May 30, 2007

5-3-1　pn 接合の整流作用

(c)　逆方向バイアス電圧

pn 接合に逆方向に外部電圧を印加(V<0)すると、順バイアスと同様に両領域のフェルミ準位に qV の電位差が生じる(Fig.1)。両領域の伝導帯のエネルギー差は

$$E_{Cp} - E_{Cn} = q(V_D - V) = q(V_D + |V|)$$

となり、(キャリアにとっての)障壁高さは大きくなる。この障壁を越えるだけのエネルギーを持つ n 領域の電子密度 n は

$$n = n_p \exp\left(-\frac{q|V|}{kT}\right) \quad << \quad n_p \qquad \cdots(5.42)$$

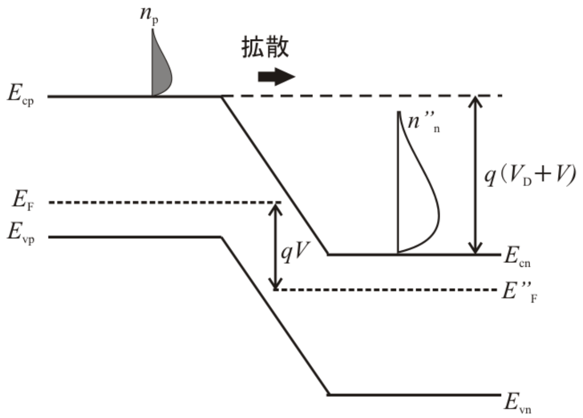

Fig.1　逆方向バイアス電圧印加時の pn 接合

となる。これより両領域の電子密度の差Δn'は

$$\Delta n' = n_p - n = n_p\left[1 - \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)\right] \qquad \cdots(5.43)$$

となる。p 領域の接合部付近の電子(少数キャリア)は n 領域に流れ込んでいく(遷移領域の内部電界による)。これを「**注出 extraction**」という。p 領域の電子は少数キャリアで密度も小さいので流れる電流値も小さく、また電圧を大きくしても電子密度は変化しないので電流値は一定となる(飽和する)。

以上の 3 つの状態から電圧-電流特性を描くと Fig.2 のようになる。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。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。この逆方向一定電流を**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。

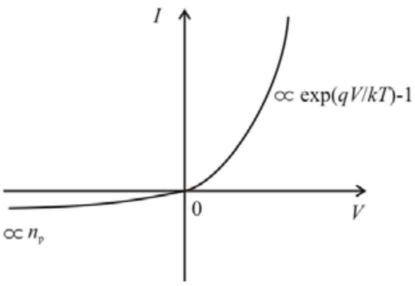

Fig.2　電圧-電流特性

5-3-2　pn 接合の拡散電流

Fig.3 に示すように、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。解析は、始めに接合面を通過する電子、正孔それぞれのキャリア密度を求め、それから拡散方程式により各キャリアによる電流密度を導く。

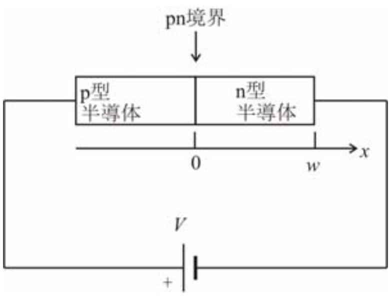

Fig.3　解析モデル

<u>**・p 領域から n 領域へ移動する正孔**</u>

仮定ⅰ)電圧 V は遷移領域にのみ掛かる、ⅱ)遷移領域の再結合は考慮しない、として正孔は拡散現象により移動するとする。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_n}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \qquad \cdots(5.44)$$

τ_p :n 領域の正孔寿命、D_p :正孔の拡散定数、p_n :n 領域の正孔密度

5-3-2　pn 接合の拡散電流(つづき)

定常状態では、正孔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 $\frac{\partial p}{\partial t}=0$ である。また、$L_p=\sqrt{D_p \tau_p}$ とおくと、(5.44)式は

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}=\frac{p-p_n}{L_p}$$

と線形の 2 階微分方程式になる。ここで、L_p 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。

$$p(x)-p_n=A\exp\left(\frac{x}{L_p}\right)+B\exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) \qquad \cdots(5.46)$$

未知数 A、B を求めるために境界条件を考える。p 領域における障壁を越えられるエネルギーを持つ正孔密度は $p=p_n\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ であるので、これと遷移領域での再結合がないという仮定ⅱ)より

$$x=0: \quad p(0)=p_n\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \qquad \cdots(5.47)$$

また、仮定ⅲ)n 領域の長さ W が拡散距離 L_p 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)、より

$$x=W: \quad p(W)=p_n \qquad \cdots(5.48)$$

境界条件(5.48)式より $p(W)-p_n=A\exp\left(\frac{x}{L_p}\right)+B\exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)=0$ なので

$$B=-A\exp\left(\frac{2W}{L_p}\right)$$

$$p(x)=p_n-2A\exp\left(\frac{W}{L_p}\right)\sinh\left(\frac{W-x}{L_p}\right)$$

境界条件(5.47)式を上式に代入すると

$$A=\frac{p_n\left[1-\exp\left(qV/kT\right)\right]}{2\exp\left(W/L_p\right)\sinh\left(W/L_p\right)} \qquad \cdots(5.49)$$

よって、正孔密度は次の式になる。

$$p(x)=p_n-p_n\left[1-\exp\left(qV/kT\right)\right]\frac{\sinh\left(W-x/L_p\right)}{\sinh\left(W/L_p\right)} \qquad \cdots(5.51)$$

1) $W>>L_p$ (n 領域が十分に長い場合)のとき

$$p\approx p_n-p_n\left[1-\exp\left(qV/kT\right)\right]\exp\left(-x/L_p\right)$$

すなわち、p は n 領域の幅 W の影響を受けずに $\exp\left(-x/L_p\right)$ で減衰する。

2) $W<<L_p$ (n 領域が短い場合)のとき

$$p\approx p_n-p_n\left[1-\exp\left(qV/kT\right)\right]\left(W-x/W\right)$$

すなわち、p には n 領域の幅 W が関係し、直線的に減衰する。