

УДК 621.315.592

Д.В. Шакура (6 курс, каф ПФОТТ), С.А. Немов, д.ф.м.н., проф.

### НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$

ABSTRACT: The experimental studies of the electrophysical properties of the PbTe – SnTe solid solutions heavily doped with In (16 at. %) in normal and superconducting states have been performed in a set of samples with the different lead content ( $z = 0.5 - 0.8$ ). It was found out that continuous lead content increase leads to the disappearance of superconducting properties of  $(\text{Sn}_{1-z}\text{Pb}_z)_{0.84}\text{In}_{0.16}\text{Te}$  and exponential increase of the material resistivity with temperature decreasing.

The substitution of Pb for Sn in  $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}:\text{In}$  affects strongly the parameters of solid solutions band structure. With Pb content increase L-extrema of the valence and conduction bands get closer to each other. At the same time the In impurity states lift to the top of the valence band; the position of the heavy hole  $\Sigma$  ( $\Delta$ )-band changes slower than the  $E_{\text{In}}$  and L-bands positions. Therefore the leaving of the In impurity band the heavy hole band spectrum and gradual overlap of In impurity band with the energy gap have to be expected. Probably at low temperatures samples with  $z > 0.6$  demonstrate the change of the band conductivity mechanism to the impurity one.

В этой работе мы исследовали низкотемпературные электрофизические свойства полупроводниковой системы  $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}$ , легированной индием, содержание свинца варьировалось от  $z=0.5$  до  $z=0.8$ , концентрация индия составляла 16 ат.%. Исследуемые образцы представляют собой поликристаллические сплавы, полученные по металлокерамической технологии.

Граничные соединения SnTe и PbTe – это узкозонные прямозонные полупроводники, кристаллизующиеся в структуре NaCl, экстремум зоны проводимости и валентной зоны находится в L точке. Существенной особенностью этой системы является большая растворимость легирующей примеси In, которая составляет около 20 ат.% [1], при этом предполагается, что зонная структура не меняется.

Известно, что примеси III группы в полупроводниках  $A^4B^6$  и в, частности, в PbTe и SnTe по своему генезису являются глубокими примесями и образуют квазилокальные состояния, которые пиннируют уровень Ферми из-за большой плотности состояний [2]. Действие примеси индия на SnTe и PbTe различно: в PbTe индий образует квазилокальные состояния на фоне разрешенного спектра зоны проводимости на 80 мэВ выше дна зоны проводимости; в SnTe примесные состояния лежат глубоко в валентной зоне, при этом уже необходимо учитывать сложный спектр валентной зоны и, в частности, наличие зоны тяжелых дырок с большой плотностью состояний в  $\Sigma$  точке [3]. Отличие действия In в PbTe и SnTe проявляется также в том, что в SnTe примесные состояния обладают заметным уширением и сильной зависимостью энергетического положения от содержания индия: увеличение концентрации примеси приводит к уширению полосы и смещению её положения вниз по энергии.

SnTe и PbTe образуют непрерывный ряд твердых растворов, причем  $E_g$ ,  $m^*$  и другие параметры плавно изменяются с составом. PbTe обладает инверсной зонной структурой по сравнению со SnTe. Это обстоятельство позволяет, путем изменения состава сплава, в широких пределах изменять свойства материала. Изменение состава от SnTe к PbTe при фиксированной концентрации индия приводит к движению примесных состояний из зоны тяжелых дырок к потолку валентной, с последующим выходом в запрещенную зону и движением к зоне проводимости по мере увеличения содержания свинца.

Критические параметры сверхпроводящего состояния, обнаруженного в SnTe легированным индием и в некоторых сплавах PbTe-SnTe:In, оптимальны при расположении примесных состояний вблизи вершины зоны тяжелых дырок с большой плотностью состояний [4].

В исследуемых сплавах  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  при изменении содержания свинца от  $z=0.5$  до  $z=0.8$  и при концентрации индия  $x=0.16$  энергетическое положение примесной полосы изменяется относительно зоны тяжелых дырок: смещаясь вверх по энергии, примесная полоса выходит из зоны тяжелых дырок и движется к потолку валентной зоны. Такая картина изменения энергетического положения примесных состояний должна приводить к исчезновению сверхпроводящего состояния при увеличении содержания свинца.

