

05.4;12

## Эффект Джозефсона в структуре металл–полидиметилсилоксан–металл

© А.Н. Ионов, В.А. Закревский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 25 мая 2000 г.

Обнаружен эффект Джозефсона в структуре сверхпроводник–полидиметил-силоксан–сверхпроводник.

В работе [1] сообщалось, что в слоях полидиметилсилоксана (ПДМС) толщиной 5–12  $\mu\text{m}$ , не подвергавшегося предварительно никаким воздействиям, регистрировалась нестабильная во времени высокая проводимость при комнатной температуре. При приложении напряжения менее IV сопротивление случайным образом изменялось от  $10^9$  до  $0.5 \Omega$ . При этом величина сопротивления структуры металл–ПДМС–металл в низкоомном состоянии не зависела ни от площади пленки, ни от ее толщины. Ранее было показано, что стабильное высокопроводящее состояние возникает в тонких пленках некоторых термостойких полимеров класса полиариленов, а именно полидифениленфталида (ПДФФ) [2] и одного из полиимидов (ПИ) [3], помещенных между металлическими электродами. Это состояние наблюдалось даже в отсутствие специально приложенного электрического поля, если толщины пленок не превышали 1.5  $\mu\text{m}$ . Прикладываемое небольшое внешнее одноосное давление, которое никак не влияло на свойства самого полимера, было необходимо лишь для улучшения контакта полимера с металлическими электродами. Было также показано, что в сэндвич-структурах: сверхпроводник–тонкая пленка аморфного полиимида–сверхпроводник наблюдается эффект Джозефсона [3]. Представляет интерес изучить влияние магнитного поля и на свойства полидиметилсилоксана.

Кремнийорганический полимер полидиметилсилоксан  $[-\text{Si}(\text{CH}_3)_2-\text{O}-]_n$  при комнатной температуре находится в высокоэластическом (каучукоподобном) состоянии.<sup>1</sup> Поэтому чтобы

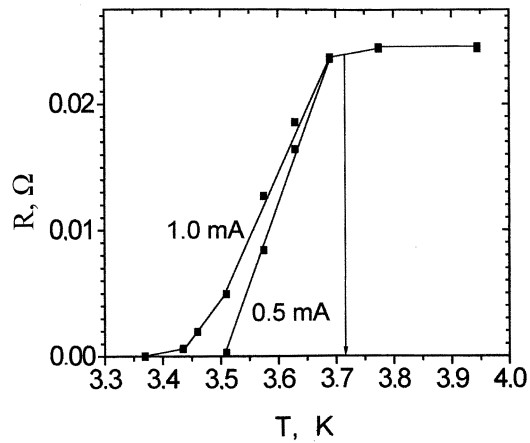
<sup>1</sup> Часть исследований была проведена на материале с молекулярным весом 250.000, который любезно предоставил И.С. Шлимак, за что авторы выражают ему благодарность.

предотвратить вытекание полимера из межэлектродного пространства, на один из электродов предварительно наносилось диэлектрическое кольцо толщиной  $1\text{--}3\ \mu\text{m}$ , имевшее внутренний диаметр  $2.5\ \text{mm}$ . Исследуемый полимер находился в полости, образованной поверхностями электродов и внутренней поверхностью кольца.

В качестве электродов использовалось массивное олово с чистотой по примесям не менее  $99.99\%$ , толщиной  $2.0$  и диаметром  $12\ \text{mm}$ . Шероховатость поверхности, контролируемая интерференционным микроскопом типа Ми-4, была не более  $0.08\ \mu\text{m}$ . Необходимо отметить, что при отсутствии ПДМС приложение к электродам внешнего механического давления, в  $100$  раз большего по величине, чем используемое в экспериментах с ПДМС, не приводило к электрическому замыканию электродов. В опытах с ПДМС установлено, что в тех структурах, где толщина охранного диэлектрического кольца (а следовательно, и толщина слоев ПДМС) была  $1.5\ \mu\text{m}$  и менее, в сэндвич-структурах наблюдается стабильное во времени высокопроводящее состояние при напряженности электрического поля не более  $40\ \text{V/cm}$ .

Обратимся теперь к низкотемпературным исследованиям структуры Sn–ПДМС–Sn в той температурной области, где олово становится сверхпроводником (критическая температура для Sn  $T_c \cong 3.72\ \text{K}$ ). Методики измерений сопротивления и температуры аналогичны тем, что были ранее описаны в [2,3].

