

# Влияние давления на параметры сверхпроводящего перехода в полупроводниковых твердых растворах $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}$ , легированных In

Р.В. Парфеньев, В.И. Козуб, Г.О. Андрианов, Д.В. Шамшур,  
А.В. Черняев, Н.Ю. Михайлин

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
ул. Политехническая, 26, г. Санкт-Петербург, 194021, Россия  
E-mail: D.Shamshur@mail.ioffe.ru*

С.А. Немов

*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
ул. Политехническая, 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Россия*

Статья поступила в редакцию 13 октября 2014 г., опубликована онлайн 22 декабря 2014 г.

Изучено влияние всестороннего сжатия до 10 кбар на сверхпроводящие и электрические характеристики полупроводникового твердого раствора  $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}$ , легированного индием (5 ат.%), в зависимости от содержания свинца. Экспериментально установлены корреляции для исследованных барических зависимостей. Обнаружено, что в материале с содержанием свинца  $z = 0,45$  при увеличении давления до  $P = 6,8$  кбар происходит пороговое усиление сверхпроводимости до значения  $T_c = 1,7$  К, характерного для состава  $z = 0,05$  при атмосферном давлении. Возрастание гидростатического давления  $P > 3$  кбар в  $(\text{Pb}_{0,05}\text{Sn}_{0,95})_{0,95}\text{In}_{0,05}\text{Te}$  приводит к понижению  $T_c$  ниже 1 К. Указанные особенности, вместе с колоколообразной зависимостью  $T_c(P)$  для состава  $z = 0,3$ , объясняются энергетическим смещением полосы квазилокальных состояний  $E_{\text{In}}$  и уровня Ферми, стабилизированного ими, из  $L$ - в  $\Sigma$ -валентную зону с большой плотностью состояний, как это наиболее ярко проявилось для состава  $z = 0,45$ . На основании измерений эффекта Холла при  $T = 77$  К определен концентрационный порог выхода уровня Ферми из  $\Sigma$ -валентной зоны при увеличении содержания свинца.

Вивчено вплив усебічного стискування до 10 кбар на надпровідні та електричні характеристики напівпровідникового твердого розчину  $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}$ , легованого індієм (5 ат.%), залежно від змісту свинцю. Експериментально встановлено кореляції для досліджених баричних залежностей. Виявлено, що в матеріалі зі змістом свинцю  $z = 0,45$  при збільшенні тиску до  $P = 6,8$  кбар відбувається порогове посилення надпровідності до значення  $T_c = 1,7$  К, характерного для складу  $z = 0,05$  при атмосферному тиску. Зростання гідростатичного тиску  $P > 3$  кбар в  $(\text{Pb}_{0,05}\text{Sn}_{0,95})_{0,95}\text{In}_{0,05}\text{Te}$  призводить до зниження  $T_c$  нижче 1 К. Вказані особливості, разом з дзвоноподібною залежністю  $T_c(P)$  для складу  $z = 0,3$ , пояснюються енергетичним зміщенням смуги квазілокальних станів  $E_{\text{In}}$  та рівня Фермі, стабілізованого ними, з  $L$ - у  $\Sigma$ -валентну зону з великою щільністю станів, як це найяскравіше проявилось для складу  $z = 0,45$ . На підставі вимірів ефекту Холлу при  $T = 77$  К визначено концентраційний поріг виходу рівня Фермі з  $\Sigma$ -валентної зони при збільшенні змісту свинцю.

- PACS: 71.20.Nr Полупроводниковые соединения;  
71.28.+d Узкополосные системы; твердые тела с промежуточной валентностью;  
71.30.+h Переходы металл–изолятор и другие электронные переходы;  
71.55.–i Уровни дефектов и примесей;  
74.62.Dh Влияние дефектов кристаллической структуры, допирования и примесей замещения;  
74.62.Fj Влияние давления.

Ключевые слова: полупроводниковый твердый раствор, гидростатическое сжатие, сверхпроводимость, критические параметры сверхпроводящего состояния.

