

## ПЕРЕХОД ПОЛУПРОВОДНИК - "КВАЗИМЕТАЛЛ" - ПОЛУПРОВОДНИК В СПЛАВАХ $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ДАВЛЕНИЯ

Н.Б.Брандт, Х.Диттманн, Я.Г.Пономарев, С.М.Чудинов

1. Исследовано влияние давления  $p$  ( $0 \leq p \leq 20$  кбар) на энергетический спектр сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  при  $0 < x \leq 0,15$  путем измерения гальваномагнитных характеристик как в предельно слабых, так и в сильных магнитных полях  $H$  в интервале температур  $1,5 - 300^\circ\text{K}$ .

2. В сплавах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  (при  $x > 0,05$ ) обнаружен переход под действием давления  $p$  (при  $H = 0$ ) из полупроводникового состояния в новое (названное "квазиметаллическим"), характеризующееся аномально малыми значениями энергетической щели  $\epsilon_g$  и эффективных масс носителей тока. Переход происходит в результате сближения под действием давления термов  $L_\sigma$  и  $L_s$  (обозначения взяты из [1]), определяющих при  $p = 1$  бар и  $x > 0,05$  дно зоны проводимости и потолок валентной зоны в точке  $L$ , приведенной зоны Бриллюэна, соответственно.

3. Изменение структуры энергетического спектра сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  с ростом  $x$  при атмосферном давлении происходит следующим образом (рис. 1, а). Потолок валентной зоны в  $T$  (терм  $T_{4\frac{1}{2}}$  [1]) опускается относительно термина  $L_s$  (два зоны проводимости в  $L$  при  $x < 0,05$ ), так что при  $x \sim 0,065$  термы  $T_{4\frac{1}{2}}$  и  $L_\sigma$  пересекаются. В то же время термы  $L_s$  и  $L_\sigma$  сближаются [1-3], и щель  $\epsilon_g$  между ними становится минимальной при  $x \sim 0,05$ . При  $x > 0,05$  термы  $L_s$  и  $L_\sigma$  обмениваются местами, а щель  $\epsilon_g$  растет с ростом  $x$ .

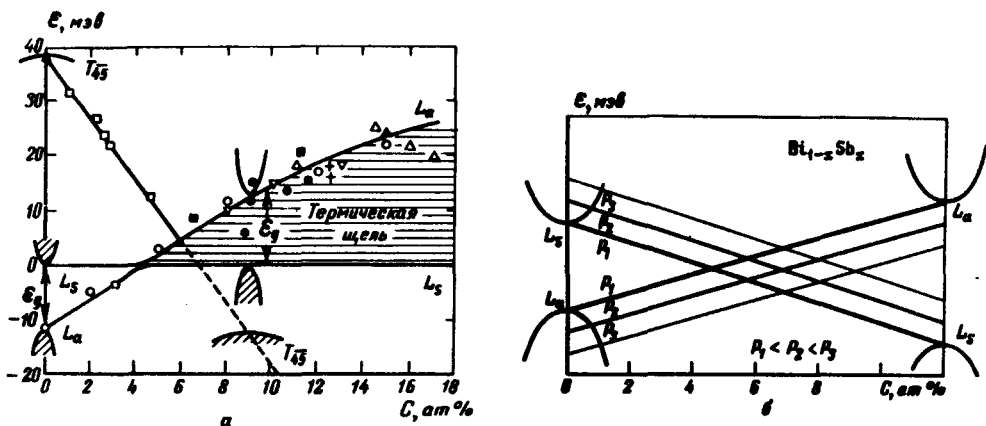


Рис. 1. *a* – зависимость структуры энергетического спектра сплавов  $Bi_{1-x}Sb_x$  от концентрации сурьмы  $x$  при атмосферном давлении:  $\circ$  – [2],  $\bullet$  – [8],  $\blacktriangle$  – [4],  $\triangle$  – [5],  $\nabla$  – [6],  $+-$  [7],  $\square$  и  $\blacksquare$  – данные настоящей работы; *b* – качественный вид зависимости энергии  $\epsilon$  термов  $L_\beta$  и  $L_\alpha$  от давления  $p$  в сплавах  $Bi_{1-x}Sb_x$  при разных  $x$

