トランジスタ　3

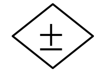
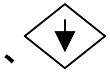
本章はやや専門的ですが、試験によく出る四端子回路計算の練習問題として手頃なので、是非計算過程を自ら確認して頂くと良いでしょう。

参考資料
　時田元昭、「トランジスタと半導体」、電波新聞社
　奥沢清吉、「ビギナートランジスタ読本」、誠文堂新光社
　押本、小林、「トランジスタ回路計算法」、工学図書
　電気工学ハンドブックおよびインターネット上の各種公開資料

7.等価回路

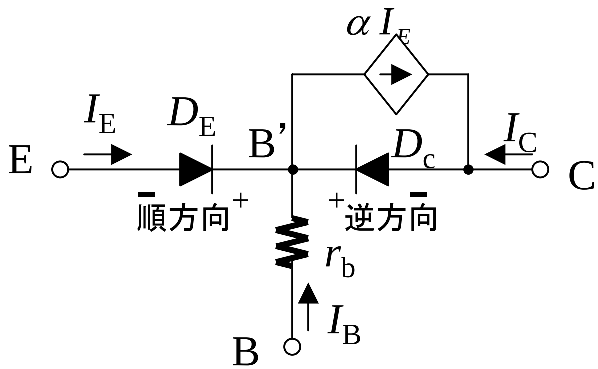
7.1 バイポーラ型トランジスタの等価回路

(1) **T** 形等価回路

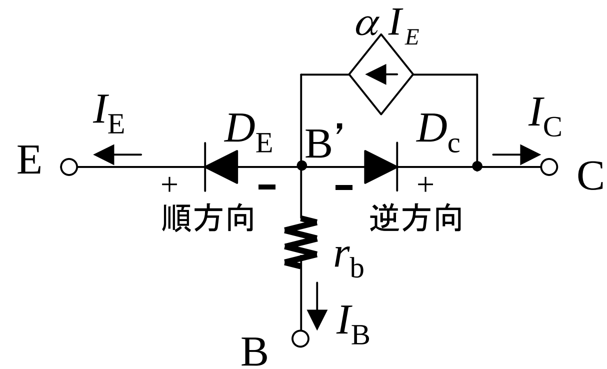
 は従属電圧源、 は従属電流源を表す。

a.直流等価回路

直流等価回路は、左図のように、2個のダイオード D_E, D_Cと定電流源 αI_Eで表せる。D_E はエミッタベース接合で、順方向にバイアスされ、D_Cはコレクタベース接合で、逆方向にバイアスされている。



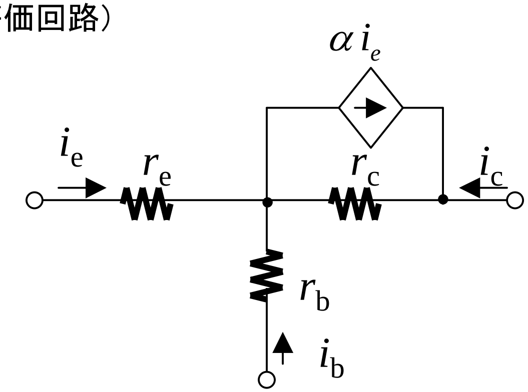
PNP型



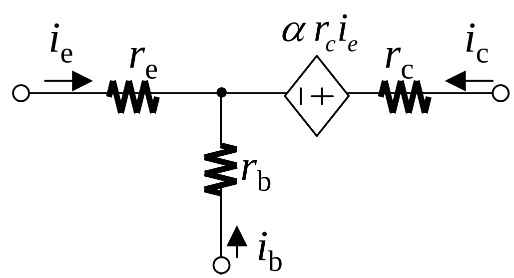
NPN型

b.交流等価回路(微小信号 **T** 形等価回路)

交流微小信号を扱う場合は、直流等価回路でダイオードは抵抗で置き換えられるので,NPN形もPNP形も同じく右a図のような等価回路で表すことができる(電流源の向きは逆)。さらに、電流源を電圧源に置き換えるとb図のようになる(次頁右側中段に変換についての解説あり)。



a.従属電流源等価回路(PNP)

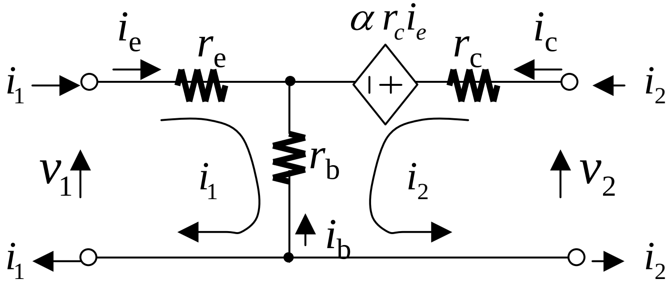


b.従属電圧源等価回路(PNP)

r_eは1mA程度の小信号回路では25Ω程度、r_sは50~500Ω程度、r_cは数MΩ程度である。
αは1より僅かに小さい値、βはα/(1－α)で50~200程度である。

c.バイポーラトランジスタの接地方式別T形等価回路

(a)ベース接地回路(PNP)



$$i_e = i_1,\ i_c = i_2,\ i_b = -(i_1 + i_2)$$
$$v_1 = r_e i_1 + r_b (i_1 + i_2)$$
$$v_2 = \alpha r_c i_1 + r_b (i_1 + i_2) + r_c i_2$$

が成り立つ。整理して、

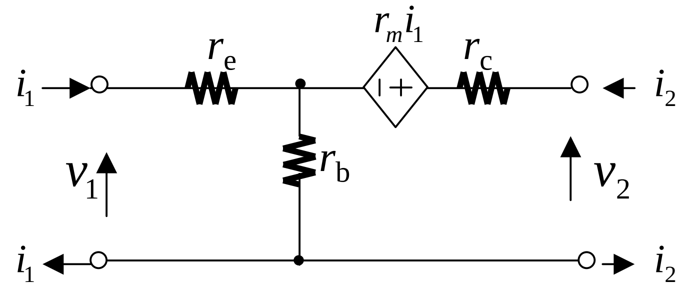
$$v_1 = (r_e + r_b) i_1 + r_b i_2$$
$$v_2 = (\alpha r_c + r_b) i_1 + (r_b + r_c) i_2$$

さらに、$r_m \equiv \alpha r_c$ とおけば、

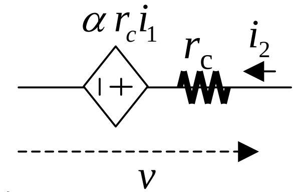
$$v_1 = (r_e + r_b) i_1 + r_b i_2$$
$$v_2 = (r_m + r_b) i_1 + (r_b + r_c) i_2$$

