1966 г. Март *Том 88, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

537.312.62

НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ТОНКИМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ПЛЕНКАМ

В последнее время появился ряд экспериментальных работ, посвященных изучению критической температуры T_c тонких сверхпроводящих пленок и ее зависимости от ряда факторов: толщины пленки, оксидирования поверхности и т. д. Повышенный интерес, который вызывают эти эксперименты, связан с тем, что в них были получены T_c более высокие, чем в массивном металле.

Так, в экспериментах группы Стронджина [1] на пленках алюминия при уменьшении толщины пленки до 100 Å удалось повысить T_c — температуру перехода — до $\sim 2°$ К (в массивном образце $T_c \sim 1{,}2°$ К). Для пленок толщиной около 10^3 Å значение критического поля H_c оказалось $H_c \sim 30$ *кэ* (у массивного образца $H_c \sim 30$ *э*). Для понимания природы рассматриваемых эффектов существенное значение имеет полученная в этих экспериментах зависимость T_c от толщины пленки (см. рисунок). Наиболее вероятным объяснением этих экспериментов авторы считают появление поверхностной сверхпроводимости [2,3]. Электроны, находящиеся вблизи поверхности, могут испытывать избыточное притяжение, например, за счет поляризации атомов окисла [3,4] (другой возможный механизм — обмен поверхностными рэлеевскими фононами [2]). Температура перехода такой пленки с переменными по ее толщине парамет рами определяется следующим выражением *):

$$T_c = 1{,}14\omega_0 \exp\left(-1/\overline{NV}\right),$$
$$\overline{NV} \cong N\left(\frac{V_n d_n + V_s d_s}{d}\right), \qquad (1)$$

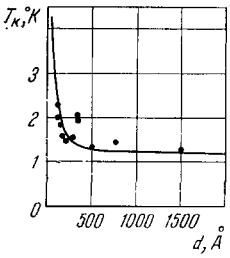
где d — общая толщина пленки, d_s — толщина слоя с избыточным взаимодействием, d_n — толщина остальной части пленки, N — плотность уровней, а V_n и V_s — константы взаимодействия в соответствующих частях пленки.

Беря $d_s = 20$ Å и V_s в два раза больше, чем V_n, авторы получают кривую, изображенную на рисунке, которая достаточно хорошо согласуется с их экспериментальными точками. В опытах Рюля [8] исследовались пленки алюминия, индия, свинца и ряда других металлов толщиной около 100 Å. Для всех пленок с естественным оксидным покрытием, за исключением свинцовой пленки, было отмечено более высокое значение T_c, чем в массивном образце, причем для алюминия T_c пленки было в два раза выше, чем в массивном образце, что согласуется с результатами работы [1]. Значение T_c после дополнительного оксидирования для ряда металлов, в том числе и для алюминия, возрастало на 0,3—0,4° К или незначительно уменьшалось; например, для свинца T_c значение уменьшилось на 0,13° К. Это добавочное изменение T_c объясняется в работе влиянием электрического поля, которое образуется из-за диффузии электронов металла на акцепторные уровни окисла.

Еще более резкое увеличение T_c было получено в экспериментах групп Стронджина [9] и Маттиаса [10] на пленках вольфрама и рения толщиной порядка 10^3 Å. Критическая температура пленок вольфрама достигала 4° К (в массивном образце $T_c \sim$ $\sim 0{,}01°$ К), у рения 7° К (в массивном образце $T_c \sim 1{,}7°$ К). Авторы работы [9] предлагают два возможных механизма для объяснения отмеченного факта увеличения T_c, а именно — разупорядочение и поверхностную сверхпроводимость. Хотя эффекты

*) Эта формула была получена из качественных соображений Купером[5] и позднее выведена для «грязных» пленок в работе [6], а для чистых в [7].

разупорядочения и приводят к повышению критической температуры [11], каким образом они могут дать такое большое увеличение T_c, не ясно. В толстой пленке трудно ожидать сильного увеличения T_c за счет поверхностной сверхпроводимости ввиду того, что электроны проводят лишь малую долю времени вблизи поверхности, где имеется избыточное притяжение, что и отражено в формуле (1). (Обратным в этом смысле является механизм поверхностной сверхпроводимости на таммовских уровнях [2], где электроны удерживаются на поверхности самим кристаллом.) Поэтому более вероятным кажется объяснение этого резкого увеличения T_c, данное в работе [10]. Авторы считают, что этот факт может быть объяснен присутствием в пленках данных металлов другой кристаллографической фазы (β-фазы), которая неустойчива в массивном образце, но, по мнению авторов, может стабилизироваться в пленке даже малым количеством примесей. Авторы полагают, что в β-фазе существуют условия, более подходящие для возникновения сверхпроводимости. Их объяснение подкрепляется тем фактом, что при рентгенографическом исследовании в пленках, где T_c было выше, чем в массивном образце, было отмечено наличие этой фазы и, наоборот, в пленках металлов (например, Mo и Ta), где критическая температура была ниже, чем в массивном образце, присутствие этой фазы не наблюдалось.



Точками изображены экспериментальные данные; сплошная линия построена по формуле (1).

Эксперименты другого типа были проведены группой Маттиаса [12]. Исследовались слоистые соединения графита с щелочными металлами: калием (K), рубидием (Rb) и цезием (Cs). В то время как ни одна из компонент этих соединений в отдельности не обнаруживает сверхпроводимости, подобная слоистая структура оказалась сверхпроводником с $T_c = 0{,}135°$ K (Cs), 0,151° K (Rb), 0,55° K (K). Авторы считают, что ими обнаружено проявление двумерной сверхпроводимости в металлическом слое. Если это объяснение окажется правильным, то обсуждаемые эксперименты дают пример двумерного сверхпроводника, возможность существования которого обсуждалась ранее в работе [2], правда, для существенно иной модели.

Приведенная выше теоретическая интерпретация рассматриваемых опытов носит, конечно, сугубо предварительный характер. Однако, каково бы ни было правильное объяснение обнаруженных в этих опытах высоких значений критической температуры и критического поля в тонких пленках, возможные практические последствия полученных результатов таковы, что было бы желательно уже сейчас расширить круг изучаемых веществ. В частности, представляло бы большой интерес изучение пленок со специально нанесенными на них диэлектрическими покрытиями, как это было предложено в работе [3].

Е. Г. Максимов

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. Strongin et al., Phys. Rev. Letts. **14**, 362, 949 (1965).
2. В. Л. Гинзбург, Д. А. Киржниц, ЖЭТФ **46**, 397 (1964).
3. В. Л. Гинзбург, ЖЭТФ **47**, 2318 (1965).
4. У. Литтл, УФН **86** (2), 315 (1965); Л. В. Келдыш, УФН **86**(4), 327 (1965).
5. L. Cooper. Phys. Rev. Letts. **6**, 689 (1961).
6. P. de Gennes, Rev. Mod. Phys. **36**, 225 (1964).
7. Д. А. Киржниц, Е. Г. Максимов, Письма ЖЭТФ **2**, 442 (1965).
8. W. Rühl, Zs. Phys. **186**, 190 (1965).
9. M. Strongin et al., Phys. Letts. **17**, 224 (1965).
10. B. T. Matthias et al., Phys. Rev. Letts. **15**, 260 (1965).
11. R. Hilsch, Non-Cristalline Solids, New York, 1958.
12. B. T. Matthias et al., Phys. Rev. Letts. **14**, 225 (1965).