В собственном полупроводнике свободные носители возникают только за счёт разрыва валентных связей, поэтому число дырок = числус вободных электронов, т.е. $n = \rho = n_i$, где n_i – собственная концентрация. Электропроводность:

$$\sigma = e \cdot n \cdot \mu_n + e \cdot p \cdot \mu_p$$

Собственный полупроводник. **Для собственного полупроводника концентрация носителей заряда ($n = p = n_i$) может быть выражена соотношением**

$$n_i = \sqrt{n \cdot p} = \sqrt{N_e N_v} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) = C \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right), \tag{4}$$

где $C = \sqrt{N_e N_v}$ - сравнительно слабо зависит от температуры,

$N_c = 2(2\pi m_n^* kT)^{3/2} \hbar^{-3}$ - эффективная плотность состояний в зоне проводимости,

$N_v = 2(2\pi m_p^* kT)^{3/2} \hbar^{-3}$ - эффективная плотность состояний в валентной зоне,

ΔE – ширина запрещённой зоны,

$n = N_c e^{\frac{E_F - E_c}{kT}}$ - концентрация электронов в зоне проводимости,

$p = N_v e^{\frac{E_v - E_F}{kT}}$ - концентрация дырок в валентной зоне.

В донорном полупроводнике:

$$\sigma_n = e \cdot n \cdot \mu_n$$

Донорный полупроводник. **При низких температурах можно пренебречь числом переходов электронов из валентной зоны в зону проводимости и рассматривать только переход электронов с донорных уровней в зону проводимости.**

Температурная зависимость концентрации свободных электронов донорного полупроводника при сравнительно низких температурах и частичной ионизации примесных атомов выражается соотношением:

$$n = \sqrt{N_c N_d} \exp\left(-\frac{\Delta E_d}{2kT}\right), \tag{6}$$

где N_d – число уровней (атомов) донорной примеси в единице объёма полупроводника (концентрация донорной примеси),
ΔE_d – глубина залегания донорной примеси.

Из (6) следует

$$\ln(n) = const - \frac{\Delta E_d}{2kT}. \tag{7}$$

Это область слабой ионизации примеси. Она обозначена цифрой 1 на рисунке 5, на котором показано изменение концентрации n с температурой для донорного полупроводника.

в случае преобладания акцепторных примесей:

$$\sigma_p = e \cdot p \cdot \mu_n$$

Акцепторный полупроводник. При низких температурах можно пренебречь переходом электронов из V- в С-зону и рассматривать только переход электронов из валентной зоны на акцепторные уровни. В этом случае температурная зависимость концентраций свободных дырок выражается в виде

$$p = \sqrt{N_v N_a} \exp\left(-\frac{\Delta E_a}{2kT}\right), \tag{8}$$

где N_a – концентрация акцепторной примеси,
ΔE_d – энергия активации акцепторной примеси.

Из (8) следует

$$\ln(p) = const - \frac{\Delta E_a}{2kT}. \tag{9}$$

С ростом температуры все акцепторные уровни заполняются электронами, перешедшими из V-зоны. При $kT > \Delta E_a$ наступает истощение примеси, концентрация дырок в V-зоне равна концентрации акцепторной примеси N_a.

При дальнейшем повышении температуры возникает всё больше собственных носителей за счёт перехода электронов из V- в С-зоны и при некоторой температуре проводимость полупроводника из примесной превращается в собственную.

Рассмотрим поведение σ полупроводника при переходе от низких температур к высоким. В донорном или акцепторном полупроводнике проводимость при низких температурах является примесной. Так как температура низкая, то ионизованных примесей мало и преобладает рассеяние на нейтральных атомах, при котором μ не меняется с температурой. Поэтому температурная зависимость σ будет определяться зависимостью концентрации от температуры. Для электропроводности донорного полупроводника

согласно (6) и (7) можно записать $\sigma_n = \sigma_{0n} \exp\left(-\frac{\Delta E_d}{2kT}\right)$.

$$\ln(\sigma_n) = const - \frac{\Delta E_d}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \tag{16}$$

Соответственно для электропроводности акцепторного полупроводника (см. (8) и (9)):

$$\ln(\sigma_p) = const - \frac{\Delta E_a}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \tag{17}$$

Очевидно, если уравнения (16) или (17) построить графически в координатах $\ln(\sigma)$ от $\frac{1}{T}$, то из наклонов этих зависимостей (рис. 6) можно определить энергию ионизации донорной или акцепторной примеси:

$$\Delta E_d = 2k \cdot tg(\alpha) = 2k \cdot \left|\frac{d(\ln(\sigma_n))}{d(1/T)}\right|,$$

$$\Delta E_a = 2k \cdot \left|\frac{d\ln(\sigma_p)}{d(1/T)}\right|.$$