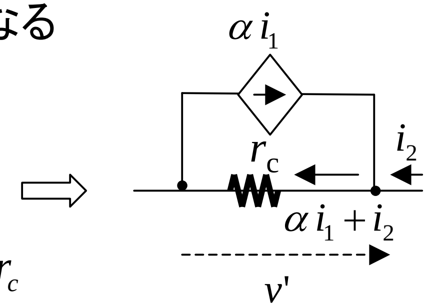
これに対応する回路は、a1図のように表せる。

a1.ベース接地回路の等価回路1 (PNP)



この図を、電流源回路に置き換えれば
a2 図のようになる



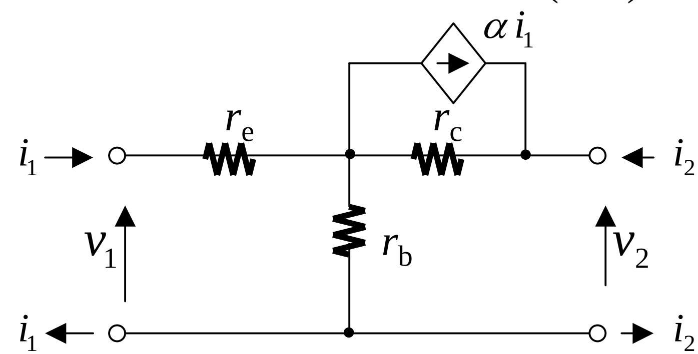


左図 $v = \alpha r_c i_1 + i_2 r_c$

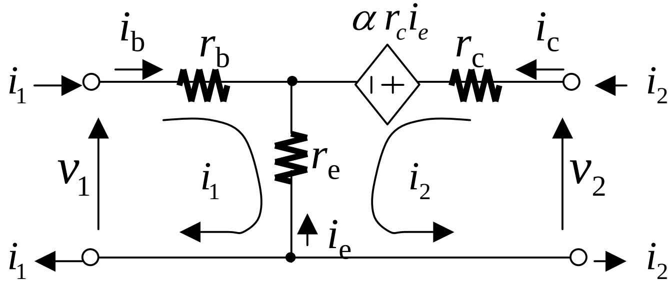
右図 $v' = (\alpha i_1 + i_2) r_c = v$

電圧源の内部Zは 0、電流源の内部Zは ∞

a2.ベース接地回路の等価回路2 (PNP)



(b)エミッタ接地回路(PNP)



$$i_b = i_1,\ i_c = i_2,\ i_e = -(i_1 + i_2),$$

$$v_1 = r_b i_1 + r_e (i_1 + i_2)$$
$$v_2 = \alpha r_c i_e + r_e (i_1 + i_2) + r_c i_2$$
$$= -\alpha r_c (i_1 + i_2) + r_e (i_1 + i_2) + r_c i_2$$

が成り立つ。整理して、

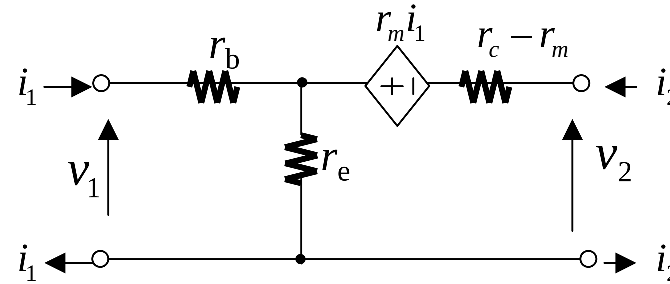
$$v_1 = (r_b + r_e) i_1 + r_e i_2$$
$$v_2 = (r_e - \alpha r_c) i_1 + (r_c - \alpha r_c + r_e) i_2$$

$r_m \equiv \alpha r_c$ とおいて、

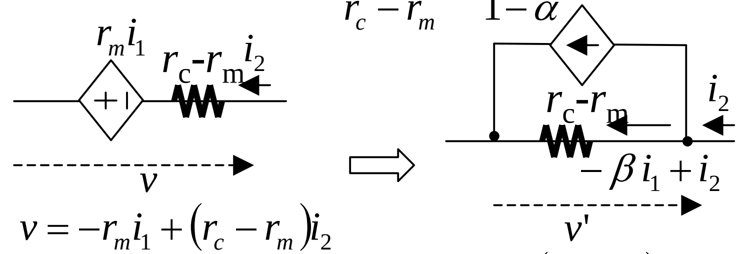
$$v_1 = (r_b + r_e) i_1 + r_e i_2$$
$$v_2 = (r_e - r_m) i_1 + (r_c - r_m + r_e) i_2$$
$$= r_e i_1 + (r_c - r_m + r_e) i_2 - r_m i_1$$

この式の関係を図示すれば、b1 図のように表すことができる。

b1.エミッタ接地回路の等価回路1(PNP)



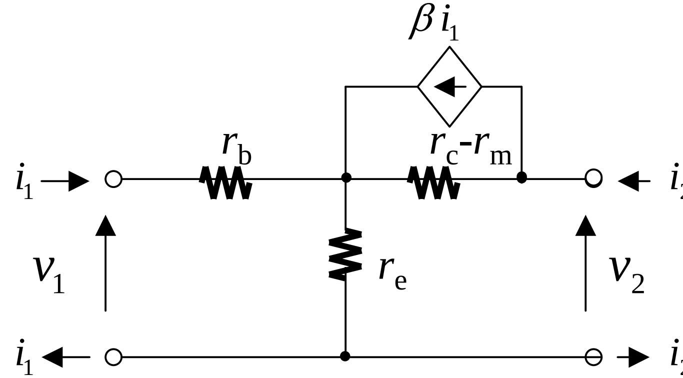
$$\frac{r_m i_1}{r_c - r_m} = \frac{\alpha}{1-\alpha} i_1 = \beta i_1,\ r_m = \alpha r_c$$



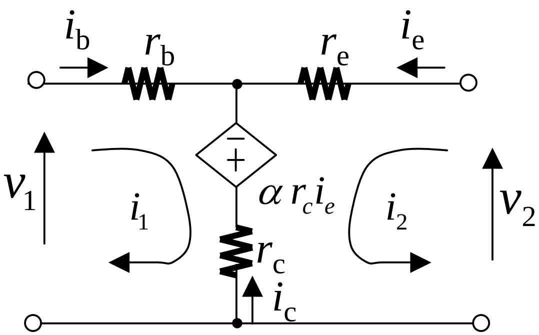
$$v = -r_m i_1 + (r_c - r_m) i_2$$

$$v' = -(r_c - r_m)\beta i_1 + (r_c - r_m) i_2$$
$$= -r_m i_1 + (r_c - r_m) i_2 = v$$

b2.エミッタ接地回路2 (PNP)



