэлектрика с неоднородным распределением заряда. Для изучения электризованных пленок ПТФЭ применение такой методики нецелесообразно, так как избыточный заряд, находящийся в этом полимере на поверхности пленки или вблизи нее (гомозаряд) будет полностью скомпенсирован индуцированным зарядом ближайшего электрода [3]. Вследствие этого электрический отклик на облучение короткозамкнутых заряженных пленок ПТФЭ отсутствует.

Метод теплового импульса нами существенно модифицирован [4]. Облучению подвергали свободную (неметаллизированную) поверхность диэлектрика через сетчатый электрод, находящийся на рас-

стоянии 2...3 мм от поверхности, таким образом, электрическая цепь была разомкнута воздушным зазором, а диэлектрик находился в сильном поле захваченных при электризации зарядов.

В классической теории неполярных электретов стабильность электретного потенциала связывают с наличием гомозаряда, релаксация которого обусловлена проводимостью и движением гомозаряда в своем собственном поле [1, 2]. В настоящей работе экспериментально из анализа переходных фототоков показано, что в типичном неполярном диэлектрике — политетрафторэтилене (ПТФЭ) — наряду с гомозарядом при электризации в сильном поле образуется также внутренняя поляризация (гетерозаряд).

Эксперимент. Пленки ПТФЭ толщиной 10 мкм односторонне металлизировали испарением алюминия в вакууме. Свободную поверхность подвергали действию коронного разряда отрицательной полярности, возбуждаемого заостренным вольфрамовым электродом. Величину потенциала, до которого заряжали пленку (150...1200 В) задавали напряжением на управляющей сетке, расположенной между коронирующим электродом и поверхностью пленки. Электретный потенциал измеряли после электризации методом вибрирующего электрода с компенсацией поля в воздушном зазоре [1, 3]. Заряженные пленки освещали через металлическую сетку лампой мощностью 60 Вт, расположенной на расстоянии 6 см от сетки. Для устранения электрических помех при включении и выключении лампы применена механическая заслонка. Переходной ток между сеткой и тыльным электродом на пленке измеряли электрометром У5-6.

Результаты и их обсуждение. Как видно из рис. 1, импульсы тока при включении и выключении облучения фотолампой имеют одинаковую форму и обратимы. Установлено также, что ток при включении совпадал по направлению с током зарядки, величина потенциала пленок не изменялась в результате облучения (в пределах погрешности измерений ± 5 В), а интеграл от переходного тока составлял $\approx 0,5$ % эффективной поверхностной плотности заряда.

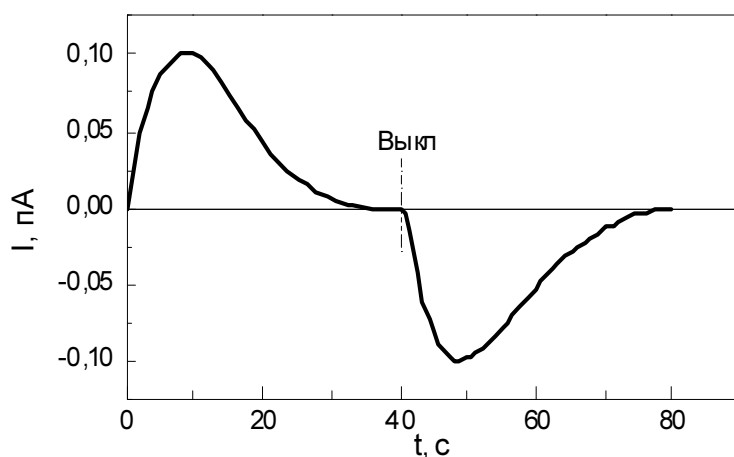


Рис. 1 — Переходной ток при включении и выключении облучения фотолампой пленок ПТФЭ толщиной 10 мкм, заряженных до потенциала — 300 В.

Время нарастания тока до максимума, как видно из рис. 2, было одинаковым при включении и выключении облучения и не зависело от электретного потенциала. Длительность импульса тока, за исключением аномалии при 600 В, возрастала в диапазоне напряжений 150...800 В, а максимум тока монотонно увеличивался с ростом потенциала. Длительностью им-

пульса считали время, в течение которого ток уменьшался до 10 % его максимального значения.

Известно, что электретный потенциал заряженных пленок уменьшается с течением времени [2, 3]. Как видно из рис. 3, в области сильных полей, несмотря на уменьшение потенциала, максимум переходного тока увеличивается. При начальном потенциале в 750 В переходной ток с течением времени не изменяется, а при 600 В — уменьшается. Принимая во внимание обратимость переходных фототоков, их иногда называют пирозлектрическими [5], хотя истинное пирозлектричество возможно лишь в нецентросимметричных кристаллах, к которым полимерные пленки ПТФЭ не относятся. Поскольку энергия фотонов видимого света значительно меньше глубины ловушек, в которых находятся захваченные заряды [2, 3], основным воздействием при таком облучении следует считать тепловое.

