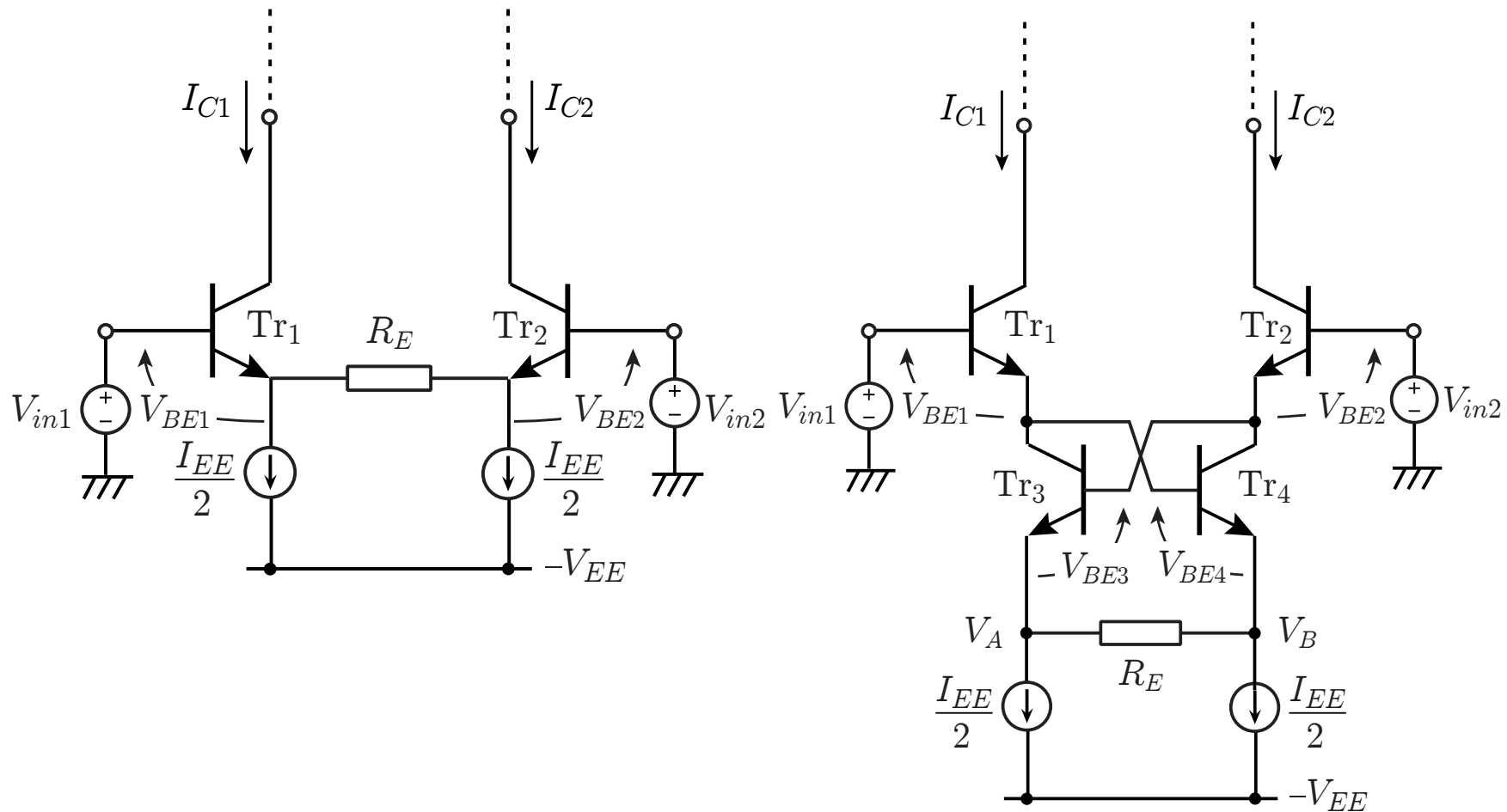


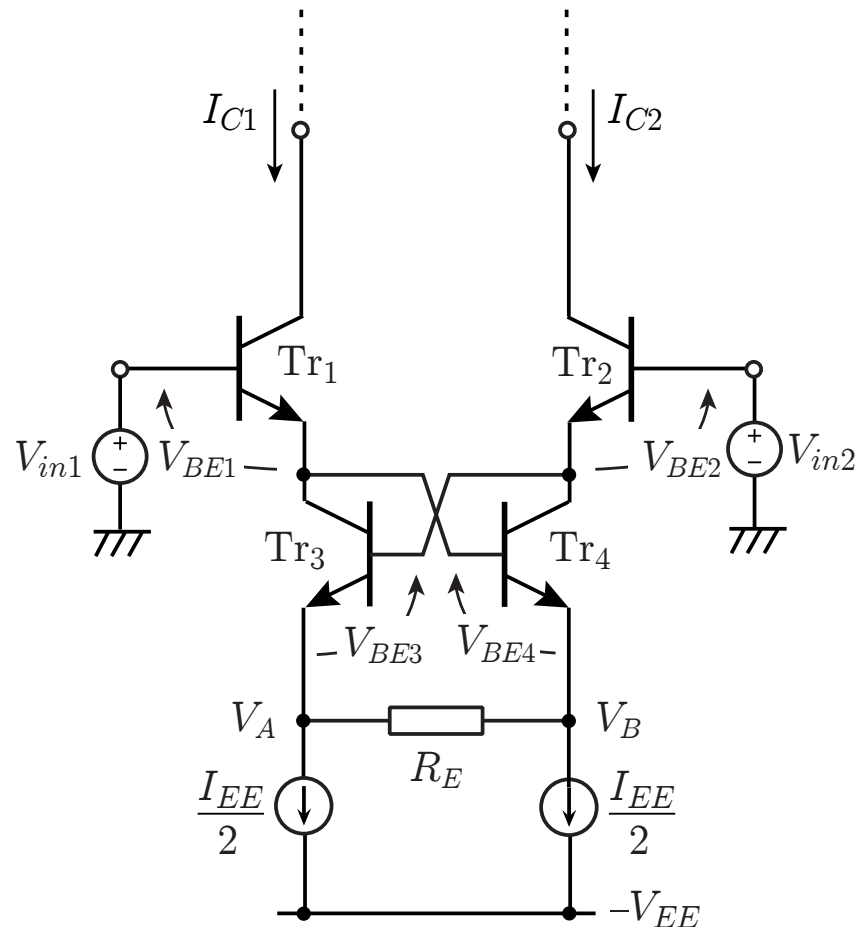
電圧制御電流源回路

バイポーラトランジスタを用いた電圧制御電流源回路 (Operational Transconductance Amplifier, OTA)

