

ТОКОВЫЙ ШУМ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ПОЛИМЕРОВ В ОКРЕСТНОСТИ ПЕРЕХОДА ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ

О.А.Скалдин, О.А.Селезнева

Отдел физики Башкирского научного центра РАН,
450025, Уфа, Россия

Поступила в редакцию 2 июня 1992 г.

Исследуются флуктуации тока в тонких полимерных пленках в окрестности перехода диэлектрик – металл. Измеренная спектральная плотность токового шума подчиняется закону $S(\omega) \sim A\omega^{-\gamma}$, где $\gamma \leq 1$. Показано, что критический рост среднеквадратичной флуктуации $\langle \delta U^2 \rangle \sim \exp(\alpha U)$ обуславливает отсутствие четко выраженных пороговых характеристик процесса перехода, который, по-видимому, является вероятностным.

Одной из центральных проблем при исследовании проводящих полимеров является вопрос о механизме проводимости в тонких ориентированных пленках полимеров. Особый интерес представляют полимерные системы, в которых наблюдается переключение типа диэлектрик-металл и обратный переход¹⁻³. С другой стороны, изучение таких систем наталкивается на определенные трудности, связанные со слабой повторяемостью результатов. В частности, после цикла переключений полимер не возвращается в исходное состояние по параметру проводимости σ . Это может быть связано либо с большим временем релаксации t_r , либо с необратимыми явлениями, имеющими место в полимере при протекании электрического тока. В этой ситуации приобретают важное значение исследования флуктуаций электрического тока вплоть до начала переключения.

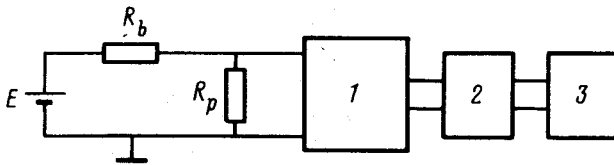


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: E – источник ЭДС – пакет батарей; R_b – балластное ограничительное сопротивление; R_p – полимерный образец; 1 – предварительный усилитель типа Унипан-237; 2 – коррелометр X6-8; 3 – ПЭВМ

В данной работе сообщается о результатах исследования низкочастотного токового шума проводящего полимера полидифениленфталата (ПДФ) в окрестности перехода диэлектрик-металл. На рис.1 представлена блок-схема экспериментальной установки для изучения флуктуаций электрического тока. Напряжение с образца поступало на предварительный усилитель, затем на коррелометр X6-8 и далее на ПЭВМ. Исследования проводились в диапазоне частот $0,2 \div 10,0$ Гц. В эксперименте использовались полимерные пленки, нанесенные на стеклянные подложки с проводящим покрытием из In , Cu , константана методом центрифугирования и свободные пленки. Толщина центрифугированной пленки составляла $200 \div 300$ нм, свободной – 1 мкм и контролировалась интерференционным методом.

Электрический ток, проходящий через полимерный образец, можно разделить на стационарную и флуктуационную компоненты $I(t) = I_c + \delta I(t)$. Согласно схеме измерения, на полимерной пленке регистрируется флуктуация напряжения $\delta U(t) = R_p \delta I(t)$, где R_p – среднее сопротивление образца.

Как известно, ⁴, основной характеристикой флуктуационного процесса является спектральная плотность (СП) – $S(\omega)$. С учетом отсутствия в исследуемом частотном диапазоне дисперсии диэлектрической проницаемости, $\epsilon(\omega) = \text{const}$, полимера СП выражается ⁴:

$$S(\omega) = U^2(1 + R_p/R_b)^{-2} S_{R_p}/R_p^2, \quad (1)$$

где U – приложенное напряжение, R_b – балластное ограничительное (по току) сопротивление, S_{R_p} – СП флуктуации сопротивления образца. Выражение (1) для удобства расчетов можно преобразовать к следующему виду:

$$S(\omega) = U^2 \Sigma(\omega) R_b^2 R_p^2 / (R_b + R_p)^4, \quad (2)$$

где $\Sigma(\omega) = \langle \delta \sigma^2(\omega) \rangle / \sigma_0^2$ – СП относительной среднеквадратичной флуктуации проводимости полимерного образца. Последнее выражение справедливо по физическим соображениям, если $\Sigma(\omega) \ll 1$, то есть при малом вкладе флуктуационного члена в среднюю проводимость образца σ_0 , что соответствует состоянию полимерной пленки, находящейся вдали от перехода. Укажем, что в нашем случае одновременный коррелятор $\langle \delta \sigma^2(\tau) \rangle / \sigma_0^2 |_{\tau=0} \leq 10^{-2}$, то есть описанный подход является вполне корректным.

