

В. И. ЗАПОРОЖЧЕНКО, В. И. РАХОВСКИЙ

**О КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ  
В «САНДВИЧАХ» Pb — Ge, Sn — Ge**

*(Представлено академиком В. Л. Гинзбургом 13 VIII 1973)*

Исследование сверхпроводимости в слоистых системах типа «сэндвич», состоящих из тонкой металлической пленки, заключенной в диэлектрическую матрицу — одно из важных направлений поиска высокотемпературных сверхпроводников. Для того чтобы экситонный механизм сверхпроводимости был эффективным, пленка металла в таких системах должна быть как можно тоньше: 15–20 Å (<sup>1</sup>, <sup>2</sup>). Трудности, связанные с получением таких пленок, являющиеся, по-видимому, причиной того, что среди обширной литературы по сверхпроводящим пленкам имеется лишь несколько работ, в которых используются такие сверхтонкие образцы (<sup>3</sup>, <sup>4</sup>).

Обычный недостаток такого рода исследований заключается в отсутствии контроля за чистотой полученных пленок и возможности их загрязнения ввиду недостаточно высокого вакуума. Последнее особенно существенно в случае «сэндвича», так как диэлектрический подслоя должен находиться в «интимном» контакте с металлической пленкой (<sup>1</sup>). Если же вакуум недостаточно высок, диэлектрический подслоя покрывается слоем адсорбированного газа прежде, чем будет нанесена пленка металла (при давлении 10<sup>-7</sup> тор время покрытия поверхности монослоем газа ~10 сек.).

С другой стороны, адсорбция кислорода на поверхности металла может приводить к изменению плотности состояний электронов проводимости из-за образования окисла (реакция начинается уже при 20° К) (<sup>4</sup>). Это обстоятельство так же, как и стабилизация неупорядоченности структуры пленки при загрязнении ее примесями, может существенным образом влиять на температуру  $T_k$  сверхпроводящего перехода. Так, в (<sup>5</sup>) показано, что именно примеси газа ответственны за повышение  $T_k$  в пленках Al, тогда как в чистых пленках, приготовленных в сверхвысоком вакууме, значения  $T_k$  при толщинах вплоть до 30 Å были близки к  $T_k$  массивного образца.

Целью данной работы явилась разработка методики получения «сэндвичей» со сверхтонким металлическим слоем в контролируемых условиях в сверхвысоком вакууме. Необходимость создания хорошего контакта между металлом и поверхностью диэлектрика требует, чтобы последняя была свободна от газов и примесей. Эти условия выполняются, если пленка диэлектрика напыляется в сверхвысоком вакууме непосредственно перед нанесением пленки металла. Варьируя условия приготовления пленок, можно получать поликристаллические и монокристаллические слои диэлектрика, электрические и оптические свойства которых почти не отличаются от свойств массивных образцов (<sup>6</sup>).

Пленки готовились испарением выбранного вещества с помощью электронной бомбардировки в сверхвысоковакуумной системе с безмасляной откачкой. Применение испарителя с электронной бомбардировкой позволяет напылять пленки практически любого вещества. Во время работы испарителя давление в системе повышалось от 5·10<sup>-10</sup> до 5·10<sup>-9</sup> тор. С помощью квадрупольного масс-спектрометра с чувствительностью 10<sup>-15</sup> тор контролировался как состав остаточных газов, так и выделение

какого-либо газа при испарении. В остаточной атмосфере вакуумной системы преобладали пары воды, затем, в порядке убывания,  $N_2$ , Ar,  $H_2$ .

Чистота пленок проверялась с помощью оже-спектров неупругорассеянных электронов на пленках, приготовленных в аналогичных условиях. Пленки напылялись на полированные стеклянные и германиевые пластинки толщиной 200 мкм, находившиеся в тепловом контакте с дном гелиевой полости металлического криостата, позволяющего производить его отжиг вместе с вакуумной системой и изменять температуру подложки от 2 до 700° К в зависимости от условий приготовления пленок. Толщина напыленного слоя определялась по уходу частоты кварцевого вибратора, который калибровался в том же приборе с помощью вакуумных кварцевых микровесов с чувствительностью  $2 \cdot 10^{-7}$  г, и путем сравнения с данными, полученными оптическим методом.

На рис. 1 представлены кривые изменения  $T_K$  в зависимости от толщины пленок Pb, полученных при криогенных температурах на предварительно напыленных пленках Ge и на стекле.  $T_K$  пленок Pb, напыленных на поверхность стекла, близка к значению  $T_K$  массивного образца и слабо зависит от толщины слоя и удельного поверхностного сопротивления  $R_0$  пленки. Начало резкого уменьшения сопротивления пленок с ростом их толщины соответствовало толщинам  $\sim 30$  Å для пленок Pb, осажденных на стекле при гелиевых температурах, и  $\sim 60$  Å, когда осаждение велось при температуре жидкого азота.

Большое значение  $R_0 \sim 10^5$  ом/см<sup>2</sup> и отрицательный температурный коэффициент сопротивления для толщины 30 Å свидетельствует о гранулированном характере получаемых пленок. При измерении вольт-амперных характеристик таких пленок было обнаружено необратимое уменьшение (на один — два порядка) их сопротивления при увеличении напряжения электрического поля, приложенного вдоль пленки, до 45 в/см. Процесс этот, по-видимому, связан с коалесценцией отдельных островков, из которых состоит пленка, под действием электрического поля (7), тогда как отогрев пленок приводит к их разрушению. Значение  $T_K$  пленок после обработки электрическим полем увеличивалось, а переход в сверхпроводящее состояние становился более резким.

