

## СТРУКТУРА ВАЛЕНТНОЙ ЗОНЫ ТелЛУРИДА ВИСМУТА

*В.В. Сологуб, Р.В. Парфеньев, А.Д. Голецкая*

Предлагается новая модель валентной зоны теллурида висмута для объяснения обнаруженных при гелиевых температурах особенностей осцилляций Шубникова — де Гааза в монокристаллах  $p$ - $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  с концентрацией дырок  $2,9 \cdot 10^{18} - 2,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

В теллуриде висмута ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $E_g = 0,13 \text{ эВ}$  [1]), пространственная группа  $D_{3d}^5$ ) с помощью эффекта Шубникова — де Гааза (ШГ) изучалось изменение формы поверхности Ферми дырок в зависимости от заполнения валентной зоны. Экстремальные сечения поверхности Ферми определялись из периодов осцилляций ШГ при изменении ориентации маг-

нитного поля  $\mathbf{H}$  относительно кристаллографических осей. При гелиевых температурах в магнитных полях до  $72 \text{ кэ}$  были исследованы зависимости периодов осцилляций ШГ от ориентации магнитного поля в плоскости зеркального отражения  $(c_1 c_3)$  и в плоскости, перпендикулярной тригональной оси  $c_3(c_1 c_2)$ . Концентрация дырок определялась из коэффициента Холла  $R_{321} (\mathbf{H} \perp c_3)$  в сильном магнитном поле. На образцах  $p\text{-Bi}_2\text{Te}_3$  с концентрацией  $p > p^* = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (№2, №3) выявлены основная и дополнительная серии осцилляций ШГ. Ранее [2] основная серия осцилляций приписывалась зоне из шести наклоненных эллипсоидов, лежащих в зеркальных плоскостях (модель Драббла – Вольфа [3]). Дополнительная серия осцилляций была измерена только при  $\mathbf{H} \parallel c_3$  и связывалась со второй шестиэллипсоидной подзоной, отстоящей от основной на  $\Delta E = 0,015 \text{ эв}$ . В предлагаемой модели валентной зоны  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  роль второй подзоны играют трубки, связывающие долины основной зоны при концентрации  $p > p^*$ . Трубки расположены параллельно зеркальным плоскостям и наклонены под углом  $45^\circ$  к бисекторной оси (рис. 1).

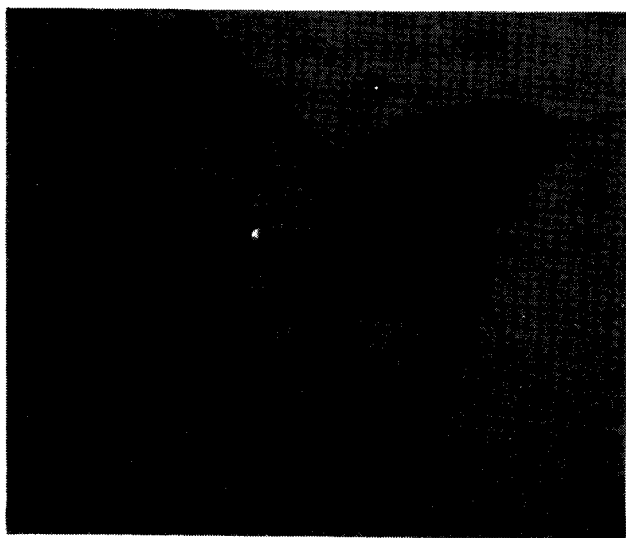


Рис. 1. Общий вид предлагаемой модели валентной зоны  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  при  $p > p^*$ :  $\theta_I = 15^\circ$  – угол наклона долины в зеркальной плоскости;  $\theta_{II} = 45^\circ$  – угол наклона трубки, центрированной на бинарной оси  $c_2$

1. На рис. 2 представлены розетки основной серии осцилляций для трех исследованных образцов. Величина максимального  $\Delta_{max}(1/H)$  периода при  $\phi_0 = 75^\circ$  принималась за единицу. Пунктирные линии соответствуют розетке  $c_1 c_3$  для шестиэллипсоидной модели, параметры которой были определены из периодов осцилляций для образца №1  $\Delta_{max}(1/H) = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$ ,  $\Delta_2(1/H) = 7,4 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$ , при  $\mathbf{H} \parallel c_2$  и  $\Delta_3(1/H) = 5,9 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$  при  $\mathbf{H} \parallel c_3$ .