Причинами появления обратимых фототоков могут быть:

- а) неравномерное распределение захваченных зарядов по толщине пленки, неоднородность коэффициента линейного расширения;
- б) неравномерный нагрев и охлаждение (движение теплового импульса);

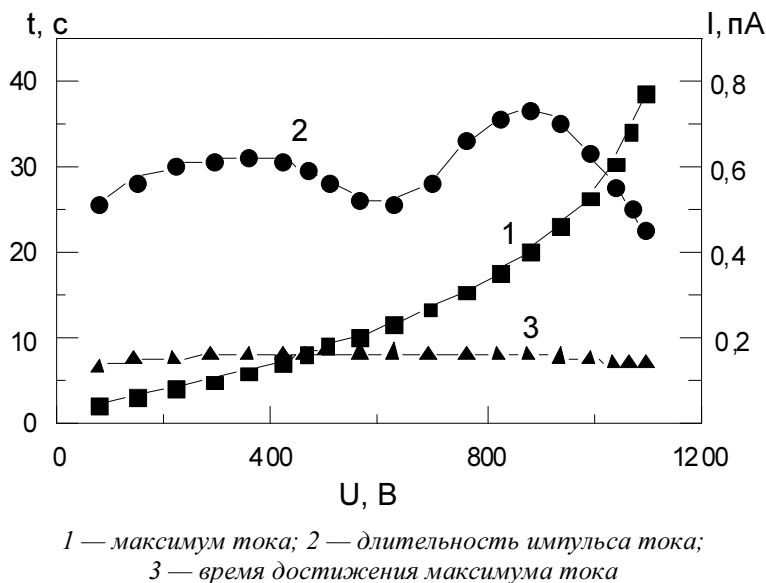


Рис. 2 — Параметры переходных токов при облучении пленок ПТФЭ, заряженных до разных потенциалов

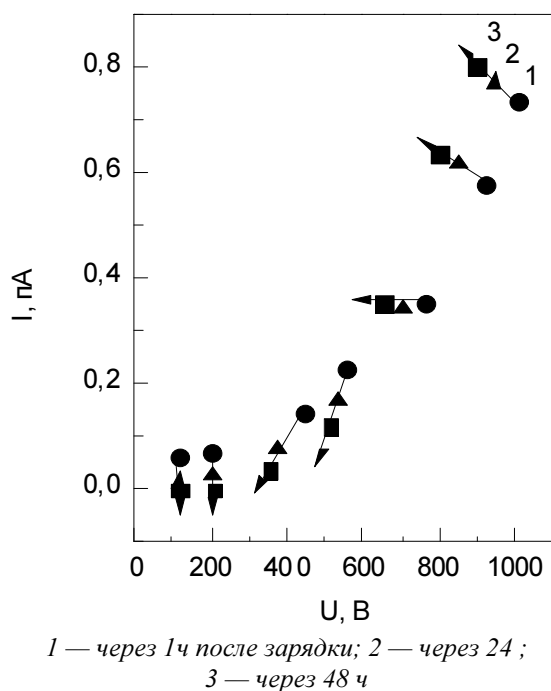


Рис. 3 — Зависимость максимума фототока от электретного потенциала

в) перераспределение индуцированных на электродах зарядов за счет изменения соотношения между толщиной пленки и шириной воздушного зазора;

г) обратимое изменение поверхностной плотности захваченных зарядов;

д) обратимое изменение внутренней поляризации.

Захваченные заряды в пленках ПТФЭ, как уже отмечалось, находятся не в объеме, а вблизи поверхности [3], поэтому первую из перечисленных выше причин можно не учитывать. Градиенты температуры также не могут играть существенной роли в появлении переходных токов, так как тепловая постоянная времени, как показал расчет, имеет порядок 1 мс, что значительно меньше временного масштаба наблюдаемых токов.

Ток, обусловленный перераспределением индуцированных зарядов, ничтожно мал, поскольку ширина воздушного зазора (2...3 мм) значительно больше толщины пленки (10 мкм). В то же время, форма переходного тока (рис. 1) позволяет предположить, что он образован из двух противоположно направленных и спадающих с разной скоростью составляющих, обусловленных обратимыми изменениями поверхностной плотности захваченного заряда (гомозаряда) и внутренней поляризации (гетерозаряда). Если наличие гомозаряда в заряженных короной неполярных пленках является естественным с точки зрения современной феноменологической теории электретов Гросса-Свана-Губкина [1], то существование гетерозаряда, то есть внутренней медленно релаксирующей поляризации, можно связать только с наличием структурных дефектов и примесей. Образование диполей на месте этих неоднородностей, вероятно, индуцируется сильным внутренним полем, создаваемым захваченным на поверхности тонкой пленки гомозарядом.