### Введение

Легирование индием твердых растворов халькогенидов свинца и олова  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  (PST:In) приводит к появлению ряда уникальных свойств PST таких, как стабилизация уровня Ферми на квазилокальных примесных состояниях In,  $E_{\text{In}}$  [1], долговременная релаксация электронной системы при выведении ее из равновесия [2], резонансное рассеяние зонных носителей заряда и сверхпроводимость (СП) с критической температурой СП перехода  $T_c$  в гелиевой области температур [3]. Ширина запрещенной зоны PST соединений линейно изменяется с составом от прямого спектра в PbTe ( $z = 1$ , терм  $L_6^-$  соответствует зоне проводимости,  $L_6^+$  — валентной зоне) до обратного расположения термов в SnTe ( $z = 0$ ), проходя через точку инверсии ( $E_g = 0$ ) при  $z = 0,65$ .

Валентная зона PST имеет сложную структуру с дополнительным экстремумом в  $\Sigma$ -точке зоны Бриллюэна с высокой плотностью состояний ( $\Sigma$ -ВЗ). В PST:In при концентрации In, превышающей концентрацию электрически активных собственных дефектов, уровень Ферми ( $E_F$ ) фиксируется энергетическим положением уровня  $E_{\text{In}}$  на фоне сплошного спектра валентной зоны. С уменьшением содержания свинца в PST:In ( $z < 0,65$  при  $x > 0,12$ ) наблюдается вхождение  $E_{\text{In}}$  в  $\Sigma$ -ВЗ с большой плотностью состояний. При этом возникает резонансное рассеяние зонных дырок на примесных состояниях, приводящее к размытию уровня  $E_{\text{In}}$  в полосу примесных состояний и образованию гибридных зонно-примесных состояний. В этом случае при  $z < 0,65$  и  $x > 0,02$  наблюдается качественное усиление сверхпроводимости [4,5]. В [6–8] приводятся данные о необычно высоких для полупроводникового соединения критических параметрах СП перехода  $T_c = 4,2$  К и  $H_{c2} = 45$  кЭ при  $z = 0,4$  и  $x = 0,16$  (рис. 1(а)). Для составов, близких к области бесщелевого состояния  $z > 0,4$  и слабом легировании In ( $x = 0,05$ ), при гелиевых температурах был обнаружен фазовый переход СП–диэлектрик при выходе  $E_{\text{In}}$ , стабилизирующего уровень химпотенциала, в запрещенную зону PST:In [9]. Подробное исследование [10] электронного фазового перехода при изменении уровня легирования In ( $x$ ) и состава ( $z$ ) при нормальном давлении позволило установить фазовую границу ( $x, z$ ) между указанными электронными состояниями PST:In.

Изучение воздействия всестороннего сжатия как метода перестройки зонной структуры PST с квазилокальными примесными состояниями In было выполнено в работе [11] в области составов вблизи инверсии краев зон  $L_6^-$  и  $L_6^+$ , в которой был обнаружен переход полупроводник–металл–полупроводник, вызванный гидростатическим давлением. Была построена диаграмма барической перестройки спектра и оценены скорости смещения с давлением уровня  $E_{\text{In}}$ , имевшие разный

