

## АНОМАЛИИ ПРОДОЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЛАВОВ $\text{Bi-Sb}$ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ДО 500 кэ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ

*Н.Б.Брандт, Е.А.Свицова, Ю.Г.Каширский, Л.В.Дынько*

1. В [1] была рассмотрена возможность различного типа электронных фазовых переходов в магнитном поле  $H$ , связанных с качественным изменением энергетического спектра электронов. Один тип такого рода переходов – переход полупроводника (диэлектрика при  $T = 0^\circ\text{K}$ ) в металл в магнитном поле был обнаружен в [2] и подробно исследован в [3]. Превращение полупроводника в металл наблюдалось в системе сплавов в области концентраций  $\text{Sb } 8,5 \div 16 \text{ ат.}\%$  при ориентации магнитного поля параллельно тригональной оси и регистрировалось по резкому возрастанию электропроводности образцов в поперечном магнитном поле, сопровождающемуся появлением металлической зависимости сопротивления от температуры. При ориентации поля перпендикулярно тригональной оси у исследованных образцов поперечное магнитосопротивление непрерывно возрастало в магнитном поле, не обнаруживая тенденции к уменьшению.

Представляло интерес исследовать, каким образом электронные переходы проявляются на компонентах тензора продольного магнитосопротивления, когда вуалирующий эффект сильного возрастания сопротивления в поле должен быть значительно слабее и явления, связанные с изменением концентрации носителей тока, должны проявляться более резко.

2. В настоящем сообщении излагаются результаты исследования продольного магнитосопротивления монокристаллов полупроводниковых сплавов  $\text{Bi-Sb}$  с концентрацией сурьмы 8,8; 8,9; 10,5 ат.% в магнит-

ном поле до 500 кэ при температуре жидкого гелия. Электрическое сопротивление у исследованных образцов возрастало при охлаждении от 300 до 4,2°К (при  $H = 0$ ) в  $100 \pm 1000$  раз.

Типичные зависимости продольного сопротивления от поля при  $T = 4,2^\circ\text{К}$  представлены на рис. 1 и 2. При ориентации поля и тока параллельно биссекторной оси (рис. 1) сопротивление монотонно возрастает в магнитном поле, причем характер зависимостей  $\rho$  от  $H$  меняется при увеличении концентрации Sb: сильное возрастание  $\rho$  в поле у об-

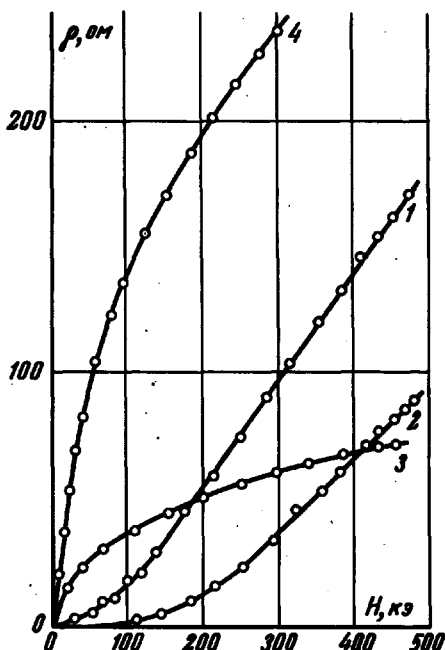


Рис. 1

разцов с концентрацией 8,8 (кривая 1); 8,9 ат.% Sb (кривая 2) при больших концентрациях Sb уступает место зависимостям, имеющим тенденцию к насыщению (10,5 ат.% – кривая 3). Поперечное магнитосопротивление при этой ориентации монотонно возрастает в магнитном поле, обнаруживая тенденцию к насыщению, при больших концентрациях Sb (рис. 1, кривая 4 – 8,8 ат.% Sb).

