

**半導体工学 Semiconductor Devices**

教科書： 「改訂 半導体素子」 石田哲郎、清水東 著 コロナ社

講義範囲： 第 4 章 4-6 密度勾配によるキャリアの運動

第 5 章 pn 接合 pn junction

第 6 章 金属と半導体の接触 metal semiconductor contact

第 7 章 接合トランジスタの動作 bipolar transistor

第 11 章 11-6 電界効果トランジスタ Field Effect Transistor

第 12 章 光電素子

**【復習】****エネルギー帯**

一つの原子が孤立した状態での電子のエネルギーは、とびとびの状態((2.9)式)しか取り得ない(Fig.1)。一方、固体では原子が密集して存在しているため、エネルギー準位は原子の数だけ分裂する。それゆえ、個々の準位も密集して1つ1つ区別できないので、これを1つの領域として考えると、電子のエネルギー準位は幅を持った帯状になる。

それぞれのエネルギー領域を「**エネルギー帯(バンド)**」と呼び、電子の入り得る帯域を「**許容帯**」、許容帯間の電子の存在できない帯域を「**禁制帯**」という。このようにエネルギー状態を帯状の状態とする考え方を「**エネルギー帯理論**」という。

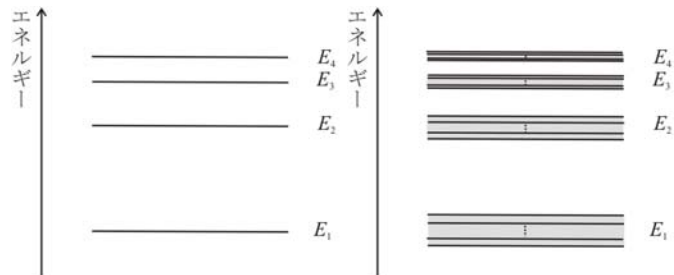


Fig.1 孤立原子の準位

Fig.2 固体中の準位

**共有結合**

原子構造を考えた時、原子核の周りを運動する電子の一番外側の軌道を**最外殻**といい、そこに存在している電子を**価電子**と呼ぶ。代表的な半導体である Si(シリコン)はIV族元素なので、価電子は 4 個である。最外殻の電子が 8 個のとき価電子配置が安定するため、隣り合う 4 つの他の原子と互いに電子を共有しあって結合する。この結合を**共有結合(covalent bond)**と呼ぶ。

