第６回　ドーピング

※本日の講義のポイント

Ⅳ族半導体のキャリア濃度に、Ⅲ族あるいはⅤ族の不純物元素を導入することにより外部から制御するドーピングの物理的性質について学び、キャリア濃度の温度依存性について理解する。

ドーピング

真性半導体：外部からキャリア濃度を変化させる要因がない

外部から何かの方法でキャリア濃度を制御したい

→ドーピング(doping)

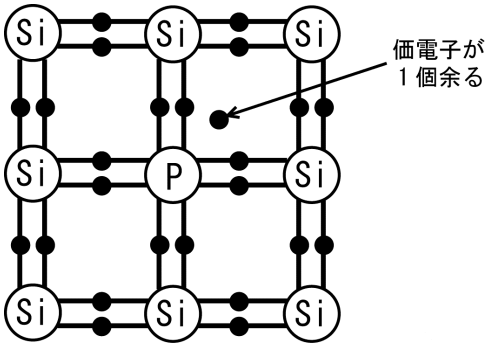
・　ｎ型半導体

～Si 結晶中の P(リン、Ⅴ族)原子～ｎ型ドーピング

Ⅳ族半導体中のⅤ族原子

Si 中に価電子が 5 つある P 原子を入れるとどうなるか？

1 つの Si サイトの Si を P で置換する(substitution)



Si 結晶（誘電体）内の P 原子は、誘電体中に孤立して存在する陽子(+e の点電荷)に見える。この場合点電荷の周りに電子が 1 個存在している。

→これは水素原子に極めて近い状況

この束縛エネルギーを考える

シリコン結晶中のリン原子の周りを回る電子のシュレディンガー方程式

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_e{}^*}\nabla^2-\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_{Si}r}\right)\varphi(\mathbf{r})=E\varphi(\mathbf{r})$$

水素原子の場合の(1s 軌道における)束縛エネルギー

$$E_{1s}=-\frac{m_0e^4}{8\varepsilon_0^2h^2}=-13.6\ \ \mathrm{eV}$$

Si 中の電子の場合の束縛エネルギー

(真空中の)電子質量 m_0 → 有効質量(m^*)

(真空中の)誘電率ε_0 → Si の比誘電率(ε_r)

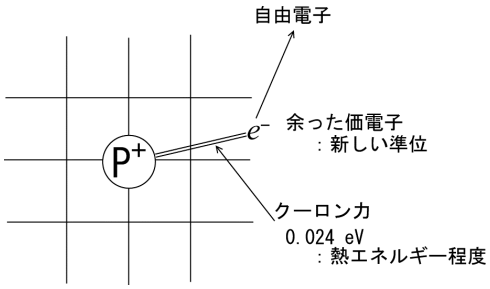
$$\Rightarrow E = -13.6\frac{m^*}{\varepsilon_r^2}\ \text{eV}$$

実際の Si では

$\varepsilon_r = 12$

$m^* = 0.25$

$\Rightarrow E = -0.024$ eV

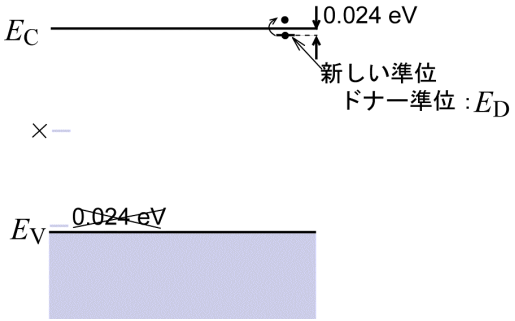


室温の熱エネルギー(300 K)

