

ПРИМЕСНЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД ЛИФШИЦА В ВИСМУТЕ

М.П.Бойко, Н.А.Редько, Н.А.Родионов, В.И.Польшин

По аномалиям температурных и концентрационных зависимостей термоэдс и удельного сопротивления в области фазового перехода Лифшица в висмуте обнаружена тяжелая электронная зона в T точке. Определен энергетический зазор $E_{gT} \cong 190$ мэВ.

В температурном интервале $2 \div 300$ К исследованы термоэдс и удельное сопротивление большой серии монокристаллических образцов висмута, легированного теллуром. Образцы ориентировались вдоль основных кристаллографических осей ($j, \nabla T \parallel C_1$ и C_3). Концентрация носителей в L_s зоне, определявшаяся при гелиевых температурах из слабополевых холловских компонент $R_{13,2}$ и $R_{31,2}$, составляла $n_L = 1,8 \cdot 10^{19} \div 1,5 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$.

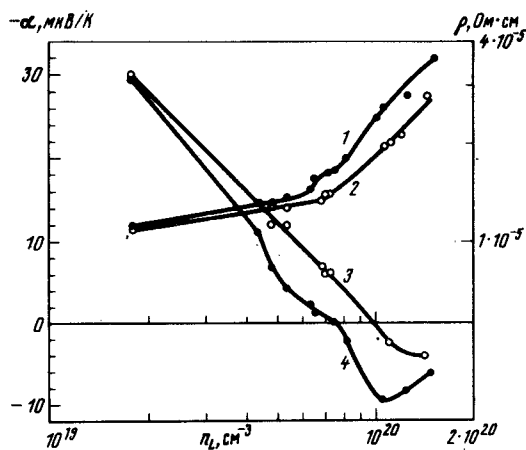
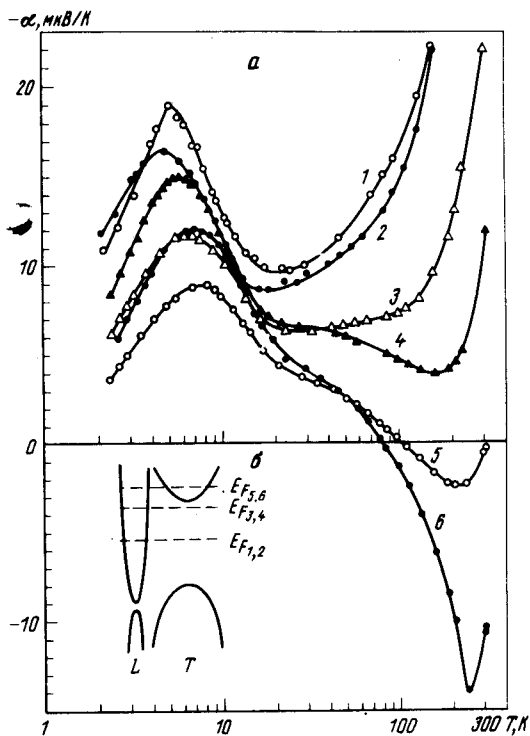


Рис. 2. Концентрационные зависимости удельных сопротивлений: 1 – $\rho_{33}(j \parallel C_3)$, 2 – $\rho_{22}(j \parallel C_1)$ при $T = 4,2$ К; термоэдс 3 – α_{22} , 4 – α_{33} при $T = 200$ К

Рис. 1. а – Температурная зависимость термоэдс висмута, легированного теллуром, α_{22} ($\nabla T \parallel C_1$) – образцы 1, 3, 5 и α_{33} ($\nabla T \parallel C_3$) образцы 2, 4, 6. Концентрация электронов в зоне L_s : 1, 2 – $1,8 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$; 3, 4 – $5,3 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$ и 5, 6 – $1,1 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$; б – схема расположения химпотенциала относительно зон L, T в образцах Bi – Te

На рис. 1, а приведены температурные зависимости термоэдс шести образцов с тремя качественно разными положениями уровня химпотенциала (рис. 1, б). При низких температурах ($T < 20$ К) величина термоэдс определяется вкладом фононного увлечения, что впервые было обнаружено в ¹. В области преобладания диффузионной составляющей ($T > 40$ К) термоэдс изотропна $\alpha_{22} \cong \alpha_{33}$ (образцы 1, 2). Изотропия диффузионной термоэдс сплавов Bi – Te с концентрацией $N_{Te} \geq 0,1$ ат. % в интервале 80 – 300 К наблюдалась ранее ² и связана с диффузионным переносом. Большая анизотропия термоэдс ($\alpha_{33}/\alpha_{22} \cong 2$), имеющаяся в чистом висмуте и обусловленная наличием двух неэквивалентных групп носителей в L и T зонах, исчезает за счет подъема уровня Ферми при легировании донорным теллуром. Аномальными

являются температурные зависимости термоэдс образцов 3 ÷ 6. При $T > 40$ К наблюдается уменьшение термоэдс, а на образцах 5, 6 даже смена ее знака. Пройдя через минимум, α стремится к своему нормальному значению при повышении температуры. В аномальной области появляется сильная анизотропия термоэдс. Это хорошо видно из концентрационных зависимостей $\alpha_{22}(n_L)$, $\alpha_{33}(n_L)$ (рис. 2). При достаточно больших концентрациях электронов наблюдается выход из аномалии ($n_L > 1,1 \cdot 10^{20}$ см⁻³). С аномалией термоэдс коррелирует резкое возрастание удельного сопротивления (рис. 2). Коэффициент анизотропии сопротивлений $K = \rho_{33}/\rho_{22}$, незначительно отличающийся от единицы в однозонных сплавах ($K = 1,03$), увеличивается до $K = 1,3$ при $n_L = 10^{20}$ см⁻³.

