

Сверхпроводящие свойства $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})\text{Te}$, легированного индием, в условиях гидростатического сжатия

© Н.Ю. Михайлин, Р.В. Парфеньев, А.В. Черняев[¶],
Д.В. Шамшур, Г.О. Андрианов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[¶] E-mail: chernyaevav@yandex.ru

(Получена 31 января 2017 г. Принята к печати 8 февраля 2017 г.)

Изучены сверхпроводящие свойства полупроводникового сплава $\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95}\text{Te}$, легированного 5 ат.% In, при гидростатическом сжатии $P < 7$ кбар. При увеличении давления $P > 1.35$ кбар исчезает скачок сопротивления к $\rho = 0$ на температурных и магнитопольных зависимостях электросопротивления $\rho(T)$ при $T \geq 1.3$ К и $\rho(H)$, соответствующих переходу в сверхпроводящее состояние. Экспериментальные результаты свидетельствуют об уменьшении плотности состояний на уровне Ферми с ростом давления, что можно интерпретировать как смещение уровня индия вглубь валентной зоны. Полученные данные уточняют и дополняют результаты работ по изучению барических зависимостей критических параметров сверхпроводящего перехода в $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ с различным содержанием свинца z .

DOI: 10.21883/FTP.2017.08.44788.57

1. Введение

Введение в твердые растворы $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}$ индия в количестве до 20 ат.% (предел растворимости In в SnTe достигает 40 ат.% [1]) приводит к образованию полосы квазилокальных примесных состояний In с высокой плотностью, расположенной на фоне сплошного спектра валентных L - и Σ -зон [2]. Именно высокой плотностью состояний на уровне Ферми определяется сверхпроводящий (СП) переход с критической температурой, достигающей в $\text{Sn}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}_{1+y}$ $T_c \approx 2.6$ К (при содержании дополнительной примеси избыточного Te $y = 1$ ат.%) [3]. Ранее было установлено, что для наблюдения СП состояния с критической температурой в гелиевой области требуются определенные условия: 1) расположение уровня Ферми зонных дырок E_F в пределах полосы квазилокальных состояний индия E_{In} ; 2) расположение полосы квазилокальных состояний индия E_{In} на фоне дополнительного Σ -экстремума валентной зоны [4].

В предыдущих работах была показана возможность управлять критическими параметрами СП перехода, варьируя количество In и/или содержание свинца z , что влияет определяющим образом на энергетическое положение примесной полосы и уровня Ферми относительно края тяжелой Σ -валентной зоны в энергетическом спектре твердых растворов [5].

Гидростатическое сжатие также позволяет в определенных пределах изменять параметры зонной структуры $\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z}\text{Te}:\text{In}$ (взаимное расположение E_{In} и потолок валентных L - и Σ -зон [6,7]) и соответственно СП характеристики материала. Задача настоящей работы — установление влияния давления на низкотемпературные электрические свойства сверхпроводящего твердого раствора $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$.

2. Методика эксперимента

Четверной твердый раствор, соответствующий химической формуле $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$, изготавливался по металлокерамической технологии [8,9], позволяющей получать однородные образцы. При синтезе образцов выдерживали следующие технологические параметры. Сплавление в вакууме исходных компонентов (Pb, Sn, In, Te) полупроводниковой степени чистоты производили при 900–1000°C. Далее в течение 200 ч проводили отжиг при 600°C с последующей быстрой закалкой. Для улучшения однородности образцов полученные слитки, раздробленные до размеров микронных зерен (100–200 мкм), подвергали горячему прессованию и отжигу в вакууме при 600°C в течение 200 ч. Размеры образцов (площадь поперечного сечения образца $S = 2.3$ мм², расстояние между контактами $l = 3.5$ мм) определялись требованиями к измерениям в условиях гидростатического сжатия.

Исследования температурных и магнитопольных зависимостей электросопротивления проводили на постоянном токе в диапазоне температур $T = 1.35$ –300 К в магнитных полях H до 1 Т. Критические параметры СП перехода — температура T_c и магнитное поле $H_{c2}(T)$ — определялись из температурных $\rho(T)$ (при $H = 0$) и магнитопольных $\rho(H)$ (при $T = \text{const}$) зависимостей удельного сопротивления по скачку сопротивления (на уровне $\rho = 0.5\rho_N$, где ρ_N — сопротивление в нормальном состоянии). Омические контакты к образцам создавали путем электролитического осаждения слоя Ni из раствора Ni_2SO_4 . Образец помещали в немагнитную автономную камеру высокого давления [8], заполняемую полиэтилсилоксаном и расположенную в криостате непосредственно в жидком He₄. Величину гидростатического сжатия до $P \leq 12$ кбар (при $T = 300$ К) определяли по изменению сопротивления датчика (манга-