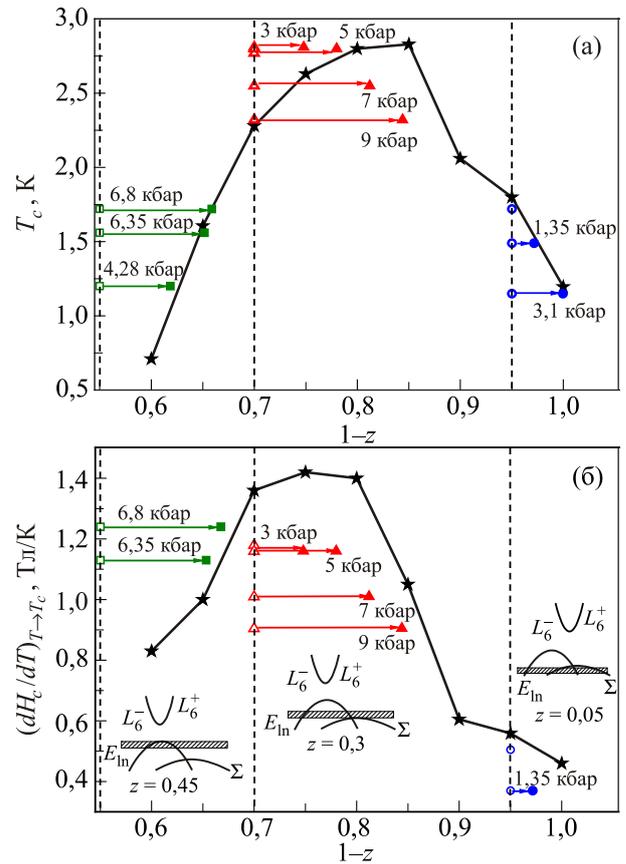


Рис. 1. (Онлайн в цвете) Влияние состава  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0,95}\text{In}_{0,05}\text{Te}$  на критические характеристики СП перехода  $T_c$  (а) и  $dH_{c2}/dT$  (б) в сопоставлении с влиянием давления на зонную структуру материала.  $T_c(P)$  и  $dH_{c2}/dT(P)$  при  $z = 0,05, 0,3$  и  $0,45$  (пустые символы); те же данные, смещенные по оси абсцисс на величину  $\Delta z^* = -1,6 \cdot 10^{-2} P$  (кбар), определенную из сравнения зависимостей  $\rho(1/T)$  от давления при фиксированном  $z$  и от состава при нормальном  $P$  (заполненные символы). На вставках рис. 1(б) указаны схемы взаимного расположения уровня  $E_{\text{In}}$  и краев  $L$ - и  $\Sigma$ -валентных зон для разных составов при нормальном давлении.

знак для сплавов  $n$ - и  $p$ -типа. В PST:In  $p$ -типа уровень  $E_{\text{In}}$  смещается в сторону валентной зоны со скоростью  $(dE_{\text{In}}/dP) = -1,5$  мэВ/кбар относительно середины запрещенной зоны.

В настоящей работе изучаются барические зависимости СП параметров PST:In разного состава, вызванные смещением  $E_{\text{In}}$  под давлением относительно краев легкой  $L$ -ВЗ и тяжелой  $\Sigma$ -ВЗ, в области составов  $z < 0,6$ , где ширина запрещенной зоны  $E_g = E_{L_6^+} - E_{L_6^-}$  увеличивается с давлением [11] и положение  $E_{\text{In}}(P)$  внутри  $L$ - и  $\Sigma$ -ВЗ определяет степень их заполнения.

### Образцы и методика измерений

Поликристаллические образцы  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{1-x}\text{In}_x\text{Te}$  с фиксированным уровнем легирования In ( $x = 0,05$ ) разного состава ( $z = 0,05, 0,3$  и  $0,45$ ) изготавливались по отработанной для полупроводниковых соединений ти-

па  $A^4B^6$  металлокерамической технологии [12] с заключительным гомогенизирующим отжигом при  $T = 660$  °C в течение 200 ч, позволяющим добиваться однородности образцов по составу. Характерный размер зерна в образцах составлял 100 мкм. Рентгено-спектральный микроанализ не обнаружил следов второй фазы в исследованных образцах. Всестороннее сжатие (до 12 кбар при  $T = 300$  K) создавалось в автономной камере высокого давления [13], совместимой с криомагнитными установками с жидкими  $He^4$  или  $He^3$  (низкотемпературный сброс давления составлял  $\Delta P \sim 3$  кбар). Низкотемпературные измерения электрических свойств исследованных образцов проводились непосредственно в жидком  $He^3$ ,  $He^4$  и жидком  $N_2$  с откачкой паров над жидкостью с помещенной в нее камерой высокого давления. Концентрация дырок, определенная из коэффициента Холла при  $T = 77$  K, изменялась в интервале  $p = 1 \cdot 10^{20} - 7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  для трех составов (рис. 2). В образце  $z = 0,45$  наблюдалось экспоненциальное уменьшение концентрации носителей  $p$  с понижением температуры с энергией активации  $E_a = 12,5$  мэВ, тогда как энергия активации в зависимости удельного сопротивления  $\rho = \rho(0) \exp(E_a/kT)$  была меньше ( $E_a = 5$  мэВ) из-за возрастания вклада в подвижность легких дырок при понижении  $T$  вследствие температурного смещения  $E_{In}$  из  $\Sigma$ -ВЗ. Температурные зависимости удельного сопротивления PST исследуемых составов представлены на рис. 3 при разных давлениях. Результаты были получены с помощью АС-техники (на частоте 0,5 Гц) для низкоомных участков кривых  $\rho(T)$  и dc-измерений при переходе в диэлектрическое состояние. Низкая подвижность дырок в твердых растворах ( $z \leq 0,3$  при  $T = 77$  K) (рис. 2) определяется резонансным рассеянием дырок  $\Sigma$ -ВЗ на квазилокальных примесных состояниях In, которое выравнивает подвижности легких и тяжелых дырок [14].

