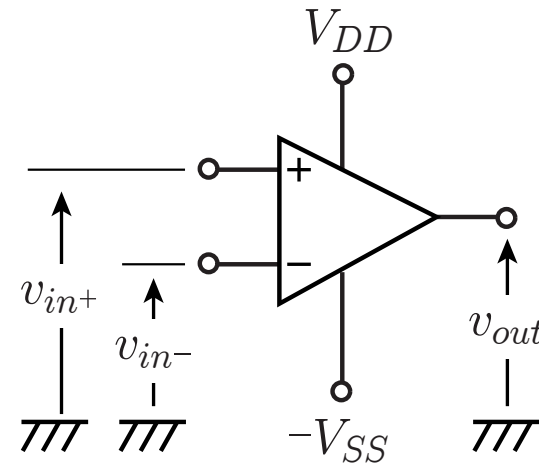


演算増幅器

演算増幅器とは

演算増幅器の記号



演算増幅器の特性

$$v_{out} = A_d(v_{in+} - v_{in-}) + A_c \frac{v_{in+} + v_{in-}}{2}$$

理想演算増幅器

差動利得: 無限大

同相利得: 零

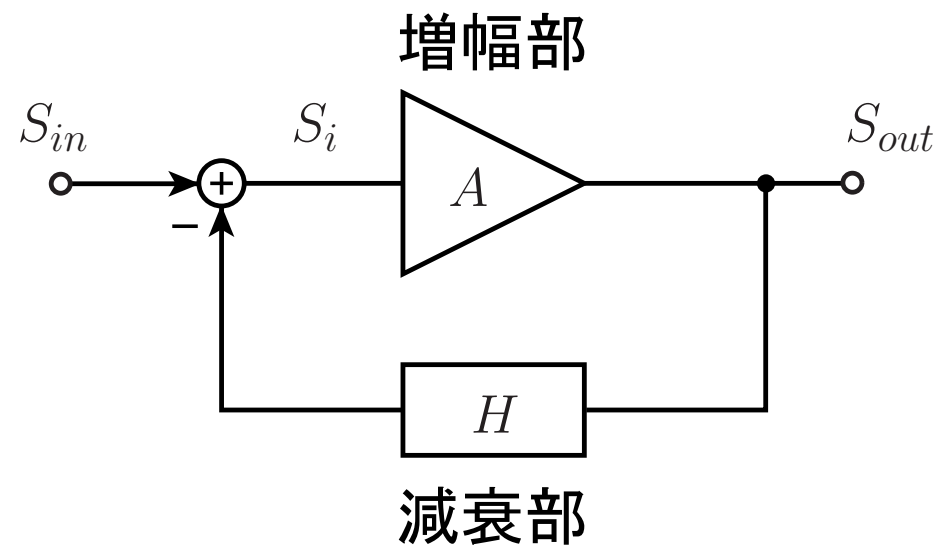
入力インピーダンス: 無限大

出力インピーダンス: 零

負帰還増幅回路の増幅部に使用

負帰還増幅回路とは

負帰還増幅回路の原理



$$\begin{aligned} S_{out} &= AS_i \\ S_i &= S_{in} - HS_{out} \end{aligned}$$



$$S_{out} = \frac{A}{1 + AH} S_{in}$$

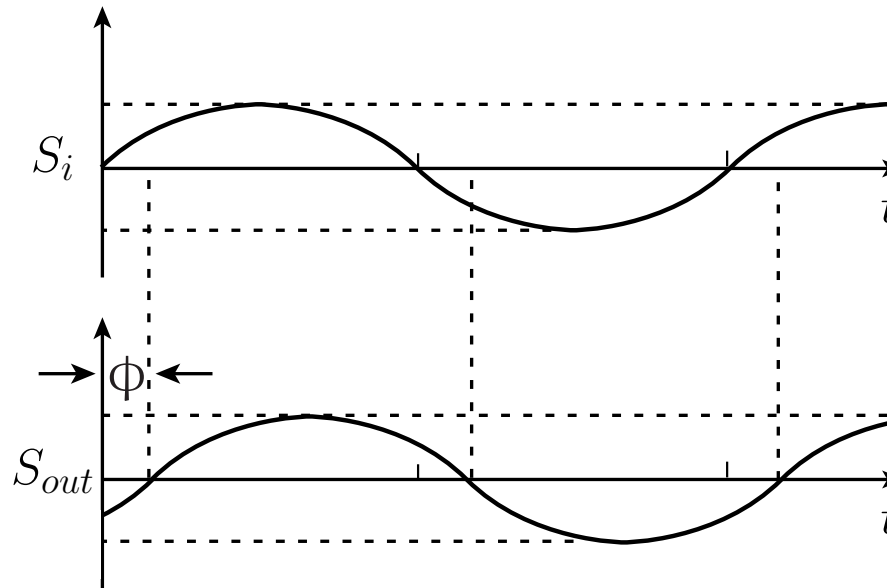
負帰還増幅回路の特徴

$AH \gg 1$ と仮定すると

$$S_{out} = \frac{A}{1 + AH} S_{in} \approx \frac{1}{H} S_{in}$$

- 素子値偏差への耐性の向上
- 出力歪み, 出力雑音への耐性の向上
- 増幅帯域幅の拡大
- 入出力インピーダンスの改善

負帰還増幅回路の問題点



ϕ : 信号の遅れ

$$\phi = 180^\circ$$

負帰還 $\rightarrow$ 正帰還

$$G = \frac{A}{1+AH} \rightarrow G = \frac{-A}{1-AH}$$

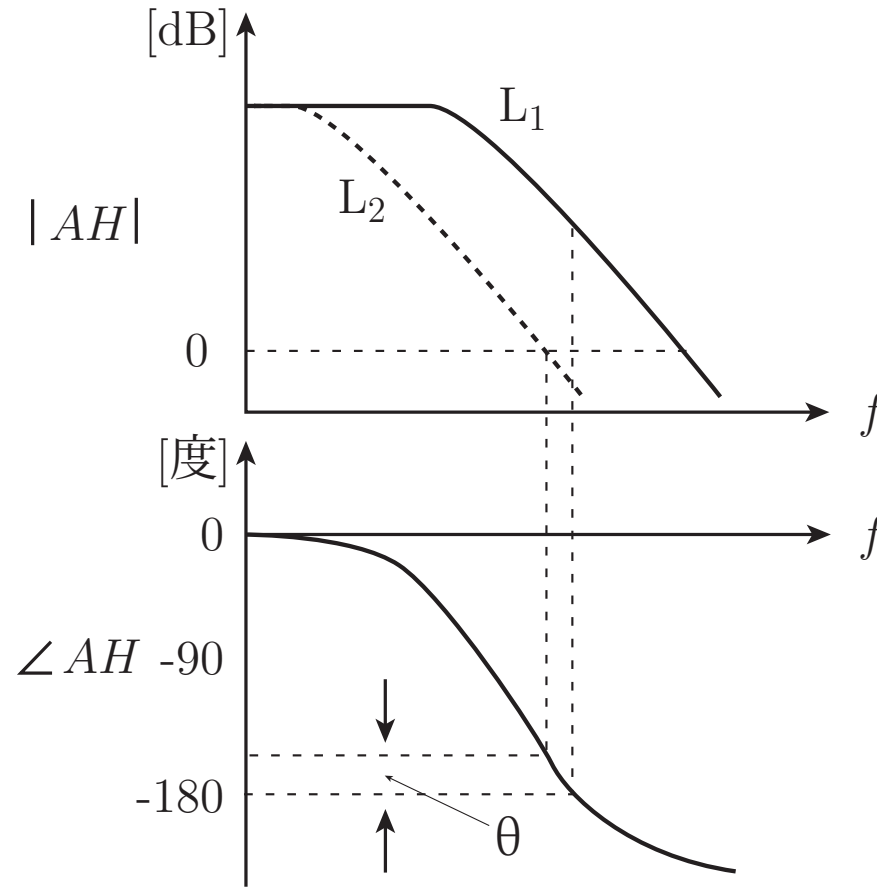
分母=0: $\frac{-A}{1-AH} \rightarrow \infty$ 不安定

