

**半導体工学 Semiconductor Devices**

教科書： 「基礎半導体工学」 小林敏志、金子双男、加藤景三 共著 コロナ社

講義範囲： 第 6 章 pn 接合  
 第 7 章 pn 接合ダイオード  
 第 8 章 金属と半導体の接触  
 第 9 章 バイポーラトランジスタ  
 第 10 章 電界効果トランジスタ  
 第 11 章 11-3 光半導体デバイス

**6 pn 接合****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。

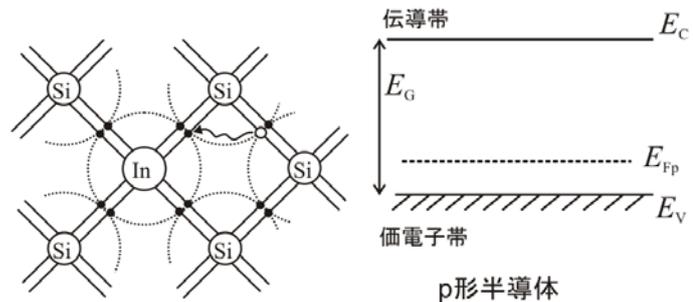


Fig.1 p 形半導体の結合モデルとフェルミ準位

**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。

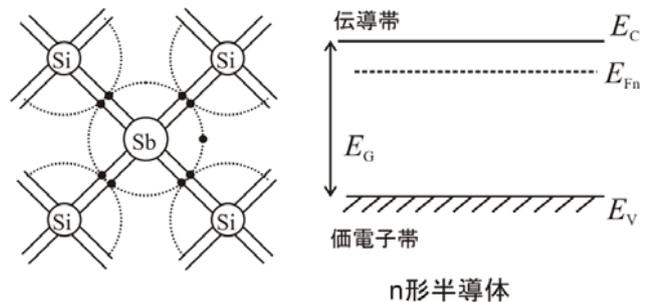


Fig.2 n 形半導体の結合モデルとフェルミ準位

**6-1 pn 接合の構造**

一つの半導体結晶で、p 形とn形が互いに結合している状態を **pn 接合(pn junction)**という。すなわち、接合とは、二つの物質の結晶性がある程度の連続を保つように結合したものを指している。接合と似た言葉に**接触(contact)**があるが、接触は単に二つの物質が合わさっている状態の場合に使う。8 章で出てくる金属と半導体の場合は、**金属-半導体接触(metal-semiconductor contact)**と呼ぶ。この講義では、接触と接合という言葉は混同せずわけて使用する。

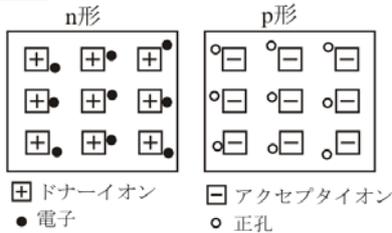
p 形半導体と n 形半導体を原子的に結合させたとき、二つの領域の間に不純物濃度に変化する領域が現れる。この領域を**遷移領域(transition region)**と呼ぶ。p 形と n 形間の遷移領域部を pn 接合という。遷移領域において、半導体の不純物濃度、すなわち p 形におけるアクセプタ密度と n 形におけるドナー密度の濃度変化が急激な接合を**階段接合(step junction)**、緩やかに変化しているものを**傾斜接合(graded junction)**と呼んでいる。また、アクセプタ密度とドナー密度が等しくなる面を **pn 境界(pn boundary)**という。

pn 接合の形成方法としては、**合金法(alloying method)**、**拡散法(diffusion method)**、**イオン注入法(ion implantation)**などがある。

### 6-2 pn 接合の平衡

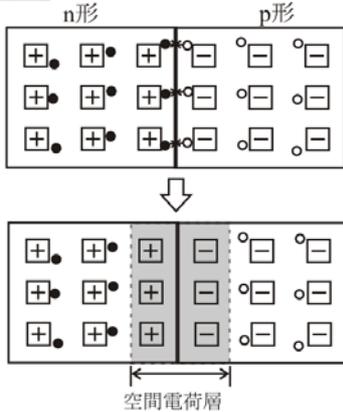
飽和領域(室温)にある p 形、n 形半導体を考える(教科書 p.71、4-4 節を参照のこと)。このとき、不純物のほとんどがイオン化し、n 形の場合、電子密度  $n$  はドナー密度  $N_D$  にほぼ等しくなる(p 形の場合は  $p \sim N_A$ )。n 形半導体領域では電子密度(負電荷)が多数を占めており、p 形では正孔密度(正電荷)が多数となっている。この 2 つの半導体で接合を形成すると、正・負電荷共に密度差が生じてキャリアはそれぞれ拡散し、n 領域の電子は p 領域に、p 領域の正孔は n 領域に移動する。

接合前



今、仮想的に p 形半導体と n 形半導体を接合すると考える。接合前では、それぞれの領域で不純物とキャリア、すなわちアクセプタイオンと正孔、あるいはドナーイオンと電子は電氣的に中性となっている。

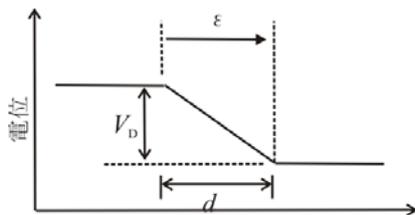
接合後



二つの領域を近づけて接合させたすると、接合付近のキャリアはそれぞれ拡散によって密度の小さい方へと移動する。すなわち、n 領域の電子は接合面を横切って p 領域へ、p 領域の正孔は n 領域へ流れ込んでいく。移動した電子は正孔と、また正孔は電子と再結合して消滅する。

接合付近の不純物イオンは結晶格子の位置に置換しているため移動できずに n 領域には正にイオン化したドナーが、p 領域には負にイオン化したアクセプタが取り残される。その結果、接合面近傍では両イオンにより空間電荷層(space charge layer)が形成されて電界  $\epsilon$  を生ずる。

Fig.3 pn 接合の概念モデル図



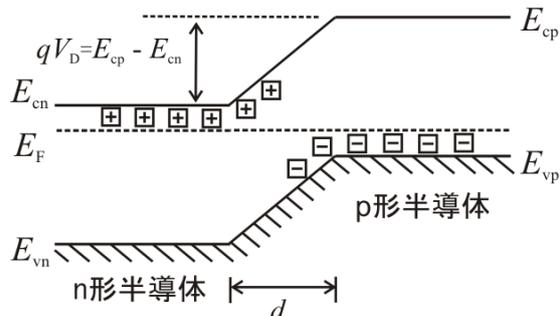
このときの pn 接合の電位を Fig.4 に示す。p 領域と n 領域には  $V_D$  の電位差が発生する。この電位差を拡散電位(diffusion potential)あるいは接触電位差(contact potential difference)と呼ぶ。拡散電位による内部電界  $\epsilon$  は空間電荷層の幅を  $d$  とすると

$$\epsilon = \frac{V_D}{d}$$

Fig.4 pn 接合の電位

と表される。この電位差はキャリアの拡散を妨げる障壁となる。

pn 接合のバンド図は Fig.5 のように表される。p 領域と n 領域を接合させたときのキャリアの拡散による移動は両領域のフェルミ準位が一致するまで続く。両領域のフェルミ準位が一致した状態を熱平衡状態という。言い換えると、熱平衡状態とはキャリアの拡散運動と内部電界によるキャリアのドリフト運動が釣り合った状態である。



また、空間電荷層はキャリアが少ない領域であるので空乏層(depletion layer)と呼ばれることもある。

Fig.5 pn 接合のバンド図