

УДК 621.315.592

Д.В.Шакура (5 курс, каф ПФОТТ),
С.А.Немов, д.ф.-м.н., проф.

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

Работа посвящена изучению низкотемпературных электрофизических свойств (включая сверхпроводящие) полупроводниковых твердых растворов $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ при изменении состава материала.

Сравнительно недавно в твердых растворах $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ была обнаружена сверхпроводимость с критическими параметрами сверхпроводящего (СП) перехода в гелиевой области температур ($T_c \sim 4.2\text{K}$), что на порядок превышает СП параметры известных сверхпроводящих полупроводников. Эти уникальные свойства и некоторые другие особенности делает этот материал, а также другие полупроводниковые материалы на основе соединений A^4B^6 , легированных примесями III группы таблицы Менделеева, перспективными для использования в инфракрасной технике, оптоэлектронике, тензометрии.

PbTe и SnTe образуют непрерывный ряд твердых растворов замещения $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}$. Сплавы кристаллизуются в кубической решетке типа NaCl ; по типу химической связи они относятся к полярным полупроводникам, связь смешанная, ионно-ковалентно.

Абсолютные экстремумы электронной и дырочной зон в PbTe , как и в других халькогенидах свинца, расположены в одной и той же точке зоны Бриллюэна – на её краю в направлении $\langle 111 \rangle$ (L-точка). Волновые функции электронов в экстремумах зоны проводимости преобразуются по нечетному представлению L_6^- в экстремумах валентной зоны – по четному L_6^+ , если за центр симметрии принять узел свинца. В SnTe , в отличие от PbTe , L_6^+ - состояния расположены выше L_6^- , т.е. имеет место инверсия главных экстремумов электронной и дырочной зон [1].

Для описания электрофизических свойств этих соединений привлекается представление о зоне тяжелых дырок, край которой при низких температурах находится ниже L –экстремумов на расстоянии $\sim 0.2\text{эВ}$ и более. Теоретические расчеты указывают на существование максимума валентной зоны в точке зоны Бриллюэна.

Как уже отмечалось, халькогениды свинца и олова образуют между собой непрерывные ряды твердых растворов, причем E_g , m^* и другие параметры плавно изменяются с составом, что является их фундаментальной особенностью. В $\text{Pb}_{1-z}\text{Sn}_z\text{Te}$ при изменении содержания свинца реализуется инверсная зонная схема: E_g сначала уменьшается с ростом z , затем термы L_6^+ и L_6^- меняются местами и E_g растет с увеличением z . При низких температурах точка инверсии соответствует $z=0.35$, при 300K $z=0.65$.

Индий в халькогенидах свинца и олова образует квазилокальные примесные состояния на фоне разрешенных зонных состояний зоны проводимости или валентной зоны. В частности, в $\text{PbTe}:\text{In}$ примесь индия образует квазилокальный уровень в зоне проводимости, смещающийся при переходе к SnTe в валентную зону. Заполнение примесных состояний электронами и обмен электронами между примесными и зонными состояниями, как и взаимное расположение уровня индия и разрешенных зон определяют характер физических свойств этих материалов. Возможность изменять зонную структуру и относительное положение квазилокального примесного уровня в сплаве $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$

$x\text{In}_x\text{Te}$ путем изменения состава твердого раствора z расширяет возможности управления электрофизическими свойствами данного материала.

Ранее были проведены подробные исследования серии твердых растворов $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ с содержанием индия и свинца, соответствующим области составов, в которой наблюдался сверхпроводящий переход в гелиевой области температур. Было обнаружено, что зависимость параметров сверхпроводящего состояния от содержания свинца имеет максимум, характеристики которого меняются с изменением содержания In. T_c возрастает с 2.65K (при $x=0.05$ и $z=0.2$) до $T_c=4.24\text{K}$ при $x=0.2$ и $z=0.5$. Т.о. увеличение концентрации In приводит к значительному увеличению параметров СП перехода и смещению максимума T_c в область больших значений z . При малом содержании In ($x=0.05-0.08$) примесная полоса при изменении z (0.25-0.4) довольно быстро выходит из спектра валентной Σ -зоны $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}$, обладающей большей, чем в L-зоне, плотностью состояний. Это приводит к сужению примесной полосы, что отражается в резком уменьшении T_c .

До сих пор отсутствует теория сверхпроводимости в данных соединений, хотя качественно модель резонансного рассеяния на квазилокальном уровне примеси In позволяет описать наблюдаемые эффекты [2]. В связи с этим представлялось интересным расширить исследования данного материала в область больших содержаний свинца z .

Измерялись зависимости удельного сопротивления образцов от температуры и магнитного поля для двух серий: для образцов с $y=0.2$ и $z=0.5-0.9$ и для $y=0.16$, $z=0.6-0.9$. Образцы были изготовлены металлокерамическим способом. Измерения проводились на установке He4, что позволило провести измерения при температурах от 300K до 1.4K.

У образцов с $z=0.5-0.6$ наблюдался сверхпроводящий переход. С ростом содержания свинца z происходило уменьшение сверхпроводящих параметров и уже при $z>0.6$ свехпроводящие состояние не наблюдалось вплоть до $T=1.4\text{K}$. Для образцов с $z=0.6-0.9$ и $y=0.16$ при гелиевых температурах с ростом z наблюдалось увеличение удельного сопротивления на 3-5 порядков по закону $\rho \sim \exp(E_a/kT)$, где E_a энергия активации (рис. 1). В серии с $y=0.2$ образцы с содержанием свинца $z=0.7$; 0.8; 0.9 проявляли характерный рост сопротивления при понижении температуры (изменение сопротивления составило 3 порядка).

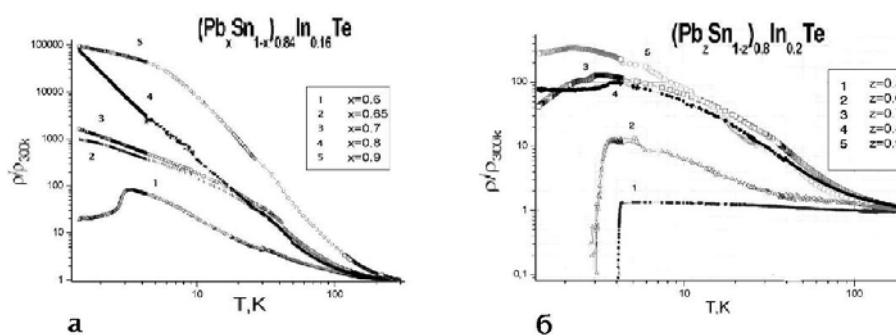


Рис1. Температурные зависимости изменения удельного сопротивления в твердых растворах а) 16% содержание индия б) 20% содержание

Полученные результаты свидетельствуют о том, что In играет главную роль в возникновении сверхпроводимости. Исчезновение сверхпроводящего состояния при росте содержания свинца z от 0.5 до 0.9 и увеличение удельного сопротивления можно связать с ослаблением взаимодействия примесных состояний In с основными состояниями валентной зоны.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кайданов В.И., Равич Ю.И. Глубокие резонансные состояния в полупроводниках типа А4В6 -УФН, 1985, т.145, в1, с.51-86.
2. Кайданов В.И., Немов С.А., Равич Ю.И., - ФТП, 1992, т.26, с.201.