

## НАБЛЮДЕНИЕ ПЕРЕХОДА ПОЛУПРОВОДНИК-МЕТАЛЛ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Н.Б.Брандт, Е.А.Сенчкова, Р.Г.Валеев*

1. В работе [1] было показано, что в зависимости от соотношения спиновой и циклотронной эффективных масс носителей тока у веществ с четным числом электронов на элементарную ячейку может наблюдаться в достаточно сильных магнитных полях переход из металлического в полупроводниковое (диэлектрическое при 0°К) состояние или, наоборот, переход полупроводника (диэлектрика) в металл.

Эти эффекты проще всего наблюдать на объектах с малым перекрытием зон или малой энергетической щелью между зонами. Из металлов минимальным перекрытием обладают висмут и сурьма. Однако, оба они

не переходят в диэлектрическое состояние в магнитном поле: у висмута перекрытие зон возрастает в поле за счет малой спиновой массы носителей [2], у сурьмы достигнутые поля ( $H = 450$  кэ) недостаточны для перехода в ультраквантовую область [3]. С этой точки зрения особый интерес представляет система твердых растворов Bi – Sb в области кон-

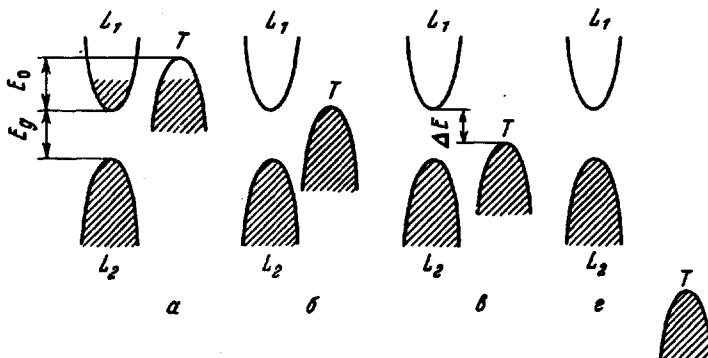


Рис.1. Зонная структура для: *a* – чистого Bi; *b* – Bi<sub>95</sub>Sb<sub>5</sub>; *c* – Bi<sub>91</sub>Sb<sub>9</sub>; *d* – Bi<sub>88</sub>Sb<sub>12</sub>

центраций от 0 до  $\sim 10$  ат.-% Sb. При увеличении концентрации сурьмы перекрытие зон уменьшается и при  $\sim 5$  ат.-% сурьмы обращается в пуль, после чего в спектре Bi – Sb образуется энергетическая щель [4,5].

2. Исследование твердых растворов в области концентраций 0-5 ат.-% Sb\* показывает, что перекрытие в магнитном поле увеличивается, т.е. имеет место картина, аналогичная висмуту. Поэтому можно было ожидать, что при содержании сурьмы, превышающем 5 ат.-%, когда появляется щель, в сильных магнитных полях будет происходить уменьшение щели и при некотором критическом значении поля  $H_{\text{кр}}$  щель обратится в нуль, и полупроводниковый сплав перейдет в металлическое состояние.

3. В настоящей работе изложены результаты исследования магнето-сопротивления у монокристаллических образцов Bi – Sb с концентрацией сурьмы  $\sim 5$ ,  $\sim 9$  и  $\sim 12$  ат.-%, в магнитном поле до 420 кэ при температуре жидкого гелия в различных кристаллографических ориентациях. Методика измерений аналогична описанной в работе [2]. Образцы имели форму параллелепипедов размерами  $\sim 2 \times 0,3 \times 0,3$  мм.

Измерения температурной зависимости электрического сопротивления при  $H = 0$  показали полупроводниковую зависимость для образцов всех составов. Слабое возрастание сопротивления при понижении температуры у образцов состава Bi<sub>95</sub>Sb<sub>5</sub> ( $\rho_{4,2^\circ\text{K}}/\rho_{300^\circ\text{K}} = 3,5$ ) указывает на то, что заметной энергетической щели у них еще не образовалось. У образцов Bi<sub>91</sub>Sb<sub>9</sub> и Bi<sub>88</sub>Sb<sub>12</sub> наблюдается сильное возрастание сопротивления полупроводникового типа ( $\rho_{4,2^\circ\text{K}}/\rho_{300^\circ\text{K}} = 107$  для Bi<sub>91</sub>Sb<sub>9</sub> и  $\rho_{4,2^\circ\text{K}}/\rho_{300^\circ\text{K}} = 220$  для Bi<sub>91</sub>Sb<sub>9</sub>). Близкий к экспоненциальному ха-

рактер зависимости в области температур 30-120°К позволяет оценить величину энергетической щели  $\Delta E$  у сплавов этого состава. Величины  $\Delta E$  у трех исследованных образцов состава  $\text{Bi}_{91}\text{Sb}_9$  приблизительно совпадают и равны  $\sim 17$  мэв. Соответствующая зонная структура изображена на рис. 1, в.