Наиболее удивительный вид имеют зависимости  $\rho(H)$  при ориентации поля и тока параллельно бинарной оси кристаллов. При этой ориентации сопротивление сначала резко возрастает в поле, проходит через максимум, уменьшается до значения меньшего, чем при  $H = 0$ , сохраняется постоянным в некотором интервале полей и затем вновь начинает воз-

растать. При увеличении концентрации Sb максимум сопротивления слабо смещается в область сильных полей; значительно быстрее смещается в область сильных полей начало вторичного роста сопротивления в магнитном поле.

На кривых поперечного магнитосопротивления при этой ориентации магнитного поля наблюдается (в отличие от ориентации поля параллельно биссекторной оси) нерегулярность, выражающаяся в замедлении роста сопротивления в некотором интервале полей (рис. 2, кривая 4).

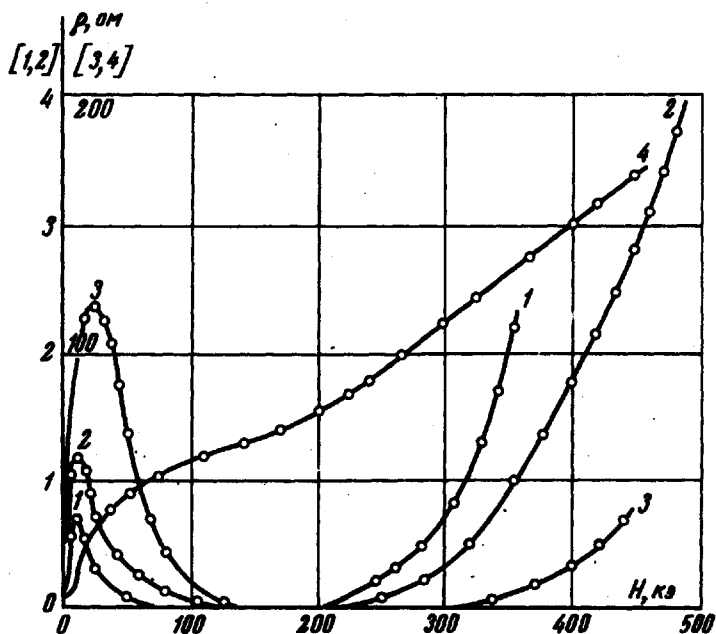


Рис. 2. Зависимость  $\rho$  от  $H$  для образцов  $\text{Bi}_{91,2}-\text{Sb}_{8,8}$  (кривая 1),  $\text{Bi}_{91,1}-\text{Sb}_{8,9}$  (кривая 2),  $\text{Bi}_{89,5}-\text{Sb}_{10,5}$  (кривая 3), при  $H \parallel i \parallel$  бинарной оси.  $\text{Bi}_{89,5}-\text{Sb}_{10,5}$  (кривая 4) при  $H \parallel$  бинарной оси,  $i \parallel$  биссекторной оси,  $T = 4,2^\circ\text{K}$ .

3. Как было показано в [3], резкое уменьшение поперечного магнитосопротивления при ориентации  $H$  параллельно тригональной оси связано с возникновением в магнитном поле перекрытия экстремумов  $T$  и  $L_1$  (рис. 3), расположенных в различных точках зоны Бриллюэна. Образовавшееся при этом перекрытие продолжает возрастать в поле, в результате чего непрерывное увеличение концентрации носителей тока компенсирует обычный эффект увеличения сопротивления в поперечном поле.

Иная картина должна наблюдаться при сближении экстремумов  $L_1$  и  $L_2$ , расположенных в зоне Бриллюэна друг под другом. Характер изме-

нений в спектре при сближении экстремумов  $L_1$  и  $L_2$  не совсем ясен. Однако, можно ожидать, что в результате условия непересекаемости энергетических уровней перекрытие зон в этом случае может возникнуть лишь в результате их искривления, так что концентрация носителей тока будет слабо (и, возможно, нерегулярным образом) возрастать при увеличении напряженности магнитного поля.

