

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ЭФФЕКТА ХОЛЛА ЧЕТВЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЛАВОВ $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ИНДИЯ

Константинов П.П.¹, Парфеньев Р.В.¹, Шамшур Д.В.¹, Черняев А.В.¹, Немов С.А.², Хламов И.И.²

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия,

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: A.Chernyaev@mail.ioffe.ru

В интервале температур $T = 400 \text{ К} - 77 \text{ К}$ изучены зависимости удельного сопротивления $\rho(T)$ и коэффициента Холла $R(T)$ в полупроводниковых сплавах $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ с различным содержанием свинца ($z = 0.4, 0.6$ и 0.7) и индия ($x = 0.05, 0.16$ и 0.20). Исследованные образцы представляли собой поликристаллы с размером зерна $\sim 0.1 \text{ мкм}$, изготовленные методом порошковой металлургии. Полученные экспериментальные данные приведены на рис. 1.

Сплавы системы $\text{PbTe} - \text{SnTe}$ образуют непрерывный ряд твердых растворов замещения с плавно изменяющейся шириной запрещенной зоны и инверсной структурой энергетического спектра при $z < 0.65$ (при содержании свинца $z = 0.65$ реализуется бесщелевое состояние материала (Рис.2)). Легирование PbSnTe элементом III группы – In приводит к возникновению полосы квазилокальных примесных состояний E_{In} с высокой плотностью, расположенной в граничных соединениях на фоне сплошного спектра зоны проводимости $\text{PbTe}:\text{In}$ или валентной зоны $\text{SnTe}:\text{In}$. В последнем случае наблюдается переход материала в сверхпроводящее (СП) состояние при гелиевых температурах с критической температурой, возрастающей с ростом x [1]. Следует отметить, что In в сплавах PbSnTe сочетает высокую растворимость (вплоть до $x < 0.24$ без признаков выпадения второй фазы) с сильной локализацией электронных состояний [2].

Структура валентной зоны $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ характеризуется наличием дополнительного экстремума (Σ -зоны "тяжелых" дырок) в достижимой области концентрации дырок. Увеличение содержания свинца z в твердом растворе, так же как и уменьшение количества In , приводят к смещению E_{In} к потолку валентной зоны с постепенным выходом из Σ -

зоны тяжелых дырок, при этом исчезает переход в СП состояние, а металлический характер электросопротивления с понижением температуры сменяется его возрастанием. Данные, приведенные на рис. 1, относятся именно к этой области составов (соотношения содержания свинца и индия) исследованных сплавов; во всех образцах наблюдается возрастание сопротивления с понижением температуры.

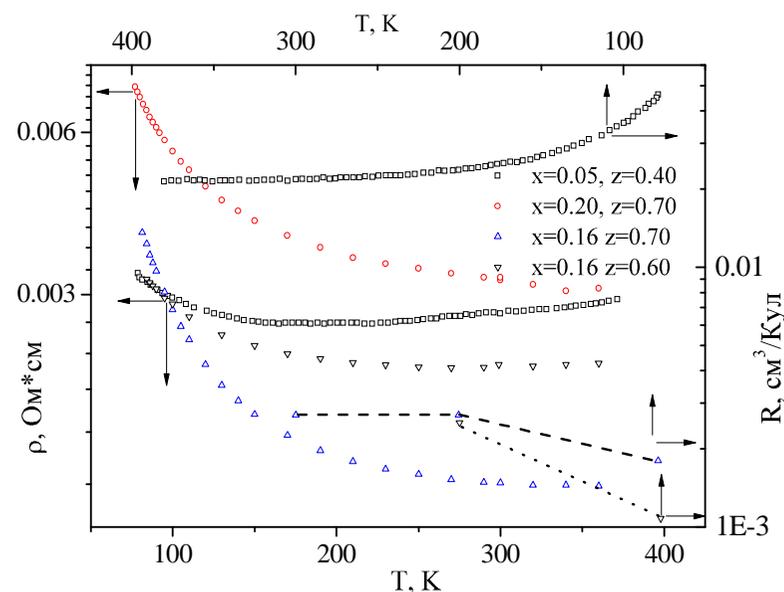


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления (левая и нижняя шкалы) и коэффициента Холла (правая и верхняя шкалы) в сплавах $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$ с различным содержанием свинца ($z = 0.4, 0.6$ и 0.7) и индия ($x = 0.05, 0.16$ и 0.2), соответственно.

