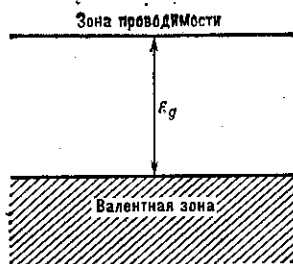


состояний в запрещённой зоне, но этих состояний сравнительно мало, так что понятие запрещённой зоны сохраняет смысл. Высшая целиком заполненная зона наз. валентной, следующая разрешённая, но пустая зона — зоной проводимости (см. *Твёрдое тело, Зонная теория*).

Рис. 1. Зонная схема полупроводника (состояния, заполненные электронами, заштрихованы).



Ширина запрещённой зоны ϵ_g является важной характеристикой П., в значит. мере определяющей все его электронные свойства; величина ϵ_g изменяется в широких пределах (табл. 1).

Табл. 1. — Ширина запрещённой зоны некоторых полупроводников при $T=300$ К

Полупроводник	ϵ_g , эВ	Полупроводник	ϵ_g , эВ
Ge	0,65	InP	1,26
Si	1,10	GaSb	0,67
Se	1,89	GaAs	1,35
Insb	0,17	GaP	2,24
InAs	0,35	AlSb	1,60

Существуют *бесщелевые полупроводники*, у к-рых $\epsilon_g = 0$ (напр., α -Sn, HgTe, HgSe); у твёрдых растворов, включающих эти П. (напр., $Hg_{1-x}Cd_xTe$), ϵ_g может принимать очень малые значения.

Состояние электрона в П. характеризуется номером разрешённой зоны s и квазиимпульсом p . Структура зоны определяется зависимостью энергии ϵ_s от квазиимпульса p : $\epsilon_s(p)$, наз. законом дисперсии (в дальнейшем, говоря о конкретной зоне, индекс s опускаем). Если валентная зона целиком заполнена электронами, то в ней нет элементарных возбуждений. Если по к.-л. причине в валентной зоне отсутствует электрон, то говорят, что в ней появилось возбуждение в виде положительно заряженной квазичастицы — *дырки*. Носителями заряда в П. являются электроны в зоне проводимости (электроны проводимости) и дырки в валентной зоне.

Энергетические зоны. Зоны проводимости типичных П. (Ge, Si, A^{III}V) не имеют вырождения вблизи минимума ф-ции $\epsilon(p)$ (не считая двукратного вырождения по спину). У нек-рых П. минимум $\epsilon(p)$ нахо-

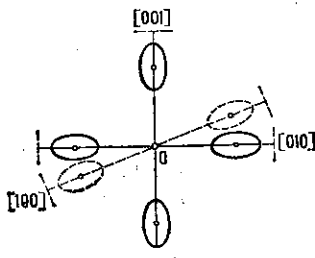


Рис. 2. Расположение изоэнергетических поверхностей электронов в зоне Бриллюэна для Si (пунктир — границы зоны).

дятся при $p = 0$, т. е. в центре Бриллюэна зоны. В малой окрестности этой точки можно разложить $\epsilon(p)$ в ряд по степеням p . При этом для кристаллов с кубич. симметрией можно ограничиться первыми двумя членами, что приводит к зависимости:

$$\epsilon(p) = \epsilon_c + p^2/2m. \quad (1)$$

Здесь ϵ_c — энергия, соответствующая «дну» зоны проводимости, m — постоянная, имеющая размерность массы. Для электронов с не очень большой энергией, для к-рых применим закон (1), величина m фигурирует в ур-ниях движения как масса электрона. Поэтому она наз. *эффективной массой*. Напр., если электрон находится в потенциальном поле, причём характерный размер, на к-ром изменяется поле, велик по сравнению с постоянной решётки a_0 , то уровни энергии и волновые ф-ции электрона можно находить с помощью *Шрёдингера уравнения*. При этом не нужно учитывать периодич. потенциал, создаваемый атомами кристалла, а нужно лишь заменить массу свободного электрона в вакууме m_0 на эфф. массу m (метод эфф. массы). Т. о., при малых энергиях эфф. масса определяет динамику электронов (табл. 2).

Закон дисперсии (1) является параболическим (квадратичным) изотропным и наз. стандартным. Изоэнергетич. поверхности в импульсном пространстве $\epsilon(p) = \text{const}$ вблизи $p = 0$ представляют собой сферы с центром в точке $p = 0$.

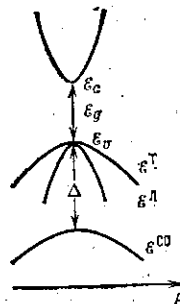
Если минимум $\epsilon(p)$ находится не в центре зоны Бриллюэна, а при $p \neq 0$, то эфф. масса m зависит от направления относительно кристаллографич. осей (осей симметрии кристалла), т. е. является тензором m_{ij} даже в кристаллах с кубич. симметрией.

В этом случае должно существовать неск. минимумов, расположенных в симметричных (эквивалентных) точках зоны Бриллюэна. Напр., зона проводимости таких П., как Ge и Si, имеет неск. минимумов. В Si один из них расположен в направлении [100] на расстоянии от центра зоны Бриллюэна ($p = 0$) $p^0 = 0,85(2\pi\hbar a_0)$. Поверхности пост. энергии $\epsilon(p) = \text{const}$ представляют собой эллипсоиды вращения вокруг направления [100] (рис. 2). Кубич. симметрия

Табл. 2. — Отношение эффективной массы m электронов проводимости для некоторых полупроводников с минимумом $\epsilon(p)$ в центре зоны Бриллюэна (при $T=300$ К) к массе свободного электрона m_0

Полупроводник	m/m_0
InSb	0,01
InAs	0,02
InP	0,08
GaSb	0,05
GaAs	0,07

Рис. 3. Зависимость энергии ϵ от квазиимпульса p для типичных полупроводников: ϵ_c — электронная зона; ϵ_v — дырочные зоны; ϵ^I — зона тяжёлых дырок; ϵ^A — зона лёгких дырок; ϵ^{CO} — спин-орбитально отщеплённая зона.



кристалла требует, чтобы такие эллипсоиды существовали в каждом из 6 эквивалентных направлений. Т. о., в Si есть 6 эквивалентных минимумов $\epsilon(p)$. Выбирая ось z вдоль [100], получим выражение для энергии электронов проводимости вблизи минимума $\epsilon(p)$:

$$\epsilon(p) = \frac{(p_z - p^0)^2}{2m_{||}} + \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m_{\perp}}. \quad (2)$$

Для Si $m_{||} = 0,91m_0$, $m_{\perp} = 0,19m_0$, где $m_{||}$, m_{\perp} — эфф. массы вдоль и поперёк z .

Минимумы зоны проводимости Ge (соответствующие ϵ_c) расположены в направлениях пространств. диагоналей куба точно на границах зоны Бриллюэна. По-