Для анализа переходных процессов при облучении применимы полученные в работе [6] выражения для тока и электретного потенциала в диэлектрике толщиной x_1 , содержащем гомозаряд σ и гетерозаряд P :

$$i(t) = \frac{1}{1 + \varepsilon \frac{x_1}{x_0}} \left(\frac{d\sigma}{dt} - \frac{dP}{dt} \right) \quad (1)$$

$$U(t) = \frac{(\sigma - P)x_0}{\varepsilon_0 \varepsilon} \quad (2)$$

где ε_0 — электрическая постоянная;

ε — диэлектрическая проницаемость пленки;

x_l — ширина воздушного зазора;

x_o — толщина пленки.

При облучении и нагреве заряженной пленки поверхностная плотность заряда σ уменьшается, так как площадь поверхности увеличивается при неизменной величине заряда. Уменьшение гетерозаряда P вызвано, вероятно, тепловым разупорядочением диполей или квазидиполей, которое носит обратимый характер, так как оно происходит во внутреннем ориентирующем поле, создаваемом гомозарядом. Таким образом, при нагревании пленки в процессе ее облучения σ и P уменьшаются, что в соответствии с формулой (1) эквивалентно появлению двух составляющих тока, направленных в противоположные стороны. При выключении освещения обе составляющие меняют знак, что приводит к обратимости переходного тока.

Наряду с относительно быстрыми обратимыми (тепловыми) изменениями σ и P наблюдаются, вероятно, и более медленные. Так, увеличение амплитуды переходного тока в сильных полях (рис. 3) можно объяснить тем, что гетерозаряд растет даже после окончания электризации. При этом потенциал 600 В является, как видно из рис. 3, критическим. По-видимому, гетерозаряд не образуется в слабых полях.

Медленное необратимое уменьшение гомозаряда происходит, как известно, из-за наличия остаточной проводимости пленки и дрейфа гомозаряда в собственном поле. В результате электретный потенциал с течением времени уменьшается, что отрицательно сказывается на возможности практического применения электретов. Учет влияния гетерозаряда открывает новые пути повышения стабильности электретного потенциала. Как видно из формулы (2), потенциал может оставаться постоянным и при уменьшении σ , если вместе с этим уменьшается и гетерозаряд P .

Заключение. Таким образом, особенности переходных фототоков при облучении заряженных пленок ПТФЭ легко объяснимы, если считать, что кроме гомозаряда, инжектированного в пленку при ее электризации, при определенных условиях образуется и внутренняя поляризация (гетерозаряд). Косвенным подтверждением наличия гетерозаряда в неполярных электретах из ПТФЭ являются, на наш взгляд, также известные факты повышения электретного потенциала в начальной стадии нагрева пленок и обращение направления тока термически стимулированной деполяризации в опытах с диэлектрическим зазором [1, 3, 7]. Наличие гетерозаряда в неполярных пленках указывает на принципиальную возможность создания стабильных электретов на основе таких пленок, в которых постоянство потенциала поддерживается за счет медленной самосогласованной релаксации гомо- и гетерозаряда.

Литература

1. Сергеева, А. Е. Поляризация и пространственный заряд в сегнетоэлектрических полимерах [Текст] / А. Е. Сергеева, С. Н. Федосов. — Одесса: ТЭС, 2014. — 347 с.
2. Лушейкин, Г. А. Полимерные электреты [Текст] / Г. А. Лушейкин. — М: Химия, 2008. — 180 с.
3. Electrets [Text] / Ed. G. M. Sessler. — Springer-Verlag: Berlin. — 2003. — 437 p.
4. Collins, R. E. Practical Application of the Thermal Pulsing Technique to the Study of Electrets [Text] / R. E. Collins // J. Appl. Phys. — 1980. — Vol. 51, Issue 6. — P. 2973-2986.
5. Ванников, А. В. Радиационные эффекты в полимерах [Текст] / А. В. Ванников, В. К. Матвеев, В. П. Сичкарь — М.: Наука, 2002. — 270 с.
6. Van Turnhout, J. Thermally Stimulated Discharge of Polymer Electrets [Text] / J. Van Turnhout. — Amsterdam: Elsevier, 1975. — 333 p.
7. Сергеева, А. Е. Внутренняя поляризация в неполярных полимерных пленках [Текст] / А. Е. Сергеева, С. Н. Федосов, А. М. Миракьян // Физика твердого тела. — 1996. — Т.38, №9. — С. 2887-2889.