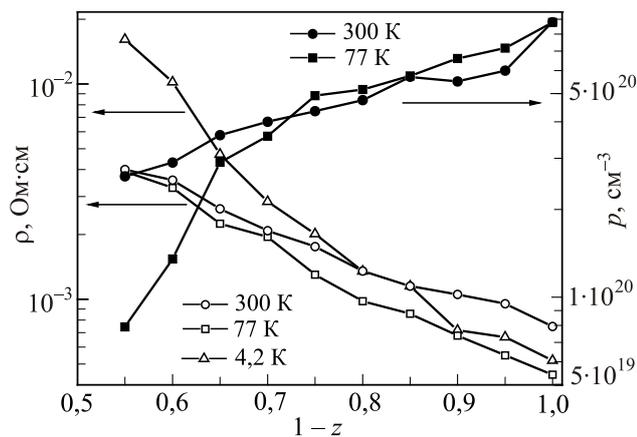


Рис. 2. Зависимости концентрации дырок  $p$ , вычисленной на основании измерений коэффициента Холла (заполненные символы, правая ось), и удельного сопротивления (пустые символы, левая ось) от состава образцов PST:In  $z = 0-0,45$ ,  $x = 0,05$  при разных температурах.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В соответствии с целью работы были выбраны образцы PST трех составов ( $z = 0,45, 0,3$  и  $0,05$ ) на двух склонах и вблизи максимума колоколообразных зависимостей  $T_c(z)$  и  $H_{c2}(z)$  (рис. 1), которые характеризуются разным энергетическим положением полосы квазилокальных состояний In относительно краев  $L$ - и  $\Sigma$ -ВЗ (см. вставки на рис. 1(б)). Удельное сопротивление для PSTс  $z = 0,05$  линейно уменьшалось с понижением температуры для всех давлений  $P \leq 6,8$  кбар, демонстрируя «металлический» характер вплоть до температуры СП перехода. Уменьшение удельного сопротивления с давлением вместе с данными СП перехода в образцах с составами  $z = 0,45, 0,3$  и  $0,05$  приведены на рис. 1, 3 и в табл. 1.

Колоколообразные зависимости критической температуры СП перехода  $T_c(z)$  и второго критического магнитного поля  $H_c(z)$  в твердых растворах PST:In (рис. 1) являются основой для понимания влияния давления на изменение расположения уровня In в инверсной зонной структуре PST ( $z < 0,6$ ), на параметры СП и электрические свойства в нормальном состоянии. При этом необходимо учитывать, что вызванное давлением смещение  $E_{In}$  в пределах спектров  $L$ - и  $\Sigma$ -ВЗ определяет уровень Ферми  $E_F$  и концентрацию свободных дырок в образцах. Степень заполнения дырками  $k_h$ -полосы примесных состояний In, содержащей два состояния на каждый атом In и один электрон, участвующий в связи, имеет вид  $k_h = 0,5 + (N_a - p)/2N_{In}$ , где  $N_a$  — концентрация акцепторов, не участвующих в создании локализованных состояний (структурные дефекты, вакансии металла) [15]. Пик плотности примесных состояний In соответствует половинному заполнению примесной полосы при  $N_a \ll N_{In}$ , и только при достаточном легировании дополнительным акцептором ( $N_a \sim N_{In}$ ) уровень Ферми  $E_F$  может располагаться в середине полосы (при фиксированной концентрации  $N_{In}$ ), что приводит к достижению максимального