増幅回路が安定であるための条件

$$AH \neq -1$$



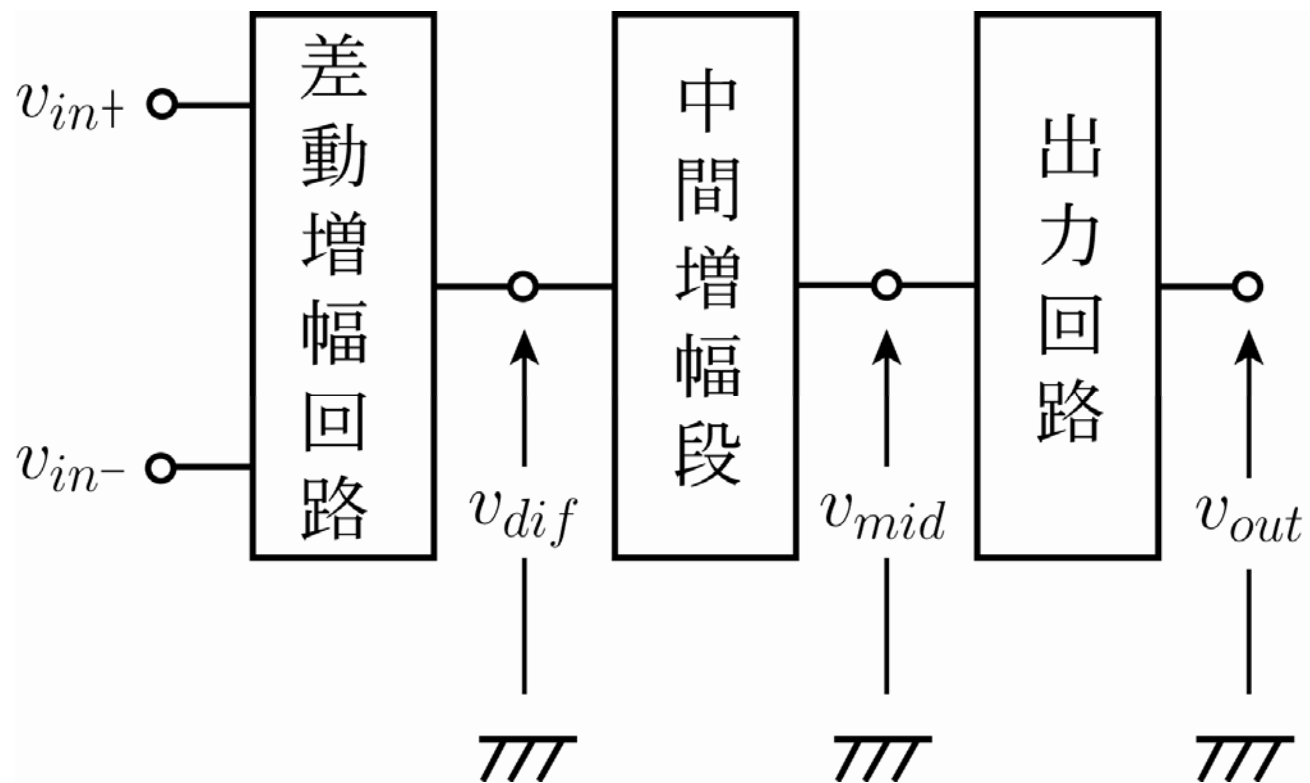
$\arg(AH) = 180^\circ \text{ のとき } |AH| < 1$