kT～0.026 eV

Si 中に P を入れると自由電子を作ることができる

→電子濃度を制御できる



半導体に電子を供給する原子

→ドナー原子（donor）

<u>n 型半導体におけるキャリア濃度</u>

※電荷の中性条件

ドナー濃度を N_D とすると

$p - n +$ (イオン化したドナー：正電荷)＝0

$$p - n + N_D \times \{-f_D(E_D)\} = 0 \quad \cdots(1)\text{式}$$

ドナー準位のフェルミディラック分布関数

<u>ドナーに電子がいない確率</u>

(1)式は E_F の関数

$$1-f(E_D)=1-\frac{1}{1+\frac{1}{2}\exp\left(\frac{E_D-E_F}{kT}\right)}$$

係数 $\frac{1}{2}$ は縮退因子（電子はドナー準位に 1 個）

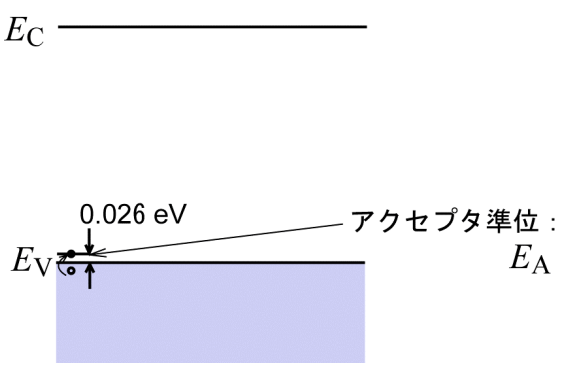
大体において E_D-E_F ≫ kT（～0.026 eV @室温)である
したがって $1-f(E_D)$～1 になる
また、 p は真性の半導体の p なので、N_D≫p となる。
これより

$n=N_D$ となる

$pn=n_i^2$ より $p=\frac{n_i^2}{N_D}$

・ p 型半導体
～Si 結晶中の B(ボロン、ホウ素、Ⅲ族)～ p 型ドーピング

Ⅳ族半導体中のⅢ族原子
→正孔を作ることができる
B は Si に比べて価電子が 1 足りない
→B は価電子帯から電子 1 個をもらう
→B は 1 価の負イオン(B^-)に、価電子帯には正孔(h)ができる
→B^-と h との間でクーロン力（束縛エネルギー～0.026 eV）
→したがって、熱エネルギーをもらって B^-と自由正孔ができる



p 型半導体におけるキャリア濃度

アクセプタ濃度を N_A とすると

$$p = N_A$$

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$n > p$ … n 型半導体(n-type semiconductor)

- 電子：多数キャリア（majority carrier）
- 正孔：少数キャリア（minority carrier）

$n < p$ … p 型半導体(p-type semiconductor)

