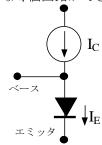
# 第4回 等価回路

### 1ダイオード・1電流源の等価回路

さて、回路に実際に入れるためには、通常等価回路と呼ばれる回路を用いて特性を表す。ここでどのような等価回路で特性が表記できるかを考えよう。ベースエミッタ電圧に対するエミッタ電流(=コレクタ電流+ベース電流)は指数関数的に増大するが、これを最も単純に表すのは、ダイオードを入れることである。一方、コレクタ電流はエミッタ電流にαをかけた量がでてくるので、この形で電流源となる。そこで、下図の様な簡単な等価回路ができる。

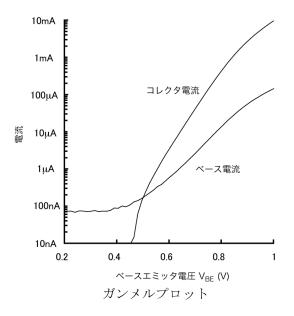


1ダイオード・1電流源の等価回路

 $I_E=I_{EQ} \exp(\frac{qV_{BE}}{kT})-1$  ここでエミッタ電流は  $I_C=I_{EQ} \exp(\frac{qV_{BE}}{kT})-1$  の式(ここでは 0 バイアスでの電流を 0 にするために、平衡時のキャリヤを考慮した形として、-1 を足した。)で、コレクタ電流は $I_C=\alpha I_E$ と表すこととする。

この特性を表す数値を測定するために、ガンメルプロットがある。ベースコレクタ電圧を OV にして、ベースエミッタ電圧をパラメータとしてコレクタ電流とベース電流を測定する。 指数関数的な変化なので 60mV 変化させると、電流が一桁変化する。ベース電流においてはこの指数的変化が緩くなるときがある。この場合、

 $I_B=I_{B0}$   $\exp(\frac{qV_{BE}}{nkT})-1$  のような式でn を用いて表されるが、この場合低電流領域でのトランジスタ側面・表面などでの再結合流電流がベース電流に流れ込んでいることが多い。シリコンだけでできたバイポーラトランジスタではコレクタ電流に関しては通常 n=1 である。



#### エバースモルモデル

先に示したようにトランジスタは npn 構造からできている。そこでエミッタとコレクタを逆に接続してもエミッタ電流やコレクタ電流を流すことができる。この特性を表すために、ベースコレクタ間にダイオードを入れてエミッタベース間に電流源を入れると対称性の高い等価回路を作れる。この回路がエバースモルモデルであり、このモデルで始めてベースコレクタ接合が順バイアスになっている条件も説明できるようになる。ここでの電流表記は $I_{C}=\alpha_{F}I_{F}$ 、

 $I_F=I_{FO}$   $\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})-1$   $I_F=I_{FO}$   $\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})-1$   $I_R=I_{RO}$   $\exp(\frac{qV_{BC}}{kT})-1$  である。ただし、次回示すようにコレクタのキャリヤ濃度はベースのキャリヤ濃度に較べて低くする必要があることから、注入効率が正しいエミッタベース接合に較べて低くなるので、 $\alpha_R$  は大幅に 1 より小さい。このモデルでは、トランジスタの回路は

 $I_{F0}$ , $I_{R0}$ ,  $\alpha_{F}$ ,  $\alpha_{R0}$ 四つのパラメータで表せることになる。それらの測定はを正常なバイアスでとエミッタとコレクタを入れ替えた逆接続状態での二回のガンメルプロット測定からでる。

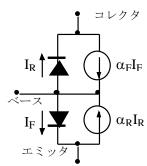
さて、先週示した正常なバイアスでのコレクタ電流に、ベース中でのコレクタ端で平衡状態にあることを仮定すると

$$J_{C}$$
=- $qD_{nB}\frac{n_{BO}}{W_{B}}$  $\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ - $1$  $+$ である。(ここで コレクタ端がベースコレクタ電圧によって平衡 状態より減る分はエバースモルモデルでは BC 間 のダイオード電流によるものと考えることが出来る。)エバースモルモデルで考えると

電子デバイス第一 宮本恭幸

 $lpha_F I_{F0} = q D_{nB} rac{n_{B0}}{W_B}$ と考えることが出来る。一方、 逆接続状態でのコレクタ電流を同様に考えると

 $lpha_R I_{R0} = q D_{nB} rac{\mathbf{n}_{B0}}{W_B}$ になる。従って $lpha_F I_{F0} = lpha_R I_{R0}$ の関係が成り立つ。この関係は相補性と呼ばれ、 先の4つのパラメータは実際には3つのパラメ ータに出来る。これはコレクタ電流がベースの パラメータだけによっていることによる。



エバースモルモデル

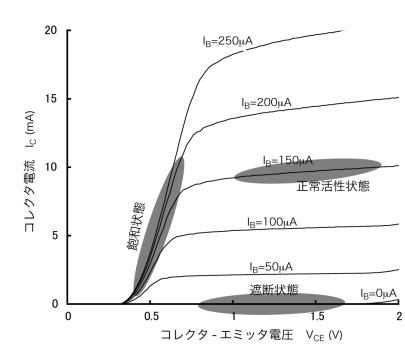
# エミッタ接地電圧-電流特性

実際のエミッタ接地電圧-電流特性を説明しよ う。エミッタ接地特性は、エミッタを接地し、 ベース電流一定の元でコレクタ電圧を変化させ てコレクタ電流を測定する。ベースエミッタ電 圧はベース電流が一定になるように変化してい ることになる。

