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

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

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

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

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

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

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

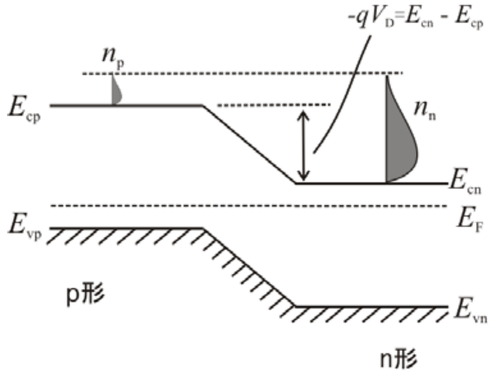

Fig.1　熱平衡状態の pn 接合

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。

6-4　階段接合

階段接合 : pn 境界で不純物濃度が階段状に変化している接合(接合部で不純物がアクセプタからドナーへ急激に変わっている接合)。

階段接合の空乏層の厚さ d および静電容量 C を表す式を導く。解析は一次元モデルを仮定する。

Fig.2 に解析モデルの空間電荷分布および電位を示す。ここで、N_D および N_A はドナーおよびアクセプタ濃度、x_n および x_p はそれぞれ空乏層の両端を示す。

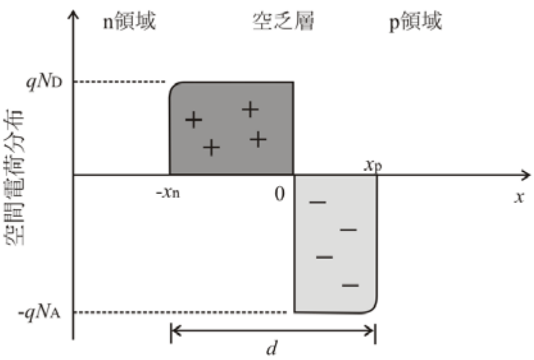

Fig.2　階段接合の電荷分布

ポアソン方程式(Poisson equation)

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad \cdots(6.9)$$

ここで、誘電率 ε は $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_S$ である（ε_0 は真空の誘電率、ε_S は物質の比誘電率）。各領域で電位 φ を求める。

ｉ) $0 \le x \le x_p$ の領域

ポアソン方程式より

$$\varphi_p = \frac{qN_A}{2\varepsilon}x^2 + A_p x + B_p$$

ⅱ) $-x_n \le x \le 0$ の領域

$$\varphi_n = -\frac{qN_D}{2\varepsilon}x^2 + A_n x + B_n$$

ⅲ) $x \le -x_n$ および $x_p \le x$ の領域

$$V_D = -(\Phi_p - \Phi_n)$$

各境界での連続の条件より未知定数 A および B を求める。

ｉ）$x=0$ での連続性

$$\varphi_n(0)=\varphi_p(0) \quad \text{および} \quad \frac{d\varphi_n(0)}{dx}=\frac{d\varphi_p(0)}{dx} \quad \text{より} \quad B_n=B_p\equiv B \quad \text{および} \quad A_n=A_p\equiv A \quad \text{となる。}$$

ⅱ）$x=-x_n$ での連続性

$$\varphi_n(-x_n)=\Phi_n \quad \text{および} \quad \frac{d\varphi_n(-x_n)}{dx}=\frac{d\Phi_n}{dx} \quad \text{より} \quad A=-\frac{qN_D}{\varepsilon}x_n \quad \text{となる。}$$

ⅲ）$x=x_p$ での連続性

$$\varphi_p(x_p)=\Phi_p \quad \text{および} \quad \frac{d\varphi_p(x_p)}{dx}=\frac{d\Phi_p}{dx} \quad \text{より} \quad A=-\frac{qN_A}{\varepsilon}x_p \quad \text{となる。}$$

ここで、$A=-\frac{qN_D}{\varepsilon}x_n=-\frac{qN_A}{\varepsilon}x_p$ より、 $N_Dx_n=N_Ax_p$ …(6.13)

この式は、空乏層内の正負の電荷量は等しいことを示している。

空乏層の厚さ $d(=x_n+x_p)$ を求める。(6.13)式から x_n および x_p を d で表すと

$$x_n=\frac{N_A}{N_A+N_D}d \text{、} \qquad x_p=\frac{N_D}{N_A+N_D}d$$

また、p 領域と n 領域の電位差 V_D は

$$V_D=\varphi_n(-x_n)-\varphi_p(x_p)=\frac{q}{2\varepsilon}\left(N_D\cdot x_n{}^2+N_A\cdot x_p{}^2\right)$$