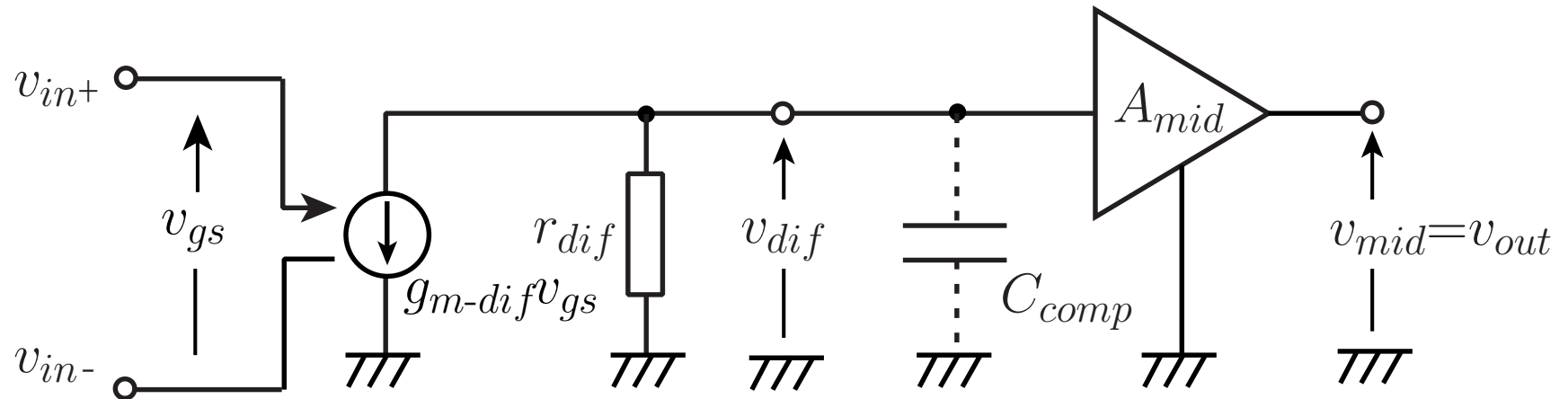
θ : 位相余裕

ボード線図

演算増幅器の基本構成



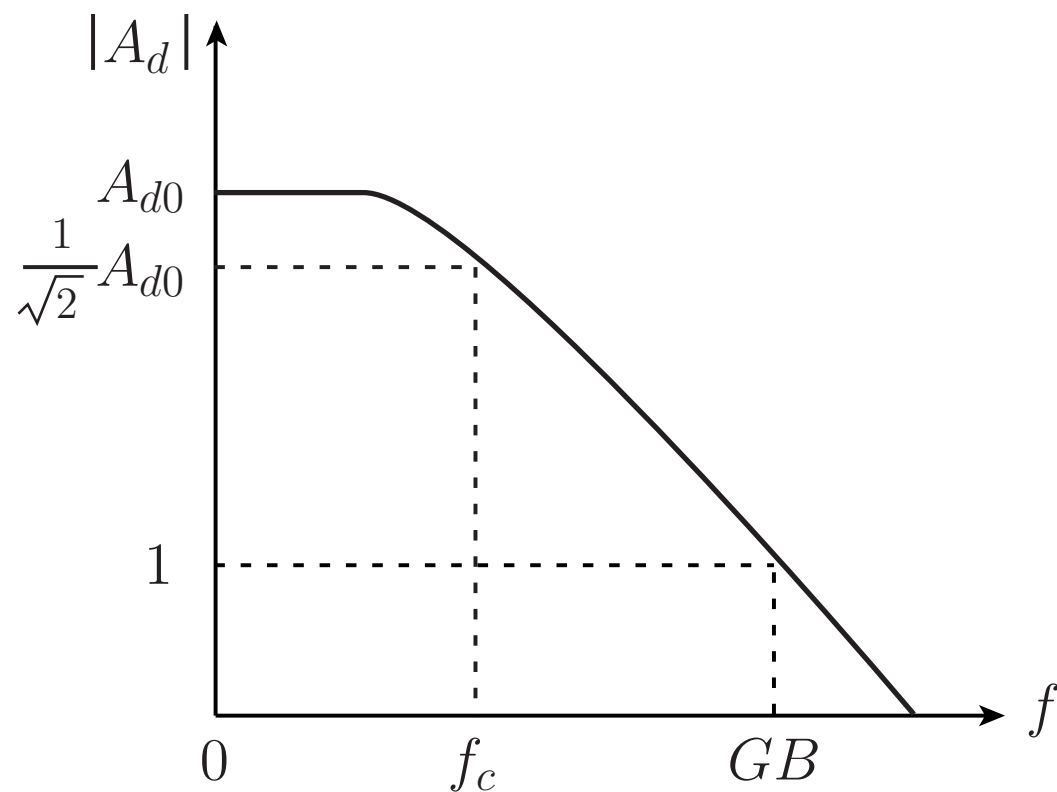
基本演算増幅器の近似モデル



問 v_{out} と v_{in+} , v_{in-} の関係を示せ.

$$A_d = A_{mid} \frac{g_{m-dif} r_{dif}}{1 + s C_{comp} r_{dif}} = \frac{A_{d0}}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

$$\frac{f}{f_c} \gg 1 \text{ と仮定} \quad |A_d| \approx \frac{A_{d0} f_c}{f} \quad = 1 \rightarrow f = A_{d0} f_c = GB$$

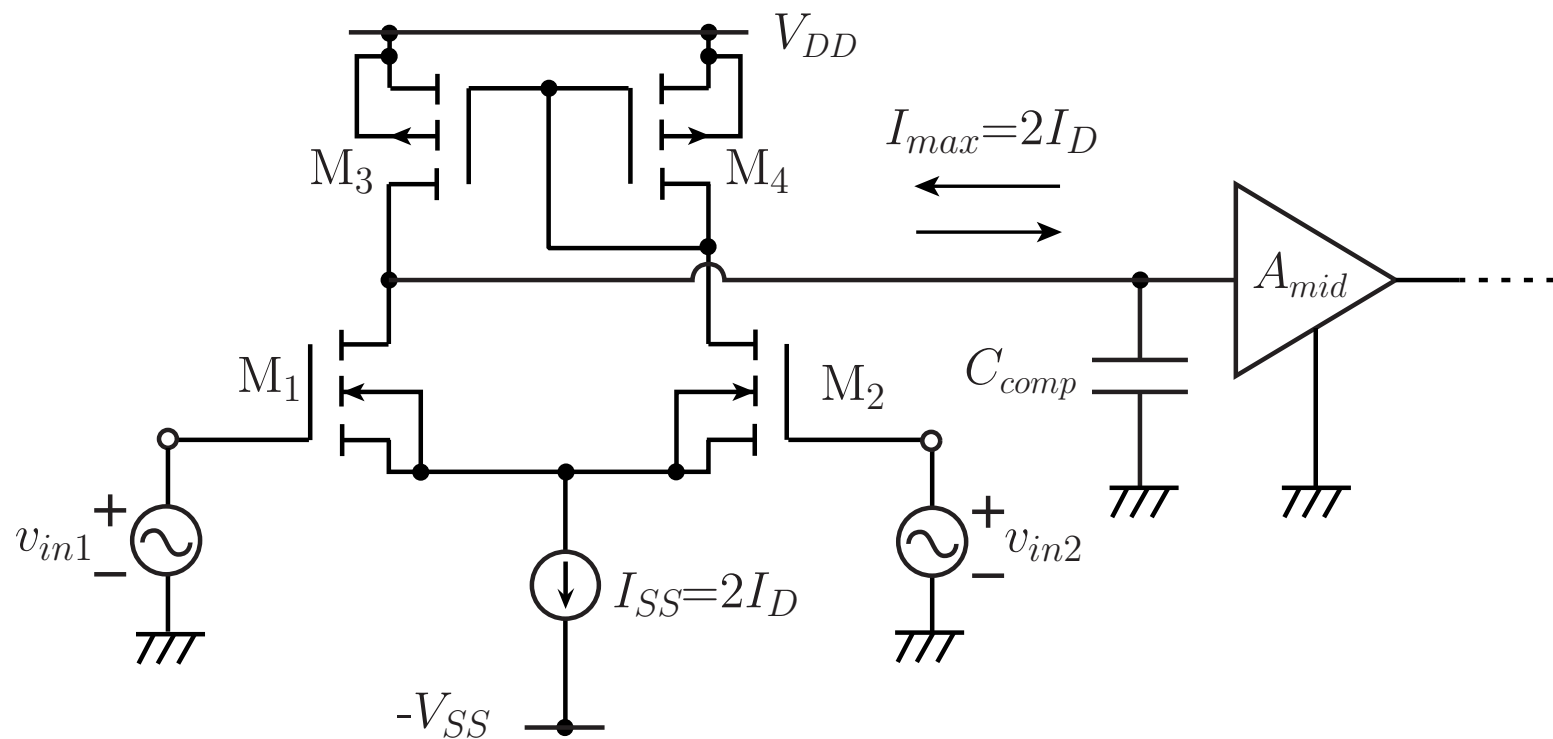


$$A_d = A_{mid} \frac{g_{m-dif} r_{dif}}{1 + s C_{comp} r_{dif}} = \frac{A_{d0}}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

問 $g_{m-dif} \approx 2\sqrt{K I_D}$, $r_{dif} \approx \frac{1}{\lambda I_D}$ という関係を用いて
直流利得 A_{d0} を求めよ.

$$A_d = A_{mid} \frac{g_{m-dif} r_{dif}}{1 + s C_{comp} r_{dif}} = \frac{A_{d0}}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

問 $g_{m-dif} \approx 2\sqrt{K I_D}$, $r_{dif} \approx \frac{1}{\lambda I_D}$ という関係を用いて
利得帯域幅積 GB を求めよ.



