

## ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПЕРЕХОДА ТОНКИХ ПЛЕНОК ПРИ НАПЫЛЕНИИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЬ НОРМАЛЬНОГО МЕТАЛЛА

*И.Л.Ландау, Д.Л.Шаповалов, И.А.Паршин*

*Институт физических проблем им. П.Л.Капицы АН СССР  
117334, Москва*

Поступила в редакцию 1 февраля 1991 г.

Обнаружено повышение температуры сверхпроводящего перехода тонких висмутовых пленок при напылении на их поверхность серебра. Эффект обусловлен подавлением локализации электронов проводимости при уменьшении поверхностного сопротивления пленки.

Температура сверхпроводящего перехода тонких пленок понижается при уменьшении их толщины. Такие зависимости были обнаружены практически во всех случаях, когда пленки могут рассматриваться как двумерные объекты. В первую очередь это холодноосажденные пленки различных металлов, а также соединения типа  $\text{MoGe}$ , которые образуют однородные аморфные пленки при комнатной температуре (см., например, <sup>1-4</sup>). В настоящее время является несомненным, что понижение температуры сверхпроводящего перехода при уменьшении толщины пленок обусловлено в первую очередь эффектами локализации электронов.

Впервые эта ситуация была рассмотрена теоретически Маекавой и Фукуямой <sup>5</sup>, а также Такаги и Куродой <sup>6</sup>. Ими было показано, что слабая локализация электронов в рамках теории БКШ приводит к эффективному возрастанию кулоновского отталкивания и соответствующему понижению температуры сверхпроводящего перехода  $T_c$ . В случае неупорядоченных пленок с малой длиной пробега

$$\ln \frac{T_c}{T_{c0}} \simeq -\frac{1}{3} g_1 \frac{e^2}{2\pi^2 \hbar} R_{\square} \left( \ln \frac{\hbar}{T_c \tau} \right)^3$$

здесь  $T_{c0}$  - температура перехода в объемном образце,  $g_1$  - константа, описывающая кулоновское взаимодействие,  $R_{\square}$  - поверхностное сопротивление пленки,  $\tau$  - время пробега. Позднее Финкельштейн <sup>7</sup> показал, что эта формула, полученная с учетом поправок первого порядка по  $t = (e^2/2\pi^2 \hbar) R_{\square}$ , справедлива только при  $t \ll 1$ , тем не менее то обстоятельство, что критическая температура определяется в основном значением  $R_{\square}$ , сохраняется при любых предположениях.

Подчеркнем, что для исследования этого эффекта несущественна реальная микроскопическая структура пленок, необходима лишь их однородность в масштабах довольно большой длины  $L_D = (l_i l_e)^{1/2}$  ( $l_i$  - и  $l_e$ , соответственно неупругая и упругая длины свободного пробега электронов). При низких температурах  $l_i$  велика и даже при  $l_e$  порядка межатомного расстояния  $L_D \simeq 10^3 - 10^4 \text{ \AA}$ .

В данной работе мы попытались экспериментально исследовать ситуацию, когда изменение  $R_{\square}$  происходит за счет напыления нормального металла на тонкую пленку сверхпроводника. В нормальном состоянии (при  $T > T_c$ ) напыление на поверхность пленки другого металла приводит к уменьшению сопротивления и соответствующему уменьшению локализационных эффектов.

При  $T < T_c$  ситуация несколько усложнена тем, что кроме уменьшения локализационных эффектов необходимо учитывать влияние изменения состава пленки на критическую температуру. Очевидно, что добавление атомов нормального металла на сверхпроводящую пленку должно приводить к понижению  $T_c$  (за исключением экзотической ситуации, когда эти два металла образуют химическое соединение с более высокой критической температурой).

Таким образом, при напылении пленки нормального металла на тонкую сверхпроводящую пленку должны наблюдаться два эффекта: повышение  $T_c$  за счет уменьшения локализации и понижение  $T_c$  за счет влияния атомов нормального металла. В тонких пленках, когда сверхпроводимость существенно подавлена локализацией электронов, можно ожидать, что напыление нормального металла приведет к абсолютному возрастанию  $T_c$ .