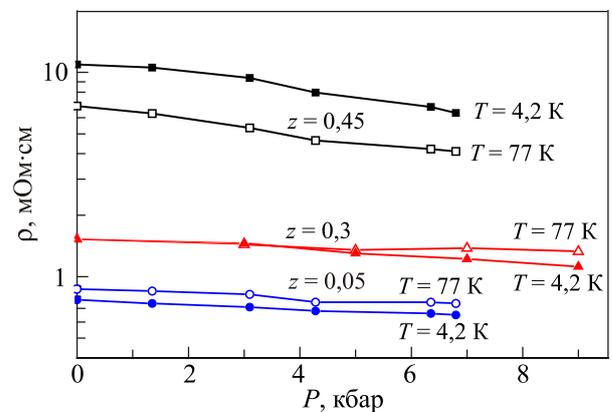


Рис. 3. (Онлайн в цвете) Барические зависимости удельного сопротивления образцов PST с содержанием свинца  $z = 0,45, 0,3$  и  $0,05$  при  $T = 4,2$  и  $77$  K.

Таблица 1. Состав, параметры СП состояния и электрофизические характеристики исследованных объемных образцов  $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0,95}\text{In}_{0,05}\text{Te}$  ( $z = 0,05, 0,3$  и  $0,45$ ) при разных давлениях:  $p$  — холловская концентрация носителей заряда, определенная при  $T = 300$  К;  $\rho_N$  и  $\rho_{300\text{ К}}$  — удельное сопротивление в нормальном состоянии ( $T \approx 4,2$  К и  $T \approx 300$  К);  $T_c$  — температура сверхпроводящего перехода;  $|dH_{c2}/dT|_{T_c}$  — абсолютная величина производной второго критического магнитного поля по температуре при  $T \rightarrow T_c$  ( $T_c$  и  $|dH_{c2}/dT|_{T_c}$  определялись на уровне  $\rho(T, H) = 0,5\rho_N$ );  $N(0)$  — плотность состояний на уровне Ферми, рассчитанная на одну ориентацию спина по формуле  $N(0) = 2,84 \cdot 10^{14} \cdot |\partial H_{c2}/\partial T|_{T \rightarrow T_c} \rho_N^{-1}$ ,  $[N(0)] = \text{эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ ,  $[|\partial H_{c2}/\partial T|_{T \rightarrow T_c}] = \text{эВ}/\text{К}$ ,  $[\rho_N] = \text{Ом} \cdot \text{см}$

$z_{\text{Pb}}$	$P_{4,2\text{ К}}$ , кбар	$\rho_{300\text{ К}}$ , $10^{20} \text{ см}^{-3}$	$\rho_{300\text{ К}}$ , Ом·см	$\rho_N$ , Ом·см	$T_c$ , К	$dH_{c2}/dT$ , кЭ/К	$N(0)$ , $10^{21} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$
0,05	0,001	6,00	0,0013	0,00077	1,72	5,05	1,86
0,05	1,35		0,0017	0,00074	1,49	3,7	1,42
0,05	3,1		0,00113	0,00071	1,15		
0,05	4,28		0,00107	0,00068			
0,05	6,35		0,00104	0,00066			
0,05	6,8		0,00102	0,00065			
0,3	0,001	4,00	0,00192	0,00154	2,76	12	2,22
0,3	3		0,00168	0,00146	2,81	11,5	2,23
0,3	5		0,00161	0,00132	2,81	11	2,37
0,3	7		0,00156	0,00122	2,56	10	2,32
0,3	9		0,00151	0,00113	2,31	9	2,27
0,45	0,001	2,6	0,00641	0,01094			
0,45	1,35		0,00538	0,01055			
0,45	3,1		0,00498	0,00938			
0,45	4,28		0,00463	0,00796	1,2		
0,45	6,35		0,00443	0,00678	1,56	11,3	0,47
0,45	6,8		0,00435	0,00633	1,72	12,4	0,56

значения  $T_c(E_F)$  при неизменном составе и концентрации In [12]. Как видно из экспериментальных данных  $T_c(P)$  для образца PST:In с  $z = 0,3$  и  $x = 0,05$  (табл. 1 и данные [16]), такая же ситуация с максимумом  $T_c$  может быть достигнута при увеличении давления до 5 кбар в PST:In с  $z = 0,3$  за счет изменения концентрации дырок  $p$  в  $\Sigma$ -ВЗ в результате переходов электронов из заполненных состояний  $\Sigma$ -ВЗ на пустые примесные состояния In с высокой плотностью.