であるので、これより空乏層の厚さ d は

$$d=\sqrt{\frac{2\varepsilon(N_D+N_A)}{qN_DN_A}V_D} \qquad \cdots(6.21)$$

と求められる。この式からわかるように、**d は電位差 V_D の平方根に比例**する。

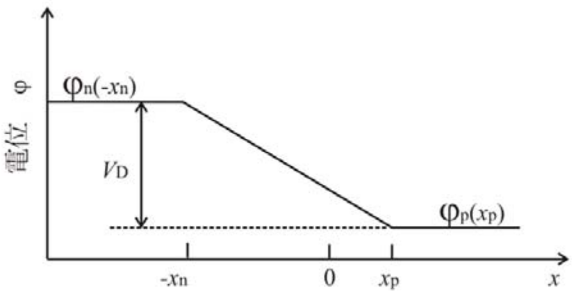

Fig.3 階段接合の電位

May 26, 2009

空乏層の静電容量

pn 接合に外部電圧(直流)を印加する。電圧の印加方向によって接合付近の状態が異なる。

・順方向バイアス状態：

p 形側に正電圧、**n** 形側に負電圧を印加。

↓

p 領域の正孔は電位の低い方(n 領域)へ、
n 領域の電子は電位の高い方(p 領域)へ移動する。
その結果、順バイアス状態では空乏層幅は狭くなる。

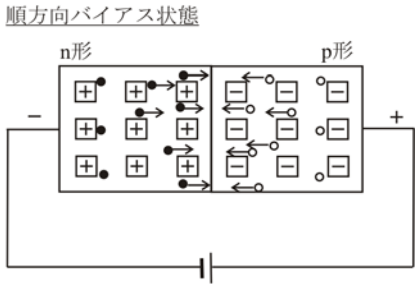

Fig.1　順バイアス状態

・逆方向バイアス状態：

p 形側に負電圧、**n** 形側に正電圧を印加。

↓

p 領域の正孔は電位の低い方(－極側)へ、
n 領域の電子は電位の高い方(＋極側)へ移動する。
その結果、逆バイアス状態では空乏層幅が広くなる。

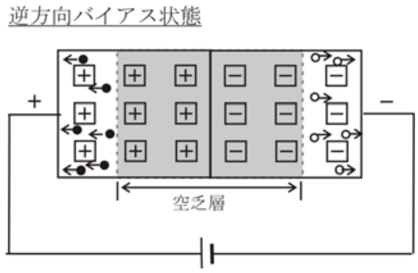

Fig.2　逆バイアス状態

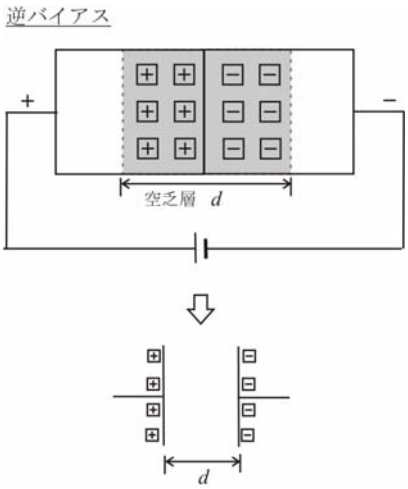

Fig.3　空乏層の静電容量

pn 接合の空乏層には、正負の空間電荷が存在しているので、これを空乏層幅の電極間隔を持つ 2 枚の平板コンデンサ（容量）と見なすことができる。

逆バイアスの電圧の大きさを変化させると空乏層の幅 d が変わるため、空乏層（コンデンサ）の静電容量 C もまた変化する。

次に空乏層の静電容量 C を表す式を求める。空乏層にたまった単位面積あたりの電荷 Q は

$$Q = q \cdot N_D \cdot x_n = q \cdot N_D \frac{N_A}{N_D + N_A} d$$

$$= \sqrt{\frac{2\varepsilon q N_A N_D}{N_D + N_A}\left(V_D - V\right)}$$

となる。これより、空乏層の静電容量 C は

$$C = \left|\frac{dQ}{dV}\right| = \sqrt{\frac{\varepsilon q N_A N_D}{2\left(N_D + N_A\right)} \frac{1}{\left(V_D - V\right)}} \qquad \cdots(6.25)$$

と表される。静電容量 C と空乏層幅 d の積をとると、

$$Cd = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

となる。一方、平板コンデンサの容量(真空中)C_0 は

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$$

と表される(S は電極の面積)。上の二式を比べると、C は物質中の電極の間隔 d の単位面積あたりの静電容量と考えることができる。この静電容量は、**空乏層容量**(depletion layer capacitance)または**接合容量**(junction capacitance)と呼ばれる。

(6.24)および(6.25)式から、逆バイアス電圧－V が大きくなると空乏層幅 d は広がり、容量 C は小さくなることが分かる。

容量 C と外部電圧 V の関係を考えると

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2\left(N_D + N_A\right)}{\varepsilon q N_D N_A}\left(V_D - V\right) \qquad \cdots(6.26)$$

となり、$1/C^2$ と V の関係は Fig.5 のようになる。すなわち、特性直線を $1/C^2 = 0$ まで伸ばす(外挿という)と、そのときの電圧値が拡散電位となる。

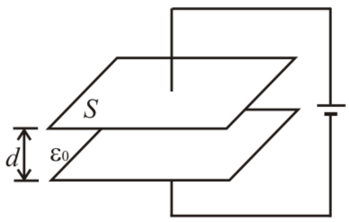

Fig.4　平板コンデンサ

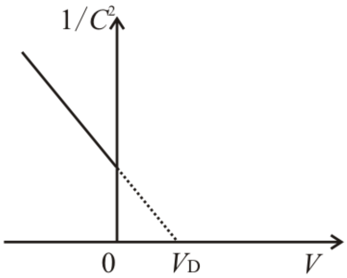

Fig.5　電圧-容量特性