(c) コレクタ接地回路(PNP)



$$i_b = i_1,\ i_e = i_2,\ i_c = -(i_1 + i_2),$$

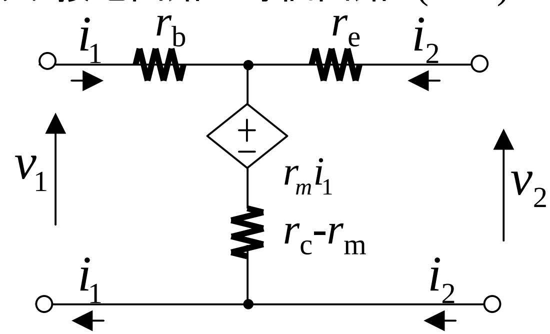
$$v_1 = r_b i_1 + r_c(i_1 + i_2) - \alpha r_c i_2$$
$$= (r_b + r_c) i_1 + (r_c - \alpha r) i_2$$
$$v_2 = -\alpha r_c i_2 + r_c(i_1 + i_2) + r_e i_2$$
$$= r_c i_1 + (r_c - \alpha r_c + r_e) i_2$$

が成り立つ。$r_m \equiv \alpha r_c$ とおいて変形すると、

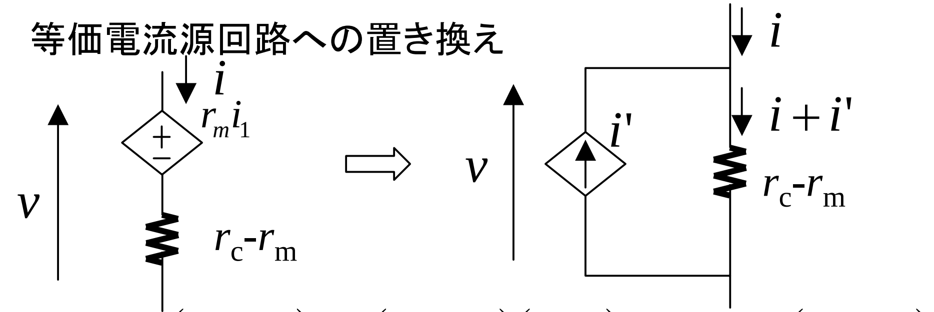
$$v_1 = (r_b + r_c - r_m) i_1 + (r_c - r_m) i_2 + r_m i_1$$
$$v_2 = (r_c - r_m) i_1 + (r_c - r_m + r_e) i_2 + r_m i_1$$

これから、c1図が得られる。

c1.コレクタ接地回路の等価回路1(PNP)



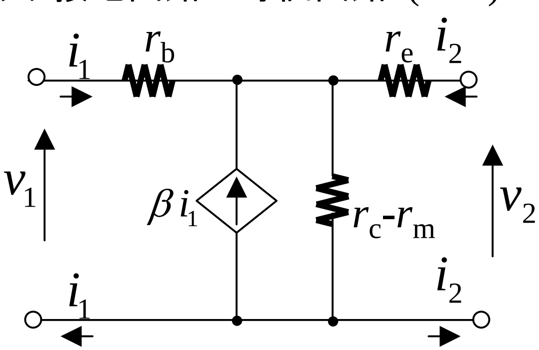
等価電流源回路への置き換え



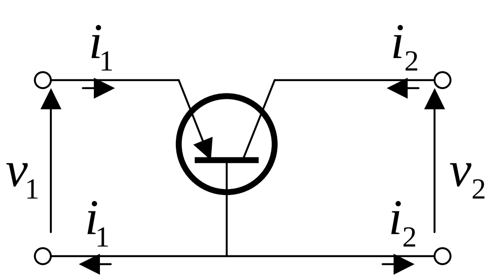
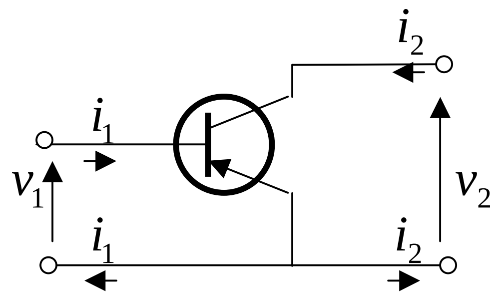
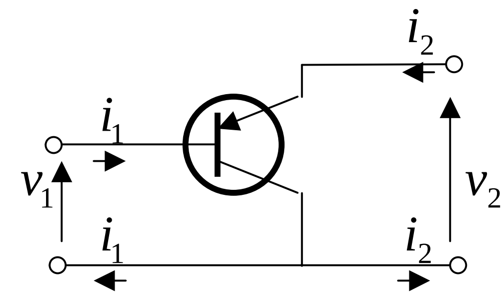
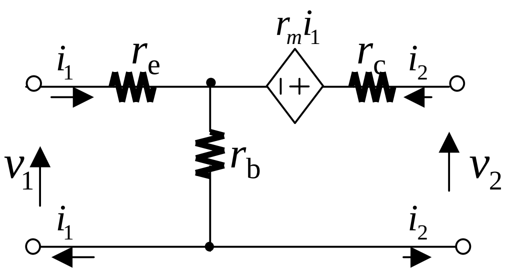
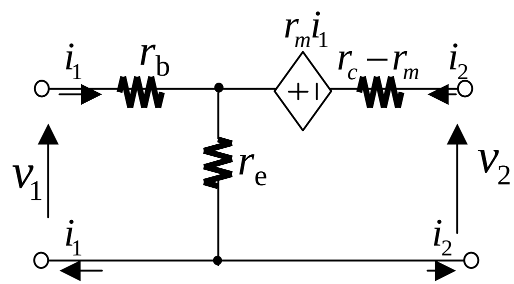
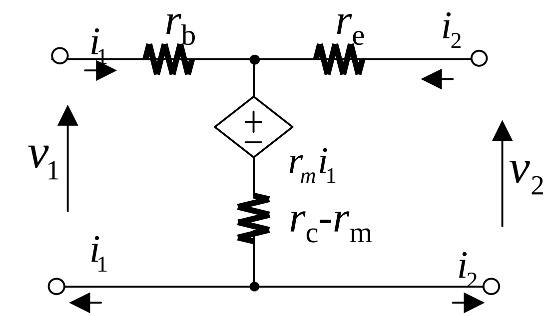
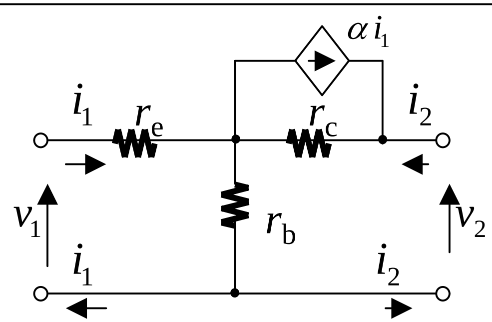
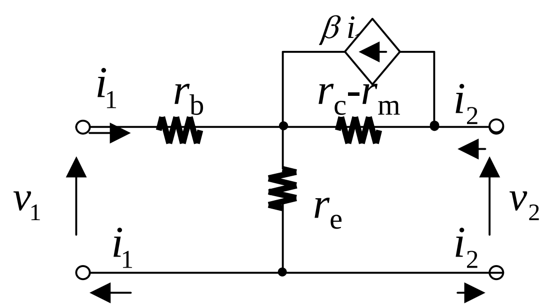
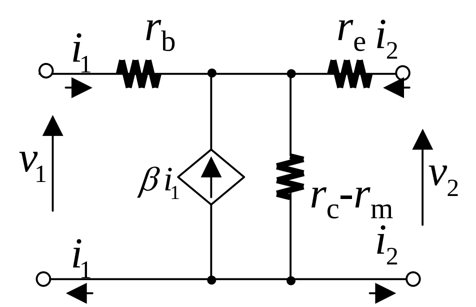
$$v = r_m i_1 + (r_c - r_m) i = (r_c - r_m)(i + i') \rightarrow r_m i_1 = (r_c - r_m) i'$$

$$i' = \frac{r_m}{r_c - r_m} i_1 = \frac{\alpha r_c}{r_c - \alpha r_c} i_1 = \frac{\alpha}{1-\alpha} i_1 = \beta i_1$$

c2.コレクタ接地回路の等価回路2(PNP)