問 C_{comp} の両端に生じる電圧について，
単位時間あたりの最大の変化量 SR を求めよ．

特性のトレードオフ

$$A_{d0} = A_{mid} g_{m-dif} r_{dif} \approx A_{mid} \frac{2}{\lambda} \sqrt{\frac{K}{I_D}}$$

$$GB = \frac{A_{mid} g_{m-dif}}{2\pi C_{comp}} \approx \frac{A_{mid} \sqrt{KI_D}}{\pi C_{comp}}$$

$$SR = \frac{2I_D}{C_{comp}} \approx \frac{g_{m-dif}^2}{2KC_{comp}}$$

バイポーラトランジスタを用いた 演算増幅器の場合

$$g_{m-dif} \approx \frac{\alpha_0 q I_E}{kT} \quad r_{dif} \approx \frac{V_A}{I_C} = \frac{V_A}{\alpha_0 I_E}$$

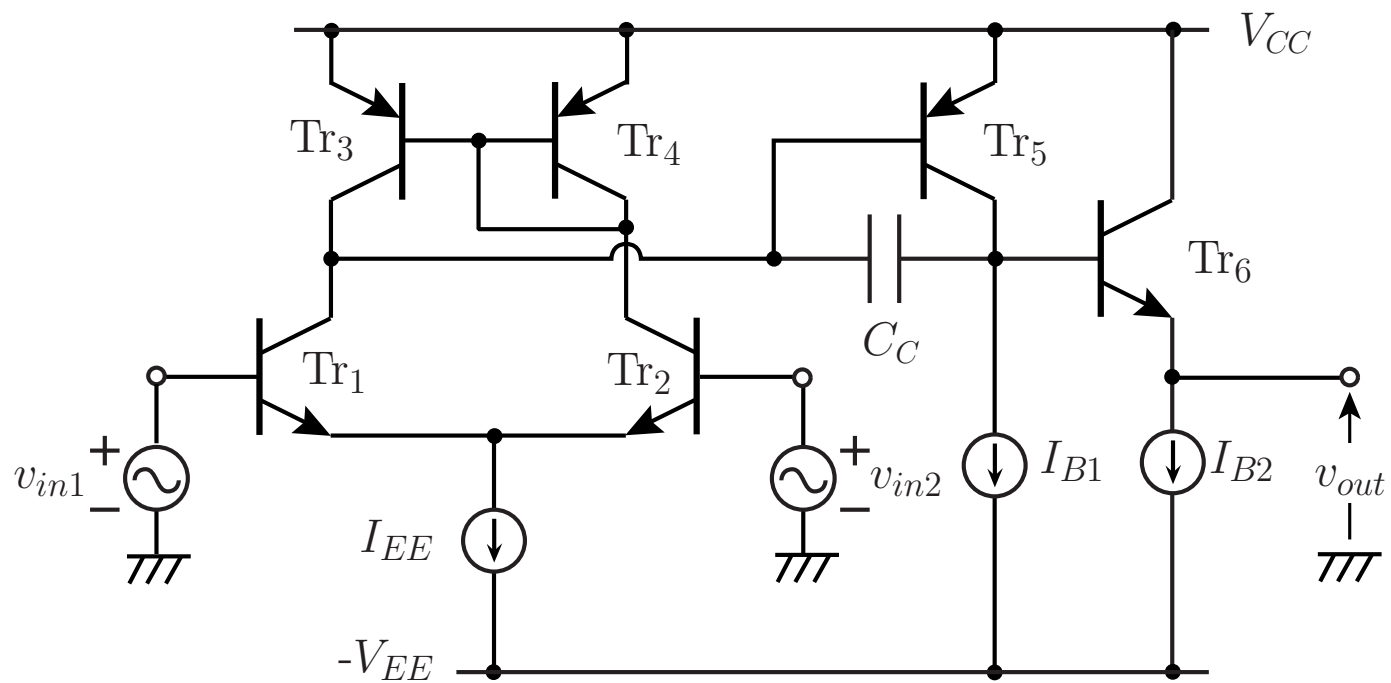
$$A_{d0} = A_{mid} g_{m-dif} r_{dif} \approx A_{mid} \frac{q V_A}{kT}$$

$$GB = \frac{A_{mid} g_{m-dif}}{2\pi C_{comp}} = \frac{A_{mid} \alpha_0 q I_E}{2\pi C_{comp} kT}$$

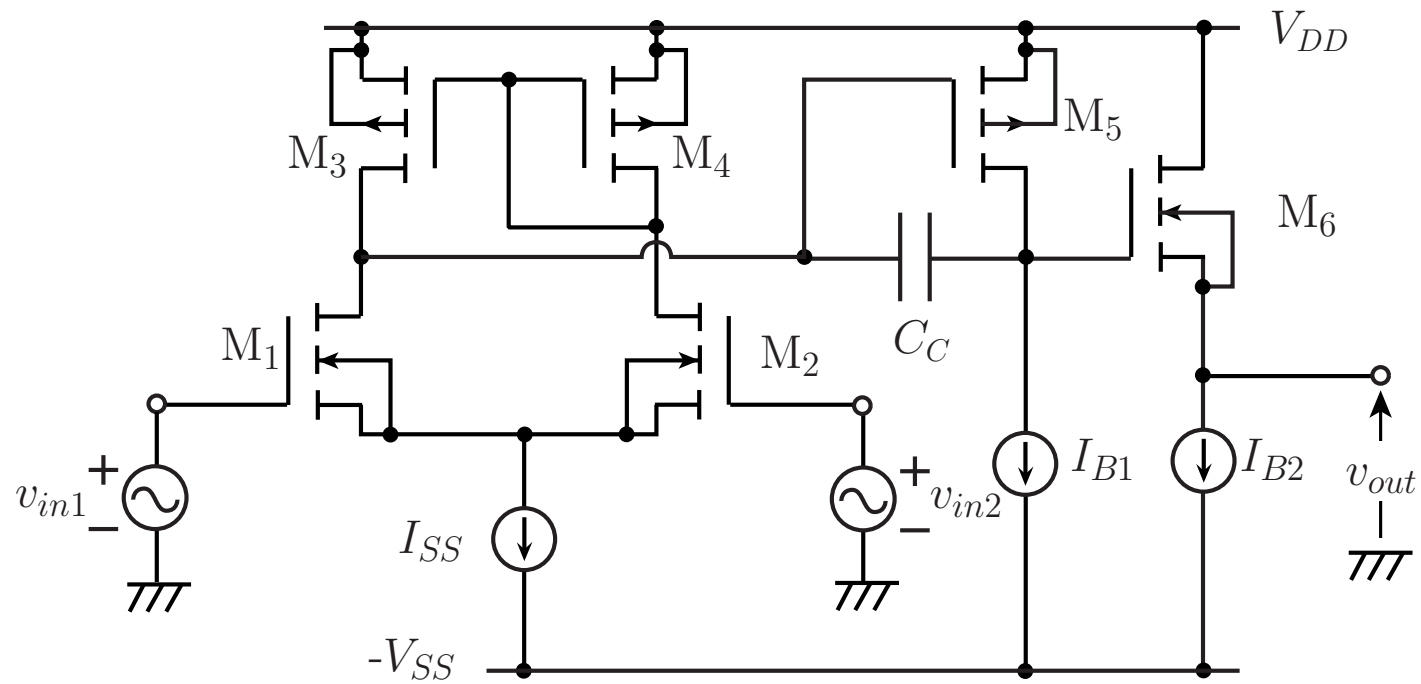
$$SR = \frac{2\alpha_0 I_E}{C_{comp}} = \frac{2kT g_{m-dif}}{q C_{comp}} = \frac{4\pi GB}{q}$$