На рис. 1 приведена температурная зависимость сопротивления  $R(T)$  структуры Sn–ПДМС–Sn. Заметное уменьшение сопротивления начинается уже в интервале температур  $3.65\text{--}3.75\ \text{K}$ , а с дальнейшим понижением температуры сопротивление падает до технического нуля, определяемого чувствительностью используемой аппаратуры. Подобная зависимость  $R(T)$  ранее была обнаружена для полидифениленфталида, аморфного полиимида и окисленного атактического полипропилена [2–4]. Из рис. 1 видно, что сверхпроводящий переход не резкий, а "размазан" по температуре в отличие от перехода в системе из двух непосредственно контактирующих оловянных электродов, где сверхпроводимость наступает резко при  $T = T_c$  (показано стрелкой). Как известно, размытость перехода по температуре характерна для очень тонких сверхпроводящих проволок или малых металлических частиц, если их диаметр  $d$  много меньше длины когерентности куперовской пары  $\xi_0$  (для Sn  $\xi_0 = 250\ \text{nm}$ ) [5]. Этот факт позволяет думать, что в полимере существуют тонкие сверхпроводящие каналы. На это

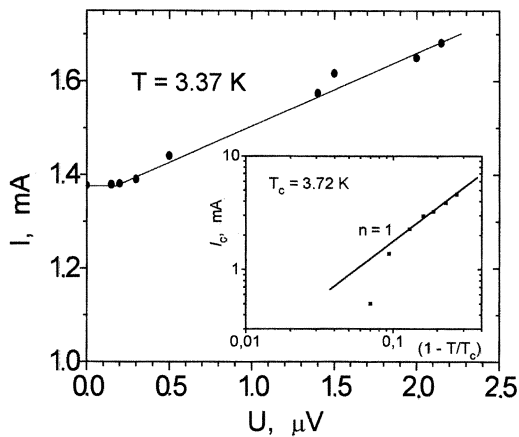


**Рис. 1.** Температурная зависимость сопротивления структуры Sn–ПДМС–Sn при двух значениях тока.

указывает также и то, что чем больше ток через структуру, тем сильнее размытость перехода (рис. 1). Это связано с тем, что чем больше собственное магнитное поле, создаваемое протекающим через проводник током, тем меньше должен быть его диаметр, чтобы в нем возникла сверхпроводимость [6].

Полученные данные позволяют предположить, что между массивными сверхпроводящими электродами имеются сверхпроводящие каналы с малыми проходными сечениями, которые могут проявлять свойства слабых связей. На это указывает также и вид вольт-амперной характеристики сэндвич-структуры Sn–ПДМС–Sn (рис. 2, *a*). Как видно из этого рисунка, при токе  $I \leq I_c$  падение напряжения на структуре не регистрируется. Такой вид  $I$ – $V$ -зависимости характерен для джозефсоновских переходов. Поэтому в Sn–ПДМС–Sn структурах можно ожидать осцилляции джозефсоновского тока в слабом магнитном поле.

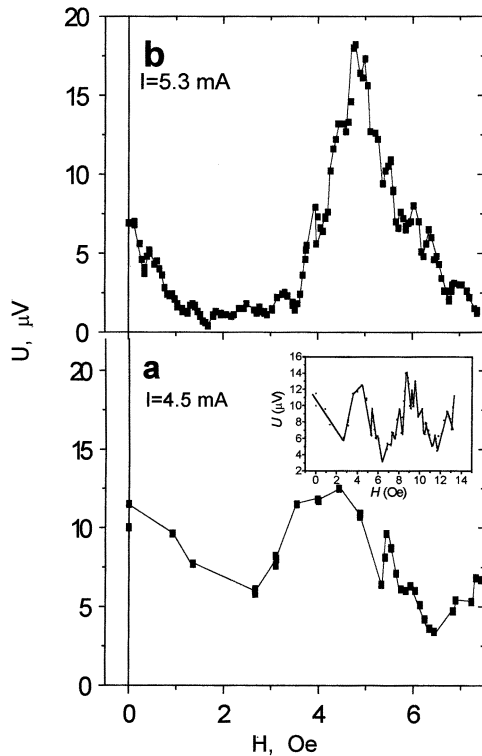
Действительно, эксперимент подтвердил это предположение. На рис. 3 (*a, b*) представлены осцилляции падения напряжения на Sn–ПДМС–Sn структуре (отражающие изменения тока через структуру) в слабом поперечном магнитном поле при двух значениях постоянного тока  $I \geq I_c$  (рис. 3, *a*) и  $I > I_c$  (рис. 3, *b*). Как видно, наблюдаемая



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика структуры Sn–ПДМС–Sn в слабых электрических полях при температуре  $T = 3.37$  К. На врезке показана зависимость критического тока сэндвич-структуры от температуры (для олова  $T_c = 3.72$  К).