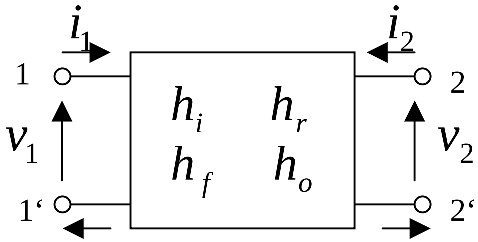


以上を集約すると次頁の表になる

<table>
<tr><th>Tパラメータまとめ</th><th>ベース接地回路(PNP)</th><th>エミッタ接地回路(PNP)</th><th>コレクタ接地回路(PNP)</th></tr>
<tr><td>回路原形</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>従属(定)電圧源等価回路</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>従属(定)電流源等価回路</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>回路方程式</td><td>$v_1 = (r_e + r_b) i_1 + r_b i_2$
$v_2 = (r_m + r_b) i_1 + (r_b + r_c) i_2$
$r_m \equiv \alpha r_c$</td><td>$v_1 = (r_b + r_e) i_1 + r_e i_2$
$v_2 = (r_e - r_m) i_1 + (r_c - r_m + r_e) i_2$
$r_m \equiv \alpha r_c$</td><td>$v_1 = (r_b + r_c) i_1 + (r_c - r_m) i_2$
$v_2 = r_c i_1 + (r_c - r_m + r_e) i_2$
$r_m \equiv \alpha r_c$</td></tr>
</table>

(2) hパラメータによる等価回路

h パラメータはトランジスタ回路では、測定が容易なこと、静特性と関連していることなどからよく用いられている。h は hybrid(混成、混合)のhである:
１次２次、I,V,Z,Yが混合した式であるから。



次式が成り立つようにhパラメータを定める。

$$v_1 = h_i i_1 + h_r v_2$$

$$i_2 = h_f i_1 + h_o v_2$$

行列表示すると、次式になる。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

hパラメータは次のように定義する。

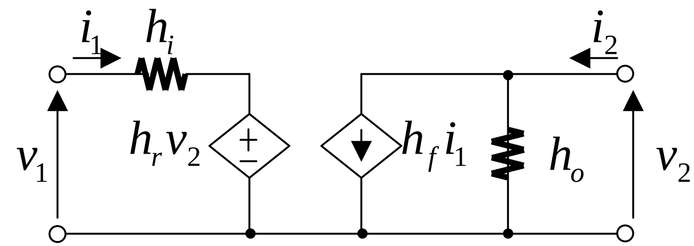
$h_i = \left(\dfrac{v_1}{i_1}\right)_{v_2=0}$: 二次側短絡時の入力インピーダンス *input impedance with output short circuit*

$h_r = \left(\dfrac{v_1}{v_2}\right)_{i_1=0}$: 一次側開放時の逆方向電圧帰還率 *reverse voltage feedback ratio with input open circuit*

$h_f = \left(\dfrac{i_2}{i_1}\right)_{v_2=0}$: 二次側短絡時の順方向電流増幅率 *forward current amplification with output short circuit*

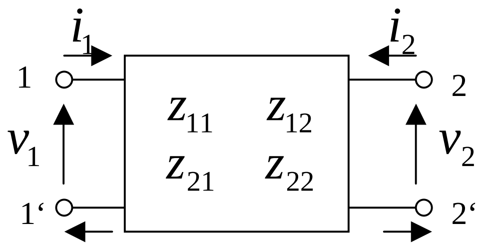
$h_o = \left(\dfrac{i_2}{v_2}\right)_{i_1=0}$: 一次側開放時の出力アドミタンス *output admittance with input open circuit*

h パラメータを用いて従属電源等価回路を作ると次図のようになる。



(3) z パラメータによる等価回路

z パラメータは上記のT形パラメータから直ちに求めることができる。



次式が成り立つようにzパラメータを定める。

$$v_1 = z_{11} i_1 + z_{12} i_2$$
$$v_2 = z_{21} i_1 + z_{22} i_2$$

行列表示すると、次式になる。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

z_{ij} はインピーダンスの次元を持つ。

zパラメータは次のように定義する。

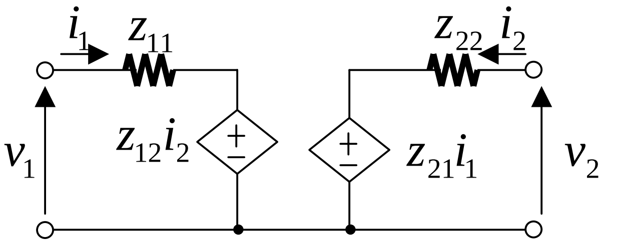
$z_{11} = \left(\dfrac{v_1}{i_1} \right)_{v_2=0}$:二次側短絡時の入力インピーダンス

$z_{12} = \left(\dfrac{v_1}{i_2} \right)_{i_1=0}$ 一次側開放相互インピーダンス

$z_{21} = \left(\dfrac{v_2}{i_1} \right)_{i_2=0}$:二次側開放時の相互インピーダンス

$z_{22} = \left(\dfrac{v_2}{i_2} \right)_{i_1=0}$:一次側開放時の出力インピーダンス

z パラメータを用いて従属電圧源等価回路を作ると次図のようになる。



6ページの図の回路方程 式から、
各接地方式別の z パラ メータは、

ベース接地

$z_{11b} = r_e + r_b$, $z_{12b} = r_b$

$z_{21b} = \alpha r_c + r_b$, $z_{22b} = r_b + r_c$

エミッター接地

$z_{11e} = r_e + r_b$, $z_{12e} = r_e$

$z_{21e} = r_e - \alpha r_c$, $z_{22e} = (1-\alpha) r_c + r_e$

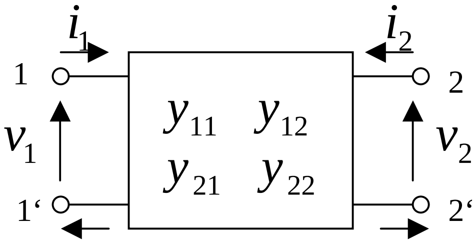
コレクタ接地

$z_{11c} = r_b + r_c$, $z_{12c} = (1-\alpha) r_c$

$z_{21c} = r_c$, $z_{22c} = (1-\alpha) r_c + r_e$

(4) yパラメータによる等価回路

y パラメータは z パラメータから逆行列として求められる。



または、

$$\begin{matrix} y_i & y_r \\ y_f & y_o \end{matrix}$$

次式が成り立つようにyパラメータを定める。

$$i_1 = y_{11}v_1 + y_{12}v_2 = y_i v_1 + y_r v_2$$
$$i_2 = y_{21}v_1 + y_{22}v_2 = y_f v_1 + y_o v_2$$

