

Академик АН УССР Б. Г. ЛАЗАРЕВ, В. М. КУЗЬМЕНКО,
А. И. СУДОВЦОВ, В. И. МЕЛЬНИКОВ

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ АМОРФНЫХ МЕТАЛЛОВ

Конденсация паров висмута (^{1, 2}), галлия (^{1, 2}), бериллия (²), железа (²), иттербия (³) на подложки, охлаждаемые жидким гелием, приводит к образованию аморфных аллотропических модификаций этих металлов. Интересной особенностью аморфных фаз, исследованной в настоящей работе, является отрицательный температурный коэффициент сопротивления. Методика получения аморфных металлических пленок аналогична ранее опубликованной (⁶); она заключается в конденсации паров исследуемых металлов на охлаждаемую жидким гелием подложку в сверхвысоком вакууме и исследовании электропроводности полученных таким образом слоев.

Аморфные фазы металлов, как известно, являются метастабильными и претерпевают переход в кристаллическое состояние, характерное для соответствующего металла в массивном состоянии, при нагреве до определенных температур $T_{\text{п}}$, зависящих от рода металла и толщины слоя d (рис. 1). Представленные кривые определяют температурный интервал существования аморфных фаз. В этом интервале температур их электропроводность характеризуется отрицательным температурным коэффициентом α (табл. 1) в отличие от соответствующих кристаллических фаз. Исследованные аморфные модификации обладают высоким удельным электросопротивлением ρ_a , сравнимым со значениями ρ_p для соответствующих жидких металлов. В таблице приведены также удельные сопротивления ρ_k при комнатной температуре отожженных пленок и температуры отжига $T_{\text{отж}}$. Эти температуры для всех металлов, кроме бериллия, выше дебаевской.

Из табл. 1 видно, что удельные сопротивления отожженных слоев иттербия и железа близки к значениям ρ_m для массивных металлов. Удельное электросопротивление пленок бериллия гораздо выше его значения для массивного бериллия, что связано, по-видимому, с недостаточным отжигом из-за очень высокой температуры Дебая (1160° К) (⁷). Высокое значение удельного электросопротивления хорошо отожженных пленок висмута, по-видимому, связано как с размерным эффектом, так и с уменьшением под-

Т а б л и ц а 1

Металл	$d, \text{ \AA}$	$\rho_a \cdot 10^4, \text{ ом} \cdot \text{см}, \text{ при } T = 10^\circ \text{ К}$	$\rho_k \cdot 10^4, \text{ ом} \cdot \text{см}, \text{ при } T = 300^\circ \text{ К}$	$T_{\text{отж}}, ^\circ \text{ К}$	$\rho_m \cdot 10^4, \text{ ом} \cdot \text{см}, \text{ при } T = 293^\circ \text{ К}$	$\rho_p \cdot 10^4, \text{ при } T = T_{\text{пл}}$	$\alpha \cdot 10^4, \text{ град}^{-1}, \text{ при } T = 15^\circ \text{ К}$
Yb	70—3000	210—240	30	460	27,0		—1,1
Fe	20—50	120—140	11	650	9,7	139 (¹⁴)	—4,1
Bi	20—600	130—150	230	350	106,5	127 (¹⁵)	—52,0
Be	20—500	200—230	80	300	3,6		—32,0

П р и м е ч а н и я. 1) Верхний предел исследованных толщин d (кроме Be) — критическая толщина, являющаяся пределом существования аморфной фазы (³⁻⁵). 2) Данные по ρ_k относятся к наиболее толстым из исследованных пленок: ~18 000 Å (Yb), ~600 Å (Fe), ~1300 Å (Bi), ~500 Å (Be). 3) Значения ρ_a и α для Be соответствуют наиболее тонким слоям (~20 ÷ 30 Å), поскольку с увеличением толщины в пленках Be увеличивается концентрация кристаллической фазы (¹¹).

вижности носителей тока в тонкой пленке по сравнению с подвижностью их в массивном состоянии ⁽⁸⁾.

