

20  
24

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗОН И ПЕРЕХОД ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЕ СОСТОЯНИЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Ю.Г.Каширский

1. При исследовании полупроводниковых сплавов Bi – Sb (в области концентраций Sb C = 8,6 + 16 ат.%, когда между экстремумами  $L_1$  и T возникает энергетическая щель) в полях до 500 кэ при температурах жидкого гелия было обнаружено, что при ориентации поля вдоль бинарной оси продольное магнитосопротивление  $\rho_H(H)$  проходит через максимум, падает и затем вновь возрастает. Области падения  $\rho_H(H)$  соответствует столообразный участок на кривых поперечного магнитосопротивления  $\rho_L(H)$  [1, 2].

Такое поведение  $\rho(H)$  интерпретировалось, как переход сплавов из полупроводникового в квазиметаллическое состояние и из квазиметаллического состояния вновь в полупроводниковое в результате сначала сближения экстремумов  $L_1$ , расположенных в одной точке фазового пространства, а затем их расхождения при дальнейшем увеличении магнитного поля. (Экстремум T при этой ориентации магнитного поля опускается вниз. Характер смещения экстремумов в магнитном поле схематически изображен на рис. 1, а).

Такой характер смещения экстремумов  $L_1$  в магнитном поле согласуется с результатами теоретических расчетов Бараффа [3].

2. Можно было предположить, что Bi и металлические сплавы Bi – Sb (с концентрацией Sb меньше 8,5 ат.%), у которых экстремумы  $L_1$  и T перекрываются, при ориентации магнитного поля вдоль бинарной оси в сильных полях должны переходить в полупроводниковое (диэлектрическое при  $T = 0^\circ\text{K}$ ) состояние (рис. 1, б). В области полей  $H < H_K'$ , экстремумы  $L_1$  и T смещаются в магнитном поле вниз. В результате того, что  $L_1$  смещается быстрее, чем T, перекрытие зон и концентрации носителей тока увеличивается [4, 5]. При  $H > H_K'$  характер смещения границ зон качественно меняется: экстремум T продолжает опускаться вниз (по-видимому, с той же скоростью), но зато экстремум  $L_1$  начинает подниматься вверх. Согласно [3] взаимодействие экстремумов

$L_1$  и  $L_2$ , при их сближении можно рассматривать как отражение. В результате этого при  $H = H_K''$  перекрытие зон  $L_1$  и  $T$  обращается в нуль, а при  $H > H_K''$  образуется энергетическая щель и металл превращается в полупроводник. (Затем, что экстремумы  $L_1$  и  $T$  смещаются независимо друг от друга, так как они расположены в различных точках фазового пространства). Очевидно, что поле  $H_K''$  максимально у висмута и должно уменьшаться в сплавах Bi – Sb за счет уменьшения величины  $\Delta E_0(C)$  перекрытия экстремумов  $L_1$  и  $T$  при  $H = 0$ . (Если соотношение спиновых и орбитальных масс при этом существенно не меняется).

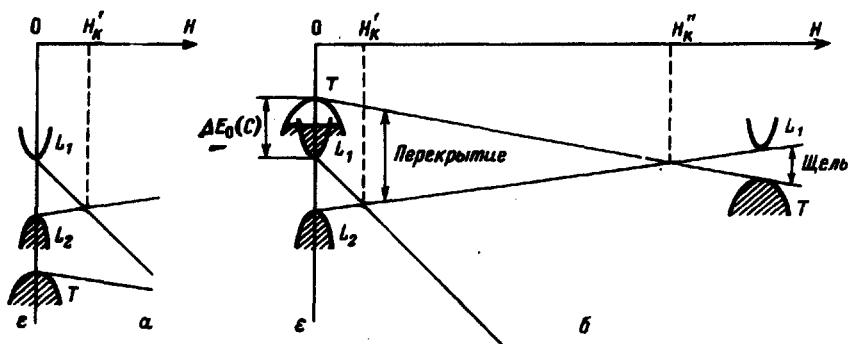


Рис. 1

3. Для обнаружения этого эффекта было исследовано  $\rho_{\parallel}(H)$  и  $\rho_{\perp}(H)$  у монокристаллических образцов Bi – Sb (с концентрацией Sb, по данным химического анализа, 6,5 и 4,9 ат.%) при ориентации магнитного поля вдоль бинарной оси в полях до 600 кз при температурах 1,5 + 20°К.