На рис.1-а изображены температурные зависимости удельного сопротивления. Видно, что увеличение содержания свинца приводит к исчезновению сверхпроводимости; если образец с  $z=0.5$  является сверхпроводящим с  $T_c \approx 4\text{K}$ , то сплав с  $z=0.6$  проявляет переходные свойства - заметен характерный спад сопротивления, но до ненулевого значения. Для материалов с  $z > 0.65$  характерно монотонное возрастание сопротивления при понижении температуры.

В температурном диапазоне  $T=150\text{K}-50\text{K}$  на зависимостях удельного сопротивления для ряда сплавов можно выделить экспоненциальные участки, как это иллюстрирует рис.1-б. Показатель экспоненты - энергия активации увеличивается по мере смещения примесной полосы вверх по энергии, значения её изменяются от  $5\text{мэВ}$  до  $10\text{мэВ}$ . Это, по-видимому, свидетельствует о том, что суммарная проводимость складывается из зонной проводимости и прыжковой проводимости по примесной полосе, причем вклад последней оказывается существенным. Тогда показатель экспоненты характеризует энергетический разброс примесных состояний.

Понятно, что, поскольку уровень Ферми пиннингуется примесной полосой и смещается вместе с ней к потолку валентной зоны с ростом  $z$ , то явления переноса всё в большей степени определяются проводимостью по примесным состояниям In. Действительно, в образце с  $z=0.8$  наблюдается классическая прыжковая проводимость, описываемая законом Мотта  $\rho = \rho_0 \exp(T_0/T)^{1/4}$  [5], как это показано на рис.1-в пунктиром.

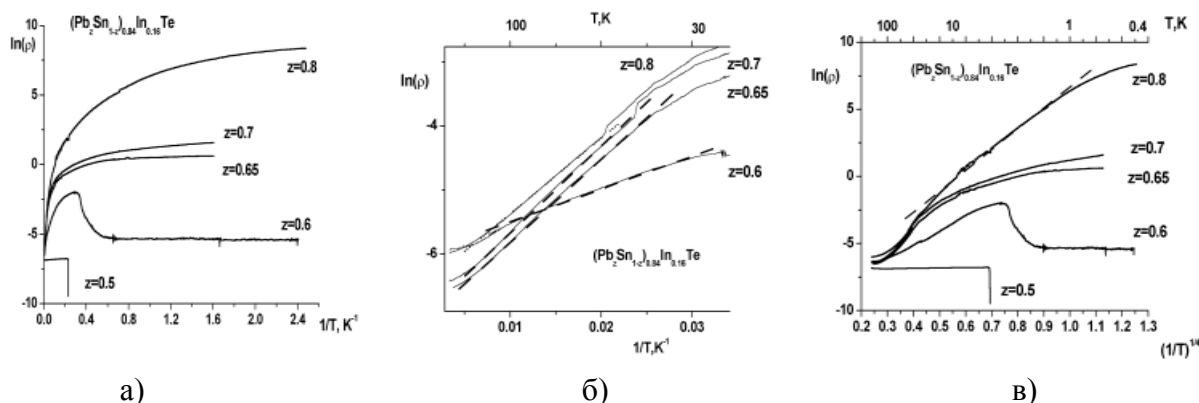


Рис.1. Зависимости удельного сопротивления сплавов: а) во всем температурном диапазоне; б) в диапазоне от 30К до 150К; в) в координатах  $\ln(\rho) - (1/T)^{1/4}$

При увеличении содержания свинца происходит выход примесных состояний из "тяжелого экстремума", сопровождающейся значительным уменьшением гибридизации зонно-примесных состояний и исчезновением сверхпроводящего перехода, что и наблюдается на эксперименте в образцах с  $z > 0.6$ . При этом наблюдается переход к проводимости обусловленной примесной полосой находящейся на фоне легких дырок. Наблюдаемые явления, по-видимому, свидетельствует о сложном характере взаимодействий дырок в зонных и примесных состояниях. Это обстоятельство также отражается в сложной картине магнитосопротивления, наблюдаемой в этих соединениях.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Rosenberg A.I., Wald F. J. Phys. and Chem. Sol., 1965, v, p. 1079.
2. Кайданов В.П., Равич Ю.И. УФН, 1985, т. 145, в. 1.
3. Квятковский О. Е. ФТТ, 1990, т. 23, в. 2.

4. G.S. Bushmarina, D.V. Mashovets, R.V. Parfeniev, D.V. Shamshur, M.A. Shakhov - Physica B, 169, p. 687-688 (1991).
5. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. “Электронные свойства легированных полупроводников” М.: Наука, 1979.