まず、ベースコレクタ接合が逆バイアスされ ている時、ベースコレクタ間のダイオードには 電流は流れない。これはエミッタ接地ではベー ス電流一定の条件でコレクタ電圧によらず、コ レクタ電流が一定の時に相当する。この状態は 正常活性状態と呼ばれる。

一方、コレクタ電圧を小さくしていくと、あ るところからベースコレクタ接合が順バイアス され、このダイオードの電流が流れるようにな る。

これは逆接続したトランジスタの α κ であり、1 よりだいぶ小さいことから、ベースに流れ込む 電流が多くなる。しかしベース電流一定の条件 で駆動していることから、ベース電圧が下がり、 エミッタ、コレクタの両方から流れ込む電流を 減らす。ベース電圧が低くなるので、コレクタ 電流も小さくなる。この領域を飽和領域と呼ぶ。



エミッタ接地電圧-電流特性

なぜ飽和領域と呼ぶか? ベースの少数キャ リヤに注目しよう。飽和領域ではベースエミッ タ接合も、ベースコレクタ接合も順方向にバイ アスされているので、エミッタ端もコレクタ端 も、すなわちベースの全域の少数キャリヤが平 衡状態より大きなキャリヤ密度になる。(この計 算はエミッタベースとベースコレクタにおいて それぞれ計算したものを足しせればよい簡単な 線形の関係で出来る。すなわち少数キャリヤの 模式図に示すように二つの三角形を組み合わせ る概念でやればよい。)

この特性はエバールモルモデルで描けるが、 デバイスシュミレータではデバイス内のキャリ ヤ濃度・電圧による素子内の挙動の変化を入れ たガンメルプーンモデルを使うのが一般的であ る。このモデルは大学院で講義する。

### 小信号用等価回路(抵抗・電流源)モデル

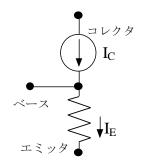
このあと高周波での回路応答に等価回路に応 用しようとすると、ダイオードは線形性がない ので、簡単(交流回路レベル)な回路解析をつ かうことができない。幸いなことに簡単な交流 回路の解析は小信号をもちいることから、バイ アス分は直流として、そこから大きくエミッタ 電流が外れることはないという小信号モデルを つかえば回路を線形的に表すことが出来る。

小信号モデルで重要なのは、直流分に重畳さ れた小信号に対してどのような電圧変化-電流変

# $dV_{BE}$

化があるかであり、微分抵抗 dlE でダイオー ドを置き換えることができる。

電子デバイス第一 宮本恭幸



小信号等価回路モデル

$$\begin{split} &I_{E} \approx I_{EQ} \stackrel{!}{\stackrel{!}{\circ}} exp(\frac{qV_{BE}}{kT}) \stackrel{!}{\stackrel{!}{\circ}} & \text{T.} \\ &\frac{dI_{E}}{dV_{BE}} \approx \frac{q}{kT} I_{EQ} \stackrel{!}{\stackrel{!}{\circ}} exp(\frac{qV_{BE}}{kT}) = \frac{qI_{E}}{kT} \stackrel{!}{\stackrel{!}{\circ}} & \text{T.} \\ &\frac{dV_{BE}}{kT} \times kT & kT \end{split}$$

 $dI_E$   $qI_{E}$ である。 q は 26mV なので、エミッタ電流 26mA で  $1\Omega$ 、13mA で  $2\Omega$  という比較的小さな抵抗である。一方電流源は $i_C$ = $\alpha i_E$ を用いて表すときもあるが、相互コンダクタンス

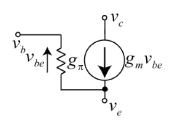
 $g_m = \frac{dI_C}{dV_{BE}}$ という表記を使って、 $i_C = g_m v_{BE}$ をと表すことも多い。 $g_m$ はエミッタの微分抵抗のほ

また、**6**回では高速動作を考えることから、 容量を入れる。

ぼ逆数である。

(実際にはエバースモルモデルなどでも交流回路応用では容量を入れる。)

なお、この T 型回路は、このままではエミッタ接地動作に使いにくいので、通常はエミッタの抵抗をベース電流とコレクタ電流が流れる分に分けて、コレクタ電流の流れとベース電流の流れを分離(ベース電流に流れる抵抗は電流が $1/\beta$ になるのに同じ電圧降下をするので、値を $\beta$ 倍にする。)してから、理想電流源の下の抵抗は意味が無いので除去して、下記の形にする。



#### 電池・電流源モデル

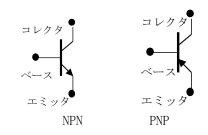
回路のバイアス条件(直流条件)設定時もダイオードで行うと煩雑である。この場合微分抵

抗は使うことができないが、ダイオードの電圧 電流特性は線形的であり、かつ 60mV で 1 桁変 わるという速い変化であることから、定電圧源 として表記することができる。

このとき電圧源の大きさは桁としてどのくらいの電流を使うかとエバースモルモデルのパラメータとの比較だけで決まるがおおむね 0.7-0.9V の範囲である。

### 回路としての表記

回路中に表記する場合は、記号がないとまずいことから右の様な記号を回路中では用いる。



トランジスタの回路表記