6-2　pn 接合のエネルギー帯図

飽和領域（室温）にある p 形半導体、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~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。

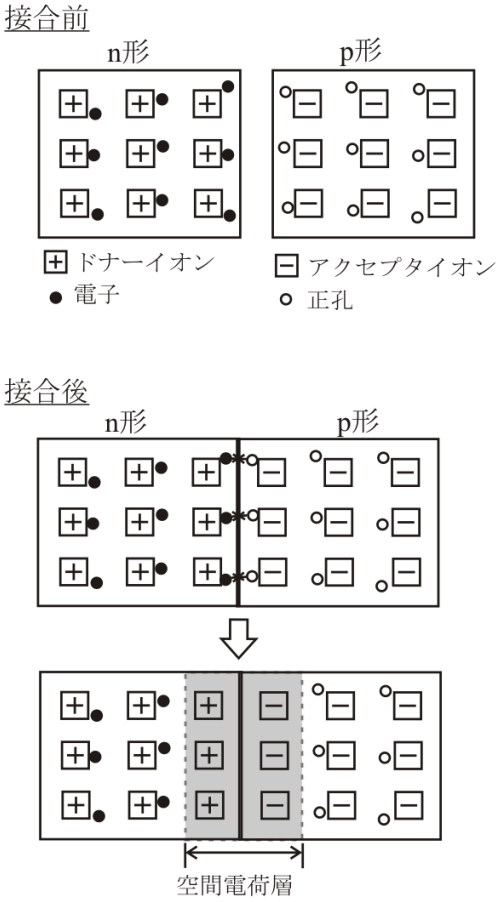

Fig.1　pn 接合の概念モデル図

今、仮想的に p 形半導体と n 形半導体を接合させて考える。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（●）は電気的に中性となっている。

二つの領域を近付けて接合させたとすると、接合部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 ε を生ずる。

このときの pn 接合の電位を Fig.2 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 ε は空間電荷層の幅を d とすると

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

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。

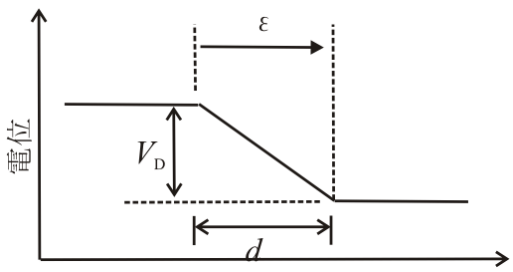

Fig.2　pn 接合の電位

pn 接合のバンド図は Fig.3 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。

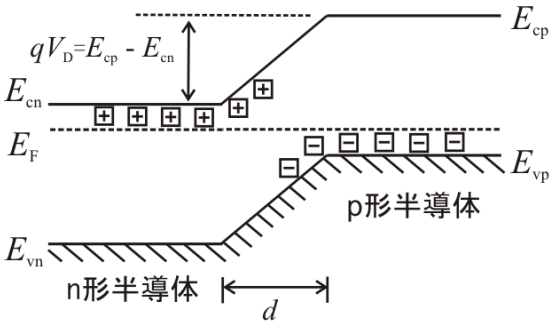

Fig.3　pn 接合のバンド図

6-3　拡散電位

熱平衡状態での pn 接合の電子密度 n_{n0}（n 領域）および n_{p0}（p 領域）は、教科書 p.63(4-11)式より

$$n_{n0} = N_c e^{-(E_{cn}-E_{Fn})/kT} \qquad \cdots(6.2)$$

$$n_{p0} = N_c e^{-(E_{cp}-E_{Fp})/kT} \qquad \cdots(6.3)$$

両式の比の対数をとると、$E_F = E_{Fp} = E_{Fn}$ として

$$V_D = \frac{kT}{q}\ln\frac{n_{n0}}{n_{p0}} \qquad \cdots(6.5)$$

となる。また、飽和領域の条件（ドナー、アクセプタがイオン化）を考えると、$n_{n0} \cong N_D$ および $n_{p0} \cong n_i^2 / N_A$ の関係から

$$V_D = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} \qquad \cdots(6.8)$$

が得られる。ここで、N_A および N_D はアクセプタ密度およびドナー密度である。(6.8)式から拡散電位は不純物濃度が高いほど大きくなることがわかる。

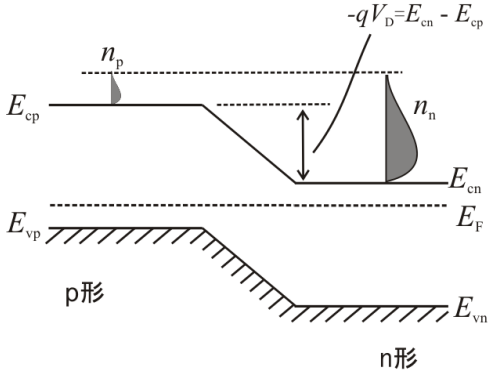

Fig.4　熱平衡状態の pn 接合