

9-5 トランジスタの直流特性

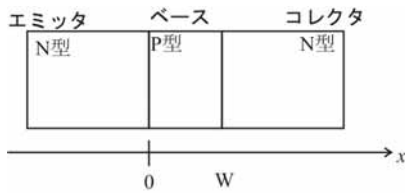


Fig.1 トランジスタの解析モデル

トランジスタに流れる電流を解析する。解析はキャリア密度を導出してから電流密度を求める。仮定は次の通りである。

- ・ベースの不純物濃度は均一
- ・一次元問題に簡単化
- ・NPN 型トランジスタを扱う(PNP 型も同様に解析できる)

pn 接合の 7-2 章で拡散方程式を解いてキャリア密度を求めた場合と同様にして、トランジスタのベース領域のキャリア密度 $n_p(x)$ を求める。

$$\frac{d^2 n_p(x)}{dx^2} = \frac{n_p(x) - n_{pB}}{L_{eB}^2}$$

ここで、 n_{pB} はベースにおける熱平衡電子密度、 L_{eB} は拡散距離*である。この一般解は

$$n_p(x) - n_{pB} = A \cdot \exp\left(\frac{x}{L_{eB}}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-x}{L_{eB}}\right) \dots (9.10)$$

A、B は積分定数で、境界条件から決定する。

境界条件 1) $x = 0$ で

$$n_p(0) = n_{pB} \exp\left(\frac{-qV_{EB}}{kT}\right)$$

境界条件 2) $x = W$ で

$$n_p(W) = n_{pB} \exp\left(\frac{-qV_{CB}}{kT}\right)$$

積分定数 A および B は次のようになる。

$$B = \frac{n_{pB} E \exp\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) - n_{pB} C}{2 \sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)}$$

$$A = \frac{-n_{pB} E \exp\left(-\frac{W}{L_{eB}}\right) + n_{pB} C}{2 \sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)}$$

ここで、 $E = \exp\left(-qV_{EB}/kT\right) - 1$ 、 $C = \exp\left(-qV_{CB}/kT\right) - 1$ とおいた。これより、(9.10)式は次のように導かれる。

$$n_p(x) - n_{pB} = \frac{n_{pB} \left\{ \exp\left(-qV_{EB}/kT\right) - 1 \right\} \sinh\left(\frac{W-x}{L_{eB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} + \frac{n_{pB} \left\{ \exp\left(-qV_{CB}/kT\right) - 1 \right\} \sinh\left(\frac{x}{L_{eB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} \dots (9.11)$$

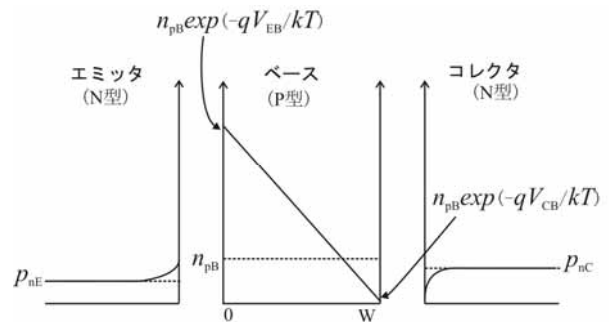


Fig.2 少数キャリア密度

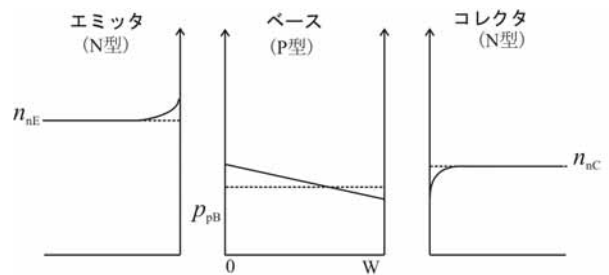


Fig.3 多数キャリア密度

* 拡散距離：注入された少数キャリアが拡散現象によって移動し、キャリア密度が $1/e$ になるまでの距離。 D を拡散定数、 τ をキャリアの寿命とすると、 $L_{nB} = (D_n \tau_n)^{1/2}$ 。

上で求めたベースのキャリア密度 $n_p(x)$ より電子電流密度 j_e を導出する。 j_e は拡散電流の式(2.17)から

$$j_e = qD_{eB} \frac{dn_p(x)}{dx} \quad \dots(2.17)$$

より求まる。ここで、 D_e は拡散定数、 q は電荷である。(9.11)式を x で微分すると

$$\begin{aligned} \frac{dn_p}{dx} &= \frac{n_{pB}E}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} \frac{d}{dx} \left(\sinh\left(\frac{W-x}{L_{eB}}\right) \right) + \frac{n_{pB}C}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} \frac{d}{dx} \left(\sinh\left(\frac{x}{L_{eB}}\right) \right) \\ &= \frac{1}{L_{eB}} \left[-\frac{n_{pB}E \cosh\left(\frac{W-x}{L_{eB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} + \frac{n_{pB}C \cosh\left(\frac{x}{L_{eB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} \right] \end{aligned}$$

これより(2.17)式から、エミッタ接合およびコレクタを流れる電子電流密度 j_{eE} および j_{eC} は次のように求まる。

$$\begin{aligned} j_{eE} &= -\frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \left[\frac{E \cosh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} - \frac{C}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} \right] \\ &= -\frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \left[E \coth\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) - C \operatorname{cosech}\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) \right] \quad \dots(9.14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} j_{eC} &= -\frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \left[\frac{E}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} - \frac{C \cosh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} \right] \\ &= -\frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \left[E \operatorname{cosech}\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) - C \coth\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) \right] \quad \dots(9.17) \end{aligned}$$

以上は電子電流密度について導出したが、正孔電流密度についても同様に得られる。エミッタ接合およびコレクタを流れる正孔電流密度を j_{hE} および j_{hC} とすると、エミッタ接合およびコレクタ接合に流れる電流密度 j_E および j_C は電子電流と正孔電流を足したものとして表される。

$$\begin{aligned} j_E &= j_{eE} + j_{hE} \\ &= -E \left[\frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \coth\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) + \frac{qD_{hE}p_{nE}}{L_{hE}} \right] + C \left[\frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \operatorname{cosech}\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) \right] \quad \dots(9.16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} j_C &= j_{eC} + j_{hC} \\ &= -E \frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \operatorname{cosech}\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) + C \left[\frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \coth\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) + \frac{qD_{hC}p_{nC}}{L_{hC}} \right] \quad \dots(9.19) \end{aligned}$$