Рис. 2 иллюстрирует типичное изменение электросопротивления с температурой для пленки иттербия толщиной ~ 200 Å. Аморфная фаза (рис. 2, 1) характеризуется отрицательным температурным коэффициентом сопротивления. После полного превращения аморфной фазы в кристаллическую температурный коэффициент сопротивления становится положительным во всей области температур (рис. 2, 3). Если же в образце присутствует смесь двух фаз — аморфной и кристаллической, что осуществляется при неполном отжиге, то зависимость удельного сопротивления от темпе-

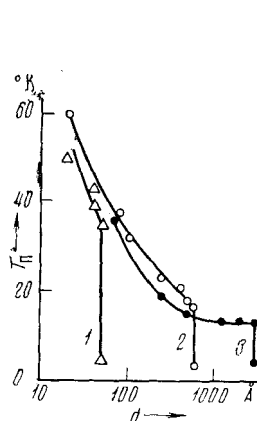


Рис. 1

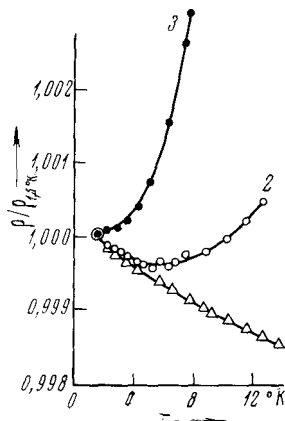


Рис. 2

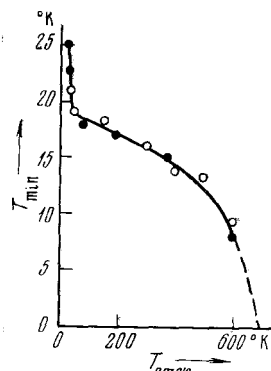


Рис. 3

Рис. 1. Зависимость температуры перехода из аморфного в кристаллическое состояние от толщины для пленок железа (1), висмута (2) и иттербия (3). Вертикальные участки кривых соответствуют критической толщине аморфных фаз этих металлов ⁽³⁻⁵⁾

Рис. 2. Зависимость величины $\rho/\rho_{1,5^\circ\text{K}}$ от температуры для слоя иттербия толщиной ~ 200 Å (ρ — удельное сопротивление пленки при температуре T , $\rho_{1,5^\circ\text{K}}$ — при $1,5^\circ\text{K}$): 1 — аморфная фаза, 2 — смесь аморфной и кристаллической фаз (после отжига пленки до 22°K), 3 — кристаллическая фаза (после отжига пленки до 50°K)

Рис. 3. Температура минимума слоя железа толщиной ~ 50 Å в зависимости от температуры его отжига

ратуры имеет минимум электросопротивления. На рис. 2, 2 показан такой минимум для слоя иттербия, нагретого до температуры $\sim 22^\circ\text{K}$, когда частично уже произошел переход из аморфного в кристаллическое состояние. При дальнейшем нагреве и величина, и температура минимума $T_{\text{мин}}$ уменьшаются по мере превращения аморфной фазы в кристаллическую.

Аналогично ведут себя слои железа. На рис. 3 представлено изменение $T_{\text{мин}}$ после отжига слоя железа толщиной ~ 50 Å. Резкое уменьшение $T_{\text{мин}}$ после отжига пленок до $30-40^\circ\text{K}$ связано с переходом основной части аморфного железа в кристаллическое в этой области температур. Однако, по-видимому, остатки аморфной фазы железа в тонких пленках сохраняются при отжиге до значительных температур ($>600^\circ\text{K}$), о чем свидетельствует наличие минимума сопротивления у отожженных до этой температуры тонких слоев железа. Экстраполяция кривой $T_{\text{мин}}(T_{\text{отж}})$ на ось абсцисс (рис. 3) дает температуру, при отжиге до которой исчезают остатки аморфной фазы. Эта температура уменьшается по мере утолщения пленок и для слоя железа толщиной ~ 600 Å составляет уже $\sim 550^\circ\text{K}$.

