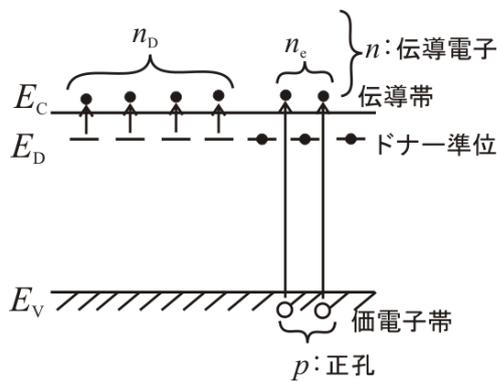


3-4 不純物半導体のキャリア密度とフェルミ準位

n 形半導体のキャリア密度とフェルミ準位



n_D : ドナーから励起した電子
 n_e : 価電子帯から励起した電子
 p : 価電子帯から励起した電子による正孔 (= n_e)

伝導電子密度: n

$$n = n_D + n_e = n_D + p \quad \dots(3.22)$$

(3.11)、(3.12)式から(3.22)式は

$$N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} = \frac{N_D}{1 + e^{-\frac{E_F - E_D}{kT}}} + N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}} \quad \dots(3.23)$$

図1 n 形半導体のキャリア密度

i) 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

$$E_F \cong \frac{1}{2}(E_D + E_C) - \frac{1}{2}kT \ln \frac{N_C}{N_D} \quad \dots(3.24)$$

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

$$\ln n = -\frac{E_C - E_D}{2kT} + \frac{1}{2} \ln N_D N_C$$

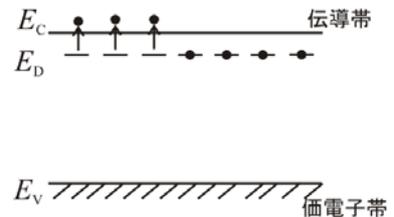


図2 低温でのキャリア密度

ii) 中温の場合 (i より僅かに高温の場合)

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、

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

$$E_F \cong E_C - kT \ln \frac{N_C}{N_D} \quad \dots(3.26)$$

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

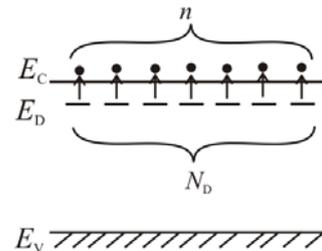


図3 中温でのキャリア密度

iii) 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。

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

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

この領域を「真性領域(intrinsic range)」という。これに対して i) と ii) の領域を「外因性領域(extrinsic range)」という。

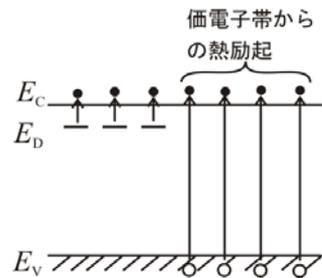


図4 高温でのキャリア密度

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は n 形半導体の場合と逆になる。

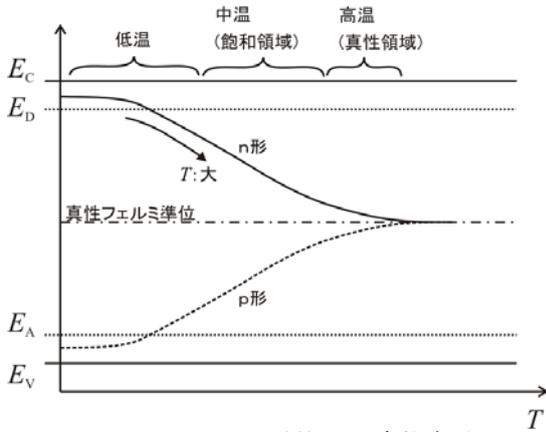


図5 フェルミ準位の温度依存性

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。

ii) 中温

温度 T の増加に従って E_F は急激に低下する。

iii) 高温

真性フェルミ準位と同じく禁制帯のほぼ中央に位置する。

キャリア密度の温度依存性

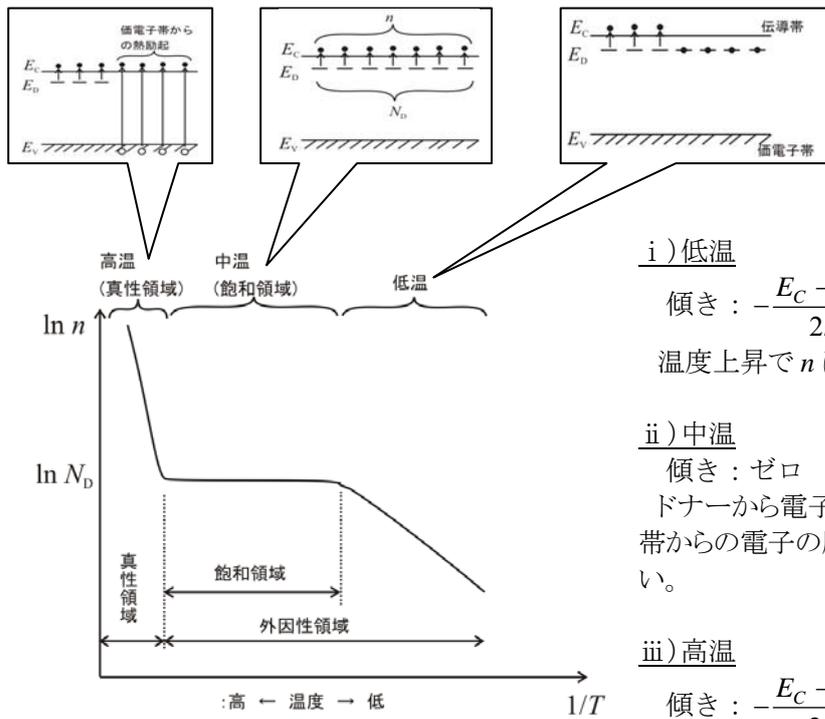


図6 キャリア密度の温度依存性

i) 低温

傾き： $-\frac{E_C - E_D}{2k}$

温度上昇で n は増加

ii) 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。

iii) 高温

傾き： $-\frac{E_C - E_V}{2k}$

温度上昇で n は急激に増大(低温時よりも増加の割合が大きい)