В пленках свинца, полученных при гелиевых температурах на предварительно напыленных пленках Ge толщиной  $\sim 100$  Å, сверхпроводимость наблюдалась уже при толщинах 10–15 Å. Покрытие таких пленок слоем Ge обнаруживает немонотонный характер зависимости  $T_K$  от толщины покрытия (рис. 2). Подобное влияние покрытия отмечалось в работе (4) для пленок Pb и в (8) для пленок Tl. В отличие от данных работы (4),  $T_K$  пленки Pb с ростом толщины верхнего слоя Ge не стабилизировалось на значениях, близких к  $T_K$  пленки без покрытия, а уменьшалось ниже этого значения.

Отогрев пленок Pb до 100° К приводит, с одной стороны, к увеличению  $T_K$  на 0,5–1° К, а, с другой, — меняет характер зависимости  $T_K$  от толщины верхнего слоя Ge.

Представленные на рис. 1 и 2 зависимости позволяют предполагать, что уменьшение  $T_K$  в пленках Pb на Ge связано прежде всего с эффектом на границе Pb–Ge (изменение плотности нормальных электронов, влияние электростатического заряда и т.п.).

На рис. 3 представлены кривые изменения  $T_K$  холодноосажденных пленок Sn от их толщины.

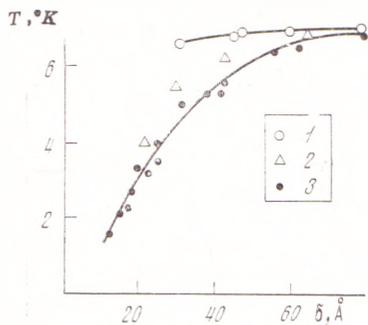


Рис. 1. Зависимость  $T_K$  от толщины  $\delta$  пленок Pb: 1 — на стекле, 2 — на монослое Ge, 3 — на Ge (100 Å)

Пленки, полученные при гелиевых температурах на предварительно напыленных слоях Ge толщиной 300 Å, имеют характерный максимум  $T_K$  при толщине  $\sim 20$  Å. Подобная зависимость, но с большим по величине максимумом  $T_K \sim 5,8^\circ \text{K}$  — наблюдалась в <sup>(9)</sup> для Sn на SiO. Увеличение  $T_K$  в таких пленках связано, по-видимому, с разупорядоченностью структуры образцов, полученных при гелиевой температуре. Подобное предположение подтверждается зависимостью  $T_K$  от толщины пленок, отожженных до температур  $100^\circ \text{K}$  (рис. 3), для которых наблюдается умень-

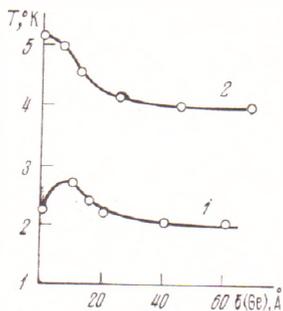


Рис. 2

Рис. 2. Влияние покрытия на  $T_K$  пленок: 1 — пленка Pb (15 Å), 2 — пленка Pb (25 Å) после отогрева до  $100^\circ \text{K}$

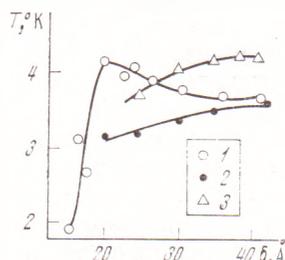


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость  $T_K$  от толщины пленок Sn на Ge. 1 — пленки, полученные при гелиевой температуре, 2 — пленки после отогрева до  $100^\circ \text{K}$ , 3 — пленки, полученные в вакууме  $10^{-6}$  тор

шение сопротивления, что свидетельствует об улучшении их структуры. Более высокие значения  $T_K$  характерны для пленок Sn, полученных в вакууме  $10^{-6}$  тор (все остальные условия приготовления такие же, как описанные выше). Последнее обстоятельство связано, вероятно, со стабилизацией разупорядоченности структуры из-за примесей газа, что подтверждается тем, что  $R_0$  таких пленок больше значений, характерных для пленок, полученных в сверхвысоком вакууме.

В заключение авторы выражают благодарность В. В. Свечеву за обсуждение результатов, постоянное внимание и поддержку на всех этапах проведения работы, а также Ю. А. Кухаренко за дискуссии и замечания, способствовавшие улучшению работы.

Институт высоких температур  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
12 VI 1973

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> В. П. Гинзбург, УФН, т. 101, 185 (1970). <sup>2</sup> Г. Ф. Жарков, Ю. А. Успенский, ЖЭТФ, т. 61, 2123 (1971). <sup>3</sup> W. Kessel, W. Rühl, PTV — Mitt, v. 4, 258 (1969). <sup>4</sup> M. Strongin, R. S. Thompson et al., Phys. Rev., v. B1, 1078 (1970). <sup>5</sup> M. Strongin, O. F. Kammerer et al., Phys. Rev. Lett., v. 30, 129 (1973). <sup>6</sup> С. А. Семилетов, Кристаллография, т. 9, 84 (1964). <sup>7</sup> К. Л. Чопра, Электрические явления в тонких пленках, М., 1972, стр. 52. <sup>8</sup> D. G. Naugle, Phys. Lett., v. 25A, 688 (1967). <sup>9</sup> M. Strongin, O. F. Kammerer, J. Appl. Phys., v. 39, 2509 (1968).