У сплава  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$  по данным работы [6], экстремум  $T$  расположен существенно ниже  $L_2$ . Поэтому экспоненциальное возрастание сопротивления у сплавов этой концентрации связано с щелью  $E$  между экстремумами  $L_1$  и  $L_2$  и не определяет положения максимума  $T$  рис. 1, г.

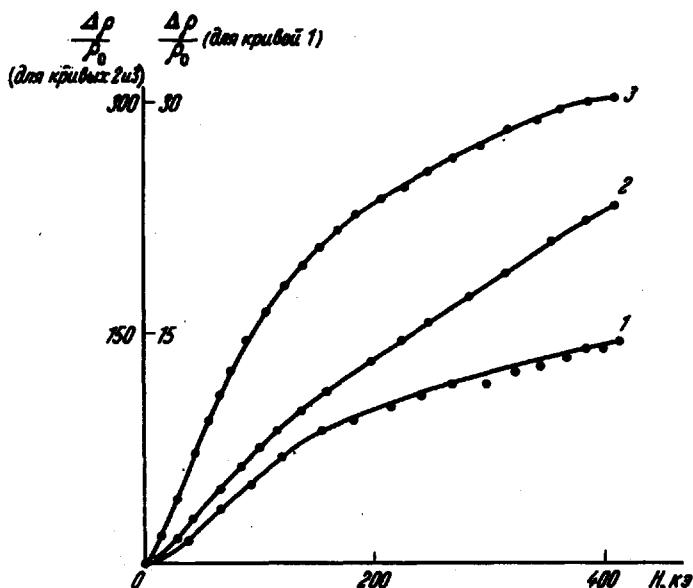


Рис.2. Зависимость относительного изменения электрического сопротивления от магнитного поля при  $T = 4,2^\circ\text{K}$  для образцов: 1 –  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ ;  $H \parallel$  тригональной оси;  $\rho_{4,2^\circ\text{K}} / \rho_{300^\circ\text{K}} = 220$ ; 2 –  $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$ ;  $H \parallel$  биссекторной оси;  $\rho_{4,2^\circ\text{K}} / \rho_{300^\circ\text{K}} = 3,5$ ; 3 –  $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$ ;  $H \parallel$  тригональной оси;  $\rho_{4,2^\circ\text{K}} / \rho_{300^\circ\text{K}} = 3,5$

На рис. 2, 3 изображены кривые относительного изменения сопротивления в магнитном поле у сплавов висмут-сульфа трех различных составов при ориентации поля параллельно тригональной и биссекторной осям. Во всех случаях направление тока совпадало с направлением бинарных осей  $\bar{y}$ . У всех трех исследованных образцов состава  $\text{Bi}_{91}\text{Sb}_9$  при ориентации поля параллельно тригональной оси наблюдается эффект резкого уменьшения сопротивления в полях, превышающих 200 кэ.

При направлении магнитного поля параллельно биссекторной оси в полях до 420 кэ эффект уменьшения сопротивления отсутствует. Падение сопротивления не наблюдается также у сплавов  $\text{Bi}_{95}\text{Sb}_5$  и  $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ .

4. Причиной резкого возрастания электропроводности, приводящей к падению сопротивления у сплава  $\text{Bi}_{91}\text{Sb}_9$  при магнитном поле параллельном тригональной оси является возникновение перекрытия зон  $L_1$  и  $T$ . При этой ориентации поля спиновое расщепление уровней Ландау у дырок висмута приблизительно в два раза превышает орбитальное.