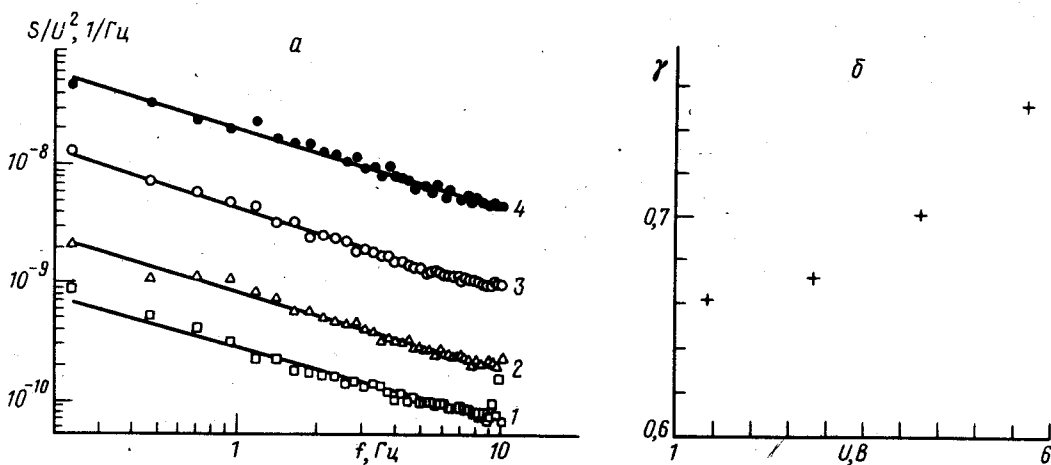


Рис.2. а – Экспериментальные зависимости СП токового шума при $U_1 = 1,4$ В (1); $U_2 = 2,9$ В (2) $U_3 = 4,3$ В (3) $U_4 = 5,7$ В (4); б – зависимости коэффициента γ от приложенного напряжения U для центрифугированной пленки

Рассмотрим СП флуктуации напряжения на полимерной пленке, нанесенной на медную подложку (рис.2а), проводимость которой составляет $\sigma_0 \approx 10^{-11} (\text{Ом}\cdot\text{см})^{-1}$, а среднее сопротивление пленки $R_p \sim 3 \cdot 10^5$ Ом, толщина $h \sim 200$ нм. В целом зависимость $S(\omega)$ аппроксимируется функцией вида $S(\omega) \sim A\omega^{-\gamma}$. Следует отметить, что коэффициент γ зависит от величины

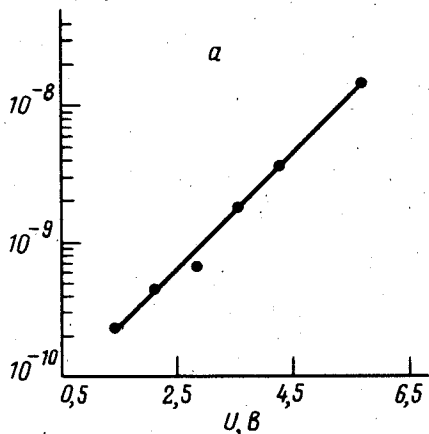
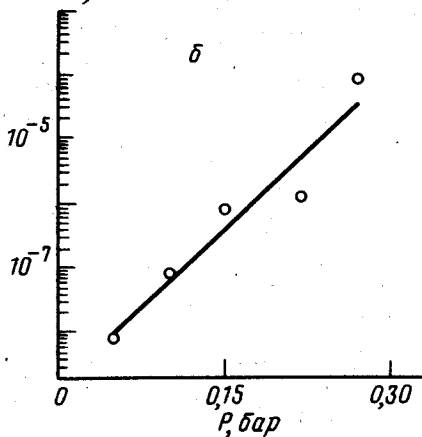
$\langle \delta U^2 \rangle / U^2, \text{отн. ед.}$  $\langle \delta U^2 \rangle / U^2, \text{отн. ед.}$ 

Рис.3. Зависимости относительной среднеквадратичной флуктуации $\langle \delta U^2 \rangle / U^2$: а - от напряжения U при $P=0,16$, б - от давления P при $U=1,4$ В