演算増幅器の構成例

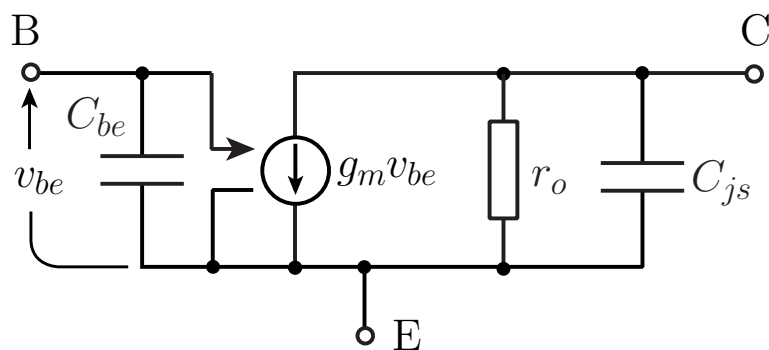
バイポーラトランジスタによる演算増幅器の構成例



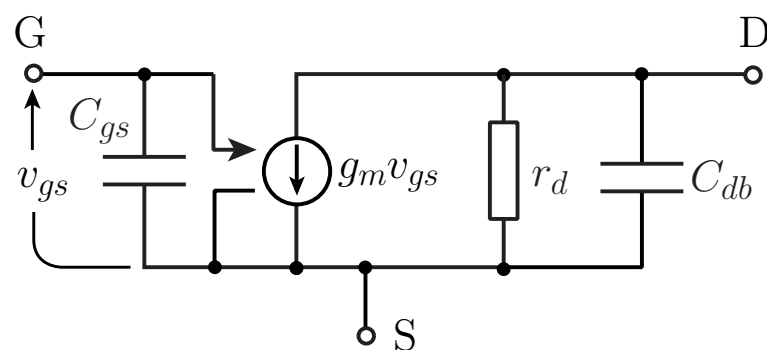
MOSTランジスタによる演算増幅器の構成例



トランジスタのモデル

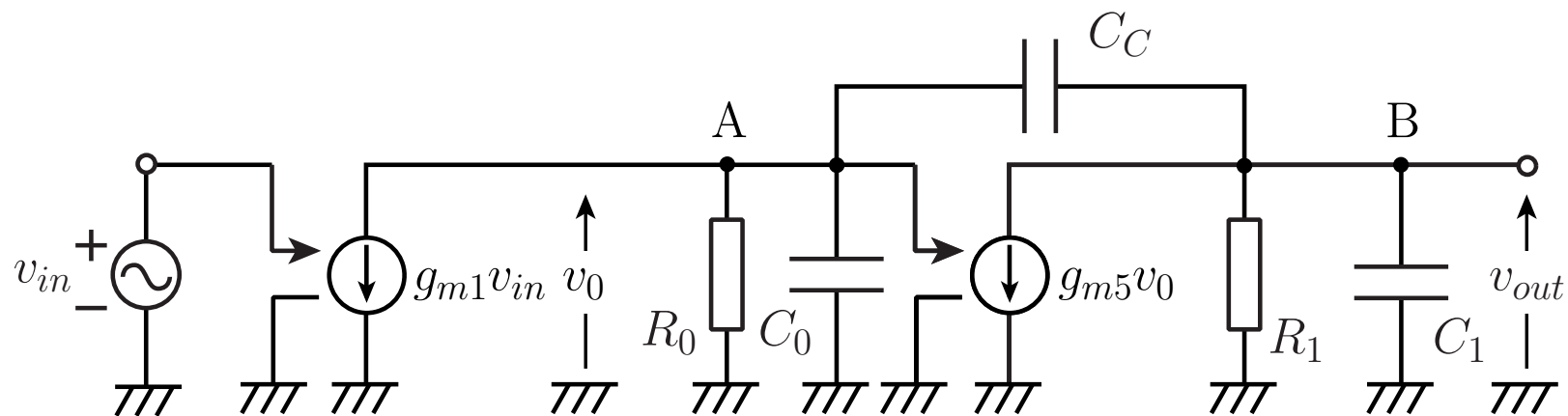
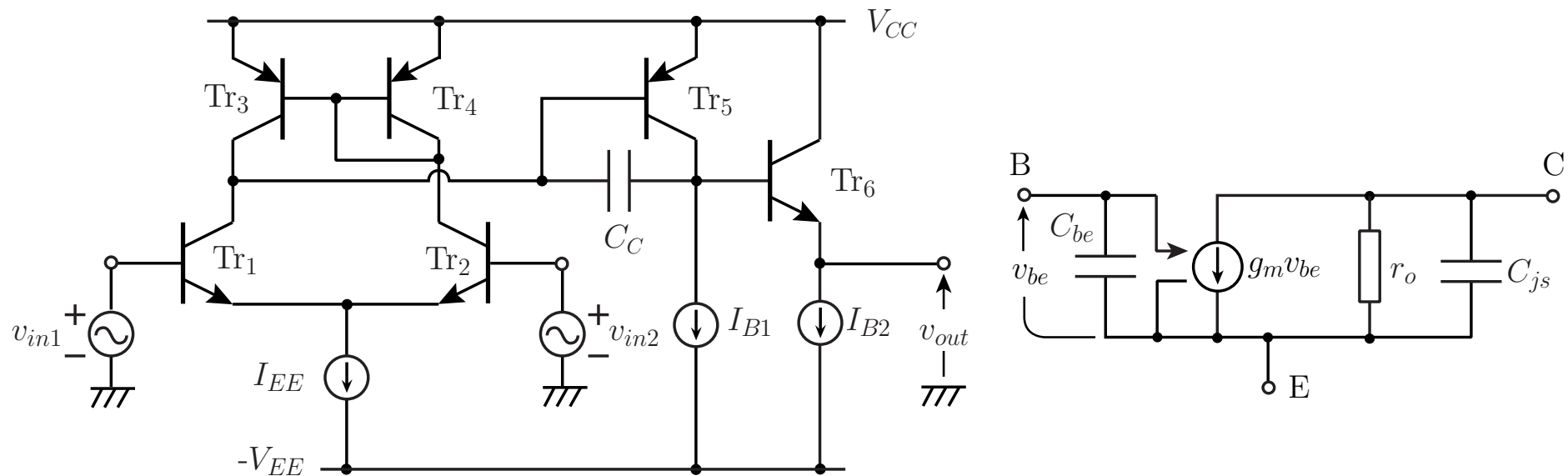