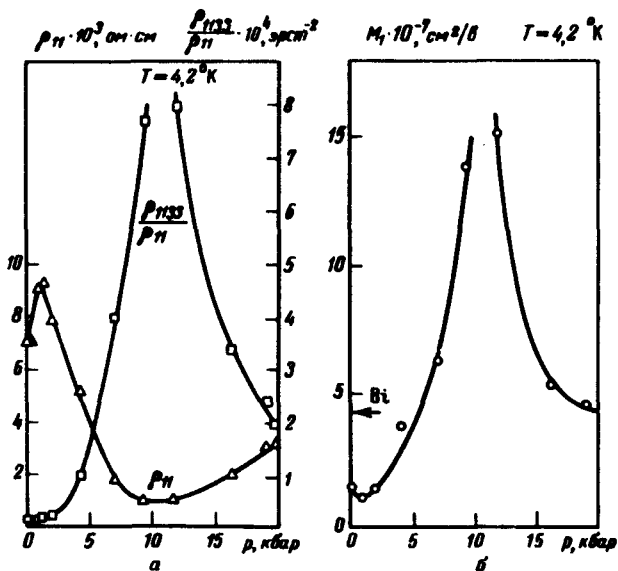


Рис. 2. *a* – зависимость удельного сопротивления  $\rho_{11}$  (ток параллелен бинарной оси) и коэффициента поперечного магнитосопротивления  $\rho_{11,33}/\rho_{11}$  (поле  $H$  параллельно тригональной оси) у сплава  $Bi_{85}Sb_{15}$  от давления  $p$  при  $T = 4,2^\circ K$ ; *b* – зависимость подвижности (вдоль бинарной оси) электронов  $\mu_1$  у сплава  $Bi_{85}Sb_{15}$  ( $n$ -тип,  $N \cong 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) от давления  $p$  при  $T = 4,2^\circ K$

4. Исследование температурных зависимостей компонент гальваномагнитного тензора у сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  (при  $\mu H \ll 1$ , где  $\mu$  – средняя подвижность носителей) в диапазоне  $0 \leq p \leq 20$  кбар показало, что под действием  $p$  потолок валентной зоны в  $T$  смещается вниз относительно терма  $L_s$  со скоростью  $\sim 1,35 \cdot 10^{-6}$  эв/бар, практически не зависящей от  $x$ . Для полуметаллических сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  с  $x < 0,06$  были определены критические давления перехода в полупроводниковую фазу и отсюда – энергия перекрытия зон при  $p = 1$  бар (рис. 1, а). Было установлено, что при  $x > 0,05$  щель  $\epsilon_g$  сначала уменьшается с ростом давления  $p$  (со скоростью  $\partial \epsilon_g / \partial p = -2,6 \cdot 10^{-6}$  эв/бар), становится минимальной при некотором  $p = p^*$ , зависящем от  $x$ , а затем растет с увеличением  $p$ . Таким образом, у сплавов с  $x > 0,05$  под действием давления термы  $L_a$  и  $L_s$  вновь обмениваются местами. Область "квазиметаллического" состояния лежит вблизи  $p^*$ , а при  $p > p^*$  происходит обратный переход: "квазиметалл" – полупроводник. Качественный вид зависимости энергии термов  $L_s$  и  $L_a$  от давления при равных  $x$  приведен на рис. 1, б.