ниновая проволока диаметром $d = 0.05$ мм). Низкотемпературный сброс давления в камере при понижении температуры составлял $\Delta P \approx 3$ кбар.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена температурная зависимость сопротивления $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ в области СП перехода ($T_c \approx 1.72$ К) при нормальном давлении. Образец для изучения барических зависимостей $\rho(T)$ и $\rho(H)$ был выбран исходя из следующих соображений. На вставке к рис. 1 показано изменение $T_c(z)$ в серии образцов $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$, имеющее форму колокола с максимумом при $z \approx 0.2$ [2]. Ранее было проведено исследование влияния давления на СП характеристики твердого раствора с содержанием свинца $z = 0.3$ (в области максимума T_c на вставке рис. 1), показавшее слабую зависимость $T_c(P)$ вплоть до $P \approx 9$ кбар [6]. В то же время изначально (при $P = 1$ бар) несверхпроводящий образец с большим содержанием свинца $(\text{Pb}_{0.45}\text{Sn}_{0.55})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ обнаружил при повышении $P > 4$ кбар [10] переход в СП состояние с температурой, достигающей $T_c \approx 1.7$ К при $P = 6.8$ кбар. Нашей задачей было последовательное изучение барических зависимостей СП свойств образца твердого раствора $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ (из „левой“ части колоколообразной зависимости $T_c(z)$ на вставке к рис. 1).

На рис. 2 показаны температурные зависимости электросопротивления твердого раствора $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ при гидростатическом сжатии $P \leq 6.8$ кбар. Они имеют линейную зависимость от T , характерную для образцов твердых растворов

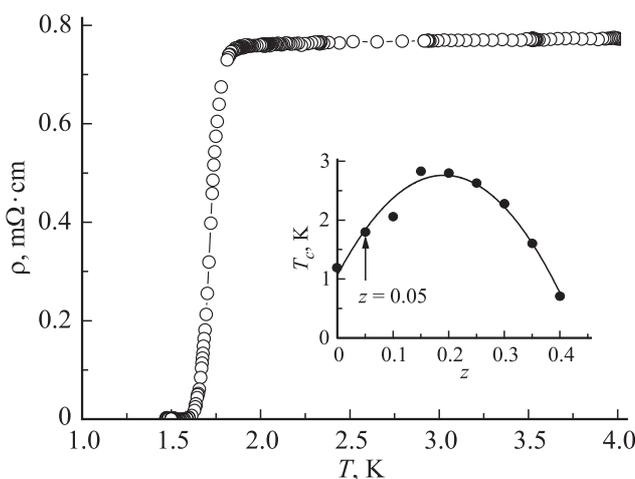


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления образца $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ при нормальном давлении. На вставке показана зависимость критической температуры T_c СП перехода от содержания свинца z в твердом растворе $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ ($P = 1$ бар) [2,6]. Стрелкой указан состав исследуемого образца.

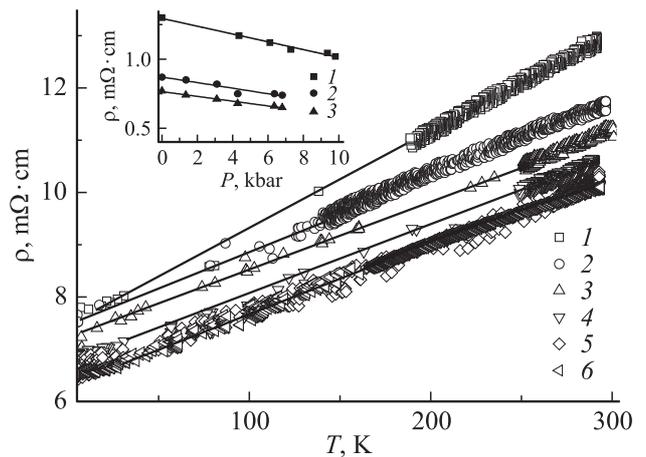


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления образца $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ при различном давлении P , кбар: 1 — 0.001, 2 — 1.35, 3 — 3.1, 4 — 4.28, 5 — 6.35, 6 — 6.8. На вставке показана зависимость сопротивления $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ в нормальном состоянии от степени гидростатического сжатия: 1 — 300 К, 2 — 77 К, 3 — 4.2 К.