バイポーラトランジスタ

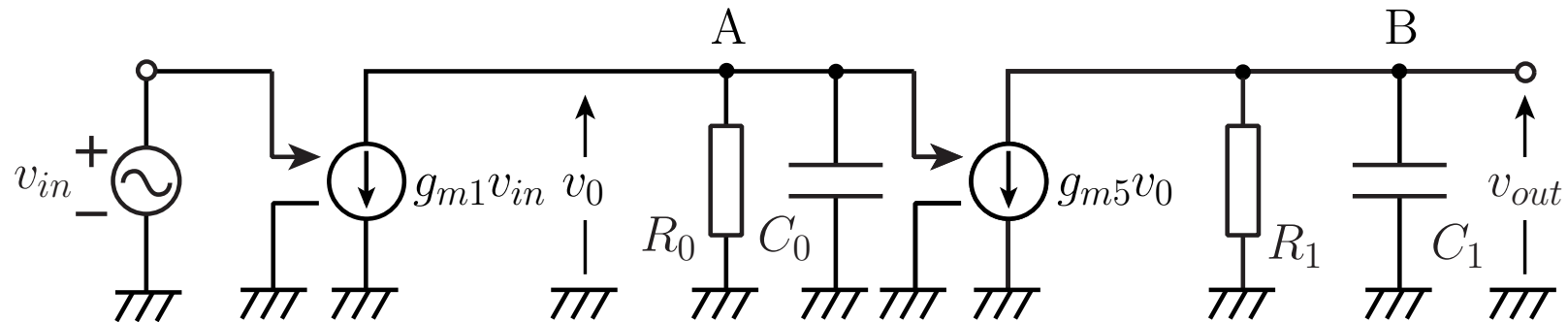


MOSTランジスタ

演算増幅器のモデル



$C_C = 0$ のとき（零時定数解析）

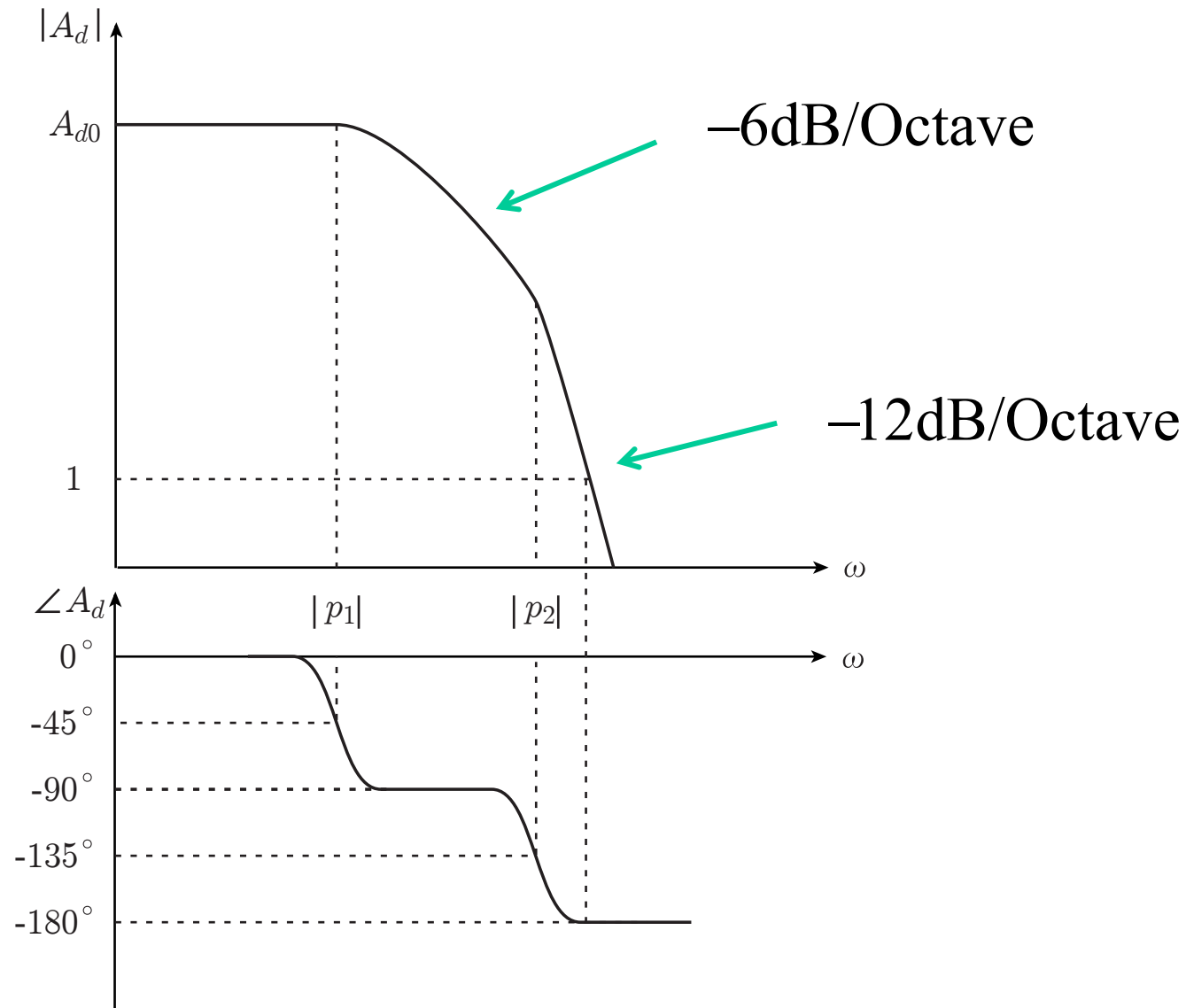


$$\tau_A = C_0 R_0$$

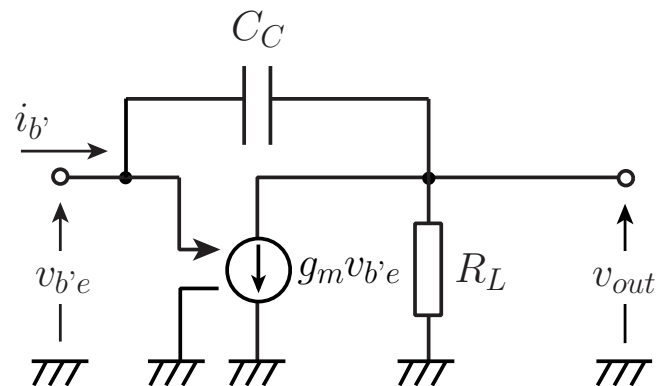
$$\tau_B = C_1 R_1$$

$$A_d = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_{m1} g_{m5} R_0 R_1}{(1 + s C_0 R_0)(1 + s C_1 R_1)}$$