Как следует из экспериментальных данных для резистивного СП перехода в зависимости от температуры (рис. 4) и от напряженности магнитного поля (рис. 5), влияние давления на СП переход сводится к увеличению степени перекрытия полосы  $E_{\text{In}}$  с тяжелой  $\Sigma$ -ВЗ, что можно охарактеризовать в линейном приближении как эффективное уменьшение  $z$  на величину  $\Delta z^* = -1,6 \cdot 10^{-2} P$  (кбар) относительно выбранных составов  $z = 0,45, 0,3$  и  $0,05$ .

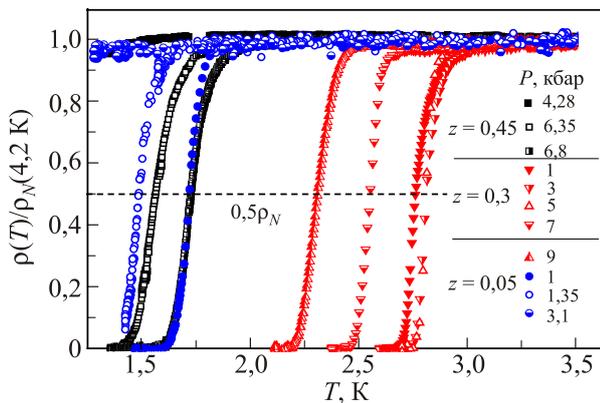


Рис. 4. (Онлайн в цвете) Резистивные СП переходы приведенного сопротивления  $\rho(T)/\rho_N$  образцов PST:In ( $x = 0,05$ ) трех составов  $z = 0,45, 0,3$  и  $0,05$ , иллюстрирующие зависимость критической температуры  $T_c$  (определенной по уровню  $0,5\rho_N$ ) и ширины перехода от всестороннего сжатия (см. табл. 1).

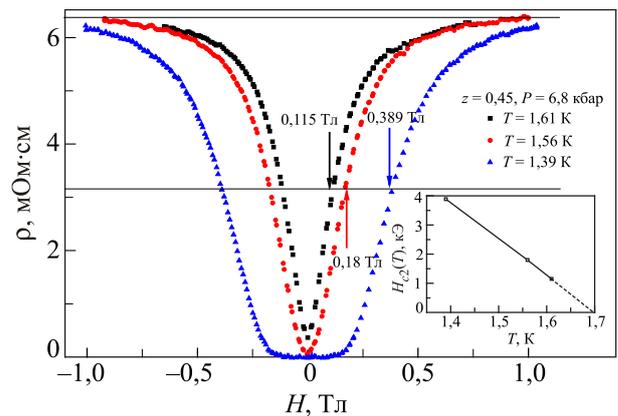


Рис. 5. (Онлайн в цвете) Влияние внешнего магнитного поля на резистивный СП переход образца PST с  $z = 0,45, x = 0,05$  при  $P = 6,8$  кбар. На вставке представлена зависимость  $H_{c2}(T)$  вблизи  $T_c$  для определения производной  $dH_{c2}/dT|_{T \rightarrow T_c}$  (на уровне  $0,5\rho_N$ , см. табл. 1).

Построенные зависимости  $T_c(z^*)$  и  $H_{c2}(z^*)$ , где  $z^* = z - 1,6 \cdot 10^{-2} P$  (кбар) для  $z = 0,05, 0,3$  и  $0,45$  (рис. 1), хорошо согласуются с зависимостями  $T_c(z)$  и  $H_{c2}(z)$ , установленных ранее [5], что отражает однонаправленные изменения в спектре PST:In при росте  $P$  и уменьшении  $z$ . На рис. 1 видно, что в нормальном состоянии при низких температурах ( $T < 20$  К) происходит постепенное уменьшение  $\rho$  и наклона кривых  $\rho(1/T)$  в образце PST:In с  $z = 0,45$  и  $x = 0,05$ , характеризующее проводимость по полосе гибридизированных зонно-примесных состояний. Следует отметить, что уменьшение содержания свинца  $z$  в PST:In так же, как и увеличение давления, сопровождается уменьшением удельного сопротивления в области высоких температур  $T > 100$  К, где наблюдается зависимость  $\rho_0(T)$ , характерная для металлов.

