

7-2 トランジスタを流れる電流

・均一ベーストランジスタ (uniform base transistor)

ベース領域の不純物分布が均一なトランジスタ。ベース領域を少数キャリアが拡散現象により通過する。

・不均一ベーストランジスタ (graded base transistor)

ベース領域の不純物濃度が濃度勾配しているトランジスタ。少数キャリアが不純物の傾斜分布による電界でドリフトする。講義では省略する。

7-2-1 トランジスタの一次元モデル



Fig.1 トランジスタの解析モデル

均一ベース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
- ・一次元問題に単純化
- ・npn 型トランジスタを扱う(pnp 型も同様に解析できる)

7-2-2 エミッタおよびコレクタ電流

pn 接合の 5-3 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 $n(x)$ を求める。

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

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

$$n(x) - n_{pB} = A \cdot \exp\left(\frac{x}{L_{nB}}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{-x}{L_{nB}}\right) \quad \dots(7.10)$$

A、B は積分定数で、境界条件から決定する。

$$\text{境界条件 1) } x = 0 \text{ で } n(0) = n_{pB} \exp\left(\frac{qV_E}{kT}\right)$$

$$\text{境界条件 2) } x = W \text{ で } n(W) = n_{pB} \exp\left(\frac{qV_C}{kT}\right)$$

積分定数 A および B は次のようになる。

$$B = \frac{n_{pB} E \exp\left(\frac{W}{L_{nB}}\right) - n_{pB} C}{2 \sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} \quad \dots(7.12)$$

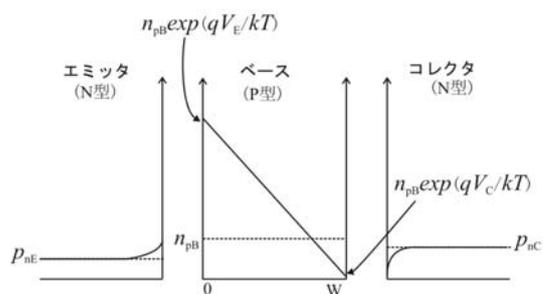


Fig.2 少数キャリア密度

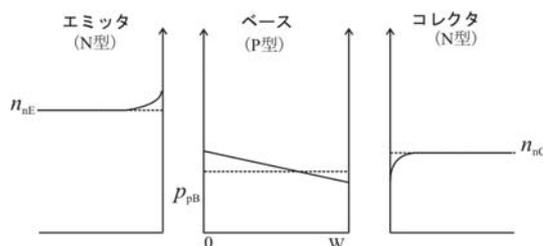


Fig.3 多数キャリア密度

$$A = \frac{-n_{pB} E \exp\left(-\frac{W}{L_{nB}}\right) + n_{pB} C}{2 \sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} \quad \dots(7.11)$$

ここで、 $E = \exp\left(\frac{qV_E}{kT}\right) - 1$ 、 $C = \exp\left(\frac{qV_C}{kT}\right) - 1$ とおいている。これより、(7.10)式は次のように導かれる。

$$n(x) - n_{pB} = \frac{n_{pB} \left\{ \exp\left(\frac{qV_E}{kT}\right) - 1 \right\} \sinh\left(\frac{W-x}{L_{nB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} + \frac{n_{pB} \left\{ \exp\left(\frac{qV_C}{kT}\right) - 1 \right\} \sinh\left(\frac{x}{L_{nB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} \quad \dots(7.13)$$

* 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 $n(x)$ より電子電流密度 J_n を導出する。 J_n は拡散電流の式(4.30)から

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \quad \dots(4.30)$$

より求まる。ここで、 D_n は拡散定数、 q は電荷である。(7.13)式を x で微分すると

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dx} &= \frac{n_{pB}E}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} \frac{d}{dx} \left(\sinh\left(\frac{W-x}{L_{nB}}\right) \right) + \frac{n_{pB}C}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} \frac{d}{dx} \left(\sinh\left(\frac{x}{L_{nB}}\right) \right) \\ &= \frac{1}{L_{nB}} \left[-\frac{n_{pB}E \cosh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} + \frac{n_{pB}C \cosh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} \right] \end{aligned} \quad \dots(7.15)$$

これより(4.30)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_{nE} および J_{nC} は次のように求まる。

$$\begin{aligned} J_{nE} &= -\frac{qD_n n_{pB}}{L_{nB}} \left[\frac{E \cosh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} - \frac{C}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} \right] \\ &= -\frac{qD_n n_{pB}}{L_{nB}} \left[E \coth\left(\frac{W}{L_{nB}}\right) - C \operatorname{cosech}\frac{W}{L_{nB}} \right] \end{aligned} \quad \dots(7.16)$$

$$\begin{aligned} J_{nC} &= -\frac{qD_n n_{pB}}{L_{nB}} \left[\frac{E}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} - \frac{C \cosh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} \right] \\ &= -\frac{qD_n n_{pB}}{L_{nB}} \left[E \operatorname{cosech}\left(\frac{W}{L_{nB}}\right) - C \coth\left(\frac{W}{L_{nB}}\right) \right] \end{aligned} \quad \dots(7.17)$$

電子電流 J_{nE} および J_{nC} をもう少し変形する。今、 $V_C < 0$ として、 $\exp\left(\frac{qV_C}{kT}\right) \ll 1$ とすると

$$J_{nE} = -\frac{qD_n n_{pB}}{L_{nB}} \frac{E \cosh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)} \quad J_{nC} = -\frac{qD_n n_{pB}}{L_{nB}} \frac{E}{\sinh\left(\frac{W}{L_{nB}}\right)}$$

さらに、 \sinh 、 \cosh をテイラー展開し、2次以降を無視すると

$$J_{nE} = -\frac{qD_n n_{pB}}{W} E \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_{nB}} \right)^2 \right] \quad J_{nC} = -\frac{qD_n n_{pB}}{W} E$$

また、 $V_E > 0$ として、 $\exp\left(\frac{qV_E}{kT}\right) \gg 1$ として、 $E \cong \exp\left(\frac{qV_E}{kT}\right) \equiv E'$ とすると次の式が得られる。

$$\begin{aligned} J_{nE} &= -\frac{qD_n n_{pB}}{W} E' \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_{nB}} \right)^2 \right] \\ J_{nC} &= -\frac{qD_n n_{pB}}{W} E' \end{aligned}$$

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_{pE} および J_{pC} 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。

$$J_E = J_{nE} + J_{pE} \quad \dots(7.20)$$

$$J_C = J_{nC} + J_{pC} \quad \dots(7.21)$$