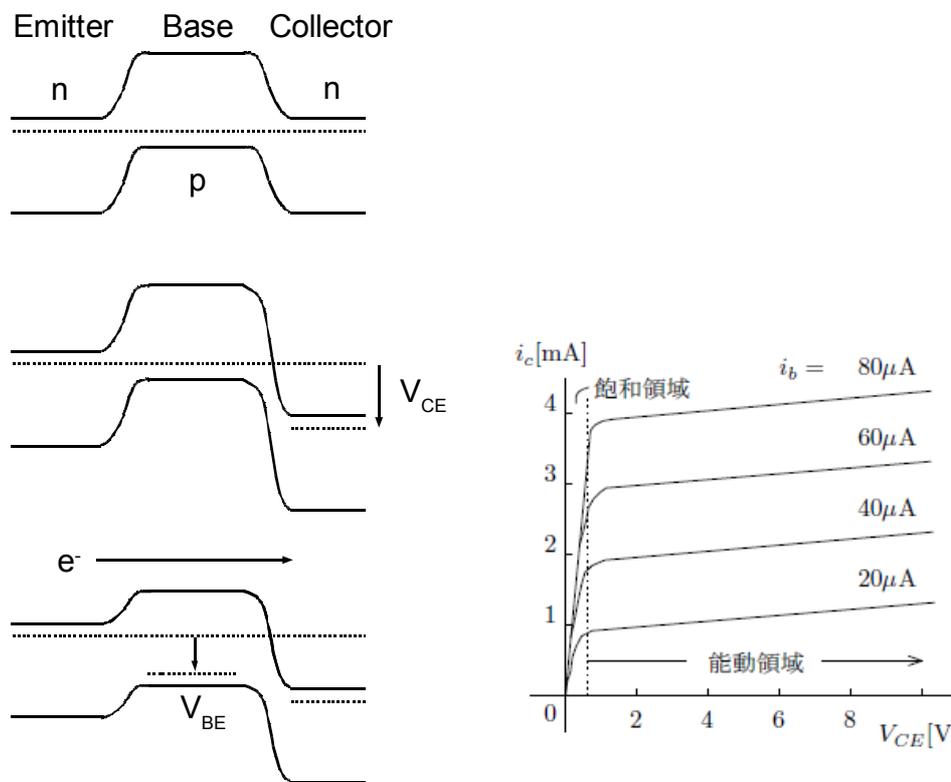


ヘテロ接合バイポーラトランジスタ

1. バイポーラトランジスタの復習

npn (or pnp)接合を利用したトランジスタ。中央のベース層の電位を変調してエミッタから注入される電子(ホール)の量を制御する。ベース層は十分薄く電子(ホール)は再結合せずコレクタまで流れる。



2. バイポーラトランジスタの電流電圧特性の最も簡単な考え方

① ベース電圧を加えるとエミッタからベースへ注入される電子数(I_{En})が増加する。

$$I_{En} = I_{En0} \exp\left[\frac{qV_{BE}}{kT}\right]$$

② このうち、一部はベース内でホールと再結合するがほとんどはコレクタに達する。

$$I_C = \alpha_T I_{En} \approx I_{En} \quad \text{ここで } \alpha_T \text{ はコレクタ到達確率 or ベース輸送効率} \sim 1$$

③ 逆にベースからエミッタへはホールが注入される (ベース電流)。その大きさは

$$I_{Bp} = I_{Bp0} \exp\left[\frac{qV_{BE}}{kT}\right] \quad (\text{再結合電流は無視できるとする。})$$

④ これより、コレクタ電流とベース電流の関係は

$$I_C = \beta I_B \approx \frac{I_{En0}}{I_{Bp0}} I_{Bp} \approx \frac{I_{En0}}{I_{Bp0}} I_B$$

⑤ したがって、ベース電圧でエミッタベース間のバリア高さを変調し、バリア高さに対して exponential でコレクタ電流が増える。(つまり、電圧で制御している)しかし、ベース電流もベース電圧で exponential に増えるため、ベース電流とコレクタ電流は比例する。結果としてコレクタ電流をベース電流で制御しているようにみると都合がよい。(電流制御)

⑥ $I_{En0} \gg I_{Bp0}$ でなければならない。つまり、以下の式で定義されるエミッタ注入効率は~1 である必要がある。

$$\gamma = \frac{I_{En0}}{I_{En0} + I_{Bp0}} = \frac{\text{エミッタからベースへ注入される電子電流}}{\text{トータルのエミッタ電流}}$$

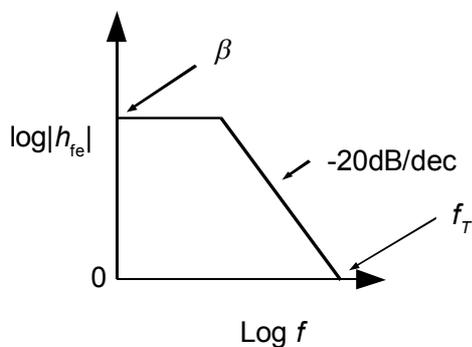
⑦ 注意：上の説明はベースが十分薄く、電流増幅率はコレクタ到達確率ではなく、ベース注入効率で決まる場合に成り立つ。