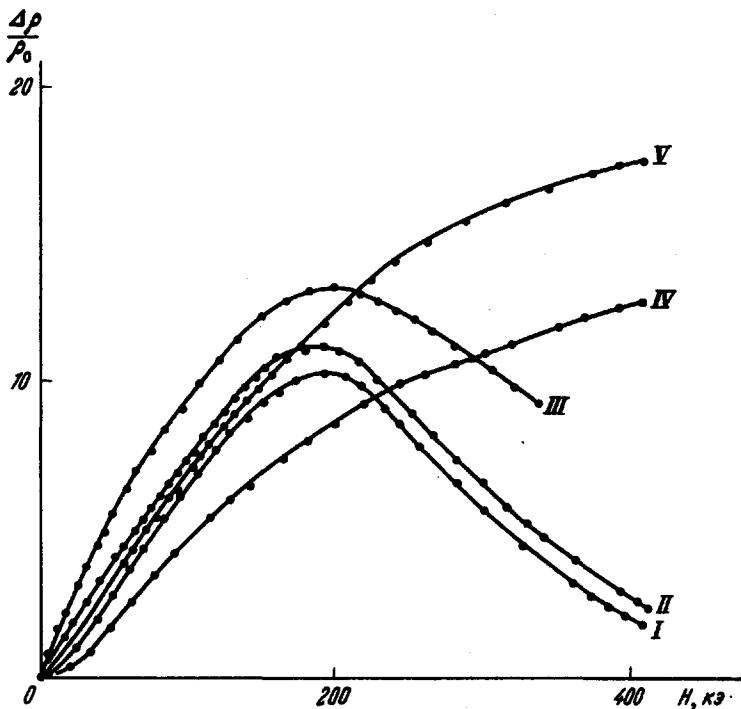


Рис.3. Зависимость относительного изменения электрического сопротивления от магнитного поля при  $T = 4,2^\circ\text{K}$  для образцов: I –  $H \parallel$  тригональной оси;  
 $\rho_{4,2^\circ\text{K}} / \rho_{300^\circ\text{K}} = 122$ ; II –  $H \parallel$  тригональной оси;  
 $\rho_{4,2^\circ\text{K}} / \rho_{300^\circ\text{K}} = 91$ ; III –  $H \parallel$  тригональной оси;  
 $\rho_{4,2^\circ\text{K}} / \rho_{300^\circ\text{K}} = 50$ ; IV –  $H \parallel$  биссекторной оси;  
 $\rho_{4,2^\circ\text{K}} / \rho_{300^\circ\text{K}} = 91$ ; V –  $H \parallel$  биссекторной оси;  
 $\rho_{4,2^\circ\text{K}} / \rho_{300^\circ\text{K}} = 122$

Падение сопротивления означает, что превышение спинового расщепления над орбитальным сохраняется у сплавов  $\text{Bi} - \text{Sb}$  в исследованной области концентраций.

В результате этого верх зоны  $T$  поднимается в магнитном поле на величину:

$$\Delta E_T = \left[ \frac{1}{2} \frac{|e| h}{m_d^* c} \pm \frac{1}{2} \frac{|e| h}{m_{dS}^* c} \right] H,$$

где  $m^*$  – циклотронная эффективная масса дырок,  $m_{\partial s}^*$  – спиновая эффективная масса дырок. У электронов в висмуте при магнитном поле параллельном тригональной оси спиновое расщепление меньше орбитального. Если это соотношение сохраняется и у сплавов висмута с сурьмой, то дно зоны  $L_1$  в поле поднимается на

$$\Delta E_{L_1} = \left[ \frac{1}{2} \frac{|e| h}{m^* c} - \frac{1}{2} \frac{|e| h}{m_{es}^* c} \right] H,$$

где  $m^*$  – циклотронная эффективная масса электронов,  $m_{es}^*$  – спиновая эффективная масса электронов.

Переход от возрастания сопротивления в магнитном поле к падению (при  $H \sim 200$  кэ) соответствует обращению  $\Delta E$  в нуль, т.е. условию

$$\Delta E_T = \Delta E + \Delta E_{L_1}.$$

Отсутствие падения сопротивления при ориентации поля параллельно биссекторной оси согласуется с соотношением спиновых и циклотронных масс при этой ориентации. Исчезновение участка с  $d\rho/dH < 0$  у сплава  $Bi_{88}Sb_{12}$  в области полей до 420 кэ (рис. 2) при соответствующей ориентации  $\beta$  связано с сильным возрастанием щели  $\Delta E$  (рис. 1, г) и указывает на то, что спиновое расщепление дырок у экстремума  $L_2$  слабо превышает или вообще не превышает орбитальное.

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

Поступило в редакцию  
10 июля 1967 г.

### Литература

- [1] М.Я.Азбель, Н.Б.Брандт. ЖЭТФ, 48, 1206, 1965.
- [2] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Г.Х.Табиева. Письма ЖЭТФ, 4, 27, 1966.
- [3] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Т.В.Горская. ЖЭТФ, 53, вып. 10, 1967,  
(в печати).
- [4] A.J. Jain, Phys. Rev., 114, 1518, 1959.
- [5] Н.Б.Брандт, Л.Г.Любутина, Н.А.Крюкова. ЖЭТФ, 53, 134, 1967.
- [6] L.Esaki, J. of the Physical Society of Japan, 21, Supplement, 589, 1966.

---

\* Результаты исследования  $Bi-Sb$  в области концентраций от 0 до 5 ат.% Sb будут опубликованы в ближайшее время.