В наших предыдущих работах ^(9, 10) был обнаружен и исследован минимум электросопротивления ряда металлов (Lu, Tu, Fe, Cu, Ag), полученных конденсацией на подложки, охлаждаемые жидким гелием. Основные особенности этого минимума, как было показано, состоят в следующем: 1) рост температуры минимума с уменьшением толщины слоя; 2) умень-

шение температуры минимума по мере отжига слоя, причем тем более сильное, чем толще слой; 3) исчезновение минимума сопротивления при высокотемпературном отжиге и его отсутствие в тонких слоях соответствующих металлов, полученных при конденсации на горячую подложку; 4) отсутствие влияния на минимум магнитного поля. Предполагается, что эти особенности находятся в полном соответствии с результатами настоящего сообщения: во всех случаях проявления минимума электросопротивления в слоях металлов, полученных низкотемпературной конденсацией, он связан с наличием какого-то количества аморфной фазы в слое.

Как было показано (¹¹), пленки бериллия, сконденсированные на подложку, охлаждаемую жидким гелием, состоят из смеси аморфной и кристаллической фаз, начиная с самой малой толщины ($\sim 20 \text{ \AA}$). В соответствии с результатами настоящей работы они также обладают явно выраженным минимумом сопротивления. Возможно, подобными же обстоятельствами объясняется минимум сопротивления в закаленных неравновесных слоях сплавов Fe — P — C (¹²) и Ni — Pd — P (¹³), лишенных кристаллической структуры (с точностью до рентгеноструктурного разрешения).

Таким образом, не только у неравновесных слоев металлов, полученных конденсацией пара на холодную подложку, но и у некоторых сплавов, резко закаленных из жидкого состояния, наблюдаются одинаковые особенности в ходе электросопротивления от температуры. При полной аморфизации металла наблюдается отрицательный коэффициент сопротивления, при наличии смеси аморфной и кристаллической фаз — минимум сопротивления. Природа отрицательного температурного коэффициента сопротивления у аморфных металлических слоев остается невыясненной. Один из возможных механизмов — полупроводниковый характер проводимости таких слоев с крайне малой энергией активации. В этом предположении оценка энергий активации (из кривых вида рис. 2, 1) дает следующие значения: для Yb (при $1,5-3^\circ \text{K}$) $\sim 10^{-7}$ эв; для Fe (при $1,5-3^\circ \text{K}$) $\sim 6 \cdot 10^{-7}$ эв; для Bi (при $10-15^\circ \text{K}$) $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ эв. Интересно заметить, что в аморфном висмуте с понижением температуры полупроводниковый ход сопротивления сменяется сверхпроводимостью — пока это единственный случай такого поведения для чистых металлов-сверхпроводников.

Физико-технический институт
Академии наук СССР
Харьков

Поступило
21 II 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ W. Buckel, Zs. Phys., 138, № 2, 136 (1954). ² Satoru Fujime, Japan J. Appl. Phys., 5, 59, 764, 1029 (1966). ³ Б. Г. Лазарев, В. М. Кузьменко и др., ДАН, 184, № 3, 587 (1969). ⁴ Б. Г. Лазарев, В. М. Кузьменко и др., ДАН, 194, № 2, 302 (1970). ⁵ Б. Г. Лазарев, В. М. Кузьменко и др., Письма ЖЭТФ, 10, 261 (1969). ⁶ Б. Г. Лазарев, Е. Е. Семенов, А. И. Судовцов, ЖЭТФ, 40, 105 (1961). ⁷ R. E. Glover, S. Moser, F. Baumann, J. Low Temperature Physics, 5, № 5, 519 (1971). ⁸ Ю. Ф. Комник, Е. И. Бухштаб и др., ЖЭТФ, 60, 669 (1971). ⁹ Б. Г. Лазарев, В. М. Кузьменко, А. И. Судовцов, ДАН, 184, 815 (1969). ¹⁰ В. М. Кузьменко, Б. Г. Лазарев и др., ЖЭТФ, 58, 434 (1970). ¹¹ Б. Г. Лазарев, В. М. Кузьменко и др., Физ. мет. и металловед., 32, 52 (1971). ¹² S. C. H. Lin, J. Appl. Phys., 40, 2173 (1969). ¹³ P. Maitrepierre, J. Appl. Phys., 41, 498 (1970). ¹⁴ R. W. Powell, Phil. Mag., 44, 772 (1953). ¹⁵ Физический энциклопедический словарь, 1, М., 1960, стр. 278.