У сплава Bi<sub>93,5</sub>Sb<sub>6,5</sub> изменение электрического сопротивления  $\rho$  при охлаждении составляло  $\rho_{300}/\rho_{4,2} = 1,6$ , у сплава Bi<sub>95,1</sub>Sb<sub>4,9</sub> – 3<sup>1)</sup>. По данным осцилляционных измерений в слабых магнитных полях величина перекрытия зон  $L_1$  и  $T$  у образца 4,9 ат.% Sb составляет 11 + 12 мэв.

Результаты измерений магнитосопротивления при  $T = 4,2^{\circ}\text{K}$  представлены на рис. 2,3. На рис. 2 изображены кривые продольного магнитосопротивления сплавов Bi<sub>93,5</sub>Sb<sub>6,5</sub> (кривая 1) и Bi<sub>95,1</sub>Sb<sub>4,9</sub> (кривая 2). В верхней части рисунка даны результаты измерений одного из образцов в постоянных магнитных полях. Резкое возрастание со-

<sup>1)</sup> Монокристаллы сплавов Bi – Sb были любезно предоставлены нам Г.А.Ивановым

противления в слабых магнитных полях переходит в падение; после которого в достаточно широком интервале полей сопротивление сохраняет приблизительно постоянное значение. У образца  $\text{Bi}_{93,5} \text{Sb}_{6,5}$  при поле 100 кэ начинается резкое возрастание сопротивления. В поле  $\sim 480$  кэ  $\rho_{\parallel}(H)$  увеличивается в 3000 раз. Аналогичное возрастание сопротивления у образца  $\text{Bi}_{95,1} \text{Sb}_{4,9}$  происходит в полях, превышающих 400 кэ. В поле 600 кэ  $\rho_{\parallel}(H)$  увеличивается в  $\sim 100$  раз.

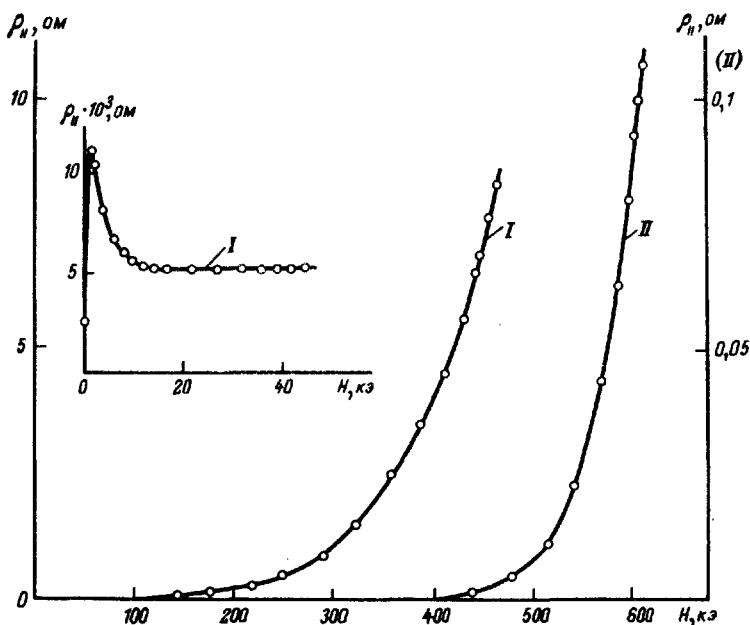


Рис. 2

На рис. 3 изображены зависимости поперечного магнитосопротивления для образцов тех же концентраций. У образца  $\text{Bi}_{93,5} \text{Sb}_{6,5}$  характерной особенностью кривой  $\rho_{\perp}(H)$  является область замедленного возрастания сопротивления в магнитном поле. При более сильных полях сопротивление резко возрастает.

