

4-3 真性半導体

真性半導体では不純物の影響がないため、熱エネルギー等を得て価電子が自由電子となった場合、電子が抜けた穴である正孔を残すので、電子と正孔の数は等しくなる。すなわち、電子密度 n と正孔密度 p の関係は

$$n = p = n_i \quad \dots(4.16)$$

となる。ここで、 n_i を真性キャリア密度という。真性半導体の np 積は

$$np = n_i^2 = N_c N_v e^{-E_G/kT}$$

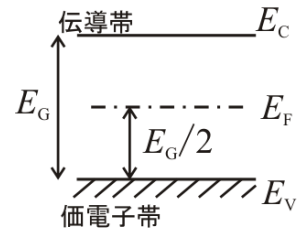
となる。よって

$$n = p = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_G/2kT} \quad \dots(4.17)$$

また、フェルミ準位 E_F は

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right) = \frac{E_G}{2} + E_V + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right) \quad \dots(4.20)$$

ここで、 $m_e^* = m_h^*$ の場合を考えると、 $E_F = \frac{E_G}{2} + E_V$ となり、フェルミ準位が禁制帯の中央に位置することになる。実際のフェルミ準位は若干 E_C 寄りとなる。

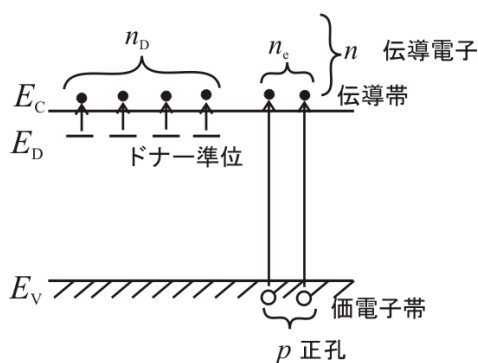


真性半導体

図 1 真性半導体のフェルミ準位

4-4 不純物半導体(I)

・ n 形半導体のキャリア密度とフェルミ準位



n 形半導体
図 2 n 形半導体のキャリア密度

n_D : ドナーから励起した電子密度

n_e : 価電子帯から励起した電子密度

p : 価電子帯から励起した電子による正孔密度 ($= n_e$)

伝導電子密度 : n

$$n = n_D + n_e = n_D + p$$

(4.11)、(4.14)式から

$$N_c e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} = \frac{N_D}{1 + e^{\frac{E_F - E_D}{kT}}} + N_v e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}}$$

i) 極低温の場合

温度 T が極低温の時、伝導帯に励起する電子は非常に少ない。温度が上がるとドナーは次第にイオン化され、ドナー準位から励起した伝導電子が増加していく。

フェルミ準位 E_F は

$$E_F \cong \frac{1}{2}(E_D + E_C) - \frac{1}{2} kT \ln \frac{N_C}{N_D} \quad \dots(4.25)$$

と表され、極低温では E_F は E_C と E_D の中央に位置し、温度上昇により E_F は低下する。電子密度 n は

$$\ln n = \frac{1}{2} \ln N_D N_C - \frac{E_C - E_D}{2kT} \quad \dots(4.27)$$

この領域を「**不純物領域(impurity range)**」という。

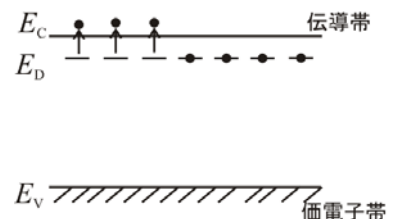


図 3 低温でのキャリア密度

ii) さらに温度上昇 (i より僅かに高温の場合)

フェルミ準位 E_F が温度上昇とともに低下し、ドナー準位 E_D と一致した時を考えると、電子密度 n は

$$n = \frac{N_D}{1 + e^0} = \frac{N_D}{2} \quad \dots(4.28)$$

iii) 中温の場合 (ii よりさらに温度上昇)