線形入力範囲の拡大



Caprio's Quad



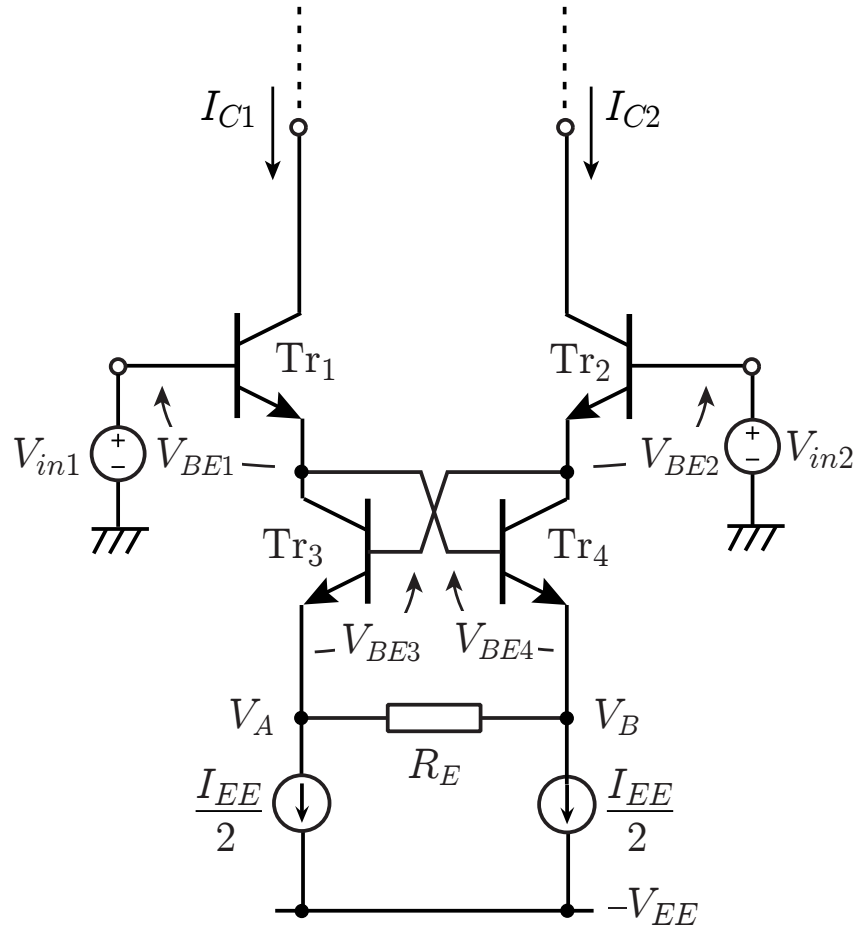
$$V_{BE} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_E}{I_{ES}}\right)$$

$$\begin{matrix} I_{E1} = I_{E3} \\ I_{E2} = I_{E4} \end{matrix} \longrightarrow \begin{matrix} V_{BE1} = V_{BE3} \\ V_{BE2} = V_{BE4} \end{matrix}$$