Тенденция изменения  $T_c(P)$  для трех составов на двух склонах колоколообразной зависимости согласуется с данными об энергетической картине расположения  $E_{\text{In}}$  относительно краев ВЗ при соответствующих  $z$ . Однако следует учесть не только изменение положения  $E_{\text{In}}(P)$ , но и влияние давления на процессы электрон-электронного взаимодействия, приводящие к усилению СП в PST, легированных In. Согласно Шеланкову [13], в модифицированной модели БКШ для систем с переменной валентностью в случае гибридации примесных и зонных состояний появляется дополнительный член в электрон-электронном взаимодействии, обусловленный виртуальным энергетическим смещением локализованного примесного уровня. Величина вклада зависит от ширины примесной полосы по сравнению с поляронным сдвигом примесного уровня, связанным с деформацией решетки при изменении зарядового состояния примесного центра. При малой ширине полосы  $E_{\text{In}}$  уровень Ферми испытывает скачок и не может проходить через пик плотности состояний примесной полосы из-за относительно большого поляронного сдвига. В этом случае дополнительный член в электрон-электронном притяжении отсутствует. Под действием давления зарядовое состояние центров может быть изменено из-за смещения атомов In, вызванного деформацией. Так, всестороннее сжатие образца PST с  $z = 0,45$  приводит к смещению полосы  $E_{\text{In}}$  ниже потолка  $\Sigma$ -ВЗ при  $P > 4,5$  кбар, тем самым увеличивая степень гибридации зонно-примесных состояний и ширину примесной полосы за счет резонансного рассеяния тяжелых дырок с энергиями, близкими к  $E_{\text{In}}$  на примеси In, что объясняет возрастание  $T_c$  с давлением в образцах с  $z = 0,45$  и  $0,3$  (табл. 1). При больших давлениях ( $P > 5$  кбар в образце с  $z = 0,3$ ) и малых  $z$  уровень Ферми дырок по мере заглубления  $E_{\text{In}}$  в  $\Sigma$ -ВЗ выходит из пика плотности состояний примесной полосы, степень заполнения дырками  $k_h \rightarrow 0$ . В результате резонансное рассеяние зонных дырок ослабевает, и  $T_c$  уменьшается с давлением.

Концентрация дырок и низкотемпературная проводимость с ростом давления возрастают, и уровень Ферми дырок располагается в  $\Sigma$ -ВЗ во всех образцах (в том числе и в PST:In с  $z = 0,45$  при  $P > 4,5$  кбар). Пересечение  $E_F$  с краем  $\Sigma$ -ВЗ, как видно на рис. 2, происходит при  $p = 3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 77$  К, что согласуется с данными [5], и определяет концентрационный порог появления СП состояния в PST, легированном In ( $x = 0,05$ ), в зависимости от  $z$  при атмосферном давлении. Влияние давления на электрические свойства PST:In при  $z \leq 0,45$  и  $0,3$  приводит также к расширению области металлической проводимости как по температуре, так и по составу  $z$  за счет увеличения перекрытия волновых функций примесных атомов.

### Заключение

Показано, что изменения электрических и СП характеристик полупроводниковых твердых растворов PST, легированных In, при всестороннем сжатии связаны не только со смещением полосы примесных состояний In относительно краев легкой и тяжелой валентных зон, но и с изменением суммарной плотности состояний на уровне Ферми дырок вследствие обмена носителями заряда между зонными состояниями и состояниями  $E_{\text{In}}$  при их относительном смещении. Полученные результаты важны для установления и управления областями СП состояния и прыжковой проводимости в PST путем изменения ширины примесной полосы при ее приближении к потолку тяжелой валентной зоны и расположению в ней.

