

В отличие от П. V группы электронные (с центром в точках K зоны Бриллюэна) и дырочные участки поверхности Ферми соприкасаются между собой. В малой окрестности точек соприкосновения поверхности близки к коническим. Эфф. массы электронов и дырок вдоль оси C:  $m \geq m_0$ , в плоскости графитовых слоёв  $m \approx 10^{-2} m_0$ . Кроме описанных частей поверхности Ферми, к-рые относятся к т. н. осн. носителям заряда вблизи точек K и H в зоне Бриллюэна расположены изоэнергетич. поверхности малых групп электронов и дырок (неосновные носители).

**Физические свойства полуметаллов**

**Электропроводность.** Высокая подвижность  $\mu$  носителей в П. частично компенсирует малость их концентрации. В результате электропроводность  $\sigma$  П. значительно меньше отличается от проводимости металлов, чем концентрация носителей заряда ( $\sigma = 2 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  при  $T = 300 \text{ К}$  и  $10^5 - 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  при низких темп-рах). Высокие значения  $\mu$  и равенство концентраций электронов и дырок приводят к аномально сильной зависимости уд. сопротивления П. от магн. поля H. Напр., у Bi при  $T = 4,2 \text{ К}$  уд. сопротивление  $\rho$  возрастает в  $10^4$  раз в поле  $H = 10^4 \text{ Э}$ . При  $T = 300 \text{ К}$  в том же поле наблюдается двукратное увеличение  $\rho$  у Bi, тогда как у Si изменение  $\rho$  при тех же условиях составляет  $10^{-4}$  (см. *Гальваномагнитные явления, Магнетосопротивление*). При низких темп-рах магнетосопротивление  $\Delta\rho/\rho$  обнаруживает осциллирующую зависимость от обратного магн. поля  $1/H$  (*Шубникова — Де Хааза эффект*). Сильная зависимость сопротивления  $\rho$  от H широко используется для создания датчиков магн. поля.

**Магнитные свойства полуметаллов.** Все П. — диамагнетики. Определяющий вклад в величину магн. восприимчивости  $\chi$  вносят электроны валентной зоны. Малость  $m$  обуславливает большое значение  $\chi$ , к-рая для П. достигает макс. значения среди всех известных диамагнетиков (исключая сверхпроводники, у к-рых  $|\chi| = 1/4\pi$ ).

При низких темп-рах у П. наблюдается осциллирующая зависимость  $\chi$  от  $1/H$  (*Де Хааза — ван Альфена эффект*). В наиб. чистых монокристаллич. П. амплитуда осцилляций превосходит величину монотонной части, иногда достигает теоретически возможного предела  $|\chi| = 1/4\pi$ . В последнем случае в кристалле возникает своеобразная структура магн. доменов. Среди П. макс. диамагнетизмом обладает графит (особенно искусственные квазидвумерные графиты с увеличенным межслоевым расстоянием). Высокий диамагнетизм П. (в частности, графита и Bi) позволяет их использовать для создания магнитных подвесов.

**Термоэдс полуметаллов.** С малостью энергии Ферми  $\epsilon_F$ , большой подвижностью  $\mu$  носителей и заметным различием подвижностей электронов и дырок связаны высокие значения термоэдс П. ( $\alpha$ ) и её сильная зависимость от магн. поля H (см. *Термогальваномагнитные явления*). С этим же связана большая величина т. н. термоэлектрич. добротности Z. В частности, у сплавов Bi — Sb при  $T = 77 \text{ К}$  величина Z достигает значений  $\sim 6 \cdot 10^{-2} \text{ град}^{-1}$  и увеличивается до  $10^{-2} \text{ град}^{-1}$  в поле  $H \sim 10^8 \text{ Э}$  (*Нерста — Эттингсхаузена эффект*). Высокая термоэлектрич. и термомагн. добротности позволяют использовать П. в качестве материалов для создания термоэлектрич. преобразователей или твердотельных холодильных устройств.

