7-2　少数キャリアの分布

pn 接合に順方向に外部電圧 V を印加したときに pn 接合面(接合面積 S)に流れる電流を求める。始めに接合面を通過する電子（正孔）のキャリア密度を求め、それから拡散方程式によりキャリアによる電流密度を導く。

・n 領域から p 領域へ移動する電子

外部電圧 V は遷移領域にのみ掛かる、遷移領域での再結合は考慮しない、と仮定して電子は拡散現象により移動するとする。

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = -\frac{n_p - n_{p0}}{\tau_e} + D_e \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} \qquad \cdots(7.2)$$

ここで、τ_e :電子の寿命、 D_e :電子の拡散定数。

定常状態では、電子のキャリア密度の時間的変化は無い(直流電圧が印加されている)ので $\frac{\partial n_p}{\partial t} = 0$

である。また、$L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$ とおくと、(7.2)式は

$$\frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} = \frac{n_p - n_{p0}}{L_e^2}$$

と線形の 2 階微分方程式になる。ここで、L_e は拡散長と呼ばれ、キャリアが消滅するまでに移動する距離である。この微分方程式の一般解は次のように与えられる。

$$n_p(x) - n_{p0} = A\exp\left(\frac{x}{L_e}\right) + B\exp\left(-\frac{x}{L_e}\right)$$

一般解の未知数 A、B を求めるため境界条件を考える。障壁を越えられるエネルギーを持つ p 領域における正孔密度は $n_p(0) = n_{p0}\exp\left({qV}/{kT}\right)$ であるので、

$$x = 0：\quad n_p(0) - n_{p0} = n_{p0}\left[\exp\left({qV}/{kT}\right) - 1\right]$$

また、p 領域の長さが拡散距離 L_e よりも十分に長い(注入キャリアは電極に達するまでに消滅する)、として

$$x = \infty：\quad n_p(\infty) - n_{p0} = 0$$

$x = \infty$ での境界条件より、 $n_p(\infty) - n_{p0} = A\exp\left({\infty}/{L_e}\right) + B\exp\left(-{\infty}/{L_e}\right) = 0$ なので

$$A = 0$$

$x = 0$ での境界条件より B は

$$B = n_{p0}\left[\exp\left({qV}/{kT}\right) - 1\right]$$

よって、電子密度は次の式になる。

$$n_p(x) = n_{p0} + n_{p0}\left[\exp\left({qV}/{kT}\right) - 1\right]\exp\left({-x}/{L_e}\right) \qquad \cdots(7.8)$$

7-3　電圧電流特性（1）

電子による電流

導出した電子密度より電子電流密度 J_e を求める。電流密度の式は 2-2 節の(2.17)式より

$$J_e = +qD_e \frac{dn_p(x)}{dx}$$

であるので、(7.8)式より

$$J_e = -\frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right]\exp\left(\frac{-x}{L_e}\right) \quad \cdots(7.10)$$

となる。接合部 $x = 0$ での電流密度は

$$J_e = -\frac{qD_e n_{p0}}{L_e}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right] \quad \cdots(7.11)$$

正孔による電流密度 J_h も同様に

$$J_h = -\frac{qD_h p_{n0}}{L_h}\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right] \quad \cdots(7.12)$$

と求めることができる。これより、接合部を流れる全電流 I は、接合面積 $S\times(J_e + J_h)$ であるので

$$I = S(J_e + J_h) = qS\left(\frac{D_h p_{n0}}{L_h} + \frac{D_e n_{p0}}{L_e}\right)\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right]$$

$$= I_s\left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right]$$

となる。この式より、電流が少数キャリア密度(p_{n0}, n_{p0})と拡散定数(D_e, D_h)、拡散距離(L_e, L_h)で決まることがわかる。

7-4　電圧電流特性（2）

逆方向バイアス電圧印加の場合も上述の電流の式で表される。pn 接合の電圧-電流特性を描くと Fig.1 に示すようになる。順バイアス電圧印加時(V>0)では、電流は V の増加と共に急激に増加する。

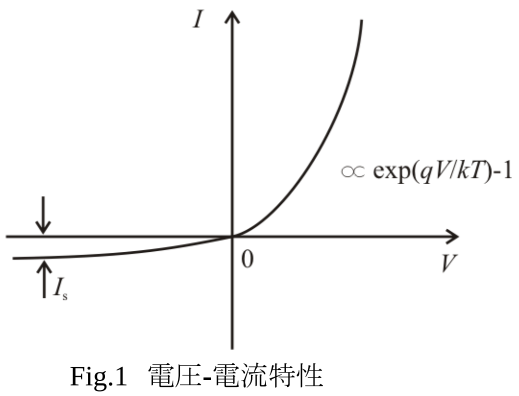

Fig.1　電圧-電流特性

常温で、例えば V=0.1[V]程度では、$\exp\left({qV}/{kT}\right) >> 1$ となるので、指数関数で近似できる。また、逆バイアス電圧印加時(V<0)では、電流値は電圧に無関係に一定になる。この逆方向に流れる一定の電流を**逆方向飽和電流(saturation current)**という。このように電圧-電流特性が非線形性を示し、順バイアスのときのみ電流が流れる性質を**整流性(rectification)**という。