

## НАПЫЛЕНИЕ ПЛЕНОК КАДМИЯ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

И.Л.Ландау, С.Э.Кубаткин, Ю.В.Шарвин

При напылении кадмия через слой жидкого гелия были получены диэлектрические пленки толщиной несколько десятков атомных слоев.

Обычно холодноосажденные пленки металлов получают вакуумным испарением на диэлектрическую подложку, обратная сторона которой охлаждается жидким гелием. При этом на холодную подложку попадают атомы металла, имеющие температуру испарителя. Естественно, это обстоятельство играет существенную роль в образовании структуры пленок и можно ожидать, что, если на подложку будут попадать уже замедленные атомы, то структура и свойства таких пленок будут совершенно иными.

В наших экспериментах напыление производилось на стеклянную подложку, расположенную под поверхностью жидкого гелия, и атомы металла, вылетающие из испарителя, при своем движении к подложке должны были преодолевать слой сверхтекучей жидкости толщиной около 1 мм. Оценки показывают, что такого слоя гелия достаточно для практически полной термализации металлических атомов.

При такой постановке эксперимента было необходимо охладить жидкий  $He^4$  настолько, чтобы его пар не мешал движению атомов металла от испарителя к поверхности жидкости. Охлаждение ванны  $He^4$  до температуры около 0,6 К производилось с помощью криостата, работающего на откачке паров  $He^3$ . Для того, чтобы уменьшить давление пара  $He^4$ , связанное с испарением сверхтекучей пленки, использовался подавитель пленки, по конструкции аналогичный тем, которые используются в криостатах растворения<sup>1</sup>. В результате давление  $He^4$  в приборе составляло  $3 \cdot 10^{-4}$  тор.

Поскольку однократное столкновение тяжелого атома металла с легким атомом гелия лишь незначительно изменяет направление импульса тяжелого атома, то большая часть атомов металла достигала поверхности жидкости. Тем более можно было пренебречь столкновениями атомов кадмия между собой (длина пробега относительно такого процесса значительно превышала длину прибора).

Контроль за ходом напыления и оценка толщины пленок производились по измерению сдвига частоты кварцевого резонатора, который размещался в жидком гелии на одном уровне с подложкой. На стеклянные подложки были нанесены катодным распылением четыре платиновых контакта так, что исследовавшиеся пленки имели длину 1 мм и ширину 2 мм. Сопротивление пленок измерялось либо двухконтактным, либо четырехконтактным методом; причем значения сопротивления, измеренные разными способами для одной пленки совпадали с точностью 10 – 20%. Максимальное значение сопротивления, которое могло быть зарегистрировано, составляло  $10^9$  Ом.

Контрольные эксперименты были проведены в этом же приборе, но без напуска гелия, что соответствует обычному вакуумному напылению на холодную подложку (давление в приборе в этом случае было меньше  $10^6$  тор). Проводимость на уровне  $10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup> возникла при толщине  $\approx 2$  ат. слоя<sup>1)</sup> и плавно увеличивалась при увеличении толщины пленки; так при толщине 5 ат. слоев сопротивление было  $\sim 100$  Ом. Температура сверхпроводящего перехода для пленки с сопротивлением в нормальном состоянии  $R_n = 60$  Ом составляла 1,1 К.

Совершенно другие результаты были получены при напылении через жидкость (было напылено около двадцати пленок). Проводимость таких пленок возникала скачком и только при толщине несколько десятков атомных слоев (при типичном времени напыления около

<sup>1)</sup> При пересчете использовалось значение плотности массивного кадмия.

трех часов проводимость возникала за время порядка секунды). Толщина, при которой появлялась проводимость, в разных опытах была различна и варьировалась в интервале 20 — 50 ат. слоев. После появления проводимости напыление прекращалось и производился отжиг пленок.

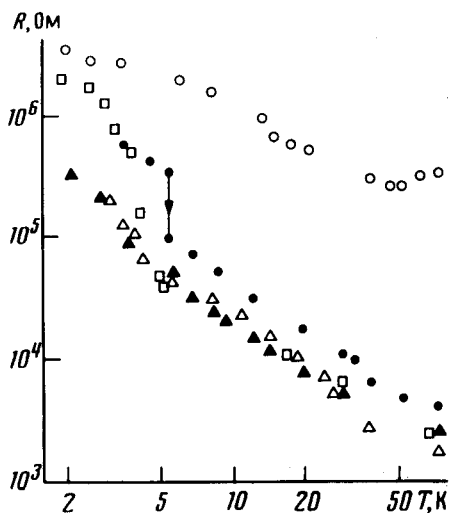


Рис. 1. Зависимость сопротивления пленок от температуры при отжиге:  $\circ$  — толщина 20 — 25 ат. слоев;  $\bullet$ ,  $\square$ ,  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  — толщина 40 — 50 ат. слоев

Отжиг пленок производился постепенно — после отогрева до некоторой температуры пленка снова охлаждалась, записывался сверхпроводящий переход, а затем следовал новый отжиг до более высокой температуры и т. д. Полученные таким образом результаты представлены на рис. 1. Необратимое уменьшение сопротивления у всех пленок начиналось около 2 К. Отметим, что скачок сопротивления одной из пленок при  $T = 5$  К, не связан с нагревом пленки, а произошел во время одного из циклов охлаждения; такие скачки сопротивления иногда наблюдались на высокоомных пленках.