Эксперименты были проведены на холодноосажденных пленках висмута, которые образуют устойчивую аморфную структуру с критической температурой  $T_{c0} \approx 6,1 \text{ K}^{1,8}$ ; в качестве нормального металла было выбрано серебро, которое не образует с аморфным висмутом сверхпроводящих соединений (критическая температура холодноосажденных смесей висмута с серебром ниже  $T_c$  чистого висмута <sup>9</sup>).

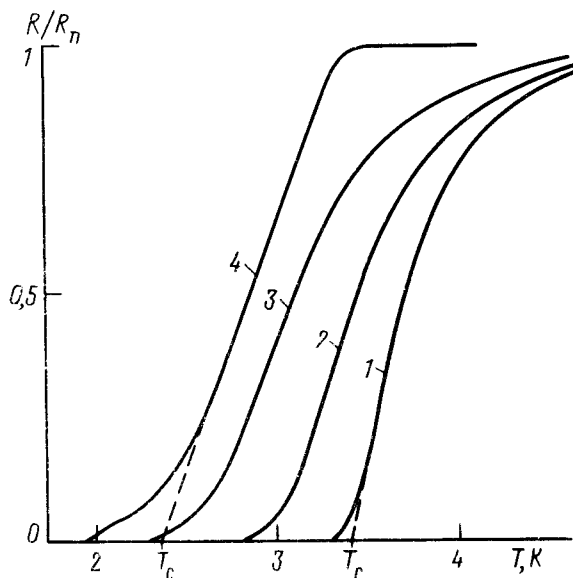


Рис. 1. Сверхпроводящие переходы при различных толщинах серебряной пленки. 1 -  $d_{Ag} = 18 \text{ \AA}$ , 2 -  $d_{Ag} = 8 \text{ \AA}$ , 3 -  $d_{Ag} = 0$  (исходная висмутовая пленка), 4 -  $d_{Ag} = 56 \text{ \AA}$ . Пунктиром на этом рисунке показан способ определения  $T_c$ .

Напыление производилось на стеклянную подложку с пропаянными платиновыми контактами, находящуюся при гелиевой температуре, из двух различных испарителей. Конструкция прибора была аналогична описанному в работе <sup>10</sup>. Количество напыленного металла определялось по сдвигу частоты кварцевого резонатора; пересчет полученных данных в толщину производился с использованием значений плотности массивных кристаллических образцов. Измерение сопротивления пленок производилось четырехконтактным методом.

Всего было проведено два опыта с пленками висмута различной толщины. Первоначально на подложку напылялась висмутовая пленка и по зависимости ее сопротивления от температуры определялось значение  $T_c$ . Затем на эту же пленку напылялось небольшое количество серебра и определялось новое значение  $T_c$ ; такая процедура повторялась несколько раз.

На рис.1 показано несколько сверхпроводящих переходов для различных значений толщины серебряной пленки  $d_{Ag}$ , а на рис.2 представлена зависимость  $T_c$  от  $d_{Ag}$ . При малых толщинах серебра происходит заметное возрастание критической температуры, которое при больших толщинах сменяется

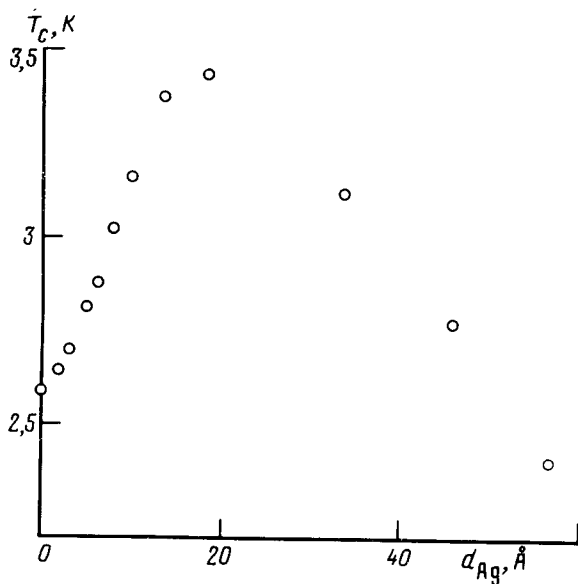


Рис. 2. Зависимость  $T_c$  от толщины серебряной пленки; толщина пленки висмута  $d_{Bi} = 18\text{Å}$