$(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})\text{Te}$, легированных In. Металлический ход сопротивления обусловлен высокой концентрацией носителей заряда из-за электрически активных собственных дефектов и высокой концентрации примеси ($\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$). На вставке к рис. 2 представлены зависимости удельного сопротивления $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ от степени гидростатического сжатия при комнатной, азотной и гелиевой температурах. Видно, что сопротивление образца монотонно уменьшается с увеличением давления во всей исследованной области температур. Барическое изменение удельного сопротивления составило для комнатной, азотной и гелиевой температур $\partial\rho/\partial P = -0.028$, -0.020 и -0.017 мОм/кбар соответственно.

На рис. 3 показаны зависимости $\rho(T, P)$ в $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ в области СП перехода (при 1.35–2.5 К). Увеличение степени гидростатического сжатия до $P = 1.35$ кбар приводит к смещению критической температуры СП перехода в область более низких температур ($T_c \approx 1.5$ К). При дальнейшем повышении давления СП переход исчезает в исследованном диапазоне температур ($T \geq 1.35$ К). Уменьшение T_c с ростом P подтверждают зависимости сопротивления от магнитного поля (рис. 4). Критические магнитное поля разрушения СП состояния уменьшаются, и при $P \geq 3.1$ кбар скачок сопротивления $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ в магнитном поле, связанный с СП переходом, исчезает.

Ранее в работе [6] было исследовано влияние давления на параметры СП состояния $(\text{Pb}_{0.7}\text{Sn}_{0.3})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$. Было обнаружено, что СП параметры материала слабо меняются с давлением, что связывалось авторами с незначительным изменением положения уровня Ферми E_F вблизи максимума плотности состояний примесной полосы

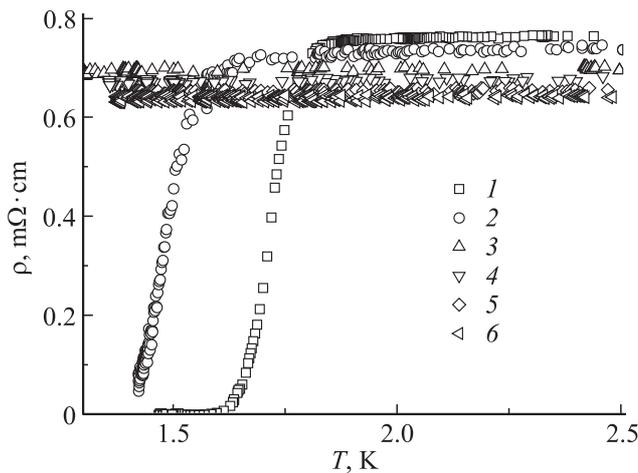


Рис. 3. Температурные зависимости удельного сопротивления образца $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ в области СП перехода при различном давлении P , кбар: 1 — 0.001, 2 — 1.35, 3 — 3.1, 4 — 4.28, 5 — 6.35, 6 — 6.8.

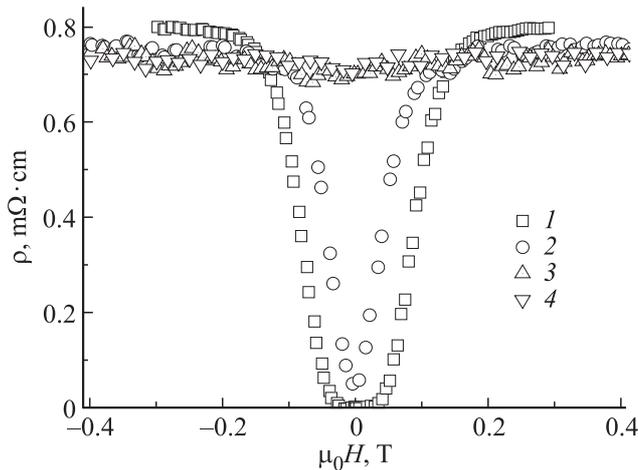


Рис. 4. Зависимость сопротивления $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ от магнитного поля $\mu_0 H$ при различных температурах ниже критической $T_c = 1.72$ К в условиях гидростатического сжатия P , кбар (T , К): 1 — 0.001 (1.51), 2 — 1.35 (1.38), 3 — 3.1 (1.34), 4 — 4.28 (1.32).

In под давлением до $P = 9$ кбар. В твердом растворе с меньшим содержанием свинца $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ повышение давления до $P > 1.35$ кбар приводит к исчезновению СП перехода при экспериментально достижимых температурах.