$$V_A = V_{in2} - V_{BE2} - V_{BE3}$$

$$V_B = V_{in1} - V_{BE1} - V_{BE4}$$

$$V_A - V_B = V_{in2} - V_{in1}$$



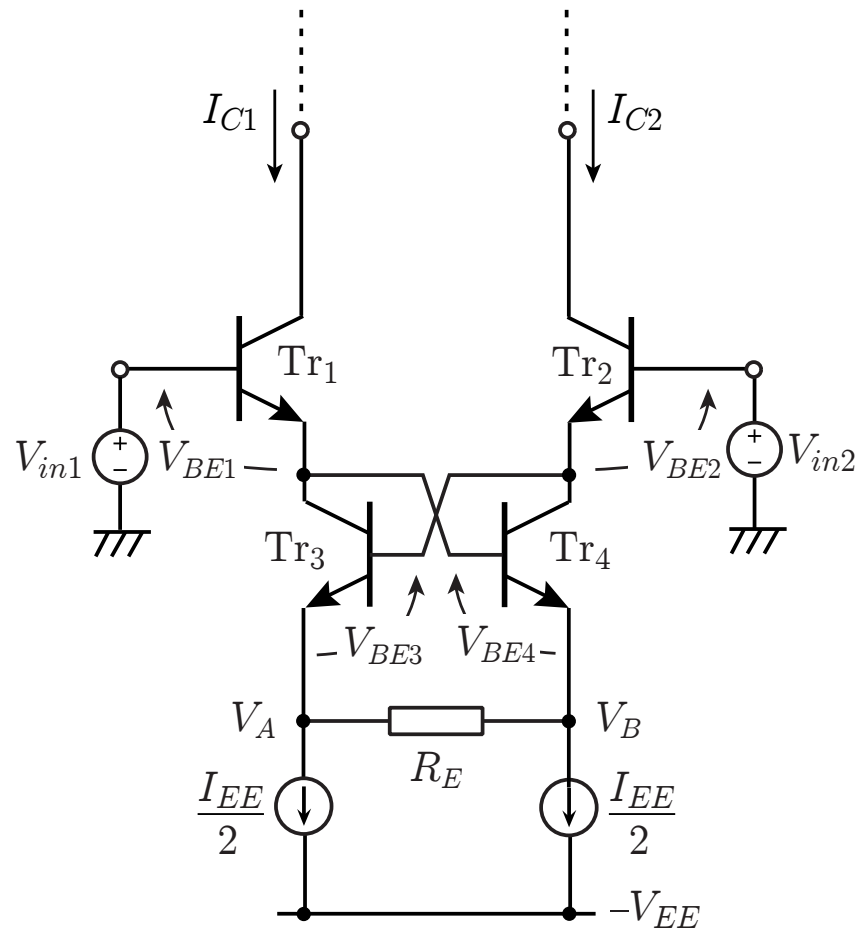
$$V_A - V_B = V_{in2} - V_{in1}$$

$$I_{RE} = \frac{V_{in2} - V_{in1}}{R_E} = \frac{-\Delta V_{in}}{R_E}$$

$$I_{C1} = \frac{I_{EE}}{2} + I_{RE}$$

$$I_{C2} = \frac{I_{EE}}{2} - I_{RE}$$

$$\Delta I_{out} = I_{C1} - I_{C2} = 2I_{RE} = \frac{-2}{R_E} \Delta V_{in}$$



Tr3について

$$V_{C3} = V_{in1} - V_{BE1}$$

$$V_{B3} = V_{in2} - V_{BE2}$$

$$V_{C3} > V_{B3} \rightarrow$$

$$V_{in1} - V_{BE1} > V_{in2} - V_{BE2}$$

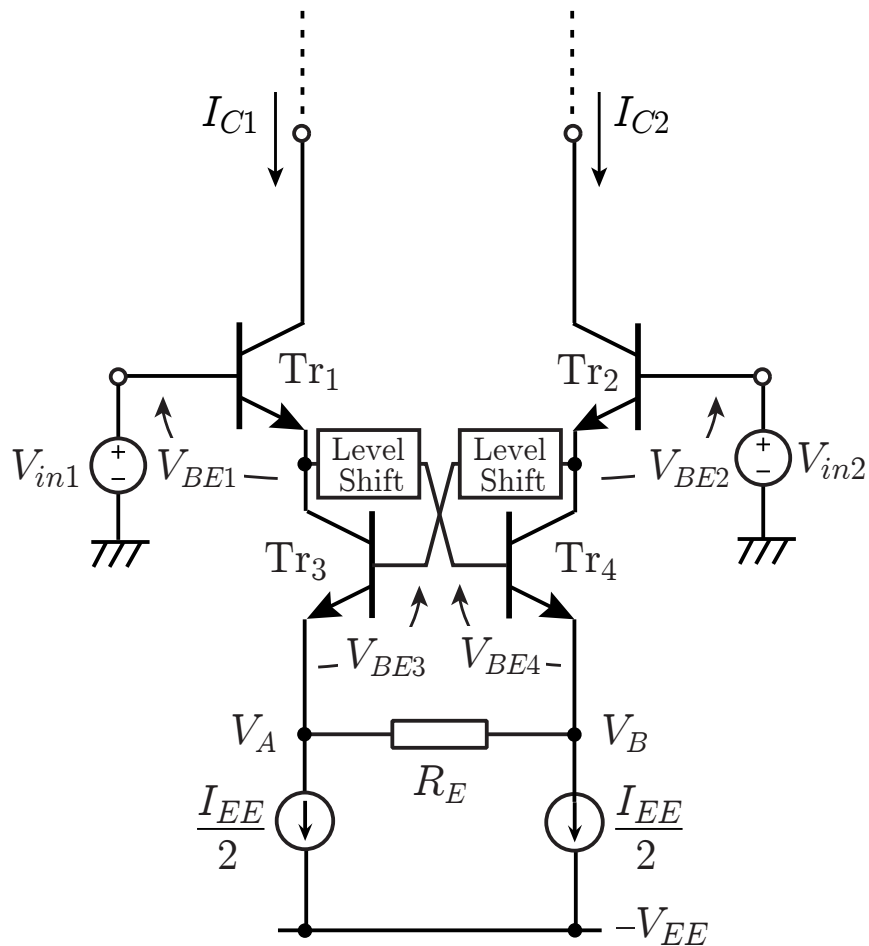
Tr4について

$$V_{C4} = V_{in2} - V_{BE2}$$

$$V_{B4} = V_{in1} - V_{BE1}$$

$$V_{C4} > V_{B4} \rightarrow$$

$$V_{in1} - V_{BE1} < V_{in2} - V_{BE2}$$



$$V_{C3} = V_{in1} - V_{BE1}$$

$$V_{B3} = V_{in2} - V_{BE2} - V_{shift}$$

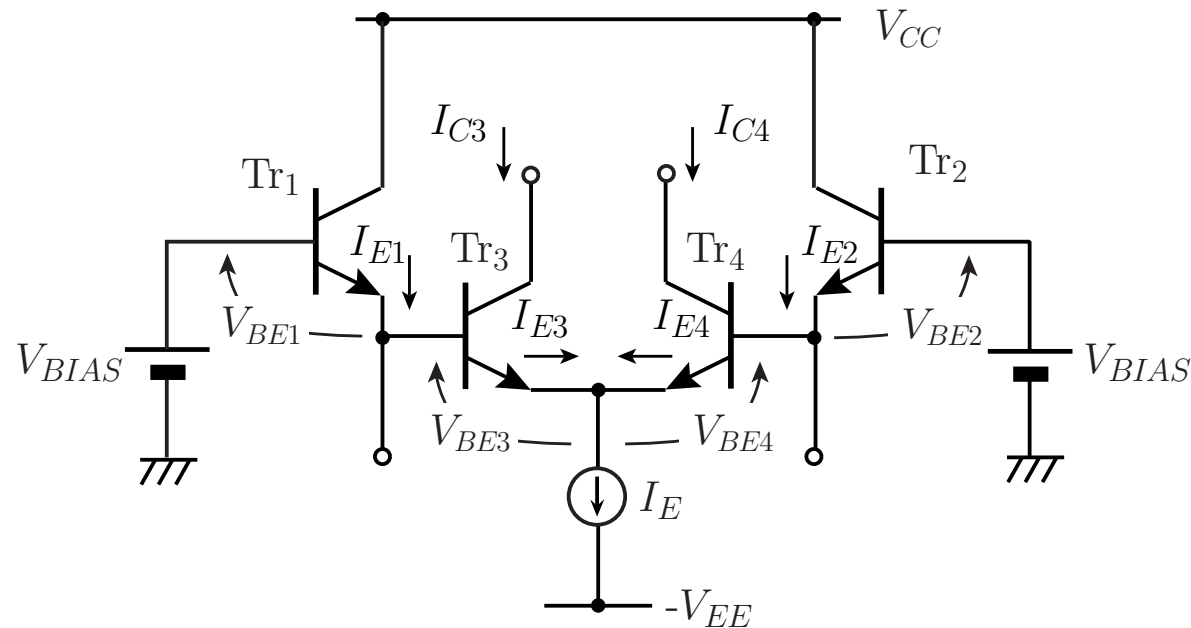
$$V_{in1} - V_{BE1} > V_{in2} - V_{BE2} - V_{shift}$$

$$V_{C4} = V_{in2} - V_{BE2}$$

$$V_{B4} = V_{in1} - V_{BE1} - V_{shift}$$

$$V_{in1} - V_{BE1} - V_{shift} < V_{in2} - V_{BE2}$$

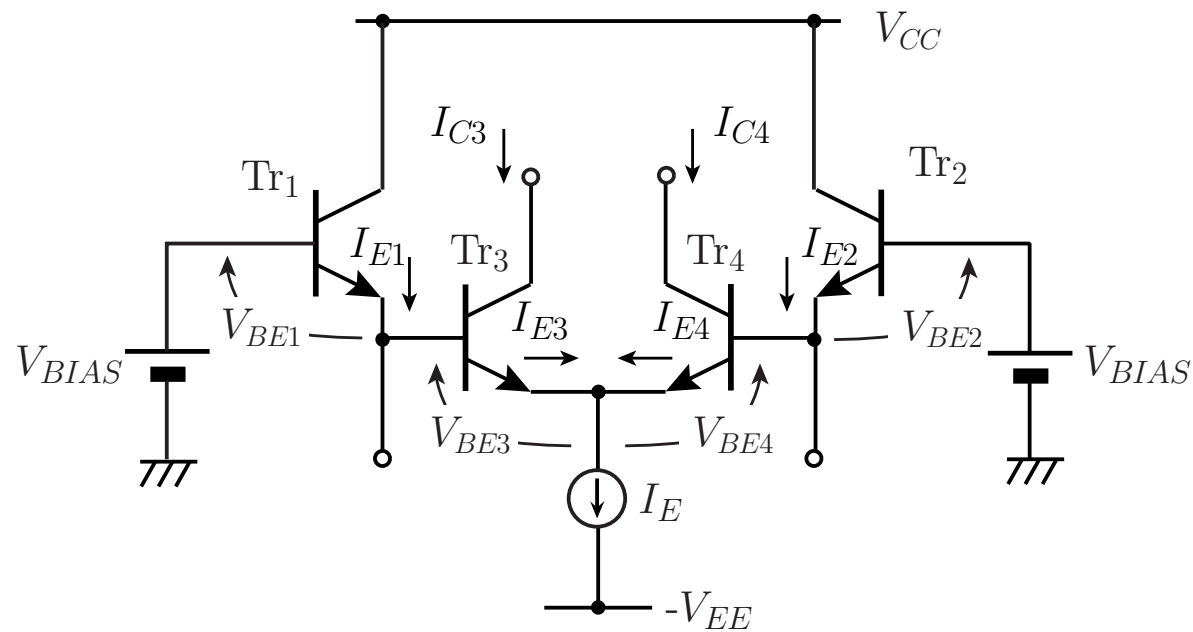
伝達コンダクタンスの電子的制御



$$V_{BE1} + V_{BE3} = V_{BE2} + V_{BE4}$$

$$\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{E1}}{I_{ES}}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{E3}}{I_{ES}}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{E2}}{I_{ES}}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{E4}}{I_{ES}}\right)$$