Верхняя кривая отражает изменение главного сечения, т. е. максимального сечения эллипсоида, лежащего в зеркальной плоскости и повернутого относительно оси  $c_1$  на  $15^\circ$ . Нижняя кривая связана с изменением неосновных сечений, т. е. максимальных сечений эквивалентных эллипсоидов, расположенных в двух других зеркальных плоскостях. Расчетная угловая зависимость периодов не соответствует экспериментальным данным. В то время как для шестиэллипсоидной модели наименьшие сечения (наибольшие  $\Delta(1/H)$ ) от главного и эквивалентного эллипсоидов лежат по разные стороны от оси  $c_1$  (в разных квадратах), экспериментальные кривые указывают на то, что оба сечения достигают наименьших значений в одном квадранте. Это возможно для более сложных, чем эллипсоиды долин без центра симметрии, что указывает на необходимость учета кубических по  $k$  членов в энергетическом спектре дырок.

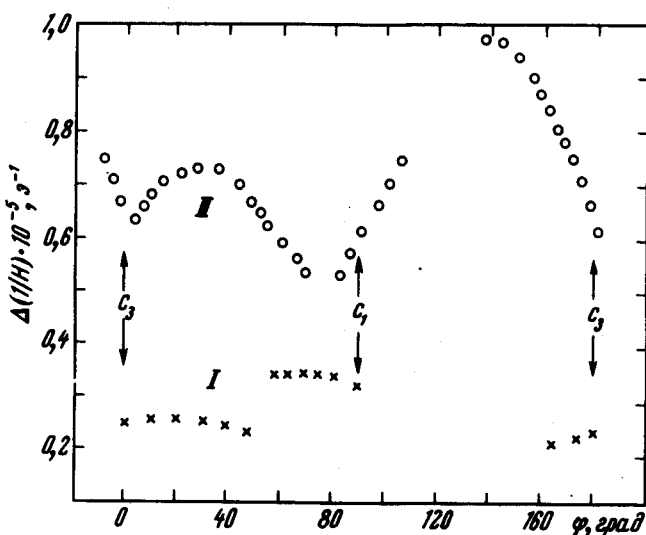


Рис. 2. Изменение  $\Delta(1/H)$  основной I и дополнительной II серий осцилляций ШГ при вращении  $\mathbf{H}$  в зеркальной плоскости для образца  $p\text{-Bi}_2\text{Te}_3$  №3 при  $T = 1,6\text{K}$  ( $\mathbf{J} \parallel c_2$ ).

2. На рис. 3 представлены угловые зависимости периодов основной I и дополнительной II серий осцилляций для образца №3. Дополнительная серия осцилляций имеет большие периоды, что соответствует появлению малых сечений поверхности Ферми при концентрации дырок  $p > 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Резкий спад периода второй серии от максимального значения при  $\phi_{II} = 135^\circ$  при смещении по углу не может быть объяснен угловой зависимостью максимального сечения эллипсоида и даже цилиндра и соответствует изменению минимального сечения гиперболоидной трубки, расположенной параллельно зеркальной плоскости и наклоненной к оси  $c_1$  под углом  $45^\circ$ . Изменение дополнительного периода слева от  $c_1$  согласует-

ся с изменением сечений эквивалентных (повернутых на  $120^\circ$  вокруг  $c_3$ ) гиперболоидных трубок. Ориентация трубок параллельно зеркальным плоскостям подтверждается розеткой  $c_1 c_2$ , из которой следует, что минимальное сечение наблюдается при  $\mathbf{H} \parallel c_1$ .