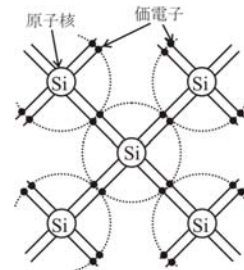


Fig.3 Si の共有結合

**p 形半導体 (IV族+Ⅲ族)**

母体IV族原子の価電子をⅢ族原子が奪って共有結合する。電子の抜けた穴が**正孔(ホール)**となって電気伝導に寄与する。

飽和領域(室温)での p 形半導体のフェルミ準位  $E_{Fp}$  の位置は価電子帯上端  $E_V$  の直ぐ上にある。

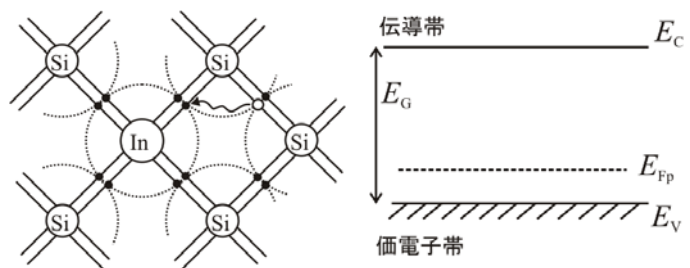


Fig.4 p 形半導体の結合モデルとフェルミ準位

**n 形半導体 (IV族+V族)**

V 族原子の価電子の 1 個がフリーとなって電気伝導に寄与する。

飽和領域(室温)での n 形半導体のフェルミ準位  $E_{Fn}$  は伝導帯下端  $E_C$  の直ぐ下に位置する。

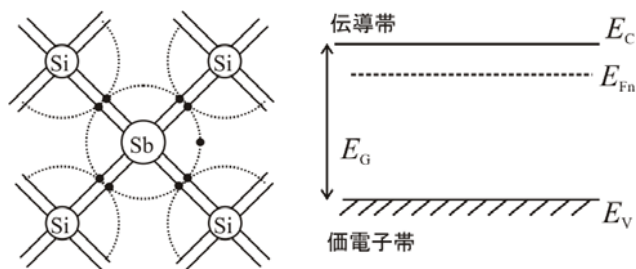


Fig.5 n 形半導体の結合モデルとフェルミ準位

#### 4-6 密度勾配によるキャリアの運動

半導体中を流れる電流はドリフト電流と拡散電流(diffusion current)の二つの成分からなっている。

- ・ドリフト電流：キャリアが電界に引かれて運動する。
- ・拡散電流：キャリアが密度差によって運動する。

##### 4-6-1 キャリアの拡散

分子濃度が不均一な(場所によって異なる)場合、分子は濃度が高い方から低い方へと均一になるように移動する。この現象を**拡散(diffusion)現象**という(例えば、煙突から出た煙や水に垂らしたインク等)。これは、荷電粒子(キャリア)の場合も同じで、荷電粒子が密度の濃い方から低い方へ拡散して移動すると、電荷は時間的に変化する、すなわち電流が流れることになる(Fig.6)。

今、簡単のため一次元モデル、キャリアとして正孔を考える(Fig.7)。  
 $x$  点および  $x+dx$  点での正孔密度をそれぞれ  $p(x)$ 、 $p(x+dx)$  とすると

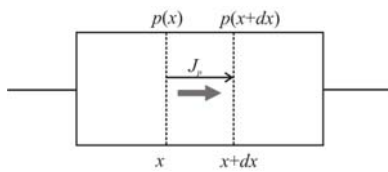


Fig.7 一次元モデル

$$p(x+dx) \cong p(x) + \frac{dp}{dx} dx$$

と展開できる(傾き  $dp/dx < 0$ )。正孔の移動による電流密度は

$$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad \cdots(4.29)$$

と表される。ここで  $D_p$  は正孔の拡散定数(diffusion constant)という。電子の場合も同様に

$$J_n = +qD_n \frac{dn}{dx} \quad \cdots(4.30)$$

と表される( $D_n$  は電子の拡散定数)。電子と正孔が同時に存在し拡散する場合は

$$J = J_n + J_p = q \left( D_n \frac{dn}{dx} - D_p \frac{dp}{dx} \right) \quad \cdots(4.31)$$

拡散定数と移動度には

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} \quad \cdots(4.34)$$

の関係がある。この関係を**アインシュタインの関係式(Einstein's relationship)**という。

よって、電界とキャリア密度の勾配が存在している半導体に流れる電流は、

(ドリフト電流) + (拡散電流)

$$\text{電子: } J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \quad \cdots(4.32)$$

$$\text{正孔: } J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx} \quad \cdots(4.33)$$

と表される。また、少数キャリアが発生してから再結合するまで拡散する平均の移動距離を**拡散距離(diffusion length)**という(Fig.8)。

$$L = \sqrt{D\tau} \quad \cdots(4.35)$$

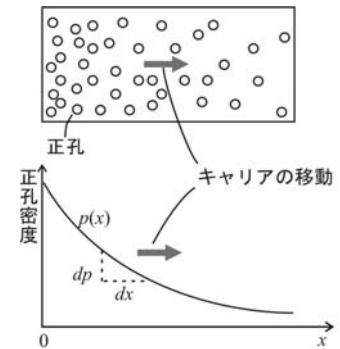


Fig.6 キャリアの拡散

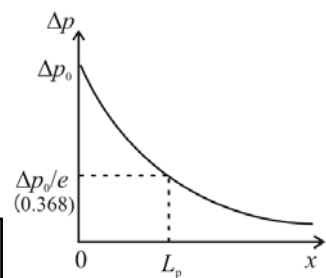


Fig.8 拡散距離

D の単位

$$D = \frac{k \left[ \frac{J}{K} \right] T [K] \mu \left[ \frac{m^2}{Vs} \right]}{q [C]} = \left[ \frac{J}{C} \right] \left[ \frac{m^2}{Vs} \right] = \left[ \frac{Nm}{C} \right] \left[ \frac{m^2}{Vs} \right] = \left[ \frac{Vm}{m} \right] \left[ \frac{m^2}{Vs} \right] = \left[ \frac{m^2}{s} \right]$$