$$I_{E1} I_{E3} = I_{E2} I_{E4}$$



$$I_{E3} + I_{E4} = I_E$$

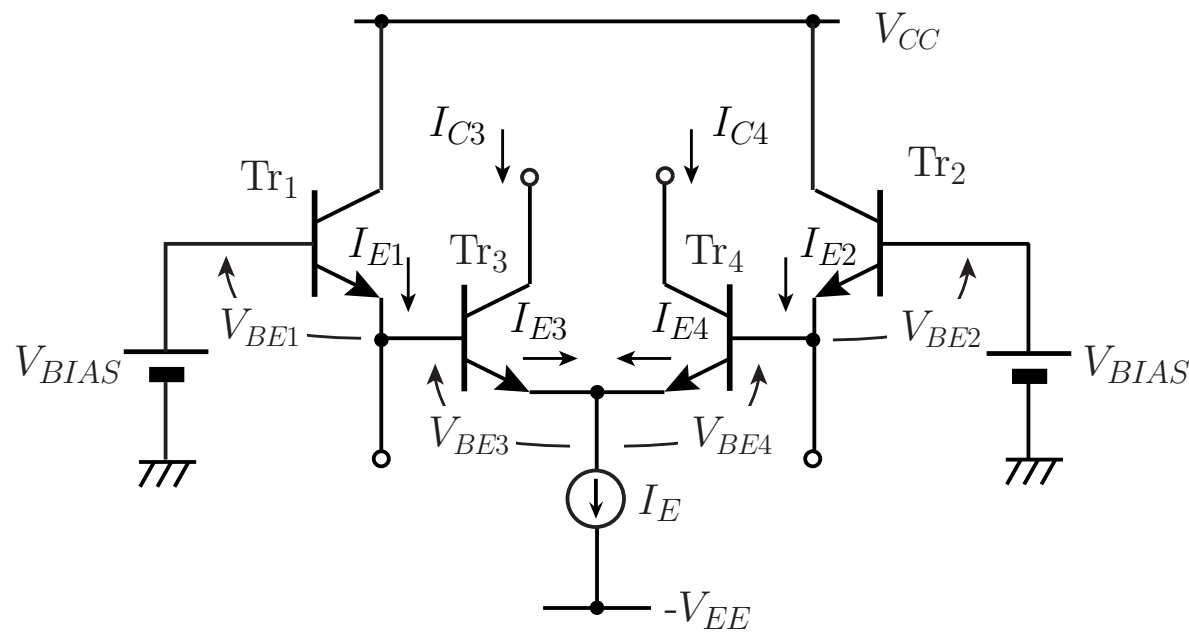
$$I_{E1} + I_{E2} = I_D \quad \longrightarrow \quad I_{E1} I_{E3} = I_{E2} I_{E4}$$

$$I_{E1} + I_{E2} = I_D$$

$$I_{E1} I_{E3} = (I_D - I_{E1})(I_E - I_{E3})$$

$$I_{E1} I_E + I_{E3} I_D = I_E I_D$$

$$\boxed{\frac{I_{E1}}{I_D} + \frac{I_{E3}}{I_E} = 1}$$



$$I_{E3} + I_{E4} = I_E$$

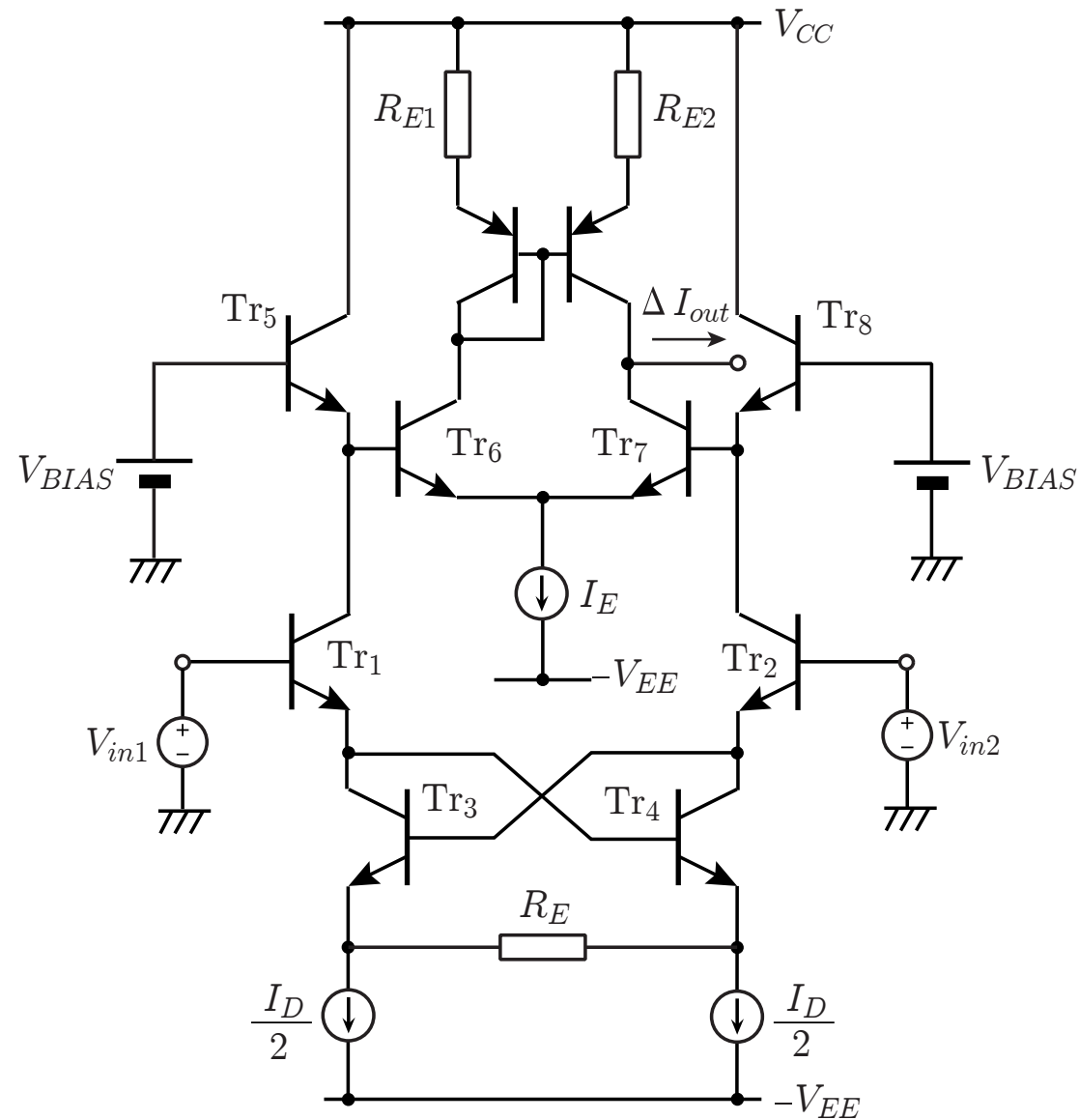
$$I_{E1} + I_{E2} = I_D$$

$$\frac{I_{E1}}{I_D} + \frac{I_{E3}}{I_E} = 1$$

$$A_I = \frac{I_{C3} - I_{C4}}{I_{E1} - I_{E2}} = \frac{I_{E3} - I_{E4}}{I_{E1} - I_{E2}} = \frac{2I_{E3} - I_E}{2I_{E1} - I_D} = \frac{I_E}{I_D} \frac{2^{\frac{I_{E3}}{I_E}} - 1}{2^{\frac{I_{E1}}{I_D}} - 1}$$

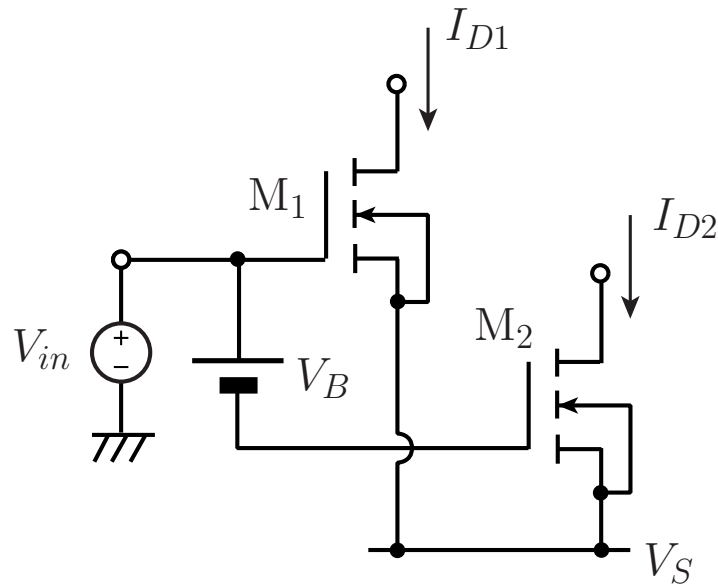
$$A_I = \frac{I_E}{I_D} \frac{2^{\frac{I_{E3}}{I_E}} - 1}{2(1 - \frac{I_{E3}}{I_E}) - 1} = -\frac{I_E}{I_D}$$