行列表示すると、次式になる。

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_i & y_r \\ y_f & y_o \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{|Z|}\begin{bmatrix} z_{22} & -z_{12} \\ -z_{21} & z_{11} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

ここに、$|Z| = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$ である。

y_{ij} はアドミタンスの次元を持つ。

yパラメータは次のように定義する。

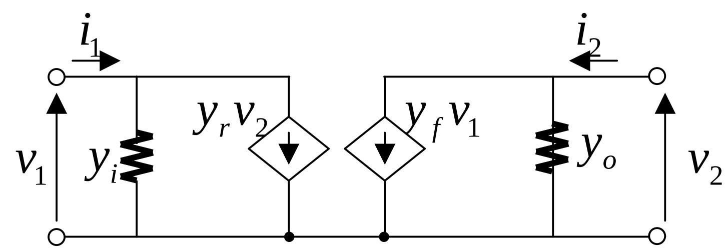
$$y_{11} = y_i = \left(\frac{i_1}{v_1}\right)_{v_2=0}$$:二次側短絡時の入力アドミタンス

$$y_{12} = y_r = \left(\frac{i_1}{v_2}\right)_{v_1=0}$$ 一次側短絡相互アドミタンス

$$y_{21} = y_f = \left(\frac{i_1}{v_1}\right)_{i_2=0}$$:二次側開放時の相互アドミタンス

$$y_{22} = y_o = \left(\frac{i_2}{v_2}\right)_{v_1=0}$$:一次側短絡時の出力アドミタンス

y パラメータを用いて従属電流源等価回路を作ると次図のようになる。



(4-1) z パラメータから h パラメータを求める

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \cdots (1)$$ から、

$|Z| = z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21}$ として、

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{|Z|} \begin{bmatrix} z_{22} & -z_{12} \\ -z_{21} & z_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$i_2 = -\frac{z_{21}}{|Z|} v_1 + \frac{z_{11}}{|Z|} v_2$ を (1) の v_1 に代入して、

$$v_1 = z_{11}i_1 + z_{12}i_2 = z_{11}i_1 - \frac{z_{12}z_{21}}{|Z|} v_1 + \frac{z_{12}z_{11}}{|Z|} v_2$$

$$v_1 \left(1 + \frac{z_{12}z_{21}}{|Z|} \right) = z_{11}i_1 + \frac{z_{12}z_{11}}{|Z|} v_2$$

$$v_1 = \frac{z_{11}|Z|}{|Z| + z_{12}z_{21}} i_1 + \frac{z_{12}z_{11}}{|Z| + z_{12}z_{21}} v_2 = \frac{|Z|}{z_{22}} i_1 + \frac{z_{12}}{z_{22}} v_2$$

$$i_2 = -\frac{z_{21}}{|Z|} v_1 + \frac{z_{11}}{|Z|} v_2 = -\frac{z_{21}}{z_{22}} i_1 - \frac{z_{12}z_{21}}{|Z| z_{22}} v_2 + \frac{z_{11}}{|Z|} v_2$$

$$= -\frac{z_{21}}{z_{22}} i_1 + \frac{v_2}{|Z|} \left(z_{11} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{22}} \right) = -\frac{z_{21}}{z_{22}} i_1 + \frac{1}{z_{22}} v_2$$

すなわち、

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} - z_{12}z_{21}/z_{22} & z_{12}/z_{22} \\ -z_{21}/z_{22} & 1/z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$$h_i = z_{11} - z_{12}z_{21}/z_{22}, \quad h_r = z_{12}/z_{22}$$

$$h_f = -z_{21}/z_{22}, \quad h_o = 1/z_{22}$$

[別法]

これは、次のようにしても求められる。

$$h_i = \left(\frac{v_1}{i_1} \right)_{v_2=0} = \left(\frac{z_{11}i_1 + z_{12}i_2}{i_1} \right)$$

$$= \frac{z_{11}i_1 - z_{12}z_{21}/z_{22}i_1}{i_1} = z_{11} - \frac{z_{12}z_{21}}{z_{22}}$$

$$h_r = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)_{i_1=0} = \left(\frac{z_{12}i_2}{z_{22}i_2} \right) = \frac{z_{12}}{z_{22}}$$

$$h_f = \left(\frac{i_1}{i_2} \right)_{v_2=0} = \left(\frac{i_1}{-z_{22}/z_{21}i_1} \right) = -\frac{z_{21}}{z_{22}}$$

$$h_o = \left(\frac{i_2}{v_2} \right)_{i_1=0} = \left(\frac{i_2}{z_{22}i_2} \right) = \frac{1}{z_{22}}$$

(4-2) h パラメータから z パラメータ を求める

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \cdots (2)$$ から、

$|H| = h_i h_0 - h_r h_f$ として、

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{|H|} \begin{bmatrix} h_o & -h_r \\ -h_f & h_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

$v_2 = \frac{-h_f}{|H|} v_1 + \frac{h_i}{|H|} i_2$ を (2) の v_1 に代入して、

$$v_1 = h_i i_1 + h_r v_2 = h_i i_1 - \frac{h_r h_f}{|H|} v_1 + \frac{h_r h_i}{|H|} i_2$$

$$v_1 \left(1 + \frac{h_r h_f}{|H|} \right) = h_i i_1 + \frac{h_r h_i}{|H|} i_2$$

$$v_1 = \frac{h_i |H|}{|H| + h_r h_f} i_1 + \frac{h_r h_i}{|H| + h_r h_f} i_2 = \frac{|H|}{h_o} i_1 + \frac{h_r}{h_o} i_2$$

$$v_2 = \frac{-h_f}{|H|} v_1 + \frac{h_i}{|H|} i_2$$

$$= \frac{-h_f h_i}{|H| + h_r h_f} i_1 + \frac{-h_f h_r h_i}{|H| \left(|H| + h_r h_f \right)} i_2 + \frac{h_i}{|H|} i_2$$

$$= \frac{-h_f h_i}{|H| + h_r h_f} i_1 + \frac{h_i}{|H| + h_r h_f} i_2 = -\frac{h_f}{h_o} i_1 + \frac{1}{h_o} i_2$$

すなわち、

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |H| / h_o & h_r / h_o \\ -h_f / h_o & 1 / h_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

$$z_{11} = |H| / h_o = h_i - h_f h_r / h_o, \quad z_{12} = h_r / h_o$$

$$z_{21} = -h_f / h_o, \quad z_{22} = 1 / h_o$$

[別法]