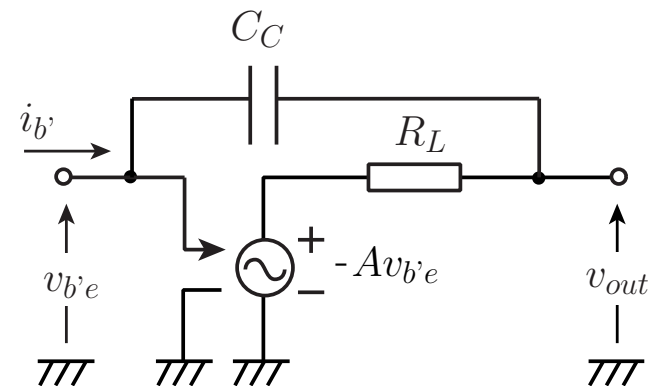
$$A_d = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{g_{m1}g_{m5}R_0R_1}{(1+sC_0R_0)(1+sC_1R_1)}$$



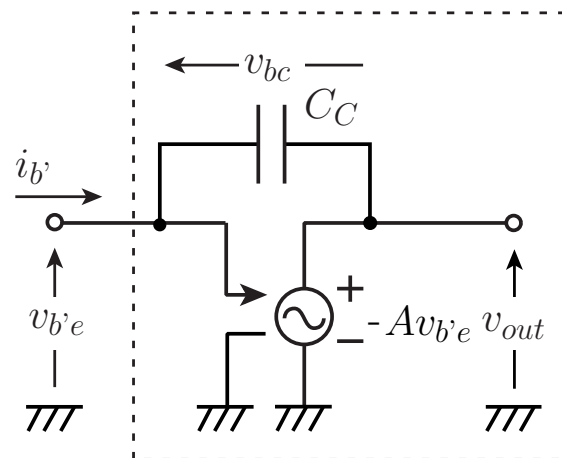
$C_C \neq 0$ のとき（零時定数解析）



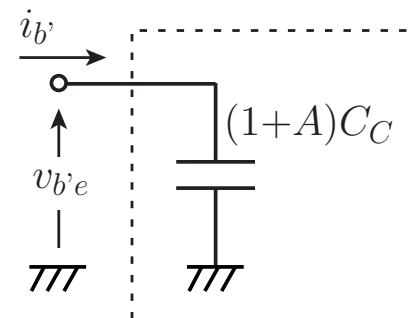
(a)



(b)

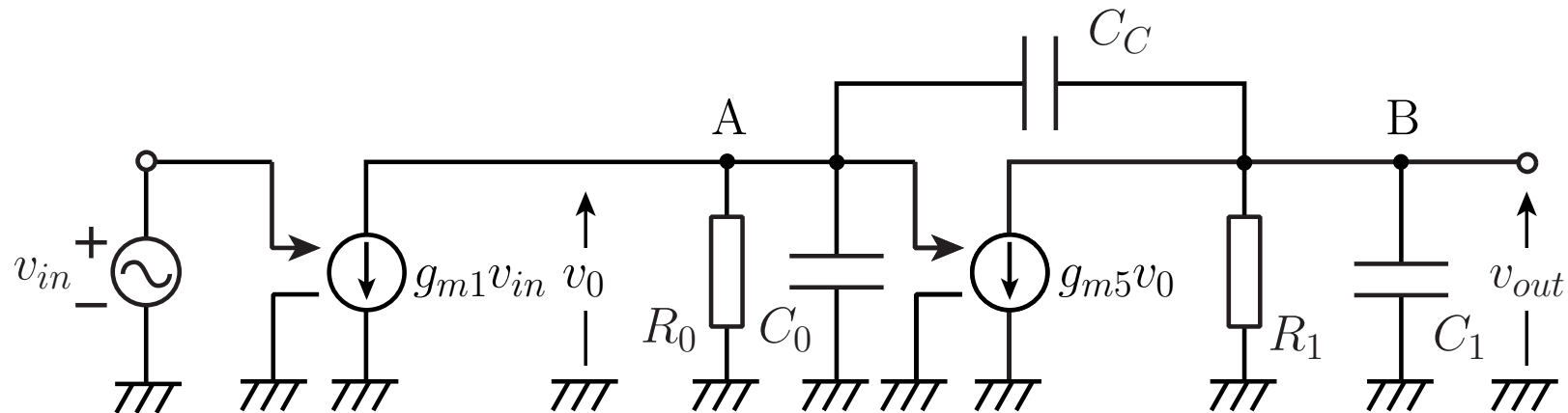


(c)



(d)

$C_C \neq 0$ のとき (零時定数解析)

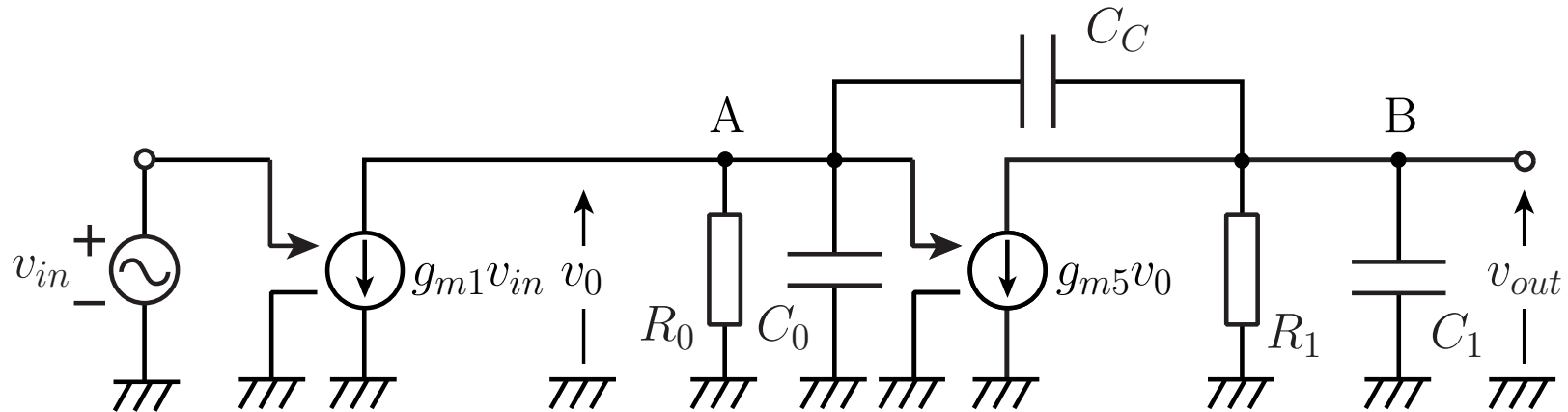


$$\tau_A' = \{C_0 + C_C(1 + g_{m5}R_1)\}R_0$$

$$R_{fb} = \frac{1}{\frac{C_C}{C_0 + C_C} g_{m5}} = \frac{C_0 + C_C}{C_C g_{m5}}$$

$$\tau_B' = \left(C_1 + \frac{C_0 C_C}{C_0 + C_C}\right) \frac{R_1 R_{fb}}{R_1 + R_{fb}}$$