バイポーラトランジスタによる電子的に特性可変のOTA



MOSTランジスタを用いたOTA

バイアスオフセット技術



$$2\text{乗則} : I_D = K(V_{GS} - V_T)^2$$

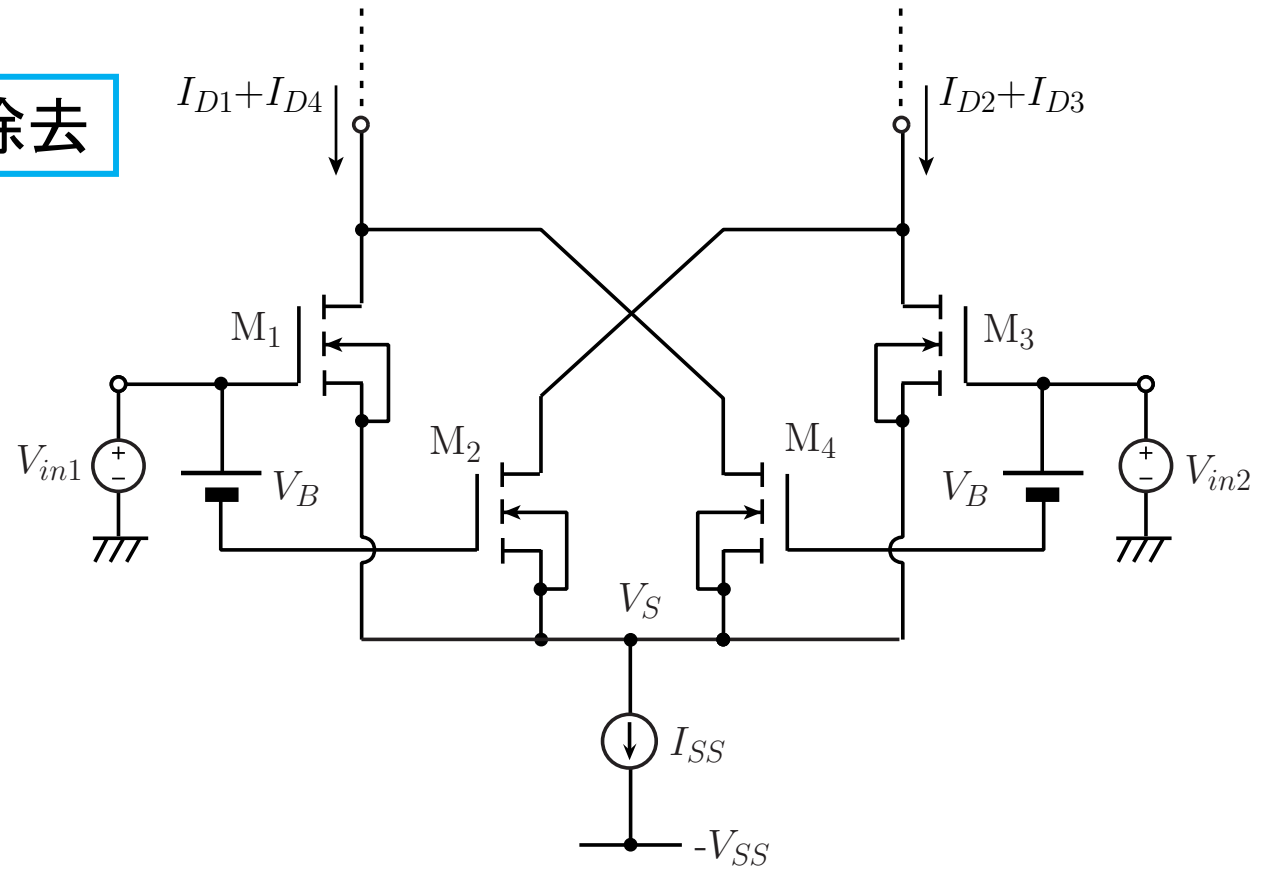
$$I_{D1} = K(V_{in} - V_S - V_T)^2$$

$$I_{D2} = K(V_{in} - V_B - V_S - V_T)^2$$

$$I_{D1} - I_{D2} = K(2V_{in} - V_B - 2V_S - 2V_T)V_B$$

$$= 2KV_B V_{in} - K(V_B + 2V_S + 2V_T)V_B$$

直流電流成分の除去

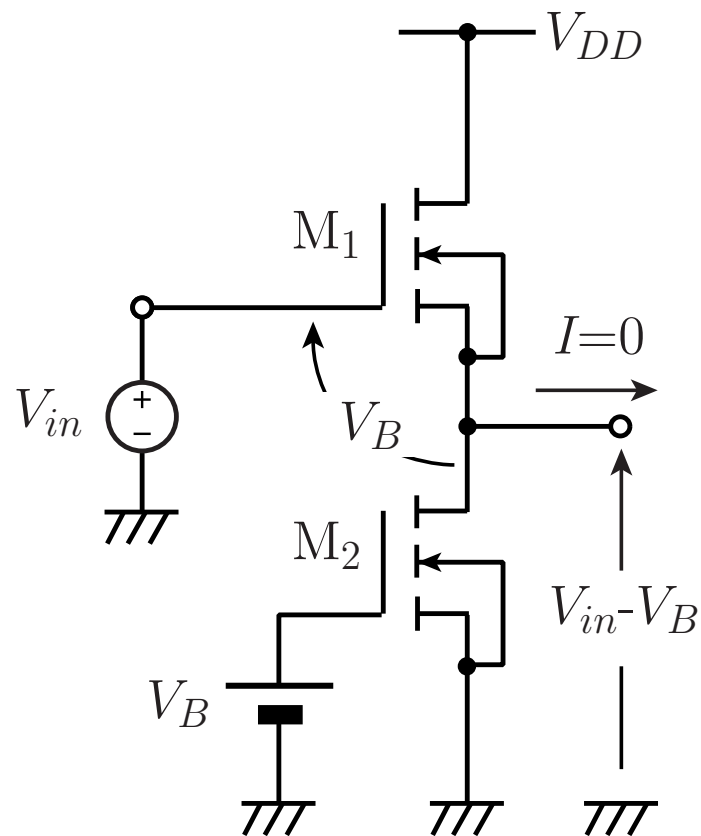


$$I_{D1} - I_{D2} = 2KV_B V_{in1} - K(V_B + 2V_S + 2V_T)V_B$$

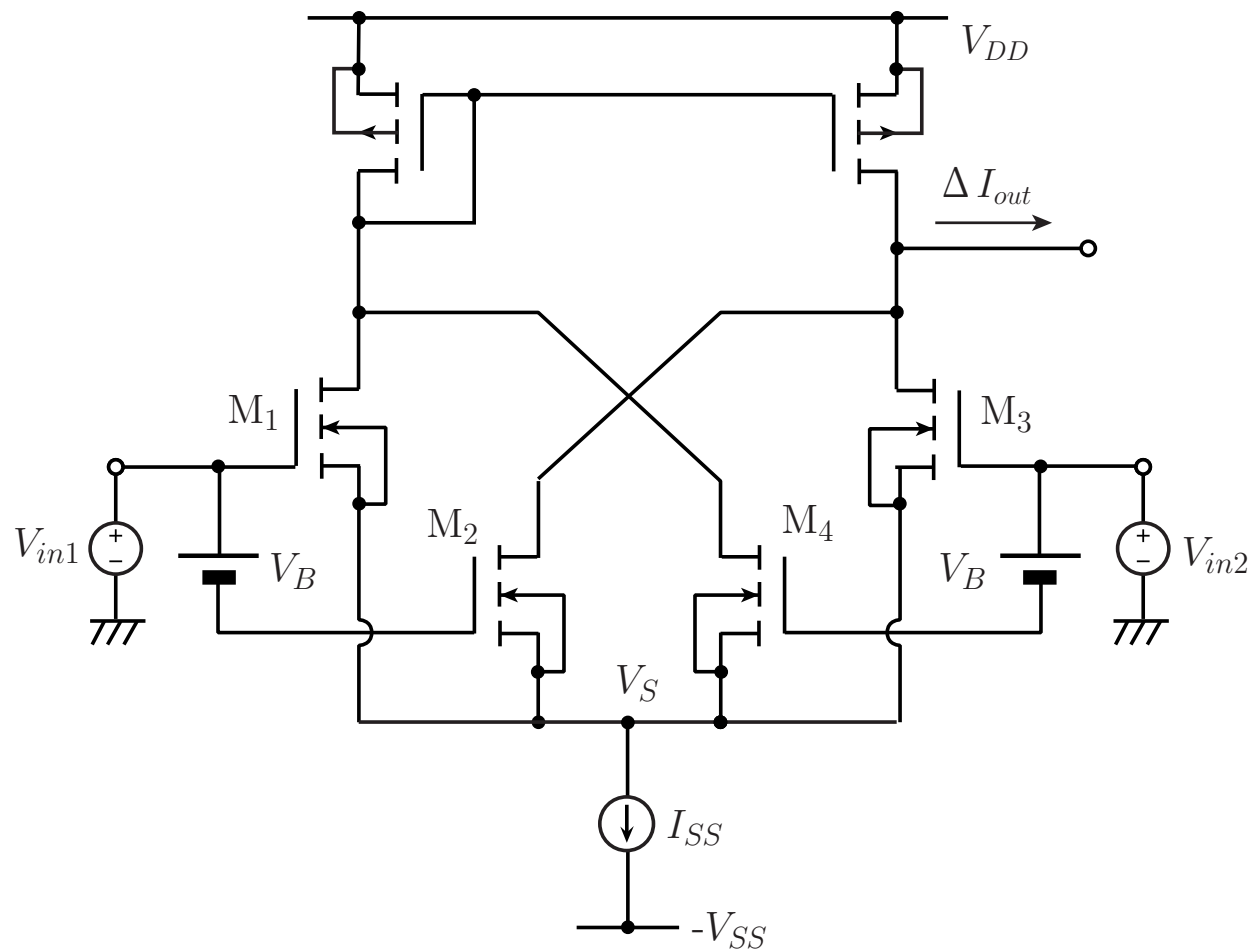
$$I_{D3} - I_{D4} = 2KV_B V_{in2} - K(V_B + 2V_S + 2V_T)V_B$$

