

9-6 電流増幅率とバイポーラトランジスタの基本設計

Fig.1 に示すように、エミッタ電流がコレクタに流れ込むまで 3 つの段階に分けて考える。

- 1) エミッタからベースへの電子の注入
- 2) ベース内での電子の拡散による移動
- 3) コレクタ空乏層内の電界による電子のドリフト

以上、3 つの段階を考慮して、トランジスタの電流増幅率 α をそれぞれの段階における効率にわけて考える。

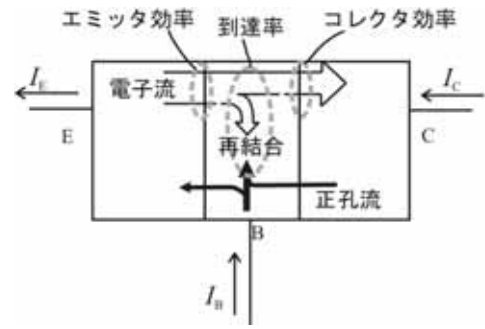


Fig.1 トランジスタ内の電流

- 1) エミッタ効率(emitter efficiency)または注入効率(injection efficiency): γ
- 2) 到達率(transport factor)またはベース輸送効率(base transport efficiency): β^*
- 3) 真性電流増幅率(intrinsic current amplification factor): α^*

電流増幅率 α を 3 つの効率の積として表す。

$$\alpha = \gamma \cdot \beta^* \cdot \alpha^* \quad \cdots(9.21)$$

9-6-1 エミッタ効率 (注入率)

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\text{少数キャリア電流成分}(I_{eE})}{\text{全エミッタ接合電流}(I_E)} \\ &= \frac{j_{eE}}{j_{eE} + j_{hE}} = \frac{1}{1 + \frac{j_{hE}}{j_{eE}}} \end{aligned} \quad \cdots(9.22)$$

今、トランジスタを通常のバイアス状態で動作させ、ベース幅が十分薄いと考える($W \ll L_{nB}$)と

$$\gamma \cong \frac{1}{1 + \frac{D_{hE} p_{nE} W}{D_{eB} n_{pB} L_{hE}}}$$

となる。ここで σ_E 、 σ_B をそれぞれエミッタ領域およびベース領域の導電率とし、 $np = n_i^2$ の関係とアインシュタインの関係式から

$$p_{nE} = \frac{q^2 n_i^2 D_{eE}}{\sigma_E kT}, \quad n_{pB} = \frac{q^2 n_i^2 D_{hB}}{\sigma_B kT}$$

となる。さらに拡散定数が等しい($D_{hE} = D_{hB}$ 、 $D_{eE} = D_{eB}$)とすると

$$\gamma \cong \frac{1}{1 + \frac{\sigma_B W}{\sigma_E L_{hE}}} \cong 1 - \frac{\sigma_B W}{\sigma_E L_{hE}} \quad \cdots(9.26)$$

となる。また、(9.26)式でエミッタ、ベース領域の不純物密度をそれぞれ N_E 、 N_B とすると、常温(飽和領域)における少数キャリア密度より γ は次のようになる。

$$\gamma \cong 1 - \frac{N_B W}{N_E L_{pE}}$$

エミッタ効率 γ をできるだけ 1 に近づけるには第 2 項を小さくすればよい。すなわち、

- 1) ベース幅 W を薄くする $\rightarrow W \ll L_{hE}$
- 2) エミッタの導電率をベース導電率より大きくする

$\rightarrow$ エミッタの不純物密度 $\gg$ ベースの不純物密度

という条件を満たす必要がある。

9-6-2 到達率（ベース輸送効率）

$$\begin{aligned}
 \beta^* &= \frac{\text{コレクタに到達した電流}}{\text{ベースに注入された電流}} = \frac{I_{eB}(W)}{I_{eB}(0)} = \frac{j_{eC}}{j_{eE}} \\
 &= \frac{-\frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \exp\left(-\frac{qV_{EB}}{kT}\right) \operatorname{cosech}\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)}{-\frac{qD_{eB}n_{pB}}{L_{eB}} \exp\left(-\frac{qV_{EB}}{kT}\right) \coth\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} = \frac{1}{\cosh\left(\frac{W}{L_{eB}}\right)} = \operatorname{sech}\left(\frac{W}{L_{eB}}\right) \\
 &\cong 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L_{eB}}\right)^2 + \dots \quad \dots(9.27)
 \end{aligned}$$

β^* をできるだけ 1 に近づけるにはベース幅 W を狭くし、 L_{eB} を大きくして電子の寿命を長くする必要がある。これにより、ベース内での再結合の割合が減少する。

9-6-3 真性電流増幅率

$$\alpha^* = \frac{j_C}{j_{eC}}$$

コレクタ接合に達した電子流は、一般に僅かに増幅される。この増幅の原因は、

- 1) コレクタへ入った電子により電界が発生し、この電界によりコレクタの正孔がドリフトして電流となる。
- 2) コレクタ接合における電子雪崩による電流増倍。

→ pn 接合の雪崩降伏を参照（教科書 p.128）

9-6-4 電流増幅率

以上より、

$$j_C = \alpha^* \cdot j_{eC} = \alpha^* \cdot \beta^* \cdot j_{eE} = \alpha^* \cdot \beta^* \cdot \gamma \cdot j_E \equiv \alpha \cdot j_E$$

通常は、コレクタ接合の逆バイアス電圧は降伏電圧より十分低く選ぶので、 $\alpha^* \cong 1$ として考えて

$$\alpha \cong \gamma \cdot \beta^* \cong \left(1 - \frac{\sigma_B}{\sigma_E} \frac{W}{L_{hE}}\right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{W^2}{L_{eB}^2}\right) \quad \dots(9.28)$$

と表すことができる。

以上を整理すると、電流増幅率 α を大きくするには、

- 1) ベース幅 W を小さくする
- 2) 電子の拡散長 L_{pB} を大きくする（寿命を大きくする）
- 3) $\sigma_B \ll \sigma_E$ ($N_B < N_E$)

の条件を考えればよい。