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

1. В.И. Кайданов, Ю.И. Равич, *УФН* **145**, 51 (1985).
2. Б.А. Волков, Л.И. Рябова, Д.Р. Хохлов, *УФН* **175**, 875 (2002).
3. С.А. Немов, Ю.И. Равич, *УФН* **168**, 817 (1998).
4. Г.С. Бушмарина, И.А. Драбкин, В.В. Компанец, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, М.А. Шахов, *ФТТ* **28**, 1094 (1986).
5. А.В. Березин, С.А. Немов, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, *ФТТ* **35**, 53 (1993).
6. G.S. Bushmarina, I.A. Drabkin, D.V. Mashovets, R.V. Parfeniev, D.V. Shamshur, and M.A. Shakhov, *Physica B (Amsterdam)* **169**, 687 (1991).
7. R.V. Parfeniev, D.V. Shamshur, M.A. Shakhov, Zb. Chrapkiewicz, *J. Alloys Comp.* **219**, 313 (1995).
8. Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, С.А. Немов, *ФТТ* **43**, 1772 (2001).
9. В.И. Козуб, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, Д.В. Шакура, А.В. Черняев, С.А. Немов, *Письма ЖЭТФ* **84**, 37 (2006).
10. Д.В. Шамшур, Р.В. Парфеньев, А.В. Черняев, С.А. Немов, *ФТТ* **52**, 1693 (2010).
11. Б.А. Акимов, Л.И. Рябова, О.Б. Яценко, С.М. Чудинов, *ФТП* **13**, 752 (1979); Б.А. Акимов, В.П. Зломанов, Л.И.

- Рябова, С.М. Чудинов, О.Б. Яценко, *ФТП* **13**, 1293 (1979).
12. Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, С.А. Немов, *ФТТ* **41**, 2132 (1999).
  13. М.Л. Шубников, *Приборы и техника эксперимента* **5**, 178 (1981).
  14. В.И. Кайданов, С.А. Немов, Ю.И. Равич, *ФТП* **26**, 201 (1992).
  15. В.И. Кайданов, С.А. Немов, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, *Письма ЖЭТФ* **35**, 517 (1982).
  16. Г.О. Андрианов, С.А. Немов, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, А.В. Черняев, *ФТТ* **52**, 1688 (2010).

The high-pressure effect on superconducting transition parameters of In-doped  $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}$  semiconducting solid solutions

R.V. Parfeniev, V.I. Kozub, G.O. Andrianov, D.V. Shamshur, A.V. Chernyaev, N.Yu. Mikhailin, and S.A. Nemov

The influences of comprehensive compression up to 10 kbar and lead content on superconducting and electrical characteristics of semiconducting solid solutions  $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}$  doped with indium (5 at.%) are studied. Experimental correlations for the pressure dependences under consideration are found out. It is established that at high pressure condition ( $P = 6.8$  kbar) the material

with content of lead  $z = 0.45$  displays a threshold increase of superconductivity up to  $T_c = 1.7$  K, which is typical of the  $z = 0.05$  compound at normal pressure. An increase of hydrostatic pressure  $P > 3$  kbar in  $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$  leads to a decrease of  $T_c$  below 1 K. The observed features and the bell-shaped dependence  $T_c(P)$  for the  $z = 0.3$  compound are explained by the energy shifting of the band of quasilocal states  $E_{\text{In}}$  and the state stabilized Fermi energy from the  $L$ -valence band into the  $\Sigma$ -valence one with a high density of states as was most noticeable for the  $z = 0.45$  compound. A concentration threshold for the Fermi energy leaving the  $\Sigma$ -valence band with increasing content of lead was determined from the Hall effect data at  $T = 77$  K.

PACS: 71.20.Nr Semiconductor compounds;  
**71.28.+d** Narrow-band systems; intermediate-valence solids;  
**71.30.+h** Metal-insulator transitions and other electronic transitions;  
**71.55.-i** Impurity and defect levels;  
74.62.Dh Effects of crystal defects, doping and substitution;  
74.62.Fj Effects of pressure.

Keywords: semiconductor solid solution, hydrostatic pressure, superconductivity, the critical parameters of the superconducting state.