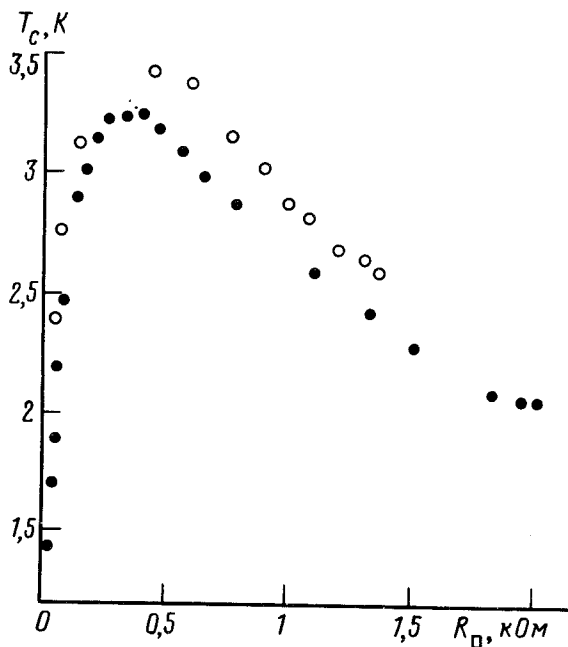


Рис. 3. Зависимость  $T_c$  от поверхностного сопротивления пленок.  $\circ$  -  $d_{Bi} = 16\text{Å}$ ,  $\bullet$  -  $d_{Bi} = 18\text{Å}$

понижением. На рис.3 результаты экспериментов представлены в координатах  $T_c$  от  $R_{\square}$ . К сожалению, точные геометрические размеры более тонкой пленки неизвестны и пересчитать ее сопротивление в  $R_{\square}$  не удалось, поэтому зависимость  $T_c$  от  $R_{\square}$  для этой пленки имеет качественный характер.

Полученные результаты, на наш взгляд, убедительно свидетельствуют, что в тонких сверхпроводящих пленках основной характеристикой, определяющей значение  $T_c$ , является именно поверхностное сопротивление пленки и уменьшение этой величины даже за счет добавления нормального металла приводит к заметному повышению критической температуры.

Поскольку в локализационных теориях фигурирует отношение  $T_c/T_{c0}$ , то для количественного анализа полученных результатов необходимо более тщательное рассмотрение сверхпроводимости в наших пленках. При больших толщинах эту ситуацию можно рассматривать в терминах эффекта близости, а при малых, когда суммарная толщина мала по сравнению с размером сверхпроводящих пар  $\xi_0$ , конкретное распределение атомов висмута и серебра не должно играть существенной роли и, при малом количестве серебра,  $T_{c0}$  такой слоистой пленки должно, по-видимому, совпадать со значением для однородного твердого раствора такой же концентрации.

### Литература

1. Strongin M., Tompson R.S., Kammerer O.F., Crow J.E. Phys. Rev, 1970, B1, 1078.
2. Rühl W., Hilsch P. Z. Physik, 1977, B26, 161.
3. Raffy H.R., Laibowitz R.B., Chaudhari P., Maekawa S. Phys. Rev., 1983, B28, 6607.
4. Graybeal J.M., Beasley M.R. Phys. Rev., 1984, B29, 4167.
5. Maekawa S., Fukuyama H. J. Phys. Soc. Jpn., 1982, 51, 1380.
6. Takagi H., Kuroda Y. Solid State Comm., 1982, 41, 643.
7. Финкельштейн А.М. Письма в ЖЭТФ, 1987, 45, 37.
8. Buckel W., Hilsch R. Z. Phys., 1954, 138, 109.
9. Korn D., Müre W., Zibold G. J. de Physique, 1974, C-4, 258.
10. Цымбаленко В.Л., Шальников А.И. ЖЭТФ, 1973, 65, 2086.