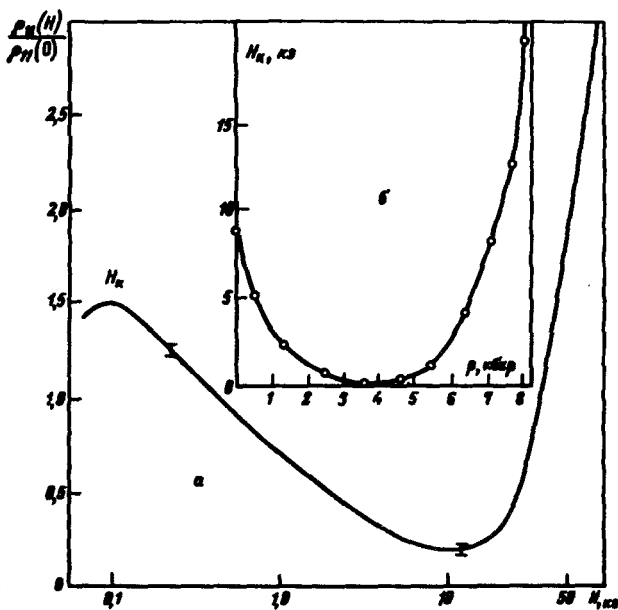


Рис. 3. а – зависимость удельного сопротивления  $\rho_{11}(H)$ , измеренного вдоль бинарной оси в продольном магнитном поле  $H$ , у сплава  $\text{Bi}_{91.1}\text{Sb}_{8.9}$  от величины  $H$  при давлении  $p \approx p^*$  и  $T = 4,2^\circ\text{K}$  ( $p^* \approx 3,2$  кбар); б) – зависимость критического поля  $H_c$  у сплава  $\text{Bi}_{91.1}\text{Sb}_{8.9}$  от давления  $p$  при  $T = 4,2^\circ\text{K}$

5. Переход полупроводник – "квазиметалл" сопровождается резким ростом подвижностей носителей тока в полупроводниковых сплавах  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  (как  $p$ - , так и  $n$ - типа), что связано с сильным уменьшением эффективных масс электронов и дырок в  $L$  – экстремумах при  $\epsilon_g \rightarrow 0$ . При этом падают удельные сопротивления и сильно растут коэффициенты поперечного магнитосопротивления (рис. 2, а). Область магнитных полей, где выполняется условие:  $\mu H \ll 1$ , сужается при  $p = p^* + (20 + 30)$  э ( $p = 1$  бар) до  $(1 + 2)$  э, откуда следует, что

подвижности носителей у исследованных сплавов при  $p = p^*$  значительно превосходят подвижности в чистом висмуте [9]. На рис. 2, б приведена зависимость от давления  $p$  подвижности электронов в  $L$  у сплава с  $x = 0,15$  ( $n$ -тип), рассчитанная из компонент гальваномагнитного тензора.

б. Сближение и "отражение" экстремумов в точке  $L$  в сплавах  $Bi_{1-x}Sb_x$  наблюдалось также в сильных магнитных полях (переходы полупроводник - "квазиметалл" - полупроводник в магнитном поле) [3]. При этом продольное магнитосопротивление проходило через максимум (в поле  $H = H_k$ ), падало до величины, много меньшей значения при  $H = 0$ , а затем возрастало по экспоненциальному закону. При  $\epsilon_g \approx 6$  мэв для наблюдения переходов этого типа требовались поля порядка  $200 + 300$  кэ. В полупроводниковых сплавах  $Bi_{1-x}Sb_x$  с помощью давления  $p$  можно получать вещества с очень малыми  $\epsilon_g$  и воспроизводить переходы указанного типа в постоянных полях с напряженностью в несколько десятков килоэрстед. На рис. 3, в качестве примера, изображены зависимости продольного магнитосопротивления от  $H$  для сплавов  $Bi_{1-x}Sb_x$  с  $x = 0,089$  при давлении  $p \sim p^*$  и  $H_k$  от  $p$ . Как видно,  $H_k$  проходит через минимум с ростом  $p$ , что является прямым указанием на сближение и "отражение" зон в  $L$  под действием давления. Характер полученных зависимостей прекрасно коррелирует с результатами, полученными в импульсных полях [3], и является убедительным доказательством правильности их интерпретации.

Физический факультет  
Московского  
государственного университета  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
31 декабря 1969 г.  
После переработки  
9 февраля 1970 г.

### Литература

- [1] S.Golin. Phys. Rev., 176, 830, 1968.
- [2] E.J.Tichovolsky., J.G.Mavroides. Solid State Comm. 7, 927, 1969.
- [3] N.B.Brandt, E.A.Svistova. J. Low Temp. Phys., 2, 1, 1970.
- [4] D.M.Brown, S.J.Silverman. Phys. Rev., 136, A 290, 1964.
- [5] D.M.Brown, F.K.Heumann, J. Appl. Phys., 35, 1947, 1964.
- [6] M.Dugue. Phys. Stat. Sol. 11, 149, 1965.
- [7] Н.Б.Брандт, Я.Г.Пономарев. ЖЭТФ, 50, 367, 1966.
- [8] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Р.Г.Валеев. ЖЭТФ, 55, 469, 1968.
- [9] R.N.Zitter. Phys. Rev., 127, 1471, 1962.