

## Сверхпроводящий ток в полимерных каналах в структурах сверхпроводник - полимер - сверхпроводник

А.Н. Ионов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт Петербург, Россия

М.Н. Николаева, В.М. Светличный

Институт Высокмолекулярных соединений РАН, 199004 Санкт Петербург, Россия

R. Rentzsch

Institut für Experimentalphysik, Freie Universität Berlin, 14195 Berlin, Germany

**В настоящем сообщении мы хотим обратить внимание на некоторые высокомолекулярные полимерные соединения с размерным эффектом проводимости, возникающим только в том случае, если полимер находится между металлическими электродами. При определенных условиях через полимер (P) толщиной более одного микрона может протекать сверхпроводящий ток в структурах Сверхпроводник – Полимер - Сверхпроводник (S –P –S).**

Насколько нам известно, первое наблюдение переключения в высоко проводящее (On) состоянии при  $E < E_c$  (здесь  $E_c$  поле пробоя полимерного материала) у недопированных, несопряженных тонких (порядка одного микрона) полимерных пленок было опубликовано в [1]. Эффект переключения наблюдался в отдельных точках поверхности полипропиленовой пленки, нанесенной на металлический электрод при тестировании тонким металлическим зондом в условиях небольшого внешнего давления. Позднее аналогичный эффект был также обнаружен в ряде других полимерных материалов [2 - 5]. В этих работах подтверждалось, что проводящее состояние в полимере имеет канальную природу, при этом с ростом величины тока росло как поперечное сечение проводящего канала, так и их число [5, 6]. Наименьшее регистрируемое сечение составляло порядка  $10^{-10}$  см<sup>2</sup>. Оцененное максимальное значение проводимости было порядка  $10^{12}$  S/cm при температуре кипения жидкого гелия. Более того, при определенных условиях, в случае если электроды переходили в сверхпроводящее состояние, сверхпроводящий ток протекал через полимерную пленку толщиной более чем один микрон [3, 6-8]. При этом в слабом магнитном поле, перпендикулярном направлению тока, наблюдались джозефсоновские осцилляции напряжения при  $I \geq I_c$ , которые дополнительно подтверждали многоканальную природу проводимости [6-8]. В настоящем сообщении приводятся новые экспериментальные результаты, которые могут быть полезны для понимания механизма возникновения эффекта размерной металлической проводимости в полимерных пленках.

Эксперимент показал, что в тонких полимерных пленках имеется два типа переключения: i) обратимое, которое наблюдается в условиях импульсного напряжения при  $E < E_c$  и толщине пленки  $d < 1.5-$

$2.0 d_c$ ; ii) с эффектом памяти (импульсное или постоянное напряжения) при  $d \leq d_c$  (здесь  $d_c$  критическая толщина пленки, когда переключение происходит практически без приложения внешнего электрического поля  $E$  [7].

Абсолютная величина проводимости у структур Металл – Полимер – Металл зависит типа переключения (обратимый или необратимый), от металла электрода, площади контакта металл/полимер, полимера, его состояния (аморфное или кристаллическое, его микротвердости). Так, например: i) при комнатной температуре проводимость у структуры с эффектом памяти много больше, чем у структуры в ON состоянии с обратимым эффектом проводимости; ii) проводимость сополимера (co-poly[4,4'-bis(4"-N-phenoxy) diphenyl-sulfone- $\alpha,\omega$ -bis( $\gamma$ -amino propyl)oligodimethylsiloxane]imide of 1,3-bis(3',4'-dicarboxyphenoxy)benzene] при одинаковой температуре у структур Sn-P-Sn много больше, чем у Nb-P-Nb или Sn-P-Nb. При этом для двух последних структур вблизи  $T_c$  критический ток  $I_c \approx (1 - T/T_c)^2$ , что характерно для наведенной сверхпроводимости. Тогда как для Sn-P-Sn структуры  $I_c \approx (1 - T/T_c)$ , что характерно для точечного контакта двух сверхпроводников iii) В аморфном состоянии полимерной пленки эффект проводимости необратимо исчезает выше 180-190 °С. Однако при переходе из аморфного в кристаллическое состояние в температурном интервале 260-290 °С проводимость вновь появляется у кристаллизующего полимера Poly-[4,4'-bis(4"-N-phenoxy)diphenyl] amic acid of 1,3-bis(3',4'-dicarboxyphenoxy)benzene (PAA(R-VAPB)). Проводимость исчезает с дальнейшим нагревом выше 320 °С когда происходит переход из кристаллического в аморфное состояние. Исследование поверхности с помощью атомно-силового микроскопа показало, что в отличие от аморфного состояния, где поверхность достаточно ровная, в кристаллическом случае поверхность имеет большую шероховатость. При этом абсолютная величина проводимости очень чувствительна к слабому (относительно давления, изменяющую молекулярную структуру полимера) приложенному к электроду одностороннему давлению. Так, например, при относительно слабом давлении не наблюдается сверхпроводящий ток в S-P-S структуре, в то время как с увеличением давления сопротивление у структуры исчезает (рис.1). Исследование сопро-

тивления растекания с помощью проводящего зонда атомно-силового микроскопа (площадь контакта порядка  $40 \text{ nm}^2$ ) показало отсутствие проводимости у приведенных выше полимеров. В то же время в пленках полиамидина, находящихся в кристаллическом состоянии при той же площади зондирующего контакта отчетливо фиксировалась канальная проводимость (рис.2а,б).