これは、次のようにしても求められる。

$$z_{11} = \left(\frac{v_1}{i_1} \right)_{i_2 = 0} = \left(\frac{h_i i_1 + h_r v_2}{i_1} \right), \quad h_f i_1 + h_o v_2 = 0$$

$$z_{11} = \frac{h_i i_1 - h_r h_f / h_o i_1}{i_1} = h_i - \frac{h_f h_r}{h_o}$$

$$z_{12} = \left(\frac{v_1}{i_2} \right)_{i_1 = 0} = \left(\frac{h_r v_2}{h_o v_2} \right)_{i_1 = 0} = \frac{h_r}{h_o}$$

$$z_{21} = \left(\frac{v_2}{i_1} \right)_{i_2 = 0} = \left(\frac{v_2}{-v_2 h_o / h_f} \right) = -\frac{h_f}{h_0}$$

$$z_{22} = \left(\frac{v_2}{i_2} \right)_{i_1 = 0} = \left(\frac{v_2}{h_o v_2} \right) = \frac{1}{h_o}$$

(4-3) ***h*** パラメータを ***z*** パラメータを利用して ***T*** パラメータで表す

a.ベース接地回路

$$v_1=(r_e+r_b)i_1+r_bi_2$$
$$v_2=(\alpha r_c+r_b)i_1+(r_b+r_c)i_2$$

$$z_{11b}=r_e+r_b,\ z_{12b}=r_b$$
$$z_{21b}=\alpha r_c+r_b,\ z_{22b}=r_b+r_c$$

$$h_{ib}=z_{11b}-\frac{z_{12b}z_{21b}}{z_{22b}}$$
$$=r_e+r_b-\frac{r_b(\alpha r_c+r_b)}{r_b+r_c}$$
$$\approx r_e+r_b-\alpha r_b$$
$$\approx r_e+r_b(1-\alpha),\ \because r_c>>r_b$$

$$h_{rb}=\frac{z_{12b}}{z_{22b}}=\frac{r_b}{r_b+r_c}\approx\frac{r_b}{r_c}$$

$$h_{fb}=-\frac{z_{21b}}{z_{22b}}=-\frac{\alpha r_c+r_b}{r_b+r_c}\approx-\alpha$$

$$h_{ob}=\frac{1}{z_{22b}}=\frac{1}{r_b+r_c}\approx\frac{1}{r_c}$$

b.エミッタ接地回路

$$v_1=(r_b+r_e)i_1+r_ei_2$$
$$v_2=(r_e-\alpha r_c)i_1+(r_c-\alpha r_c+r_e)i_2$$

$$z_{11e}=r_b+r_e,\ z_{12e}=r_e$$
$$z_{21e}=r_e-\alpha r_c,\ z_{22e}=(1-\alpha)r_c+r_e$$

$$h_{ie}=z_{11e}-\frac{z_{12e}z_{21e}}{z_{22e}}$$
$$=(r_b+r_e)-\frac{r_e(r_e-\alpha r_c)}{(1-\alpha)r_c+r_e}$$
$$=(r_b+r_e)-\frac{\{(1-\alpha)r_c+r_e\}r_e-r_er_c}{(1-\alpha)r_c+r_e}$$
$$\approx r_b+r_e/(1-\alpha)$$

$$h_{re}=\frac{r_e}{(1-\alpha)r_c+r_e}\approx\frac{r_e}{(1-\alpha)r_c}$$

$$h_{fe}=-\frac{z_{21e}}{z_{22e}}=-\frac{r_e-\alpha r_c}{(1-\alpha)r_c+r_e}$$
$$\approx\frac{\alpha}{1-\alpha}=\beta$$

$$h_{oe}=\frac{1}{z_{22e}}=\frac{1}{(1-\alpha)r_c+r_e}\approx\frac{1}{(1-\alpha)r_c}$$

c.コレクタ接地回路

$$v_1=(r_b+r_c)i_1+(r_c-r_m)i_2$$
$$v_2=r_c\,i_1+(r_c-r_m+r_e)i_2$$

$$z_{11c}=r_b+r_e,\ z_{12c}=(1-\alpha)r_c$$
$$z_{21c}=r_c,\ z_{22c}=(1-\alpha)r_c+r_e$$

$$h_{ic}=z_{11c}-\frac{z_{12c}z_{21c}}{z_{22c}}$$
$$=\frac{(r_b+r_e)((1-\alpha)r_c+r_e)-r_cr_c(1-\alpha)}{(1-\alpha)r_c+r_e}$$
$$=\frac{\{(1-\alpha)r_c+r_e\}r_b+r_cr_e-r_er_b}{(1-\alpha)r_c+r_e}$$
$$\approx r_b+r_e/(1-\alpha)$$

$$h_{rc}=\frac{(1-\alpha)r_c}{(1-\alpha)r_c+r_e}\approx1$$

$$h_{fc}=-\frac{z_{21c}}{z_{22c}}=-\frac{r_c}{(1-\alpha)r_c+r_e}\approx\frac{-1}{1-\alpha}$$

$$h_{oc}=\frac{1}{z_{22c}}=\frac{1}{(1-\alpha)r_c+r_e}\approx\frac{1}{(1-\alpha)r_c}$$

(4-4) ***T* パラメータを*h* パラメータで表す**

a.ベース接地回路

前頁の結果から、

$$h_{ib}=r_e+r_b-\frac{r_b\left(\alpha r_c+r_b\right)}{r_b+r_c}$$

$$\approx r_e+r_b-\alpha r_b\cdots\cdots\cdots b1$$

$$h_{rb}=\frac{r_b}{r_b+r_c}\cdots\cdots b2$$

$$h_{fb}=-\frac{\alpha r_c+r_b}{r_b+r_c}\approx-\alpha\cdots b3$$

$$h_{ob}=\frac{1}{r_b+r_c}\cdots\cdots\cdots b4$$

$b2,b4$から、$r_b=h_{rb}/h_{ob}$,

$b4$ から、

$$r_c=1/h_{ob}-r_b=\left(1-h_{rb}\right)/h_{ob}$$

$b1,b3$ から、

$$r_e\approx h_{ib}-\left(1-\alpha\right)r_b$$

$$=h_{ib}-\frac{\left(1-\alpha\right)h_{rb}}{h_{ob}}$$

$$=h_{ib}-\frac{\left(1+h_{fb}\right)h_{rb}}{h_{ob}}$$

b.エミッタ接地回路

前頁の結果から、

$$h_{ie}\approx r_b+r_e/\left(1-\alpha\right)\cdots e1$$

$$h_{re}\approx\frac{r_e}{\left(1-\alpha\right)r_c}\cdots\cdots e2$$

$$h_{fe}\approx\frac{\alpha}{1-\alpha}=\beta\cdots\cdots e3$$

$$h_{oe}\approx\frac{1}{\left(1-\alpha\right)r_c}\cdots\cdots e4$$

$e2,e4$から、$r_e\approx h_{re}/h_{oe}$,

$e3$ から、 $\alpha=\beta/\left(1+\beta\right)$

$e4$ から、

$$r_c\approx\frac{1}{\left(1-\alpha\right)h_{oe}}=\frac{1+\beta}{h_{oe}}=\frac{1+h_{fe}}{h_{oe}}$$