$$\Delta I_{out} = (I_{D1} - I_{D2}) - (I_{D3} - I_{D4}) = 2KV_B (V_{in1} - V_{in2})$$

非接地直流電圧源の実現

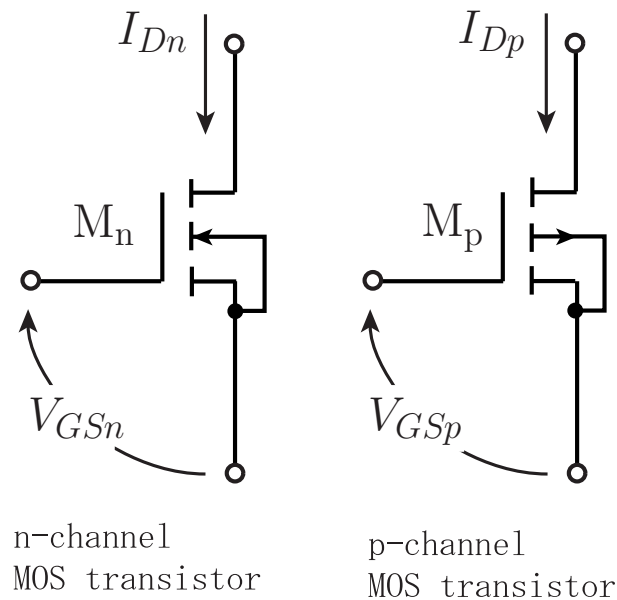


MOSTランジスタによる電子的に特性可変のOTA



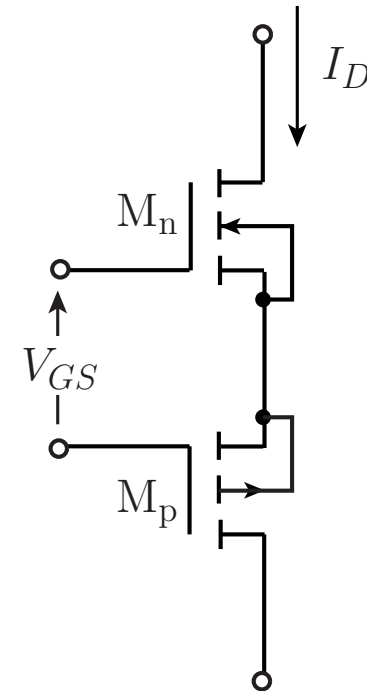
$$\Delta I_{out} = (I_{D1} - I_{D2}) - (I_{D3} - I_{D4}) = 2KV_B(V_{in1} - V_{in2})$$

問：CMOSペアの等価ゲート・ソース間電圧 V_{GS} ，
等価コンダクタンスパラメータ K ，等価しきい電圧 V_T を
 K_i ， V_{GSi} ， V_{Ti} ($i=n, p$)を用いて表せ．



$$I_{Dn} = K_n (V_{GSn} - V_{Tn})^2$$

$$I_{Dp} = -K_p (V_{GSp} - V_{Tp})^2$$

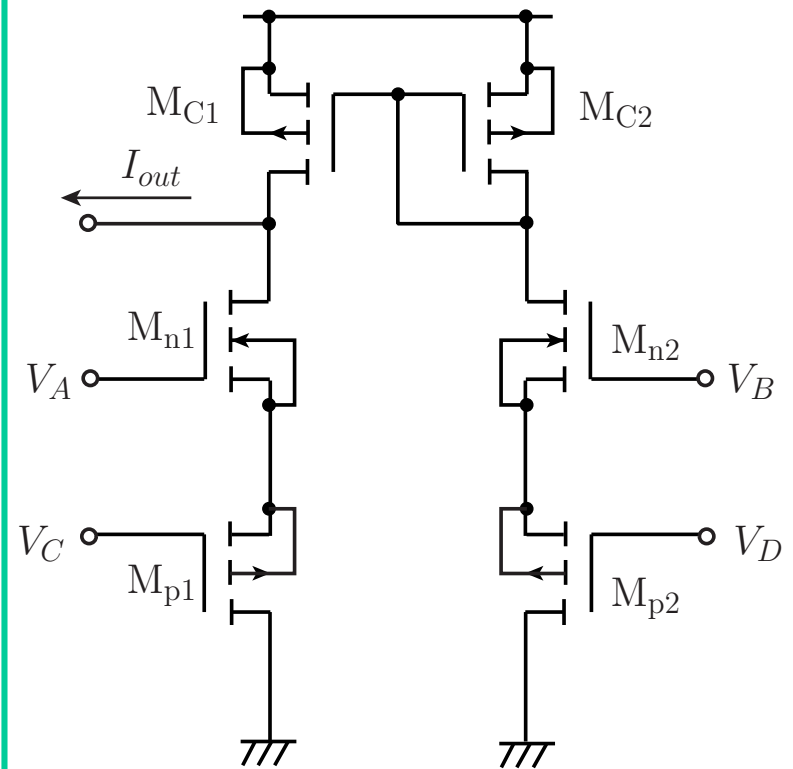


CMOSペア

問：右図に示すCMOSペアと
カレントミラー回路から
構成される回路に，適切な電圧
 V_A と V_B ， V_C ， V_D を加え，出力
電流 I_{out} が

