量子効果デバイス　第３回

前澤宏一

半導体物理のおさらい（2）

電子統計

1.　電子密度

$$n = \int f(E) g(E) dE$$

ここで、

$f(E) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT} \right) \right]^{-1}$ は Fermi-Dirac 分布関数、$E - E_F >> kT$ のとき

$$f(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT} \right) \quad \text{(Boltzmann 分布)}$$

2.　３次元の放物線バンド

$g(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi}{h^3} m^{*3/2} (E - E_C)^{1/2}$　より

電子密度は

$$n = \int_{E=E_C}^{\infty} f(E) g(E) dE = N_C \exp\left[\frac{E_F - E_C}{kT} \right] \quad \text{(Boltzmann 近似)}$$

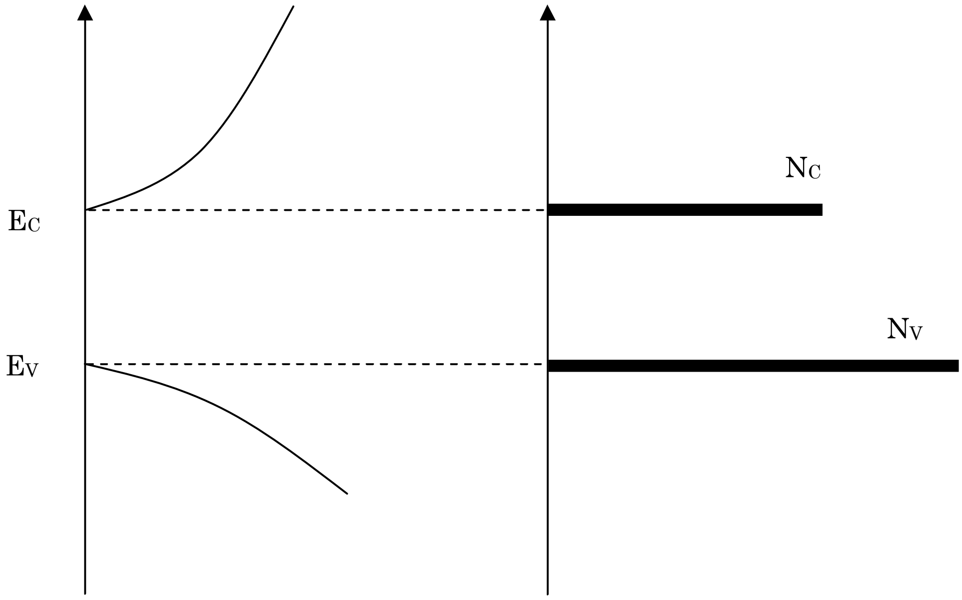
ただし、$N_C = 2\left(\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$ は伝導体の有効状態密度、単位は[cm-3]

同様にホール密度は

$$p = \int_{-\infty}^{E=E_V} (1 - f(E)) g(E) dE = N_V \exp\left[\frac{E_V - E_F}{kT} \right] \quad \text{(Boltzmann 近似)}$$

ただし、$N_C = 2\left(\frac{2\pi m_v^* kT}{h^2} \right)^{3/2}$ は荷電子帯の有効状態密度、単位は[cm-3]

3.　有効状態密度のイメージ



すべての状態をバンド端に集めてエネルギー的にはひとつのレベルがあるようにしたのが有効状態密度。したがって、この値に単に Boltzmann 因子をかければ電子密度（ホール密度）が求まる。

4.　np 積(質量作用則)

$$np = N_C N_V \exp\left[\frac{E_V - E_C}{kT}\right] = N_C N_V \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] = n_i^2 = const.$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V}\exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right]$$

n_i:真性キャリア濃度

5.　不純物順位

ドナー：電子を放出して正に帯電する順位

アクセプター：電子を捕獲して負に帯電する順位

練習問題

1) 1次元、2次元、3次元の放物線バンドにおいて、バンド端から $3kT$ 程度低エネルギーに E_F があるとき、電子分布をエネルギーの関数として図示せよ。次元によって電子分布の半値幅はどう変わるか？

2) 下図のエネルギーにおいて伝導帯の有効状態密度 N_c を用いて伝導体の電子密度とドナーレベルにある電子の比を求めよ。(ただし、ドナーレベルの縮退は無視する)

注: $\dfrac{n}{N_d^0}$ をlog−logでプロットし、$\dfrac{n}{N_d^0+n}$ をセミログでプロットせよ(横軸は N_d、範囲は 10^{15}−10^{20})。ただし、N_d^0 はイオン化していないドナー密度。

a) Siの場合: $N_c=2.8\text{x}10^{19}\text{cm}^{-3}$, $E_c-E_d=25\text{meV}$

b) GaAsの場合: $N_c=4.7\text{x}10^{17}\text{cm}^{-3}$, $E_c-E_d=5\text{meV}$

c) GaAsで 10^{18}cm^{-3} 以上の電子濃度を得ることは可能か？