

3-7 不純物半導体のエネルギー帯図

・n 形半導体: IV 族+ドナー原子(主にV 族元素)

ドナーの Sb は周囲の Si と共有結合する。5 個の価電子のうち、4 つ共有結合し、5 番目の電子は Sb 原子と弱く結合。この電子はわずかなエネルギーにより結合を離れ、伝導電子となる(伝導帯に励起する)。よって、このドナーの電子のエネルギー準位は伝導帯のすぐ下に位置していると考えることができる。

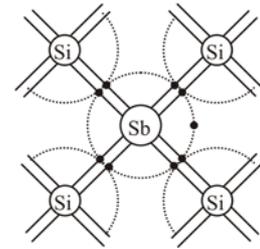


図1 n 形半導体の結合モデル

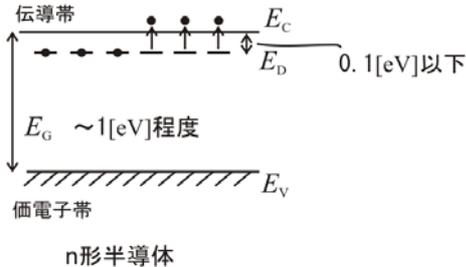


図2 ドナー準位

E_D :ドナー準位(donor level)

伝導帯下端の直ぐ下に存在

ドナーの電子はイオン化エネルギー(イオンになるのに要するエネルギー)を得ると、伝導帯に励起し、伝導電子となる(ドナーはドナーイオンとなる)。

・p 形半導体: IV 族+アクセプタ原子(主にIII 族元素)

アクセプタは Si から価電子を 1 個奪って共有結合する(そのためアクセプタ原子はイオン化する)。電子を奪われた Si には電子の抜けた正孔ができ、この正孔が電気伝導に寄与する。これより、アクセプタは価電子帯から簡単に(少しのエネルギーで)電子を奪えると考え、アクセプタ準位は価電子帯のすぐ上に位置すると言える。

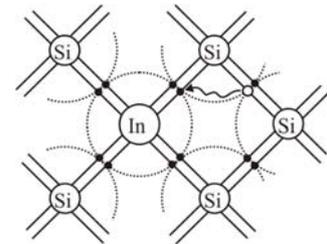
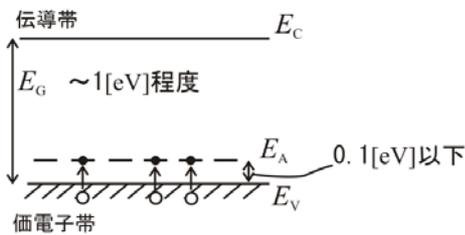


図3 p 形半導体の結合モデル



p 形半導体

図4 アクセプタ準位

E_A :アクセプタ準位(acceptor level)

価電子帯上端の直ぐ上に存在

ドナーの場合と同様に、イオン化エネルギーを得て、価電子帯から電子を受け取る。

3-8 ドナー準位

n 形半導体のドナー原子に弱く結合している 5 番目の電子の結合エネルギーは不純物のイオン化エネルギーに等しい。イオン化エネルギー E_I を水素原子モデルから考えると

$$E_I = E_{n=\infty} - E_{n=1} = \frac{m^* q^4}{8\epsilon_0^2 \epsilon_r^2 h^2} = \frac{13.6 m^*}{\epsilon_r^2 m} \text{ [eV]}$$

となる。Si の比誘電率 ϵ_r と電子の有効質量 m_e^* を考慮すると、ドナー準位と伝導帯下端 E_C との差(イオン化エネルギー)は 0.1 eV 以下と見積もることができる。

同様に、アクセプタ準位と価電子帯上端 E_V との差も 0.1 eV 以下となることがわかる。

常温(300K)では、熱エネルギーは $kT \sim 0.026 \text{ eV}$ なので、ほとんどのドナー、アクセプタはイオン化されている。

3-9 電気伝導の概略

半導体試料の両端に電圧を掛けたときの、試料の両端の電位差によるエネルギーバンドの傾斜を考える。

左図のように試料の両端 A、B に電圧 V を印加したモデルを考える(図 5(a))。A 点を基準(ゼロ)としたとき、B 点での電位は $+V$ となる(図(b))。区間 dx の電位差 dV と電界 \mathcal{E} の関係は

$$\mathcal{E} = -\frac{dV}{dx} \quad ((b) \text{図の傾き})$$

となる。電界 \mathcal{E} 中の電子(電荷: $-q$)に働く力 F は

$$F = -q\mathcal{E}$$

である。

また、力 F とポテンシャルエネルギー E との関係は

$$F = -\frac{dE}{dx}$$

であるので、上二式より

$$-q \left(-\frac{dV}{dx} \right) = -\frac{dE}{dx}$$

$$-qdV = dE$$

となる。今、A-B 間を考えると電位差は V であるので、A-B 間のエネルギー差は $-qV$ であることがわかる(図(c))。よって、この場合のエネルギーバンド図は qV だけ傾くことがわかる(図(d))。

図 5(d)のように、エネルギーバンド図に傾斜があるとき、伝導帯にいる伝導電子と価電子帯にいる正孔の動きは次のようになる。

伝導帯の電子：伝導帯の傾斜に沿って左から右に移動する。電子はボール、伝導帯の下端は床と考えると、ボールは傾斜のついた床を転がる。

価電子帯の正孔：価電子帯の傾斜に沿って右から左へ移動する。このとき、価電子帯の正孔は風船、価電子帯の上端を天井と考えると、風船は傾斜のついた天井を這うように上へ移動する。

電子の移動は A→B であるが、電子の電荷はマイナスであるので、流れる電流(電子電流)の向きは B→A である。また、正孔の電荷はプラスなので、正孔の移動方向は電流(正孔電流)の向きと一致する。

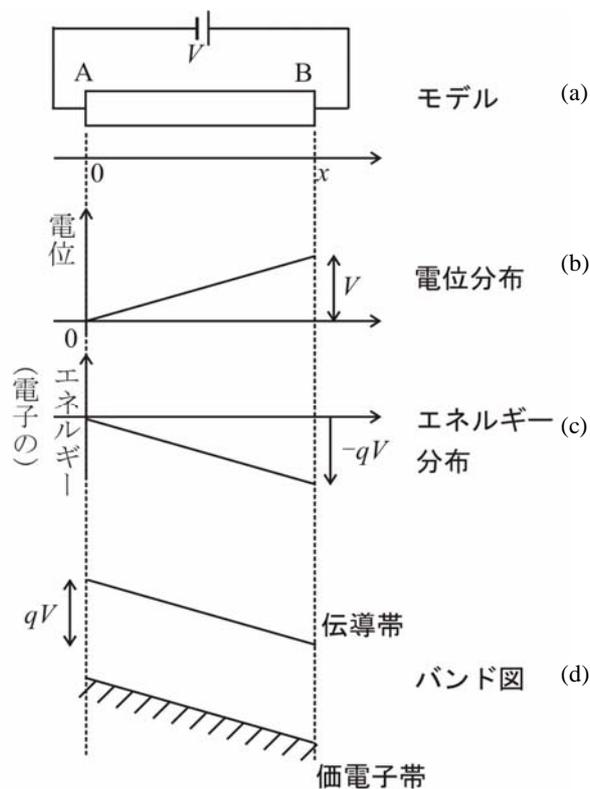


図 5 エネルギーバンドの傾斜