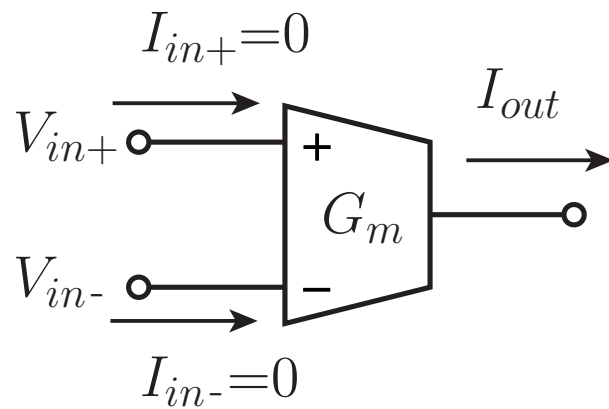
$$I_{out} = \alpha(V_X - V_T)(V_{in1} - V_{in2})$$

となる回路を実現したい．ただし，
 V_{in1} と V_{in2} は入力電圧， α は適当な
定数， V_X は適当な電圧， V_T は
CMOSペアの等価しきい電圧であ
る．電圧 V_A ， V_B ， V_C ， V_D を V_{in1} ，
 V_{in2} ， V_X ， V_T を用いて表せ．また，
 α も求めよ．

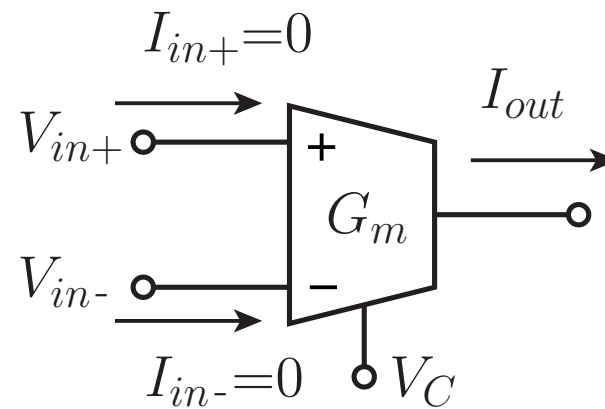


OTAの応用

OTAの記号



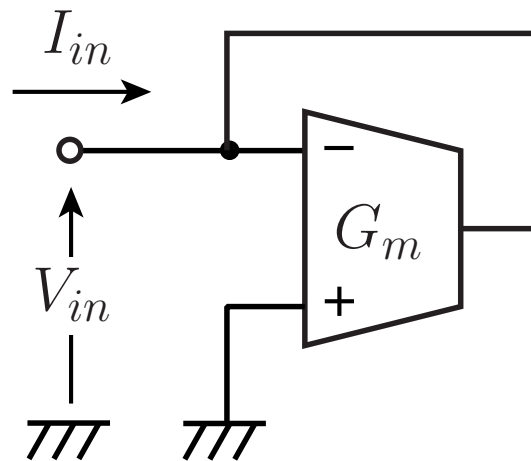
(a)



(b)

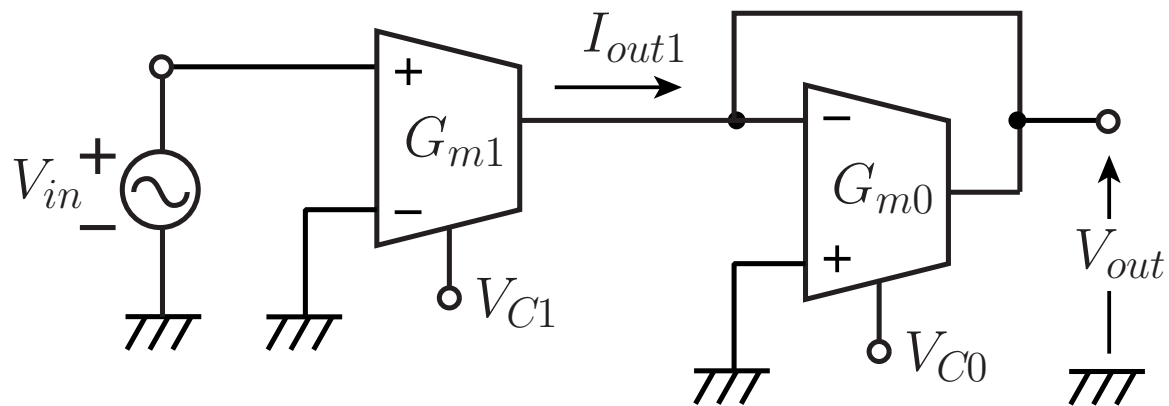
$$I_{out} = G_m (V_{in+} - V_{in-})$$

OTAによる抵抗の構成



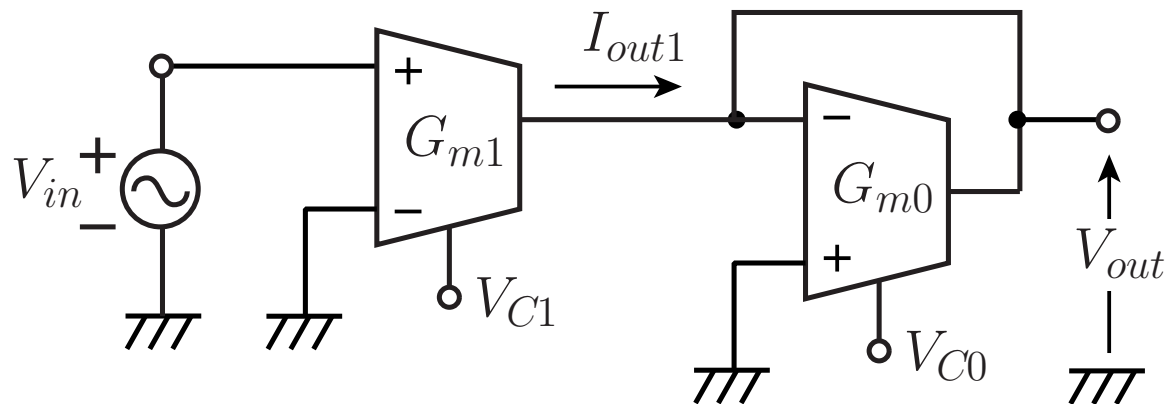
$$I_{in} = G_m V_{in} \rightarrow R_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{1}{G_m}$$