При интерпретации полученных данных необходимо учитывать следующие обстоятельства. Значения параметров СП перехода (и сама возможность реализации СП состояния с T_c в гелиевой области температур) определяются плотностью состояний на уровне Ферми, которая, в свою очередь, складывается из плотности зонных состояний L - и Σ -валентных зон и из плотности примесных состояний In. Всестороннее сжатие изменяет энергетическое расстояние между краями зон и квазило-

кальными состояниями индия E_{In} , влияя тем самым на суммарную плотность зонных состояний. При этом изменяется степень заполнения примесной полосы носителями и соответственно положение уровня Ферми E_F . Как следует из полученных экспериментальных данных, СП состояние материала исчезает уже при $P > 1.35$ кбар. Принимая во внимание данные работы [6], следует сделать вывод, что приложение гидростатического давления сдвигает квазилокальный уровень In вглубь валентной зоны. Это приводит, с одной стороны, к увеличению плотности состояний зонных дырок на уровне Ферми. При этом, однако, плотность квазилокальных состояний существенно падает из-за перехода электронов из заполненных зонных состояний на примесные состояния, что приближает уровень Ферми дырок к краю примесной полосы E_{In} , где плотность примесных состояний существенно ниже. В результате действия обоих факторов гидростатическое сжатие приводит к уменьшению суммарной плотности состояний на уровне Ферми и исчезновению сверхпроводимости.

4. Заключение

Таким образом, в изученном твердом растворе наблюдается существенное влияние гидростатического сжатия на температурные и магнитопольные зависимости удельного сопротивления $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ во всей области температур от комнатных до гелиевых. Увеличение степени гидростатического сжатия приводит к уменьшению критической температуры СП перехода и критических магнитных полей H_c , и при увеличении давления $P > 1.35$ кбар сверхпроводимость исчезает. Полученные результаты интерпретируются как барьерное смещение примесной полосы квазилокальных состояний In вглубь валентной зоны, что приводит к выходу уровня Ферми дырок из пика примесных состояний индия с высокой плотностью, уменьшению суммарной плотности состояний на уровне Ферми и исчезновению СП состояния материала в исследованной области температур $T > 1.35$ К.

Список литературы

- [1] G. Balakrishnan, L. Bawden, S. Cavendish, M.R. Lees. Phys. Rev. B, 140507(R) (2013).
- [2] Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, С.А. Немов. ФТТ, **43**, 1772 (2001).
- [3] Г.С. Бушмарина, И.А. Дабкин, В.В. Компанец, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, М.А. Шахов. ФТТ, **28**, 1094 (1986).
- [4] А.В. Березин, С.А. Немов, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур. ФТТ, **35**, 53 (1993).
- [5] В.И. Козуб, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, Д.В. Шакура, А.В. Черняев, С.А. Немов. Письма ЖЭТФ, **84**, 37 (2006).
- [6] Г.О. Андрианов, С.А. Немов, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, А.В. Черняев. ФТТ, **52**, 1688 (2010).

- [7] Р.В. Парфеньев, В.И. Козуб, Г.О. Андрианов, Д.В. Шамшур, А.В. Черняев, Н.Ю. Михайлин, С.А. Немов. *Физика низких температур*, **41**, 147 (2015).
- [8] Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, С.А. Немов. *ФТТ*, **41**, 2132 (1999).
- [9] М.А. Шубников. *Приборы и техника эксперимента*, **5**, 178 (1981).
- [10] Г.О. Андрианов, В.И. Козуб, Н.Ю. Михайлин, Р.В. Парфеньев, Д.В. Шамшур, А.В. Черняев. *Тез. докл. XII Росс. конф. по физике полупроводников* (Звенигород, 21–25 сентября 2015) с. 219.

Редактор А.Н. Смирнов

Superconducting properties of $(\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95})\text{Te}$ doped with indium under hydrostatic pressure

N.Yu. Mikhailin, R.V. Parfeniev, A.V. Chernyaev, D.V. Shamshur, G.O. Andrianov

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Superconducting properties of a semiconductor alloy $\text{Pb}_{0.05}\text{Sn}_{0.95}\text{Te}$ doped by 5 at% of In were studied at hydrostatic pressure P up to 7 kbar. It was found that at $P > 1.35$ kbar and $T \geq 1.3$ K superconducting transition isn't observed in temperature and magnetic field dependencies of resistivity $\rho(T)$ and $\rho(H)$. Such behavior indicates that pressure increase leads to a decrease of density of states on the Fermi level, which can be interpreted as a pressure-induced shift of indium level deep into the valence band. Obtained data clarify and supplement results of other works on pressure dependencies of critical parameters of superconducting transition in $(\text{Pb}_z\text{Sn}_{1-z})_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{Te}$ with various lead concentration.