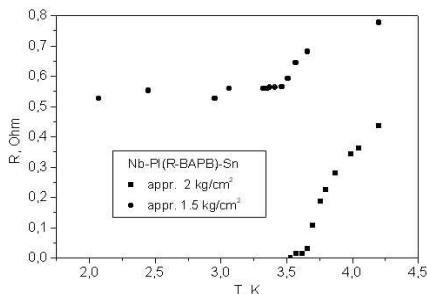


Рис.1. Температурная зависимость сопротивления S-P-S структуры при различных внешних давлениях.

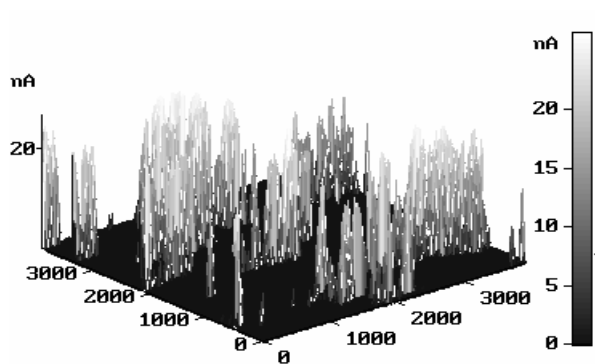


Рис.2а. Распределения тока растекания, снятое AFM микроскопом на поверхности полиамидина ( $3000 \times 3000 \text{ nm}^2$ )

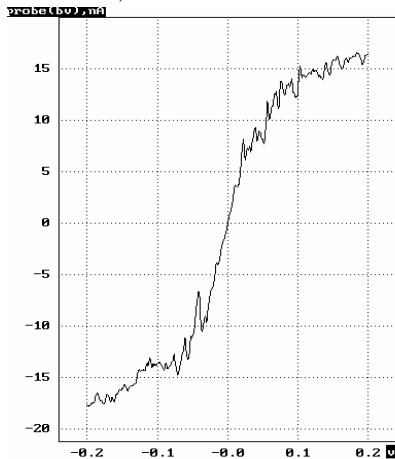


Рис.2б. Вольт-амперная характеристика AFM зонд/полимер в локальном месте.

Таким образом, можно сделать вывод, что для наблюдения эффекта размерной проводимости не-

обходимо, чтобы площадь металлического контакта превышала некоторую критическую.

Электризация полимеров при контакте с металлами, т.е. перенос заряда через интерфейс хорошо изученное явление [9]. Было показано, что величина заряда, захватываемого полимером из металла, зависит от контактирующего металла, полимера, способа электризации (внешнее до пробойное электрическое поле, скольжение электрода по поверхности, поворот). Энергетические состояния в полимере, на которые перетекает заряд, очень близки к работе выхода электрона в вакуум для многих металлов, т.е. вблизи 4 eV. Глубина проникновения заряда может достигать 3 микрон. Расположенный в локальных областях полимера заряд создает сильные внутренние электрические поля.

Мы предполагаем, что при достижении критической величины заряда происходит модификация запрещенной энергетической зоны отдельной макромолекулы в результате чего образуется проводящий полимерный канал с характерной длиной совпадающей с глубиной электризации, поскольку при достаточно плотной упаковке макромолекул возможен туннельный перенос заряда с одной макромолекулы на другую.

Настоящая работа была частично поддержана программой “Низкоразмерные квантовые структуры”.

Мы выражаем благодарность М.С. Дунаевскому за AFM измерения.

1. N.S.Enikopyan, S.G.Grusdeva, N.M. Galashina, E.I. Shkljarova, L.N. Grigorov. Dokl. AN USSR, 283, 1404 (1985).

2. N.S.Enikolopyan, L.N.Grigorov, and S.G.Smirnova. Pis'ma Zh. Exsp. Teor. Fiz., 49, 326 (1989) [JETP Lett., 49, 371(1989)]

3. V. M. Arkhangorodskii, A.N.Ionov, V.M. Tuchkevich, and I.S. Shlimak. Pis'ma Zh. Exsp. Teor. Fiz., 51, 56 (1990)[JETP Lett., 51, 67 (1990)].

4. M. Iwamoto, T.Kubota, M.Nakagawa. Japanese Journal of Applied Physics, 29, 116 (1990).

5. O. A. Scaldin, A.Yu. Zherebov, A.N. Lachinov, A.N. Chuvyrov, and V.A. Delev. Pis'ma Zh. Exsp. Teor. Fiz., 51, 141(1990).

6. A.N. Ionov, A.N. Lachinov, and R. Rentzsch. Pis'ma Zh. Tekh. Fiz., 28, 69 (2002)[Tech. Phys. Lett., 28, 608 (2002)].

7. A.N. Ionov, V.A. Zakrevskii, and I.M. Lazebnik. Pis'ma Zh. Tekh. Fiz., 25, 36 (1999)[Tech. Phys. Lett., 25, 691 (1999)]

8. A.N. Ionov and V.A. Zakrevskii. Pis'ma Zh. Tekh. Fiz., 26, 34 (2000)[Tech. Phys. Lett., 26, 910 (2000)].

9. J. Lowel, A.C. Rose-Innes, Adv. Phys. 29 947 (1980) and references therein