$e1,e3$ から、

$$r_b\approx h_{ie}-r_e/\left(1-\alpha\right)$$

$$=h_{ie}-\frac{h_{re}}{h_{oe}\left(1-\alpha\right)}$$

$$=h_{ie}-\frac{h_{re}\left(1+h_{fe}\right)}{h_{oe}}$$

c.コレクタ接地回路

前頁の結果から、

$$h_{ic}\approx r_b+r_e/\left(1-\alpha\right)\cdots\cdots c1$$

$$h_{rc}=\frac{\left(1-\alpha\right)r_c}{\left(1-\alpha\right)r_c+r_e}\approx1\cdots c2$$

$$h_{fc}=-\frac{r_c}{\left(1-\alpha\right)r_c+r_e}\approx\frac{-1}{1-\alpha}\cdots c3$$

$$h_{oc}=\frac{1}{\left(1-\alpha\right)r_c+r_e}\approx\frac{1}{\left(1-\alpha\right)r_c}\cdots c4$$

$c3,c4$から、$r_c=-h_{fc}/h_{oc}$,

$c3$ から、 $\alpha\approx\left(1+h_{fc}\right)/h_{fc}$

$c2,\ c4$ から、

$$h_{rc}=1-\frac{r_e}{\left(1-\alpha\right)r_c+r_e}=1-h_{oc}r_e$$

$$\therefore r_e=\frac{1-h_{rc}}{h_{ro}}$$

$c1$ から、

$$r_b\approx h_{ic}-r_e/\left(1-\alpha\right)$$

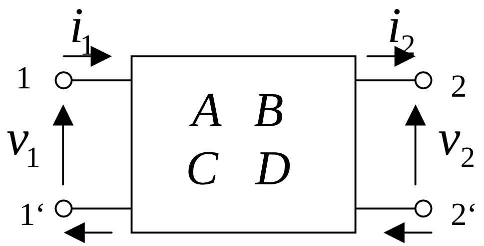
$$\approx h_{ic}+\frac{h_{fc}\left(1-h_{rc}\right)}{h_{oc}}$$

T-h 変換まとめ	h パラメータをTパラメータで表す		
	ベース接地	エミッタ接地	コレクタ接地
h_{i}	$= r_e + r_b - \dfrac{r_b(\alpha r_c + r_b)}{r_b + r_c} \approx r_e + r_b - \alpha r_b$	$\approx r_b + r_e/(1-\alpha)$	$\approx r_b + r_e/(1-\alpha)$
h_{r}	$= \dfrac{r_b}{r_b + r_c}$	$\approx \dfrac{r_e}{(1-\alpha)r_c}$	$= \dfrac{(1-\alpha)r_c}{(1-\alpha)r_c + r_e} \approx 1$
h_{f}	$= -\dfrac{\alpha r_c + r_b}{r_b + r_c} \approx -\alpha$	$\approx \dfrac{\alpha}{1-\alpha} = \beta$	$= -\dfrac{r_c}{(1-\alpha)r_c + r_e} \approx \dfrac{-1}{1-\alpha}$
h_{o}	$= \dfrac{1}{r_b + r_c}$	$\approx \dfrac{1}{(1-\alpha)r_c}$	$= \dfrac{1}{(1-\alpha)r_c + r_e} \approx \dfrac{1}{(1-\alpha)r_c}$

T パラメータを*h* パラメータで表す

	ベース接地	エミッタ接地	コレクタ接地
r_{e}	$\approx h_{ib} - (1 + h_{fb})h_{rb}/h_{ob}$	$\approx h_{re}/h_{oe}$	$= (1 - h_{rc})/h_{ro}$
r_{b}	$= h_{rb}/h_{ob}$	$\approx h_{ie} - h_{re}(1 + h_{fe})/h_{oe}$	$\approx h_{ic} + h_{fc}(1 - h_{rc})/h_{oc}$
r_{c}	$= (1 - h_{rb})/h_{ob} \approx 1/h_{ob}$	$\approx (1 + h_{fe})/h_{oe}$	$= -h_{fc}/h_{oc}$
α	$\approx -h_{fb}$	$\approx h_{fe}/(1 + h_{fe})$	$\approx (1 + h_{fc})/h_{fc}$
$r_m = \alpha r_{\mathrm{c}}$	$\approx -h_{fb}/h_{ob}$	$\approx h_{fe}/h_{oe}$	$\approx -(1 + h_{fc})/h_{oc}$

(5) F パラメータによる等価回路



次式が成り立つように F パラメータを定める。
ただし、二次側の電流 の向きは、h パラメータ方式と逆に 流れ出る向きを正に取る。

$v_1 = Av_2 + Bi_2$

$i_1 = Cv_2 + Di_2$

行列表示すると、次式 になる。

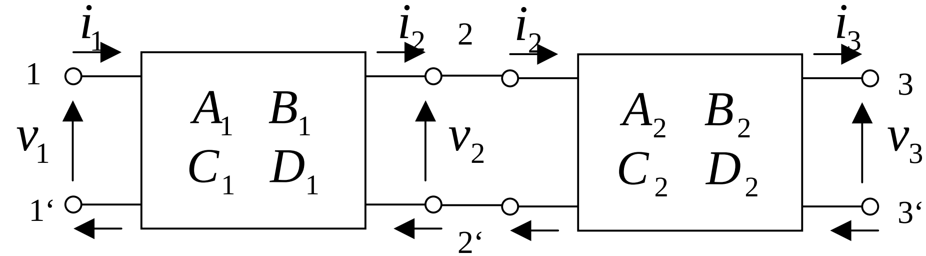
$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

この方式では、カスケ ードに多段接続したとき、合成の F パラメータは、行列の積で表せ る。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} v_2 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_3 \\ i_3 \end{bmatrix}$$

のとき、

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_3 \\ i_3 \end{bmatrix} \cdots (\text{右上図})$$



F パラメータの意味

$A = \left(\dfrac{v_1}{v_2}\right)_{i_2=0}$,二次側開放時の電圧比

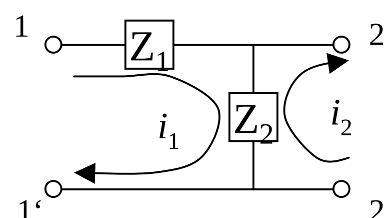
$B = \left(\dfrac{v_1}{i_2}\right)_{v_2=0}$,二次側短絡時の伝達インピーダンス

$C = \left(\dfrac{i_1}{v_2}\right)_{i_2=0}$,二次側開放時の伝達アドミタンス

$D = \left(\dfrac{i_1}{i_2}\right)_{v_2=0}$,二次側短絡時の電流比

R, L, C, Mのみからなる回路(自然回路)では、$AD - BC = 1$

例題



[別法]