Обнаруженные особенности кинетических коэффициентов свидетельствуют о том, что в сильнолегированных сплавах Bi – Te осуществляется примесный фазовый переход (ФП) Лифшица 2¹/2 рода ³. При легировании теллуром уровень Ферми поднимается по зоне проводимости (рис. 1, б) и при некотором критическом значении $E = E_{\text{крит}}$ касается дна новой зоны. Кинетические коэффициенты в области ФП должны иметь корневую особенность $Z^{1/2}$, где $Z = E - E_{\text{крит}}$. Исключением является термоэдс $\alpha \sim Z^{-1/2}$. Вопрос о поведении термоэдс при ФП ($Z \rightarrow 0$) для металлов был рассмотрен Ваксом и др. ⁴. Отметим, что аномалия термоэдс является следствием селективного рассеяния носителей, расположенных выше и ниже уровня Ферми, и возможна только при сильном вырождении электронного газа. В нашем случае это условие довольно хорошо выполняется. Частичное снятие вырождения при комнатных температурах приводит к уменьшению аномальной термоэдс (рис. 1, а). Снять селективность рассеяния возможно также подъемом уровня Ферми выше дна новой зоны, что соответствует выходу из аномалии при увеличении концентрации (рис. 2). Сложная структура кривой $\alpha(n_L)$ может быть связана с влиянием примесных состояний теллура.

Важной особенностью обнаруженного нами ФП является его анизотропный характер. Из анализа анизотропной аномальной термоэдс, удельного сопротивления и интегральной изотропности L зоны однозначно следует, что для новой зоны $\sigma_{33}/\sigma_{22} \ll 1$. Для наблюдения аномалии на эксперименте необходимо, чтобы плотность состояний в новой зоне была достаточно велика ⁵. Из зон, близко расположенных к уровню Ферми ⁶, таким требованиям удовлетворяет T зона. Вычислив значение $E_{\text{крит}} = f(n_{L, \text{крит}})$, можно определить ее энергетическое положение относительно дна L зоны. Вопрос о возможном положении электронной T зоны обсуждался в обзоре ⁷. Большие расхождения в величине энергетического зазора в T точке ($E_{gT} = 170 \div 740$ мэВ) по данным различных авторов связаны с косвенным методом определения E_{gT} по непараболичности валентной T зоны. Прямое наблюдение электронной зоны в нашем эксперименте позволяет сделать более достоверные количественные оценки. С использованием параметров L_s зоны из ⁸ $E_{\text{крит}} \cong 230$ мэВ. Тогда в приближении жестких зон $E_{gT} \cong 190$ мэВ.

Отметим, что метод исследования зонной структуры по аномалии термоэдс в области ФП оказался эффективным в интервале температур и концентраций недоступных для осцилляционных методик. На определенную универсальность этого метода при исследовании многозонных материалов указывает также успешное изучение валентной зоны сплавов Bi – Sb ⁹.

Литература

1. Кузнецов М.Е., Шалыт С.С. Письма в ЖЭТФ, 1967, 6, 745; Коренблит И.Я., Кузнецов М.Е., Шалыт С.С. ЖЭТФ, 1969, 56, 8.
2. Гицу Д.В., Иванов Г.А., Попов А.Н. ФТТ, 1962, 4, 22; Грабов В.М., Иванов Г.А. ФТТ, 1966, 8, 2460.
3. Лифшиц И.М. ЖЭТФ, 1960, 38, 1569.
4. Вакс В.Г., Трефилов А.В., Фомичев С.В. ЖЭТФ, 1981, 80, 1613.
5. Грязнов О.С., Иванов Г.А., Мойжес Б.Я., Наумов В.Н., Немчинский В.А., Родионов Н.А., Редько Н.А. ФТТ, 1982, 24, 2335.
6. Абрикосов А.А., Фальковский Л.А. ЖЭТФ, 1962, 43, 1089.
7. Эдельман В.С. УФН, 1977, 123, 257.

8. Брандт Н.Б., Германн Р., Голышева Г.И., Девяткова Л.И., Кусник Д., Краак В., Пономарев Я.Г. ЖЭТФ, 1982, 83, 2152.

9. Редько Н.А., Родионов Н.А. Письма в ЖЭТФ, 1985, 42, 246.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
6 ноября 1985 г.