При ориентации поля параллельно биссекторной оси экстремумы  $L_1$  и  $T$ , по-видимому, очень слабо смещаются в магнитном поле, так что

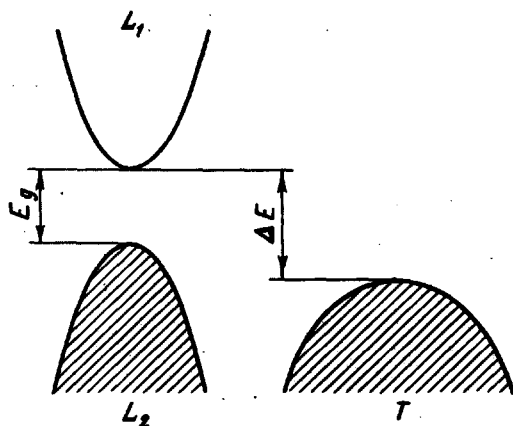


Рис. 3. Энергетический спектр полупроводниковых сплавов  $Bi - Sb$

величина щели  $\Delta E$  практически не меняется в полях до  $400 \text{ кэ}$  [3]. Заметим, что при этой ориентации смещение  $L_1$  вниз должно быть максимальным вследствие минимального значения орбитальной и спиновой эффективных масс [4]. Таким образом, при ориентации поля вдоль бинарной оси аномалии, наблюдаемые на кривых продольного магнитосопротивления связаны, по-видимому, в основном со смещением экстремумов  $L_2$ . Так как циклотронные массы дырок в  $L_2$  малы, то достаточно небольшого превышения спинового расщепления над орбитальным, чтобы экстремумы  $L_2$  при ориентации  $H \parallel$  бинарной оси быстро смещались вверх. Скорость смещения экстремумов  $L_1$  и  $L_2$  друг относительно друга может меняться в магнитном поле, так как при изменении щели  $E_g$  меняются эффективные массы носителей тока в  $L_1$  и  $L_2$  [5]. Щель  $E_g$  слабо увеличивается в сплавах  $Bi - Sb$ . Слабой зависимости  $E_g$  от концентрации  $Sb$  соответствует слабое смещение максимума на кривых  $\rho(H)$  вправо при переходе к сплавам с большим содержанием  $Sb$ .

Таким образом, по-видимому, можно считать, что появление максимума на кривых  $\rho(H)$  при  $H \parallel$  бинарной оси, после которого сопротивление сильно уменьшается, связано с возникновением своеобразного перекрытия экстремумов  $L_1$  и  $L_2$ . При возрастании этого "перекрытия" в магнитном поле соотношение спиновых и орбитальных масс может измениться. Не исключена возможность, что вторичное возрастание сопротивления в сильных магнитных полях связано с расхождением экстремумов  $L_1$  и  $L_2$  в результате такого изменения.

Отсутствие подобных аномалий на кривых продольного магнитосопротивления (в полях до  $500 \text{ кэ}$ ) при ориентации  $H$  параллельно биссекторной оси указывает на то, что при этой ориентации спиновое расщепление уровней в  $L_2$  не превышает орбитального, либо превышает очень слабо.

Пользуемся случаем выразить искреннюю признательность Г.И.Иванову за любезное предоставление высококачественных монокристаллов и А.И.Шальникову за внимание к работе.

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

Поступило в редакцию  
9 апреля 1968 г.

#### Литература

- [1] М.Я.Азбель, Н.Б.Брандт. ЖЭТФ, 48, 1206, 1965.
- [2] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Р.Г.Валеев. Письма ЖЭТФ, 6, 724, 1967.
- [3] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Р.Г.Валеев. ЖЭТФ, 55, вып. 8, 1968.
- [4] G. E. Smith, G. A. Baruff, J. M. Rowell. Phys. Rev., 135A, 1118, 1964.
- [5] M. H. Cohen. Phys. Rev., 121, 387, 1961.