приложенного напряжения U (рис.2б) и изменяется от 0,5 до 0,8 по мере приближения к переключению. При слабых токах (~ 10 мкА) значение $\gamma \sim 0,5$, что, по-видимому, характерно для СП шума, обусловленного гидродинамическими флуктуациями бальмановского электронного газа^{5,6}. Измерения на свободных пленках показывают, что в окрестности переключения коэффициент $\gamma \sim 1$. Наличие токового шума в проводящей системе с СП $S(\omega) \sim \omega^{-1}$ соответствует модели токового шума в тонких проводящих нитях с $r/h \ll 1$ ⁵ (r - радиус нити, h - ее длина, равная в нашем случае толщине пленки). Как показано в⁷, переключение в таких полимерных системах приводит к разбиению всей поверхности пленки на проводящие каналы с размерами $20 \leq r \leq 300$ нм. Так что вся полимерная пленка представляет собой диэлектрическую матрицу с вкрапленными в нее проводящими нитями, поверхностная плотность которых составляет $\rho \sim 10^4 \div 10^5$ кан./см². В этом случае достаточно хорошо выполняется условие появления ω^{-1} шума, так как $r/h < 1$.

В³ сообщается об аномальной электронной неустойчивости полимеров при одноосном давлении. Причем, изменение проводимости в 10^{11} раз трактуется наличием в системе фазового перехода, подобного переходу Мотта⁸. В связи с этим, интересным представляется изучение среднеквадратичной флуктуации тока в полимерной пленке в зависимости от приложенного напряжения U и одноосного давления P . Как было показано выше, в нашем случае измерялись флуктуации напряжения $\delta U(t)$. Исследуем среднеквадратичную флуктуацию напряжения $\langle \delta U^2(\tau) \rangle |_{\tau=0}$ как функцию U и P , то есть $\langle \delta U^2 \rangle = F(U, P)$. Зафиксируем давление на некоторой величине $P = P_0$ и будем изменять разность потенциалов, приложенную к полимерной пленке. В этом случае величина $F(U, P_0)$ аппроксимируется экспоненциальной функцией от U (рис.3а). При фиксации напряжения $U = U_0$ и изменении давления P (рис.3б) получим зависимость величины $\ln F(P)$, которая возрастает также линейно при увеличении давления. В целом, величина F является функцией двух аргументов $F \simeq A \exp(\alpha U + \beta P)$, то есть $F(U, P)$ обладает перестановочной симметрией

по U и P . Последнее позволяет говорить о едином механизме нарастания флуктуаций тока и природе перехода диэлектрик-металл при воздействии различных инициирующих переход факторах - в данном случае ими являются постоянное напряжение U и одноосное давление P .

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что процесс переключения типа диэлектрик-металл в полимерах не является структурно-фазовым переходом в его традиционном смысле. В пользу этого свидетельствует отсутствие четко выраженных пороговых значений напряжения и давления, а также экспоненциальный рост относительной флуктуации проводимости $(2) \langle \delta\sigma^2 \rangle / \sigma_0^2 \sim \langle \delta U^2 \rangle \sim \exp(\alpha U)$. По-видимому, можно говорить только о вероятностном переходе при данных U и P , то есть чем больше U или P , тем выше вероятность образования системы проводящих каналов, что делает сомнительным существование в такого рода системах перехода Мотта³.

-
1. Н.С.Ениколопан, Л.Н.Григоров, С.Г.Смирнов, Письма в ЖЭТФ 49, 326 (1989).
 2. В.М.Архангородский, Е.Г.Гук, А.М.Ельяшевич и др. ДАН СССР 309, 603 (1989).
 3. А.Н.Лачинов, Ю.А.Жеребов, В.М.Корнилов, Письма в ЖЭТФ 52, 742 (1990).
 4. Ш.М.Коган, Успехи физических наук 145, 285 (1985).
 5. Ю.А.Климонтович, Статистическая физика. М.: Наука, 1982, 608.
 6. Ю.А.Берлин, С.Н.Бешенко, В.А.Жорин и др., ДАН СССР 260, 1386 (1981).
 7. О.А.Скалдин, А.Ю.Жеребов, А.Н.Лачинов и др. Письма в ЖЭТФ, 51, 141 (1990).
 8. В.Lundberg, В.Sundqvist, O.Inganas et al. Mol. Cryst. Liq. Cryst. 118, 155 (1985).