3. バイポーラトランジスタにおける重要な点

- ① ベースにおける少数キャリアライフタイム（再結合時間）が大きく、かつその厚さが薄いこと→コレクタ到達確率大
- ② エミッタからベースへの電子注入を増やし、逆にベースからエミッタへのホールの注入を減らす。→通常エミッタのドナー濃度>ベースアクセプタ濃度

4. バイポーラトランジスタの動作速度

- ① カットオフ周波数 f_T : 電流増幅率 $h_{fe} = (\text{出力電流の絶対値}) / (\text{入力電流の絶対値}) = 1$ となる周波数。この周波数以上では電流が増幅できない。



$$\tau = \tau_E + \tau_B + \tau_x + \tau_C$$

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau}$$

- 1) τ_E : エミッタ充電時間 $\tau_E = r_E C_{EB}$
- 2) τ_B : ベース走行時間
- 3) τ_x : コレクターベース空乏層走行時間
- 4) τ_C : コレクターベース接合容量充電時間

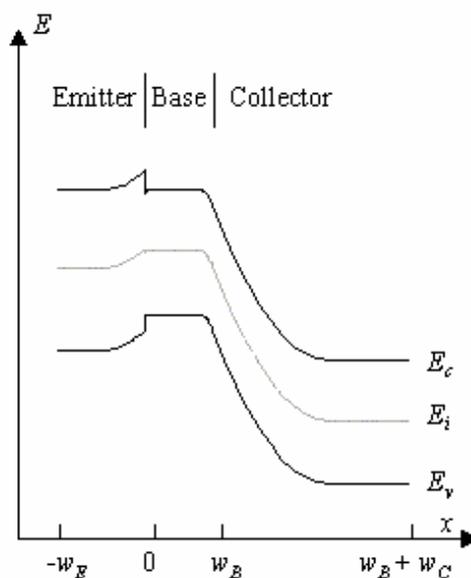
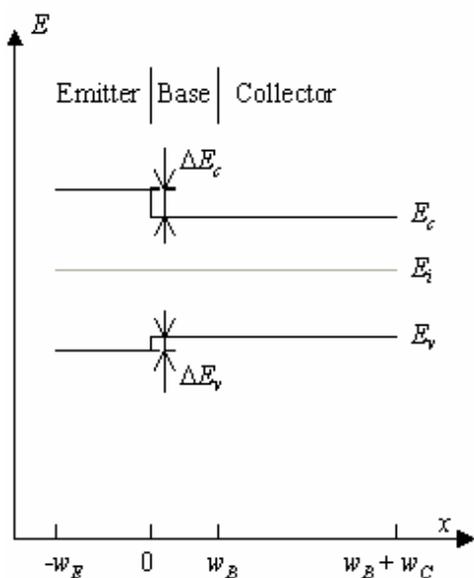
② 最大発振周波数 f_{max} : 電力増幅率が 1 となる周波数。この周波数以上では電力が増幅できない。→ 発振できない。 f_T より大きな値も可能。

$$f_{max} = \left(\frac{f_T}{8\pi C_{BC} R_B} \right)^{1/2}$$

- 1) アナログ回路ではこれが重要な性能指数となる
- 2) ベース抵抗の低減が重要
ただし、通常のバイポーラトランジスタで、ベース抵抗を下げようとしてベースの不純物濃度を増大させるとベースからエミッタへのホール電流が増加し電流増幅率が低下してしまう。

5. ヘテロ接合バイポーラトランジスタ

- ① ワイドバンドギャップエミッタによってホールの逆電流をブロック
→ ベースの不純物濃度の増大が可能
→ ベース抵抗の低減
→ f_{max} 増大
- ② 材料系: SiGe, AlGaAs/GaAs, InP/GaAs, InAlAs/InGaAs など



練習問題

- 1) 通常のバイポーラトランジスタにおいてエミッタのドーピング濃度をベースより高くする必要があるのはなぜか？エミッタからベースへの電子注入量とベースからエミッタへのホール注入量についてバンド図を描いて説明せよ。
- 2) 通常のバイポーラトランジスタではベースの不純物濃度をあまり高くできないため、 V_{CE} を大きくしていくとベース中に空乏層が伸びることになる。このとき、どんなことがおきるかバンド図を描いて説明せよ。
- 3) 下図はベースに傾斜を設けたヘテロバイポーラトランジスタのバンド図である。この構造を実現するためにはベースをどのように構成したらよいか考えよ。また、先に述べたヘテロバイポーラトランジスタと比べてどのような利点があるか述べよ。