- 電子：少数キャリア
- 正孔：多数キャリア

Si に対するドナー、アクセプタのエネルギー準位

ドナー準位　Li 0.033 eV,　Sb 0.039 eV,　P 0.045 eV,　As 0.054 eV

アクセプタ準位　B 0.045 eV,　Al 0.067 eV,　Ga 0.072 eV

ドナーとアクセプタを同時にドーピングした半導体

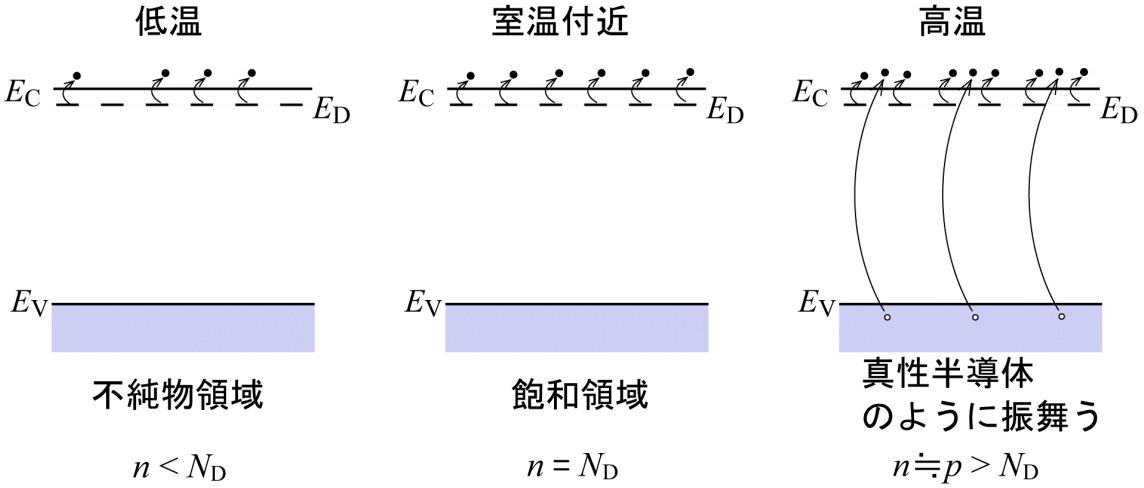
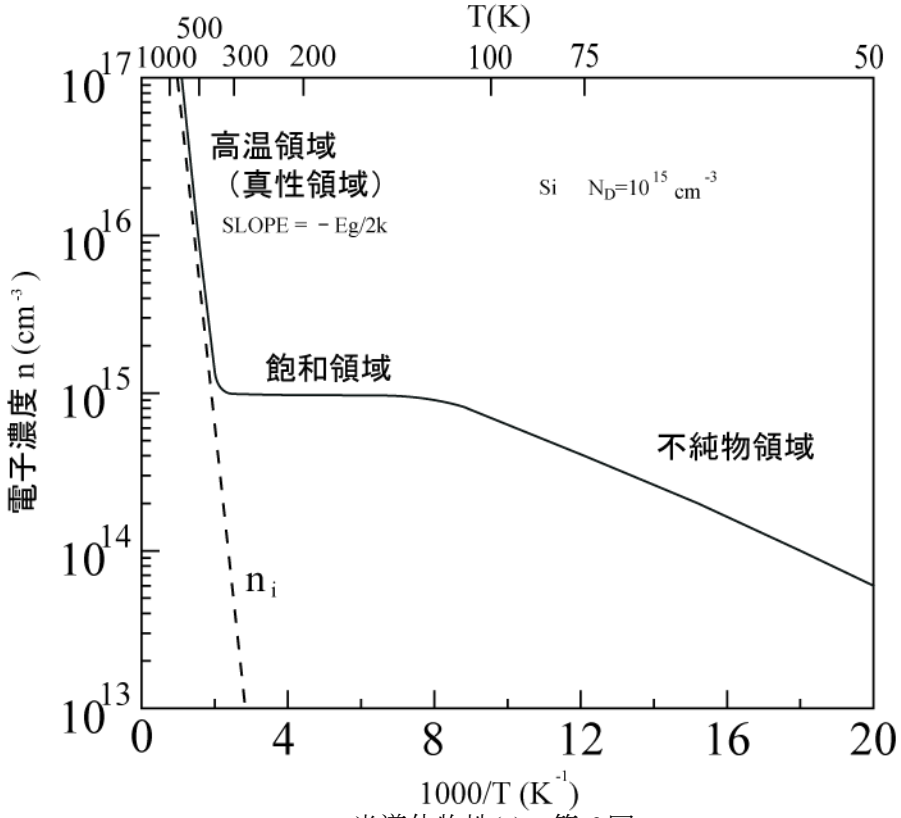
ドナー濃度 N_D＞アクセプタ濃度 N_A のとき、n 型半導体

ドナー濃度 N_D＜アクセプタ濃度 N_A のとき、p 型半導体

温度に対するキャリア濃度と E_F の位置

n 型半導体

温度とキャリア濃度



- 低温時：$\Delta E_D(=E_C-E_D)$が kT よりもかなり大きい
  →ドナーのイオン化の温度依存性が表れる
- 室温付近：ΔE_D と kT が同じくらい
  →ほとんどのドナーがイオン化する
- 高温時：ほとんどすべてのドナーがイオン化し、さらに価電子帯からも熱励起される
  価電子帯からの熱励起が N_D を上回るとき、$n \gg N_D$→電荷中性条件より $n = p$