картина сильно отличается от той, которая соответствует наличию одного джозефсоновского перехода. Наблюдаемая картина ближе всего подходит к случаю  $N$  — параллельных, взаимодействующих между собой джозефсоновских переходов [8]. Как видно также из рисунка, характер осцилляций напряжения в магнитном поле меняется в зависимости от силы тока, протекающего через структуру. По-видимому, это обстоятельство связано с нестационарным состоянием джозефсоновского перехода, когда  $I > I_c$  и  $V \neq 0$ .

Обратимся снова к рис. 2 (*a, b*). Как известно, зависимость  $I_c(T)$  вблизи  $T_c$  описывается формулой  $I_c(T) = \text{const}(1 - T/T_c)^n$ , где показатель степени  $n$  зависит от типа джозефсоновского перехода. Для SNS перехода ( $N$  — нормальный металл), в котором сверхпроводимость обусловлена эффектом близости  $n = 2$  [9]. В случае перехода SIS типа ( $I$  туннельно-прозрачный барьер толщиной не более 2 nm между двумя сверхпроводниками), а также для точечного контакта между двумя сверхпроводниками  $n = 1$  [10,11]. На вставке рис. 2 представлены экспериментальные результаты измерения  $I_c(T)$  в двойном логарифми-



**Рис. 3.** Зависимость падения напряжения на структуре Sn–ПДМС–Sn от поперечного магнитного поля при двух значениях постоянного тока  $I = 4.5 \text{ mA}$  (a) и  $I = 5.3 \text{ mA}$  (b) и при температуре  $T = 2.73 \text{ K}$ . Для случая (a) на врезке показана зависимость  $U$  от  $H$  в расширенном интервале магнитных полей.

ческом масштабе. Как видно из рисунка, в нашем случае с хорошей точностью  $n = 1$ . Тем самым исключается джозефсоновский переход SNS типа за счет эффекта близости в полимерном канале. Относительно перехода SIS типа можно сказать, что туннельно-прозрачный слой изолятора специально нами не создавался, однако исключить полностью его существование нельзя, так как Sn электроды могли окислиться на воздухе за время приготовления сэндвич-структуры. Однако и в этом

случае точечного джозефсоновского контакта необходимо предположить, что полимерный канал обладает сверхпроводимостью. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы ответить на вопрос о природе сверхпроводимости полимерного канала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 00–03–33060.

## Список литературы

- [1] *Shlimak I., Marchenkov V.* // Solid. State Commun. 1998. V. 107. N 9. P. 443–446.
- [2] *Закревский В.А., Ионов А.Н., Лачинов А.Н.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 13. С. 89–94.
- [3] *Ионов А.Н., Закревский В.А., Лазебник И.М.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 17. С. 36–43.
- [4] *Архангородский В.М., Ионов А.Н., Тучкевич В.М., Шлимак И.С.* // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 51. В. 1. С. 56–61.
- [5] *Хоэнберг П.* // УФН. 1970. Т. 102. В. 2. С. 239–246; Skocpol W.J. Rep. Progr. Phys. 1975. V. 38. P. 1049–1097.
- [6] *Rose-Innes A.C., Rhoderick E.H.* In Introduction to Superconductivity. 1969. Pergamon Press. Chap. 8.
- [7] *Holm R.* Electric Contacts: Theory and Application. 1967. Springer, New York.
- [8] *Harbaugh J. Kent, Stroud D.* // Cond.-mat/9809279.
- [9] *DeGennes P.G.* // Rev. Mod. Phys. 1964. V. 36. P. 225–237.
- [10] *Ambergaokar V., Baratoff A.* // Phys. Rev. Lett. 1963. V. 10. P. 486–489.
- [11] *Асламазов Л.Г., Ларкин А.И.* // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 9. № 2. С. 150–154.