

ПЕРЕХОД МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК ПО ТОЛЩИНЕ АМОРФНОГО СЛОЯ Sb

В.М.Кузьменко, А.Н.Владычкин, Ю.В.Навозенко

*Украинский научный центр, Харьковский физико-технический институт
310108 Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 16 апреля 1993 г.

Посредством конденсации Sb на аморфный слой Bi реализовано металлическое состояние аморфной сурьмы в слое толщиной ~ 20 нм. При дальнейшем увеличении толщины конденсат Sb формируется в обычном полупроводниковом состоянии. Различие в значениях проводимости этих двух состояний аморфной сурьмы составляет ~ 6 порядков (при $T = 20$ К).

Исследована электропроводность σ аморфных пленок сурьмы, сконденсированных в сверхвысоком вакууме ($\sim 10^{-10}$ Па) на подложки, охлаждаемые жидким гелием. Методика получения и исследования пленок описана в работе [1]. До настоящего времени было известно только полупроводниковое состояние аморфной сурьмы (состояние ферми-стекла [2]). Такое состояние реализуется, например, в случае использования стеклянных подложек. На рис.1а показана зависимость проводимости аморфной пленки Sb толщиной ~ 70 нм, сконденсированной на стеклянную подложку, от температуры T . Эта зависимость описывается выражением $\lg \sigma = A - BT^{-1/4}$ (где A и B - const, σ - в $\text{Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$) и аналогична зависимости, полученной для аморфной сурьмы ранее [3]. Она свидетельствует о том, что в этом случае состояния электронов на уровне Ферми локализованы, и проводимость при низких температурах ($T < 100$ К) обусловлена термически активированными перескоками электронов из одного локализованного состояния в другое [2].

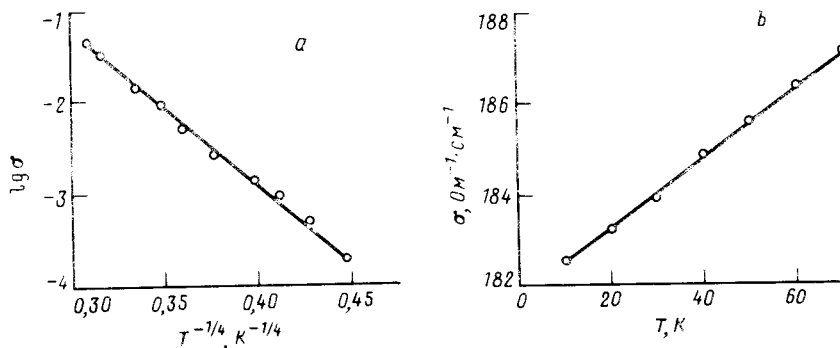


Рис.1

В настоящей работе найдено, что в аморфных конденсатах Sb наряду с полупроводниковым состоянием (a -Sb) может быть реализовано и металлическое состояние (a_m -Sb) - при конденсации Sb на аморфную пленку висмута. В этом случае с момента начала конденсации Sb наблюдается резкое уменьшение электросопротивления R "сэндвича" Bi-Sb. Это уменьшение замедляется

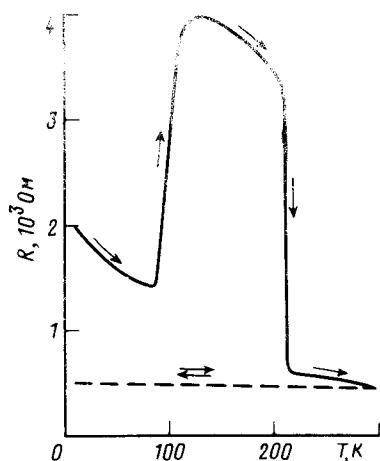


Рис.2

с течением времени t (при постоянной скорости конденсации Sb), и при толщине слоя сурьмы $d_{\text{Sb}} \approx 20$ нм изменение R прекращается, т.е. есть кривая $R(t)$ переходит в горизонтальную прямую линию. Расчеты, выполненные с помощью экспериментальной зависимости $R(t)$, показывают, что слой Sb толщиной ~ 4 нм, прилегающий к аморфной пленке Bi, имеет практически не зависящее от толщины удельное электросопротивление $\rho \approx 2 \cdot 10^{-3}$ Ом·см. По мере удаления от висмутовой подложки послойное (например, через каждые 2 нм) удельное электросопротивление быстро возрастает, достигая при толщине конденсата Sb ~ 16 нм значения $\rho \approx 3 \cdot 10^{-2}$ Ом·см¹). При $d_{\text{Sb}} > 20$ нм поверхностный слой Sb формируется уже в полупроводниковом состоянии. Усредненное значение ρ для слоя a_m -Sb толщиной ~ 20 нм при $T = 20$ К примерно на шесть порядков меньше значения ρ для α -Sb и составляет $\sim (6 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$ Ом·см. Зависимость проводимости этого слоя от температуры (при $T < 70$ К) является линейной: $\sigma = A_1 + B_1 T$ (A_1 и B_1 – const) (рис.1б), что может быть объяснено эффектом квантовой интерференции [4,5].