Подобное необычное для сильнолегированных материалов группы A^4B^6 поведение $\rho(T)$ естественно было связать со смещением E_{In} в область запрещенной зоны соединения [3]. В соответствии со схемой рис. 2, такая ситуация вполне вероятна для сплава с содержанием свинца $z = 0.7$ и индия $x = 0.16, 0.2$, однако для меньших содержаний Pb и In , по-видимому, необходимо принять во внимание дополнительные факторы. Так, выход

E_{In} из Σ -валентной зоны сопровождается резким уменьшением суммарной плотности состояний на уровне Ферми E_F , при этом уменьшается вероятность межзонного рассеяния, что приводит к уменьшению степени гибридизации зонных и примесных состояний. Если определяющим фактором проводимости материала является проводимость по состояниям In с большой плотностью, то возрастание сопротивления с понижением температуры можно связать с увеличением степени локализации состояний в примесной полосе для $z < 0.75$.

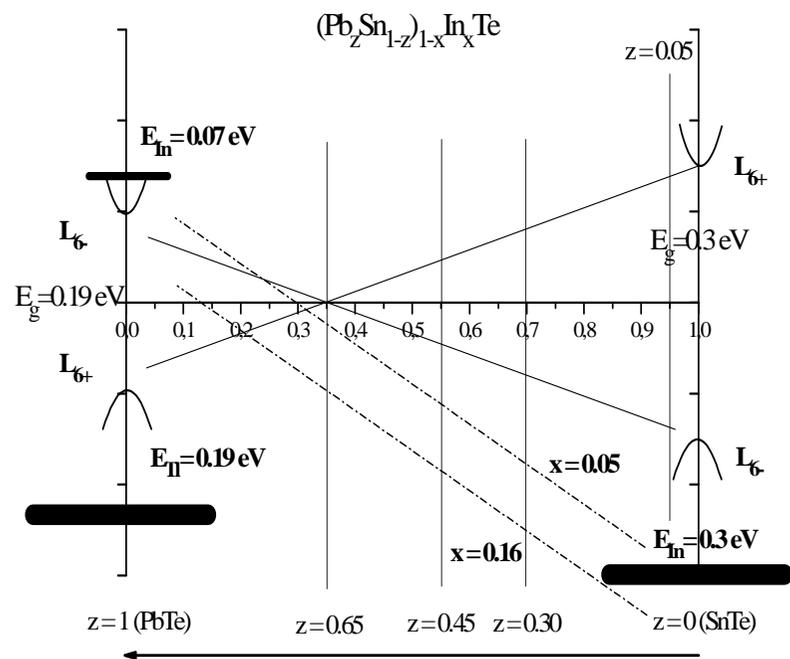


Рис. 1. Схематическое изменение зонной структуры сплавов $(Pb_zSn_{1-z})_{1-x}In_xTe$ при изменении содержания Pb и In (ширины запрещенной зоны E_g – сплошные линии - и положения уровня In – пунктир - в материале). Примерные значения энергетических параметров указаны при гелиевых температурах [2].

Легирующие PbTe примесью таллия также приводит к возникновению полосы примесных состояний (TI) на фоне сплошного спектра валентной зоны (рис. 2), как было установлено в [4]. Подробный анализ экспериментальных данных о концентрационной зависимости $T_c(P)$ в PbTe:TI приведен в [5]. Экспериментальные результаты можно интерпретировать как проявление андерсоновской локализации дырок и наличие псевдощели в пике плотности состояний таллия (при $N_{TI} < 2$ ат.%). Вполне вероятно, что подобный эффект может проявиться и в PbSnTe:In. При выходе состояний In из Σ -зоны тяжелых дырок происходит перераспределение носителей между зонными и примесными состояниями, степень заполнения которых приближается к 0.5 ($k_H \rightarrow 0.5$), что приводит к смещению уровня Ферми в область предполагаемой псевдощели в пике плотности состояний In. В этом случае также может наблюдаться низкотемпературное активационное возрастание сопротивления в твердых растворах исследованных составов и уровня легирования In.

Работа выполнена при поддержке грантов Президиума РАН и РФФИ 13-02-00556.

ЛИТЕРАТУРА

1. Парфеньев Р.В., Шамшур Д.В., Немов С.А., ФТТ, т.43, N 10, с. 1772-1775 (2001).
2. Козуб В.И., Парфеньев Р.В., Шамшур Д.В., Шакура Д.В., Немов С.А., Письма в ЖЭТФ, т. 84, N 1, с.37-42 (2006)
3. Шамшур Д.В., Немов С.А., Парфеньев Р.В., Конончук М.С., Nizhankovskii V.I., ФТТ, т.50, N 11, с.1948 – 1953 (2008).
4. Кайданов В.И., Немов С.А., Парфеньев Р.В., Шамшур Д.В., Письма в ЖЭТФ, т.35, N 12, стр. 517-519 (1982).
5. Немов С.А., Равич Ю.И., Корчагин В.А., Парфеньев Р.В., Шамшур Д.В., ФТТ, т.53, N 5, с. 878-880, 2011.