

## СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ ТРИБОСЛОЕВ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ГЕРМАНИИ ПРИ ТРЕНИИ ГЕРМАНИЯ СО СВИНЦОМ

*Е.А.Духовской, С.С.Карапетян, Ю.Г.Морозов,  
А.С.Онищенко, В.И.Петинов, А.Н.Пономарев,  
А.А.Силин, Б.М.Степанов, В.Л.Тальрозе*

Впервые обнаружено сверхпроводящее состояние в трибослоях германия, образованных при трении его со свинцом при 4,2К. Максимальное значение  $T_c$ , полученное в экспериментах равно 19К, что заметно превышает  $T_c$  как для массивного свинца, так и для свинцовых пленок, напыленных на германий.

При трении двух твердых тел на трущихся поверхностях образуются трибослой; структура которых может отличаться от объемной

структуры концентрацией дефектов, примесных атомов и даже симметрией решетки. Очевидно состояние трибослоев является неравновесным и может быть стабилизировано охлаждением трущихся образцов до достаточно низких температур.

Ранее авторами [1] было обнаружено, что при образовании трибослоев на поверхности трущихся металлов в сверхпроводящем состоянии коэффициент трения становится весьма низким и сохраняется таковым при последующем нагреве образцов до температур значительно выше температуры перехода  $T_c$ . Однако, если трибослои образованы на тех же металлах при  $T > T_c$ , коэффициент трения оставался достаточно высоким.

Согласно современным представлениям о роли структурных дефектов в повышении  $T_c$  и  $H_c$  в тонких пленках [2], можно ожидать, что трибослои сверхпроводящих металлов будут иметь более высокие  $T_c$  и  $H_c$ , чем исходные металлы. Однако из-за высокой проводимости самой подложки измерять проводимость трибослоев, сформированных на металле, трудно. Поэтому было решено изучать электропроводящие свойства трибослоев, образующихся на поверхности диэлектрика или полупроводника при низких температурах при трении со сверхпроводящим металлом.

Следует отметить, что, исходя из общезначимых представлений о механизме переноса и учитывая достаточно высокую энергию активации взаимной диффузии (не менее 1 эВ [3] металлов и полупроводников, можно было и не получить в процессе трения при очень низких температурах переноса одного материала на другой. Однако специально проведенные нами исследования показали, что такой процесс имеет место даже при гелиевых температурах. Хотя природа этого явления пока недостаточно изучена, сам факт переноса металлов на диэлектрик и полупроводник указывает на протекание энергетически неравновесных либо туннельных процессов переноса в зоне контакта трущихся пар.

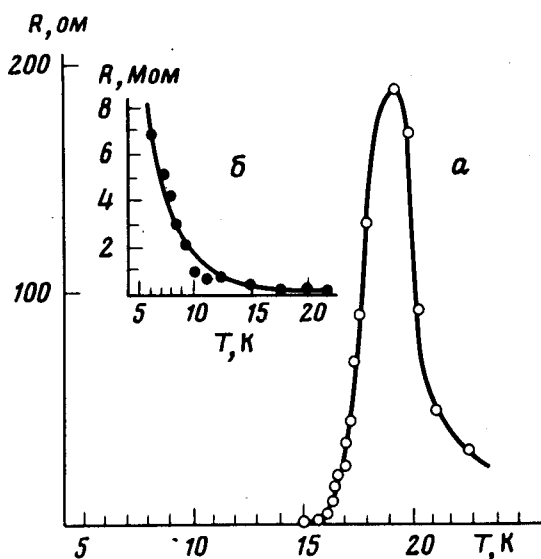
Для изучения проводимости трибослоя нами была выбрана пара трения "свинец-германий". Трение осуществлялось при температуре  $T = 4,2\text{K}$ , затем она повышалась. Сопротивление  $R$  трибослоя на поверхности германия измерялось после окончания нанесения, измерения проводились на постоянном токе 1 мкА в направлении вдоль дорожки трения.

Типичная зависимость сопротивления трибослоя от температуры представлена на рисунке. Для сравнения на вставке приведена также зависимость  $R(T)$  для исходного образца германия. Как видно из рисунка, относящегося к одному из опытов, с понижением температуры от 22K сопротивление трибослоя сначала заметно возрастает; достигает максимального значения при 19K, затем резко падает до нуля при  $T_0 = 15\text{K}$ . При этом наблюдается хорошая воспроизводимость результатов измерений в процессе нагрева и охлаждения образца в пределах 4,2–22K.