**Чувствительность полуметаллов к внешним воздействиям.** Малость энергий Ферми  $\epsilon_F$  электронов и дырок и энергии перекрытия зон является причиной того, что электронный спектр П. может претерпевать значит. изменения под действием разл. внеш. факторов (востороннее сжатие, одноосные деформации, сильные магн. поля, изменение темп-ры, внесение примесей и т. д.). Чувствительность электронного энергетич. спектра П. к относительно слабым внеш. воздействиям

позволяет наблюдать в них большое число эффектов, имеющих принципиальное значение в физике твёрдого тела. В П. V группы и их сплавов под давлением, при одноосных деформациях, легировании донорными или акцепторными примесями обнаружены фазовые переходы, к-рые связаны с изменением топологии и формы поверхности Ферми (топологич. переходы). Частым случаем таких переходов является *переход металл — диэлектрик*, к-рый сопровождается исчезновением поверхности Ферми электронов и дырок. Такой переход в П. V группы наблюдается под давлением, при одноосных деформациях и в магн. поле (у графита — в магн. поле). Вблизи критич. точки перехода металл — диэлектрик в П. в сильных магн. полях наблюдаются диэлектризация спектра в результате электронно-дырочного спаривания и образование фазы *экситонного диэлектрика*. В П. V группы происходят переходы в состояние бесщелевого полупроводника, к-рые сопровождаются резким уменьшением эфф. масс носителей, возрастанием их подвижности и анизотропии поверхности Ферми. В П. впервые обнаружены гигантские осцилляции поглощения ультразвука в магн. поле, разл. виды магнитоплазменных волн (альфеновские, циклотронные волны, доплероны), скачущие траектории электронов в магн. поле (*магнитные поверхностные уровни, циклотронный резонанс, радиочастотный размерный эффект* (см. *Гантмагера эффект*), разл. осцилляц. эффекты, фокусировка электронов и т. п.

*Лит.: Фальковский Л. А., Физические свойства висмута, «УФН», 1968, т. 94, с. 3; Брандт Н. Б., Икневич Е. С., Минина Н. Я., Влияние давления на поверхность Ферми металлов, «УФН», 1971, т. 104, с. 459; Абрамов А. А., Некоторые вопросы теории полуметаллов, «ЖЭТФ», 1973, т. 65, с. 2083; Эдельман В. С., Свойства электронов в висмуте, «УФН», 1977, т. 123, с. 257; Кракнелл А., Уонг К., Поверхность Ферми, пер. с англ., М., 1978; Clarke R., Uher C., High pressure properties of graphite and its intercalation compounds, «Adv. Phys.», 1984, v. 33, № 5, p. 469; Brandt N. B., Chudinov S. M., Popov A. G., Semimetals. 1. Graphite and its compounds, Amst., 1988. С. М. Чудинов, С. Д. Венеславский.*

**ПОЛУПРОВОДНИКИ** — широкий класс веществ, в к-рых концентрация подвижных носителей заряда значительно ниже, чем концентрация атомов, и может изменяться под влиянием темп-ры, освещения или относительно малого кол-ва примесей. Эти свойства, а также увеличение проводимости с ростом темп-ры, качественно отличают П. от металлов. Различие между П. и диэлектриками носит условный характер, к диэлектрикам обычно относят вещества, уд. сопротивление  $\rho$  к-рых при комнатной темп-ре ( $T = 300 \text{ К}$ )  $\geq 10^{11} - 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

По структуре П. делятся на кристаллические, аморфные и стеклообразные, жидкие. Особый класс составляют *твёрдые растворы П.*, в к-рых атомы разных сортов хаотически распределены по узлам правильной кристаллич. решётки. Ниже рассматриваются кристаллич. П.

По хим. составу П. делятся на элементарные П. (Ge, Si, Se, Te), двойные, тройные, четверные соединения. Существуют также органич. П. (см. *Органические проводники*). Полупроводниковые соединения принято классифицировать по номерам групп периодич. табл. элементов, к к-рым принадлежат входящие в соединения элементы. Напр., соединения A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> содержат элементы 3-й и 5-й групп (GaAs, InSb и т. д.). Элементы Ge, Si, соединения A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> и их твёрдые растворы играют важную роль в полупроводниковой электронике. Хорошо изучены также полупроводниковые соединения A<sup>II</sup>B<sup>VI</sup> и A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> (см. *Полупроводниковые материалы*).

**Зонная структура полупроводников**

Электрич. и оптич. свойства П. связаны с тем, что заполненные электронами состояния (уровни энергии) отделены от вакантных состояний запрещённой зоной, в к-рой электронные состояния отсутствуют (рис. 1). Примеси и дефекты структуры приводят к появлению