5-4　pn 接合の交流特性

5-4-1　交流電流

Fig.1 に示すように、pn 接合に順方向に直流電圧 V_0 と交流電圧 $V_1 e^{j\omega t}$（小信号）が印加されている(V_0 に $V_1 e^{j\omega t}$ が重畳している)モデルを考える。このとき、pn 接合部に流れる電流を求める。

$$V = V_0 + V_1 e^{j\omega t}$$

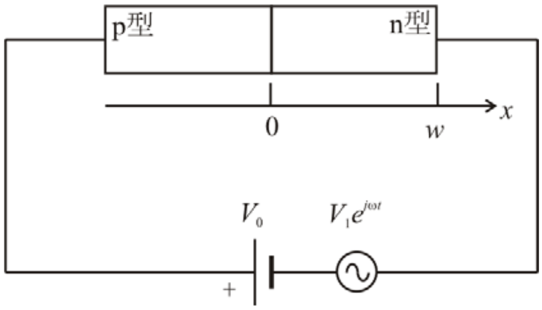

Fig.1　交流信号モデル

直流モデルにおける正孔密度の差(5.41)式に上式を代入する。ここで、交流信号の振幅 V_1 が微小($<< V_0$)であると考えると、

$$p - p_n \cong p_0 + p_1 \exp\left(j\omega t\right) - p_n \qquad \cdots(5.66)$$

ここで p_0 は $x = 0$ での直流分、 p_1 は $x = 0$ でに交流分の振幅である。

$$p_0 = p_n \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right)$$

$$p_1 = p_0 \exp\left(\frac{qV_1}{kT}\right) = p_n \frac{qV_1}{kT} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \qquad \cdots(5.67)$$

すなわち、正孔密度の直流分 p_0 は V_0 によって決まるが、交流分 p_1 は V_1 に比例することがわかる。

拡散方程式

任意の時刻 t と位置 x における正孔密度を $p(x,t) = p_0(x) + p_1(x)e^{j\omega t}$ として次の拡散方程式を解く。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_n}{\tau_p} + D\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \qquad \cdots(4.44)$$

上式の左辺は、正孔密度の時間変化（交流）分を考えると $\frac{\partial p}{\partial t} \to j\omega p$ となる。また、右辺の p および $\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}$ にそれぞれ代入すると

$$j\omega p_1 e^{j\omega t} = -\frac{p_0 - p_n}{\tau_p} - \frac{p_1 e^{j\omega t}}{\tau_p} + D\frac{\partial^2 p_0}{\partial x^2} + D\frac{\partial^2 p_1 e^{j\omega t}}{\partial x^2} \qquad \cdots(5.68)$$

となる。上式を直流項と交流項（時間 t が含まれる項）に整理すると、拡散距離 $L_p = \sqrt{D\tau_p}$ として

(直流分)　$$\frac{\partial^2 p_0}{\partial x^2} = \frac{p_0 - p_n}{L_p^2}$$

(交流分)　$$\frac{\partial^2 p_1}{\partial x^2} = \frac{1 + j\omega\tau_p}{L_p^2} p_1$$

となる。直流分の電流密度は前節 5-3-2 で求めた電流密度の解析と同じ（(5.55)式）であるので省略する。

交流分の微分方程式について、境界条件を用いて p_1 を求める。境界条件は、 $w >> L_p$ として

$$x = 0 \quad : \quad p_1(0) = p_n \frac{qV_1}{kT} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right)$$

$$x = w \quad : \quad p_1(w) = 0$$

交流分の微分方程式の一般解は、$L_p^{'} = L_p \big/ \sqrt{1 + j\omega\tau_p}$ として

$$p_1(x) = A\exp\left(\frac{x}{L_p^{'}}\right) + B\exp\left(-\frac{x}{L_p^{'}}\right)$$

であるとする。ただし、A および B は積分定数である。境界条件を使って積分定数 A および B を求めると

$$A = 0\ 、\qquad B = p_n \frac{qV_1}{kT}\exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right)$$

よって、$p_1(x)$ は

$$p_1(x) = p_n \frac{qV_1}{kT}\exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right)\exp\left(-\frac{x}{L_p^{'}}\right)$$

となる。これより、正孔電流密度 J_{1p} は

$$J_{1p} = -qD_p \left.\frac{\partial p}{\partial x}\right|_{x=0} = \frac{qD_p p_n}{L_p}\frac{qV_1}{kT}\exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right)\sqrt{1 + j\omega\tau_p} \qquad \cdots(5.72)$$

電子電流密度 J_{1n} も同様に求められる(添え字を n にする)。交流の拡散電流密度 J_1 は正孔と電子の電流密度の和として求められる。

$$J_1 = J_{1p} + J_{1n} = \frac{q^2 V_1}{kT}\exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right)\left(\frac{D_p p_n}{L_p}\sqrt{1 + j\omega\tau_p} + \frac{D_n n_p}{L_n}\sqrt{1 + j\omega\tau_n}\right) \qquad \cdots(5.73)$$