OTAによる増幅回路の構成



$$V_{out} = \frac{1}{G_{m0}} I_{out1} = \frac{G_{m1}}{G_{m0}} V_{in}$$

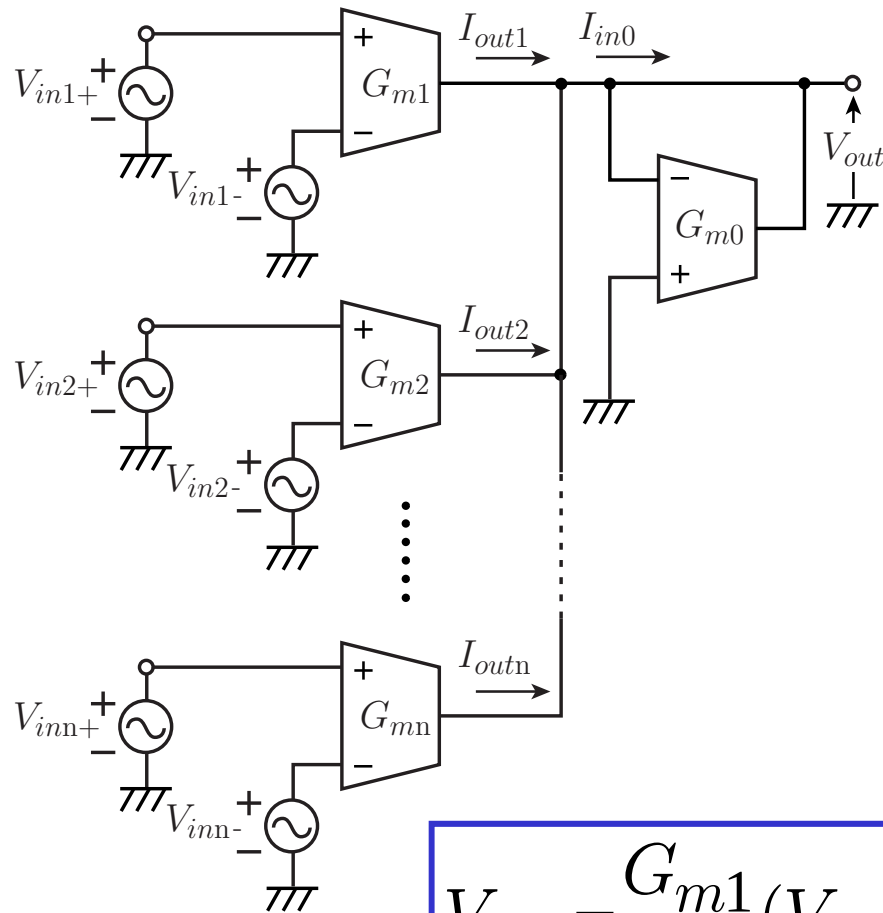
OTAによる乗除算回路の構成



$$G_{m0} = K_{m0} V_{C0}, \quad G_{m1} = K_{m1} V_{C1}$$

$$V_{out} = \frac{G_{m1}}{G_{m0}} V_{in} = \frac{K_{m1}}{K_{m0}} \cdot \frac{V_{C1} V_{in}}{V_{C0}}$$

OTAによる加減算回路の構成



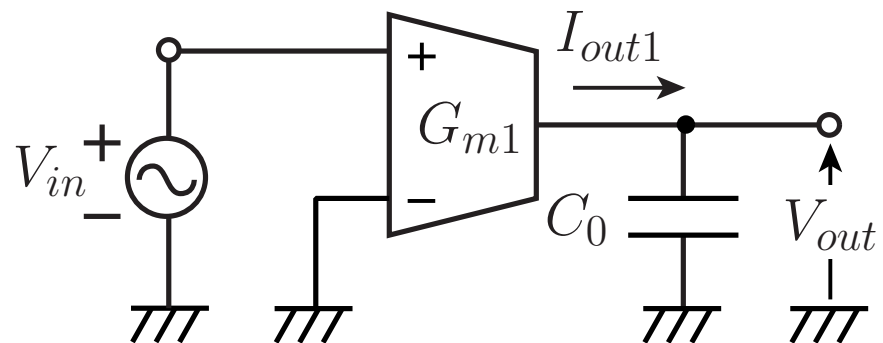
$$I_{in0} = I_{out1} + I_{out2} + \dots + I_{outn}$$

$$I_{outi} = G_{mi}(V_{ini+} - V_{ini-})$$

$$V_{out} = \frac{G_{m1}}{G_{m0}}(V_{in1+} - V_{in1-}) + \frac{G_{m2}}{G_{m0}}(V_{in2+} - V_{in2-}) + \dots$$

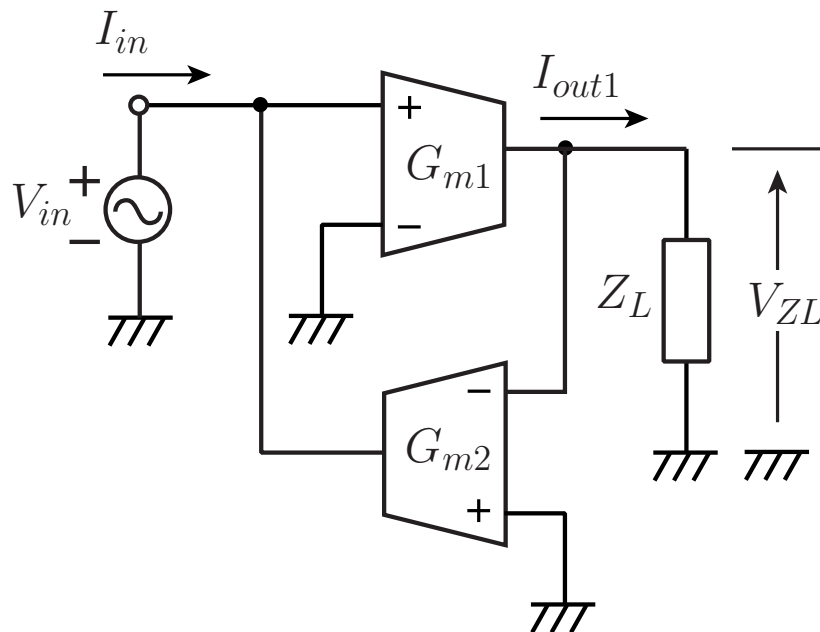
$$\dots + \frac{G_{mn}}{G_{m0}}(V_{inn+} - V_{inn-})$$

OTAによる積分回路の構成



$$V_{out} = \frac{1}{sC_0} I_{out1} = \frac{G_{m1}}{sC_0} V_{in}$$

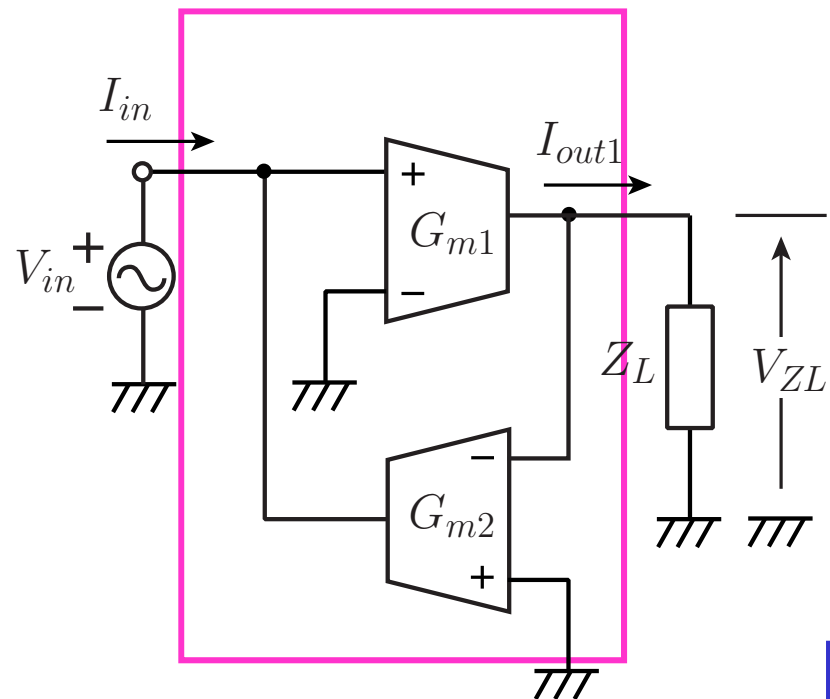
OTAによるインピーダンスの実現



$$V_{ZL} = Z_L I_{out1} = Z_L G_{m1} V_{in}$$

$$I_{in} = G_{m2} V_{ZL}$$

$$Z_{in} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{G_{m2} V_{ZL}} = \frac{V_{in}}{G_{m2} Z_L G_{m1} V_{in}} = \frac{1}{G_{m2} Z_L G_{m1}}$$



ジャイレータ

$$Z_L = \frac{1}{sC_L}$$

$$Z_{in} = \frac{1}{G_{m2}Z_LG_{m1}} = s \frac{C_L}{G_{m1}G_{m2}}$$

問：下の図の回路の入力インピーダンス $\frac{V_{in}}{I_{in}}$ を求めよ.