При повышении температуры величина возрастания магнитосопротивления уменьшается и возрастание начинается в больших полях.

У образца  $\text{Bi}_{95,1} \text{Sb}_{4,9}$  на кривой  $\rho_{\perp}(H)$  в области полей, меньших 400 кэ наблюдаются осцилляции (эффект Шубникова – де Гааза), сильно искажающие монотонную составляющую магнитосопротивления.

Отметим, что во всех случаях сопротивление в сильных магнитных полях возрастает экспоненциально

$$\rho \sim \exp \{ \alpha(H - H_K'') / kT \} \quad (\text{при } H > H_K'')$$

с близкими значениями коэффициента  $\alpha$ . Металлический характер зависимости сопротивления от температуры при  $H < H''_K$  переходит в полупроводниковый при  $H > H''_K$ .

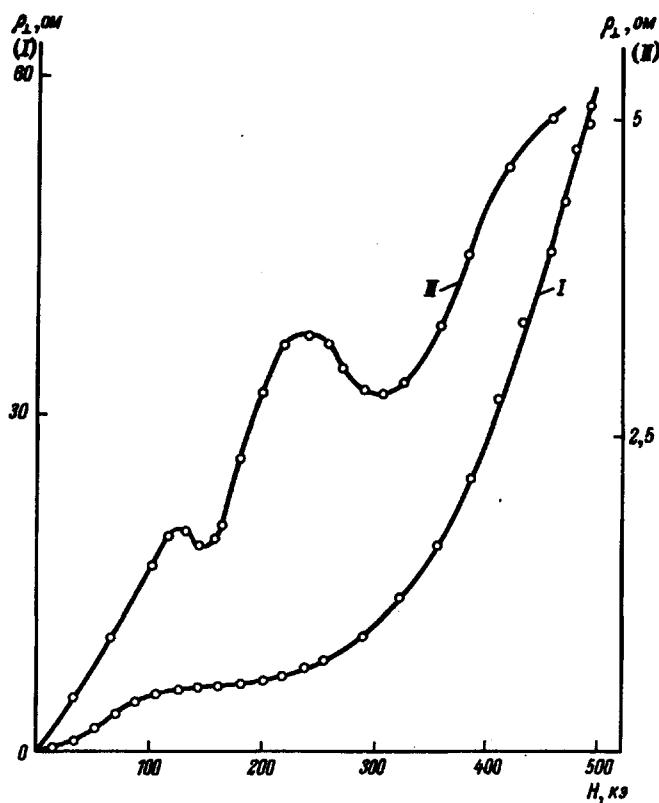


Рис. 3

4. Экспоненциальное возрастание магнитосопротивления при  $H > H''_K$  появление в сильных полях зависимости электрического сопротивления от температуры полупроводникового типа, зависимость поля  $H''_K$  от состава сплава (величина перекрытия  $\Delta E_0(C)$  зон при  $H = 0$ ) — указывают на то, что при поле  $H_K$  перекрытие зон в энергетическом спектре исчезает и при  $H > H''_K$  появляется энергетическая щель. При этом металлические сплавы Bi — Sb переходят в полупроводниковое состояние.

Предварительная оценка показывает, что для наблюдения аналогичного перехода у висмута при ориентации магнитного поля вдоль бинарной оси необходимы поля около 1,5 млн. эрстед.

Московский  
Государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступило в редакцию  
30 декабря 1968 г.

## Литература

- [ 1 ] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Ю.Г.Каширский, Л.В.Лынько. Письма в ЖЭТФ, 7, 12, 1968.
- [ 2 ] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Ю.Г.Каширский, Л.В.Лынько. ЖЭТФ, 56, 65, 1969.
- [ 3 ] G. A. Baraff. Phys. Rev., 137, A842, 1965.
- [ 4 ] G. E. Smith, G. A. Baraff, I. M. Rowell. Phys. Rev., 135, 4A, 1118, 1964.
- [ 5 ] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Г.Х.Табиева. Письма в ЖЭТФ, 4, 1, 1966.