ドナーはほとんどがイオン化され、ドナー準位の電子が伝導帯に励起する。すなわち、

$$n \cong n_D \cong N_D \rightarrow \ln n = \ln N_D \quad (\text{一定})$$

$$E_F \cong E_C - kT \ln \frac{N_C}{N_D} \quad \dots(4.30)$$

$n \cong N_D$ が成立している領域を「**飽和領域(saturation range)**」という。

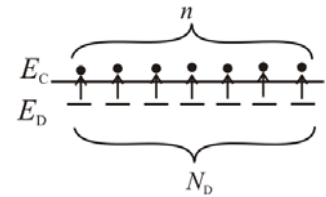


図 4 中温でのキャリア密度

iv) 高温の場合

価電子帯からの熱励起による電子の方が、ドナーからの電子より多くなり、不純物(ドナー)の影響が無視できるようになる。すなわち、真性の性質を持つようになり、 E_F は真性半導体と同様に禁制帯のほぼ中央に位置することになる。

$$E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{1}{2}kT \ln \frac{N_V}{N_C} \quad \dots(4.19)$$

$$\ln n = \frac{1}{2} \ln N_C N_V - \frac{E_C - E_V}{2kT}$$

この領域を「**真性領域(intrinsic range)**」という。

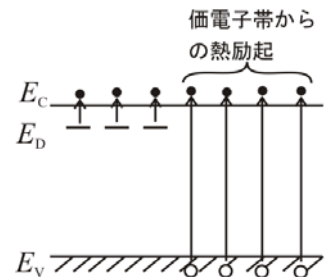


図 5 高温でのキャリア密度

フェルミ準位の温度依存性

p 形半導体のフェルミ準位の温度依存性は n 形半導体の場合と逆になる。

i) 低温

E_F は E_C と E_D の中央から温度上昇により低下する。

iii) 中温

温度 T の増加に従って E_F は急激に低下する。

iv) 高温

真性半導体と同じく禁制帯のほぼ中央に位置する。

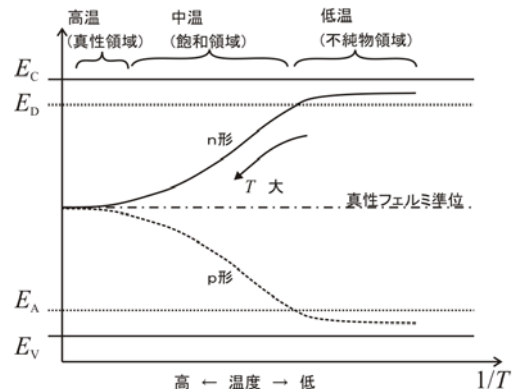


図 6 フェルミ準位の温度依存性

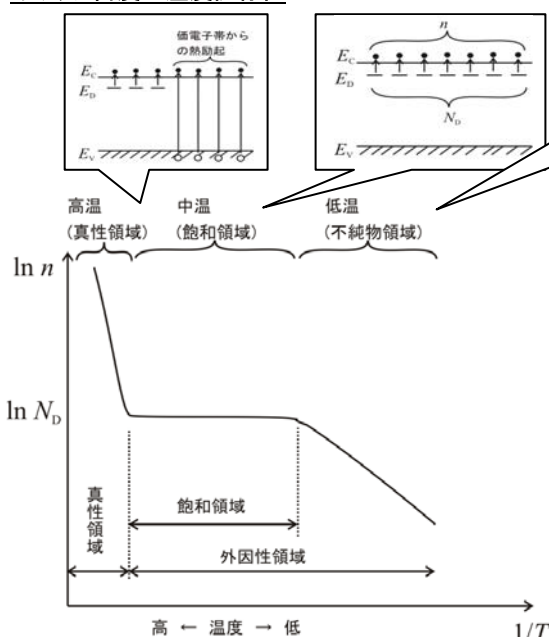
キャリア密度の温度依存性

図 7 キャリア密度の温度依存性

i) 低温

$$\text{傾き: } -\frac{E_C - E_D}{2k}, \quad \text{温度上昇で } n \text{ は増加}$$

iii) 中温

傾き: ゼロ

ドナーから電子がほとんど励起され、価電子帯からの電子の励起はないので n は変化しない。

iv) 高温

$$\text{傾き: } -\frac{E_C - E_V}{2k}$$

温度上昇で n は急激に増大(低温より増加の割合が大きい)