Нами исследовано около двух десятков аморфных "сэндвичей" Bi-Sb с $d_{\text{Bi}} = (3 - 30)$ нм и $d_{\text{Sb}} = (9 - 150)$ нм. Результаты полностью воспроизводимы и не зависят от толщины аморфного слоя Bi. Значение температуры перехода в сверхпроводящее состояние T_c аморфной пленки Bi толщиной ~ 3 нм после конденсации на нее слоя Sb толщиной > 20 нм уменьшается незначительно: с 3,99 К до 3,96 К. Столь малое изменение T_c тончайшей пленки Bi свидетельствует о том, что смешивание висмута с сурьмой у поверхности раздела не происходит. Действительно, в аморфных сплавах Bi-Sb с увеличением концентрации Sb резко уменьшается T_c и увеличивается ρ [6]. Признаков такого поведения в настоящей работе не наблюдалось.

Изменение электросопротивления "сэндвича" Bi-Sb ($d_{\text{Bi}} \approx 3$ нм., $d_{\text{Sb}} \approx 21$ нм) по мере отогрева его до комнатной температуры со скоростью ~ 2 К/мин показано на рис.2. Электронографические исследования [7] показали, что резкие изменения сопротивления при отогреве аморфных слоев Bi или Sb, аналогичные представленным на рис.2, соответствуют их кристаллизации. Отсюда мы заключаем, что увеличение R при $T = 90 - 110$ К связано с кристаллиза-

¹) Для верхнего слоя толщиной ~ 2 нм.

шой тонкого (~ 3 нм) слоя Вi – это подтверждается, в частности, потерей его сверхпроводимости после отогрева "сэндвича" до $T \sim 110$ К. Падение сопротивления при $T = 210$ К обусловлено кристаллизацией аморфного слоя Sb – при $T > 210$ К значение ρ этого слоя соответствует значению ρ для кристаллических пленок Sb [3,7].

Значение ρ слоев a_m -Sb соответствует минимальной металлической проводимости в определении Мотта [2]:

$$\sigma_{min} \simeq 0,026 \frac{e^2}{\hbar a}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона; \hbar – постоянная Планка, деленная на 2π ; a – межатомное расстояние. Для $a = 0,3$ нм, согласно (1), получим $\sigma_{min} \simeq 200 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Для a_m -Sb экстраполяция прямой $\sigma(T)$ на $T=0$ дает конечное значение проводимости (см. рис.1b). Таким образом, в соответствии с критериями Мотта [2], слои a_m -Sb ведут себя как металл, в отличие от полупроводникового поведения слоев a -Sb, когда $\rho \rightarrow \infty$ при $T \rightarrow 0$.

Минимальная металлическая проводимость, согласно [2], соответствует состоянию электронов непосредственно перед возникновением локализации, то есть когда уровень Ферми E_F приближается к порогу подвижности E_c со стороны делокализованных состояний. Именно это состояние, когда $E_F > E_c$ и реализуется, по-видимому, в a_m -Sb, в отличие от a -Sb, где $E_F < E_c$. Причиной такого поведения может быть, например, различие ближних порядков в расположении атомов a -Sb и a_m -Sb.

Представляется, что в случае конденсации Sb на слой аморфного Вi последний "навязывает" конденсату Sb свой ближний порядок (в соответствии с природой псевдоморфизма [8]). Такой висмутоподобный ближний порядок вызывает, по-видимому, увеличение плотности электронов (и E_F) в аморфной Sb. В пользу этого предположения говорит тот факт, что жидкая Sb, имеющая параметры ближнего порядка, близкие по величине к параметрам аморфного Вi (см. [9]), – типичный металл. С увеличением толщины конденсата Sb ориентирующее влияние висмутовой подложки на структуру поверхностного слоя Sb ослабевает ²⁾, и при $d_{Sb} > 20$ нм становится возможным формирование аморфной сурьмы в обычном полупроводниковом состоянии.

Кроме висмута, в качестве подложек для конденсации Sb мы использовали аморфные и кристаллические пленки иттербия толщиной 20–30 нм. В этом случае формировалась только полупроводниковая аморфная модификация сурьмы.

1. В.М.Кузьменко, Б.Г.Лазарев, В.И.Мельников, А.И.Судовцов, Укр. физ. журнал **21**, 883 (1976).
2. Н.Мотт, Э.Дэвис, Электронные процессы в некристаллических веществах, М.: Мир (1982) (N.F.Mott and E.A.Davis, *Electron processes in non-crystalline materials*, Oxford: Clarendon Press (1979)).
3. J.J.Hauer, *Phys. Rev. B* **9**, 2623 (1974).
4. M.Kaveh and N.F.Mott, *J. Phys. C: Solid State Phys.* **15**, L.707 (1982).
5. А.И.Ларкин, Д.Е.Хмельницкий, УФН **136**, 536 (1982).
6. N.Barth, *Z. Phys.* **142**, 58 (1955).
7. W.Buckel, *J. Vac. Sci. Techn.* **10**, 599 (1973).
8. K.L.Chopra, *Phys. Stat. Solidi* **32**, 489 (1969).
9. Л.И.Татаринава, Структура твердых аморфных и жидких веществ, М.: Наука, 1983.

²⁾Имеется в виду опосредствованное влияние через структуру ниже лежащего слоя сурьмы.