$v_1 = (Z_1 + Z_2)i_1 - Z_2 i_2$

$v_2 = Z_2 i_1 - Z_2 i_2$

この2式から、

$v_1 = \{(Z_1 + Z_2)/Z_2\}v_2 + Z_1 i_2$

$i_1 = v_2 / Z_2 + i_2$

$A = \left(\dfrac{v_1}{v_2}\right)_{i_2=0} = \dfrac{i_1(Z_1 + Z_2)}{i_1 Z_2} = \dfrac{Z_1 + Z_2}{Z_2}$

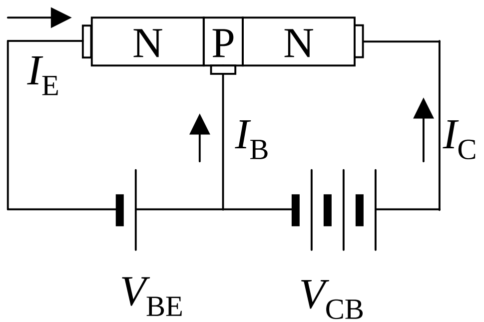
$B = \left(\dfrac{v_1}{i_2}\right)_{v_2=0} = \dfrac{i_1 Z_1}{i_1} = Z_1$

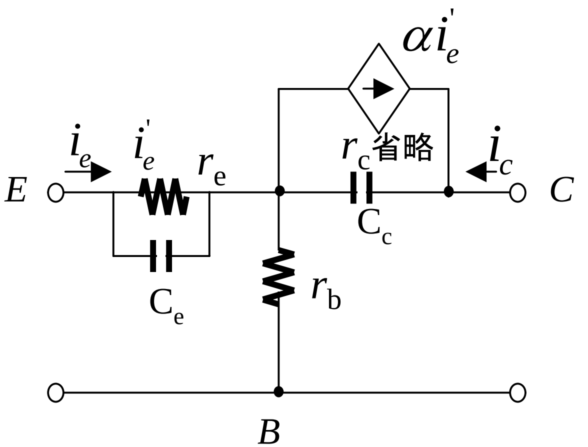
$C = \left(\dfrac{i_1}{v_2}\right)_{i_2=0} = \dfrac{i_1}{i_1 Z_2} = \dfrac{1}{Z_2}$

$D = \left(\dfrac{i_1}{i_2}\right)_{v_2=0} = \dfrac{i_1}{i_1} = 1$

$AD - BC = \dfrac{Z_1 + Z_2}{Z_2} - \dfrac{Z_1}{Z_2} = \dfrac{Z_2}{Z_2} = 1$

(6) 高周波等価回路





高周波では、
①ベース領域でキャリアの拡散に時間がかかる。（BE間が問題。CE間では逆方向バイアス電圧がキャリヤを加速するので速度は低下しない。）
②CB間接合容量C_cや、ベース広がり抵抗のため増幅度が低下する。

このため、コンデンサC_c,C_eを抵抗に並列に挿入した等価回路で代表させる。r_cは大きな値なので省略することが多い。

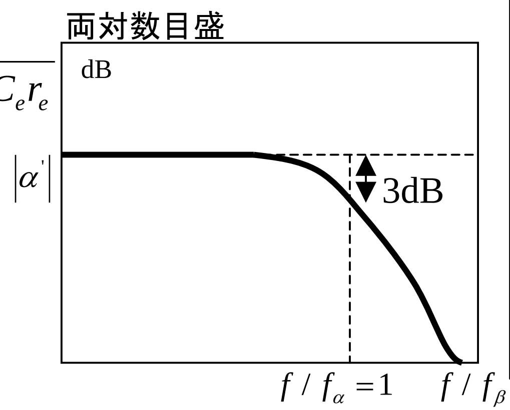
[α' の計算, r_c 省略]

$$i_e' = \frac{i_e \times 1/r_e}{1/r_e + j\omega C_e} = \frac{i_e}{1 + j\omega C_e r_e}$$

$$i_c = \alpha i_e' = \frac{\alpha i_e}{1 + j\omega C_e r_e}$$

$$\alpha' = \frac{i_c}{i_e} = \frac{\alpha}{1 + j\omega C_e r_e}$$

$$|\alpha'| = \frac{\alpha}{\sqrt{1 + (\omega C_e r_e)^2}}$$



$|\alpha'|/\alpha = 1/\sqrt{2}$ すなわち、$3dB$低下する周波数をα遮断周波数(αカットオフ周波数) f_αと呼ぶ。

$2\pi f_\alpha C_e r_e = 1$ から、$f_\alpha = \dfrac{1}{2\pi C_e r_e}$, $\alpha' = \dfrac{\alpha}{1 + jf/f_\alpha}$

[エミッタ接地電流増幅率β' の計算]

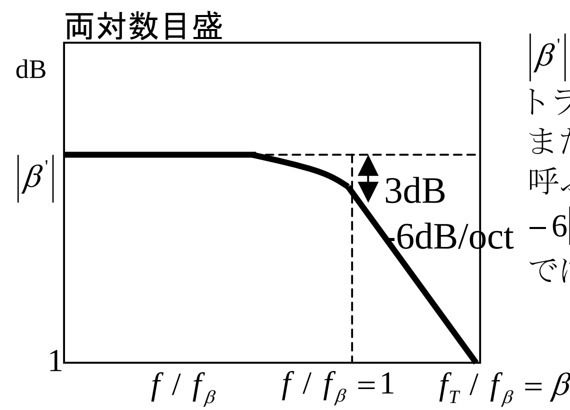
$$\beta' = \frac{\alpha'}{1-\alpha'} = \frac{\dfrac{\alpha}{1+jf/f_\alpha}}{1-\dfrac{\alpha}{1+jf/f_\alpha}} = \frac{\alpha}{1-\alpha+jf/f_\alpha}$$

$$= \frac{\alpha/(1-\alpha)}{1+jf/f_\alpha/(1-\alpha)} = \frac{\beta}{1+jf/f_\alpha/(1-\alpha)} = \frac{\beta}{1+jf/f_\beta}$$

$$f_\beta = f_\alpha(1-\alpha) = f_\alpha/(1+\beta)$$

$|\beta'| = \beta/\sqrt{2}$ となる周波数 f_β を、β遮断周波数と呼ぶ。上式から、$f_\beta << f_\alpha$ である。

$f >> f_\beta$ では、$\beta' = -j\beta f_\beta/f$, $f \to 2f$ で$\beta' \to 1/2\beta'$
すなわち、β'は$-6[dB/oct]$で低下する。
oct = オクターブ(2倍周波)



$|\beta'| = 1$ になる周波数 f_T を、トランジション周波数、または、利得帯域幅積と呼ぶ。$f_T = \beta f_\beta$ である。$-6[dB/oct]$の高周波領域では、$|\beta'| = f_T/f$ と表せる。