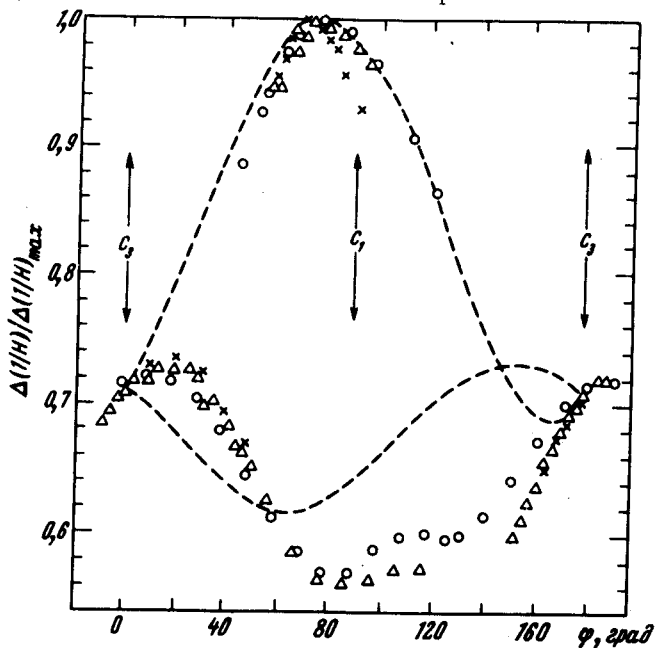


Рис. 3. Угловые зависимости периодов осцилляций ШГ в  $p\text{-Bi}_2\text{Te}_3$  при вращении  $\mathbf{H}$  в зеркальной плоскости:  $\mathbf{J} \parallel c_2$ ,  $T = 1,6\text{K}$ ;  $\Delta_{\max}(1/H) = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$ ,  $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$  и  $3,45 \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$  для образцов №1, №2, №3, соответственно. Параметры образцов  $\rho$  ( $\text{см}^{-3}$ ) и  $R_{321} \sigma_{22}$  ( $\text{см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ ) при  $T = 1,6\text{K}$  равны: о (№1)  $2,9 \cdot 10^{18}$  и  $3,7 \cdot 10^4$ ;  $\Delta$  (№2)  $7 \cdot 10^{18}$  и  $1,7 \cdot 10^4$ ;  $\times$  (№3)  $2,4 \cdot 10^{19}$  и  $5,6 \cdot 10^3$

3. При концентрации дырок  $p < p^*$  трубки обрываются (исчезает дополнительная серия осцилляций). При этом форма долин все еще может отличаться от эллипсоидальной из-за наростов, которые остаются в местах присоединения трубок. По-видимому, наросты наиболее сильно влияют на угловую зависимость экстремальных сечений эквивалентных долин (рис. 2, образец №1).

4. Гиперболоидные трубки при малости минимального сечения могут иметь заметный объем, что позволяет объяснить несовпадение концентраций дырок, определенных из периода осцилляций ШГ основной серии при  $\mathbf{H} \parallel c_3$  и из коэффициента Холла  $R_{321}$ , наблюдавшееся в [2, 4].

5. Появление трубок с малым сечением при  $p > p^*$  может привести к изменению соотношений между компонентами тензора магнетосопротивления в слабом магнитном поле. В исследованных образцах с концентрациями  $p = 1,6 \cdot 10^{18} - 2,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 4,2\text{K}$  наблюдалось возрастание отношения коэффициентов Холла при  $\mathbf{H} \perp c_3$  и  $\mathbf{H} \parallel c_3$  ( $R_{321}/R_{123}$ ) от 1,5 при  $p < p^*$  до 2,6 при  $p > p^*$  и уменьшение отношения  $\rho_{1133}/\rho_{1122}$  для поперечного магнетосопротивления от 3,5 до 1,6 соответственно.

Отмеченные экспериментальные факты указывают на неприменимость чисто эллипсоидальной модели валентной зоны  $\text{Vi}_2\text{Te}_3$  при концентрации дырок  $p \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Обнаруженные дополнительные сечения принадлежат трубкам, центрированным на бинарных осях, которые появляются вследствие анизотропной непараболичности основной зоны.

Авторы выражают благодарность С.С.Шалыту и Г.Л.Биру за постоянный интерес к работе и полезные обсуждения.

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

Поступила в редакцию  
12 мая 1975 г.

### Литература

- [1] I.I.Austin. Proc. Phys. Soc., 72, 545, 1958.
  - [2] A. von Middendorff, G.Landwehr. Sol. State Com., 11, 203, 1972.
  - [3] J.R.Drabble, R.Wolfe. Proc. Phys. Soc., 69, 1101, 1956.
  - [4] В.В.Сологуб, А.Д.Голецкая, Р.В.Парфеньев. ФТТ, 14, 915, 1972.
-