Такой экспериментальный характер зависимости  $R(T)$  был обнаружен у всех исследованных образцов. Положение же максимума ( $T_{max}$ ) в разных экспериментах было несколько различным и изменялось в пределах от 10,7 до 19K. Соответственно и температура  $T_0$  изменялась от 8,3 до 15K.

Вольт-амперные характеристики трибослоев сняты при температурах ниже  $T_0$ , соответствуют сверхпроводящему состоянию, а при  $T > 30\text{K}$  — металлической проводимости. При этом температурная зависимость  $R(T)$  трибослоев в области 30 — 300К подобна аналогичной зависимости для сильно легированного германия [4].

Отжиг трибослоев при 300К сильно снижал их проводимость и смещал положение максимума сопротивления в область более низких температур. Подобное, но значительно более слабое влияние отжига проявлялось и при нагреве образцов даже до 30К.



Температурная зависимость сопротивления трибослоя Ge — Pb сформированного при  $T = 4,2\text{K}$  (кривая *a*) и исходного образца германия (кривая *b*)

Наиболее интересным из полученных результатов представляется экстремальный характер и достигавшиеся величины  $T_c$ . Прекращение роста сопротивления трибослоя с понижением температуры и его падение при  $T < T_{max}$ , по-видимому, связано с возникновением в слое сверхпроводящих образований. Следует отметить, что переход в сверхпроводящее состояние через максимум сопротивления был наблюдаем ранее в гранулированных сверхпроводниках из малых сверхпроводящих частиц разделенных друг от друга диэлектрическим барьером [5] и объяснен уменьшением одночастичных токов при появлении щели и постепенным ростом вклада двухчастичных токов при дальнейшем уменьшении температуры.

Вероятно и исследуемые трибослои германия представляют собой островковые металлические образования, разделенные полупроводниковыми прослойками. Такими металлическими образованиями могут быть островки свинца или сильно легированные свинцом участки германия. Учитывая неравновесное состояние трибослоя, можно предположить и образование в нем островков металлической фазы германия, аналогичной фазе высокого давления [6]. Такая модель позволяет качественно объяснить наблюдаемые зависимости. В области высоких температур проводимость трибослоев определяется проводимостью полупроводниковых прослоек.

При переходе отдельных металлических островков в сверхпроводящее состояние через эти прослойки начинают просачиваться куперовские пары и поэтому общая проводимость трибослоя начинает расти. По мере понижения температуры для островков в сверхпроводящем состоянии их общая проводимость увеличивается до тех пор, пока сопротивление трибослоя не становится нулевым. Однако, если существуют барьеры с низкой проницаемостью, то, в трибослое может сохраняться некоторое остаточное сопротивление. Действительно, в отдельных экспериментах при охлаждении образцов после резкого спада сопротивления сохранялась конечная проводимость вплоть до 4,2К.

Наблюдаемая в опытах размытость сверхпроводящего перехода может быть объяснена также наличием в трибослое областей с различными  $T_c$ . Это подтверждается, в частности упомянутым различием  $T_{max}$  в различных опытах, несколько отличающихся условиями трения. Сама по себе размытость говорит о том, что для некоторых областей  $T_c > T_{max}$ .

Таким образом, нами обнаружено, что в трибослоях германия, образованных при трении его со свинцом при 4,2К, возникает сверхпроводящее состояние. Максимальное значение  $T_c$ , полученное в экспериментах больше или, по крайней мере, равно 19К, что заметно превышает  $T_c$  как для массивного свинца, так и для свинцовых пленок, напыленных на германий [7].

Всесоюзный

научно-исследовательский институт  
оптико-физических измерений

Поступила в редакцию  
2 февраля 1978 г.

### Литература

- [1] Е.А. Духовской, С.С.Карапетян, Ю.Г.Морозов, А.С.Онищенко, В.И.Петин, А.Н.Пономарев, А.А.Силин, Б.М.Степанов, В.Л.Гальрозе, ДАН СССР, 235, 331, 1977.
- [2] K.L.Chopra. Thin Film phenomena N.Y. Mc Graw Hill, 1969, ch2 (рис. пер.: Чопра К.Л. Электрические явления в тонких пленках, М., изд. Мир, 1972, гл. 2).
- [3] П.Шьюмон. Диффузия в твердых телах. М., изд. Металлургия, 1967.
- [4] К.Зеегер. Физика полупроводников, М., Изд. Мир, 1977. гл. 6.
- [5] Ю.Г.Морозов, И.Г.Науменко, В.И.Петин. ФНТ, 2, 988, 1976.
- [6] Y.Witting, Zeitschrift für Physik, B195, 5215, 1966.
- [7] В.И.Запорожченко, В.И.Раховский. ДАН СССР, 217, 544, 1974.