При отогреве до температур выше 100 К сопротивление пленок начинало необратимо возрастать; причем температура начала роста сопротивления была тем ниже, чем тоньше пленка. Для наиболее тонкой из пленок, представленных на рис. 1, эта температура была около 50 К.

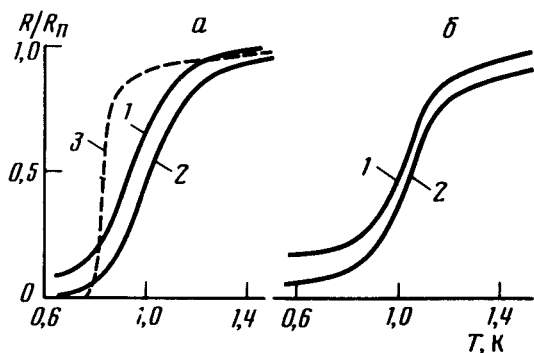


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость сопротивления от температуры при сверхпроводящем переходе:  $a$  — 1 — после отжига до 4,2 К,  $R_n = 440$  КОм, 2 — после отжига до 10 К,  $R_n = 43$  КОм, 3 — после отжига до 70 К,  $R_n = 1,5$  КОм;  $b$  — 1 — до отжига,  $R_n = 4$  МОм, 2 — после отжига до 3,5 К,  $R_n = 2,7$  МОм

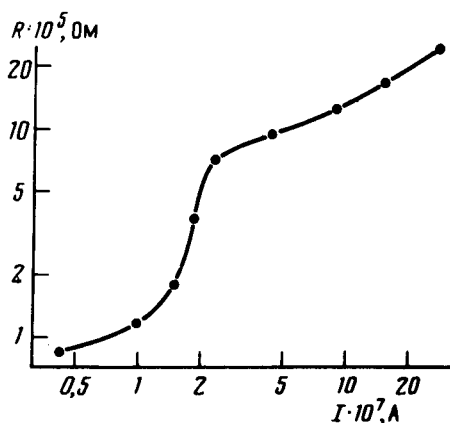


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость сопротивления от тока:  $T = 0,58$  К

На рис. 2 представлены кривые сверхпроводящего перехода для двух пленок после различных стадий отжига. Отметим также сильную зависимость сопротивления пленок от тока при температуре ниже критической (рис. 3). В нормальном состоянии сопротивление высокоомных пленок также возрастало обратимо при увеличении тока, но гораздо слабее: так  $R_n$  пленки, представленной на рис. 3, возрастало с 2 МОм (при токе  $5 \cdot 10^{-8}$  А) до 3 МОм (при токе  $2 \cdot 10^{-6}$  А).

Представленные в этой статье результаты свидетельствуют, что при напылении через слой жидкого гелия возникает новая модификация кадмия, которая не является проводящей. Вероятно, этой модификации соответствуют большие расстояния между атомами, чем в обычном проводящем кадмии.

Скачкообразное появление проводимости связано с такими изменениями в структуре пленки, при которых возникают проводящие каналы между электродами. Возможно, электромагнитные наводки через измерительные цепи могут стимулировать переход в проводящее состояние; этим можно было бы объяснить возникновение проводимости при различной толщине пленок и то обстоятельство, что сопротивление пленок после перехода может значительно различаться даже для пленок одной толщины.

Подчеркнем, что исходная пленка, напыленная через слой жидкого гелия, может содержать только неоднородности, связанные со статистическим разбросом толщины. Однако, по мере отжига структура пленок может перестраиваться таким образом, что неоднородности в пленках будут увеличиваться; это предположение объясняет тот факт, что сопротивление пленок остается очень высоким и после отжига.

В заключение мы хотели бы выразить благодарность А.И.Шальникову за многочисленные полезные замечания и Е.Г.Астрахарчику за обсуждение затронутых в статье вопросов.

#### Литература

1. Kirk W.P., Adams E.D. Cryogenics, 1974, 14, 147.

Институт физических проблем  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
4 мая 1983 г.

Институт физики твердого тела  
Академии наук СССР