差動利得の解析



$$A_d = \frac{g_{m1}R_0R_1(g_{m5} - sC_C)}{D(s)}$$

$$D(s) = 1 + s\{C_C(R_0 + R_1 + g_{m5}R_0R_1) + C_0R_0 + C_1R_1\} \\ + s^2(C_CC_0 + C_0C_1 + C_1C_C)R_0R_1$$

$$A_d=A_{d0}\frac{1-\frac{s}{z_1}}{(1-\frac{s}{p_1})(1-\frac{s}{p_2})}\approx A_{d0}\frac{1-\frac{s}{z_1}}{1-\frac{s}{p_1}+\frac{s^2}{p_1p_2}}$$

$$A_d=\frac{g_{m1}R_0R_1(g_{m5}-sC_C)}{D_{Ad}(s)}$$

$$D(s)=1+s\{C_C(R_0+R_1+g_{m5}R_0R_1)+C_0R_0+C_1R_1\}+s^2(C_C C_0+C_0C_1+C_1C_C)R_0R_1$$

$$A_d = \frac{g_{m1} R_0 R_1 (g_{m5} - s C_C)}{D_{Ad}(s)}$$

$$D_{Ad}(s) = 1 + s \{ C_C (R_0 + R_1 + g_{m5} R_0 R_1) + C_0 R_0 + C_1 R_1 \} \\ + s^2 (C_C C_0 + C_0 C_1 + C_1 C_C) R_0 R_1$$

$$A_{d0} = g_{m1} R_0 R_1 g_{m5}$$

$$z_1 = \frac{g_{m5}}{C_C}$$

$$p_1 = \frac{-1}{C_C (R_0 + R_1 + g_{m5} R_0 R_1) + C_0 R_0 + C_1 R_1}$$

$$p_2 = \frac{-\{ C_C (R_0 + R_1 + g_{m5} R_0 R_1) + C_0 R_0 + C_1 R_1 \}}{(C_C C_0 + C_0 C_1 + C_1 C_C) R_0 R_1}$$

零時定数と極の比較

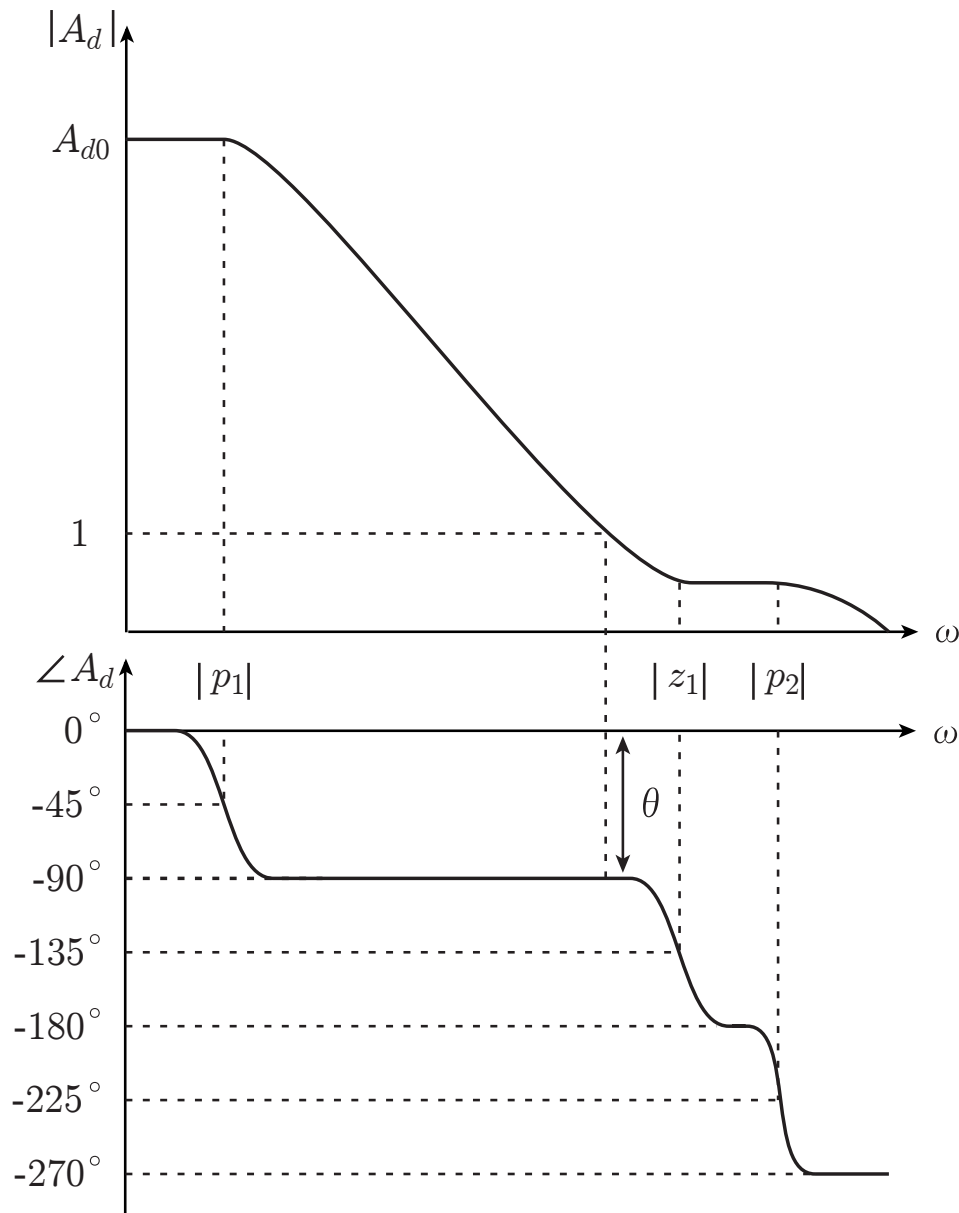
$$p_1 = \frac{-1}{C_C(R_0 + R_1 + g_{m5}R_0R_1) + C_0R_0 + C_1R_1} \approx \frac{-1}{C_C g_{m5}R_0R_1}$$

$$\tau_A' = \{C_0 + C_C(1 + g_{m5}R_1)\}R_0 \approx C_C g_{m5}R_0R_1$$

$$p_2 = \frac{-\{C_C(R_0 + R_1 + g_{m5}R_0R_1) + C_0R_0 + C_1R_1\}}{(C_C C_0 + C_0 C_1 + C_1 C_C)R_0R_1} \approx \frac{-g_{m5}}{C_0 + C_1}$$

$$\begin{aligned} \tau_B' &= \left(C_1 + \frac{C_0 C_C}{C_0 + C_C}\right) \frac{R_1 R_{fb}}{R_1 + R_{fb}} \\ &\approx \left(C_1 + \frac{C_0 C_C}{C_0 + C_C}\right) R_{fb} = \left(\frac{C_1 C_0 + C_1 C_C + C_0 C_C}{C_0 + C_C}\right) \frac{C_0 + C_C}{C_C g_{m5}} \\ &\approx \frac{C_1 + C_0}{g_{m5}} \end{aligned}$$

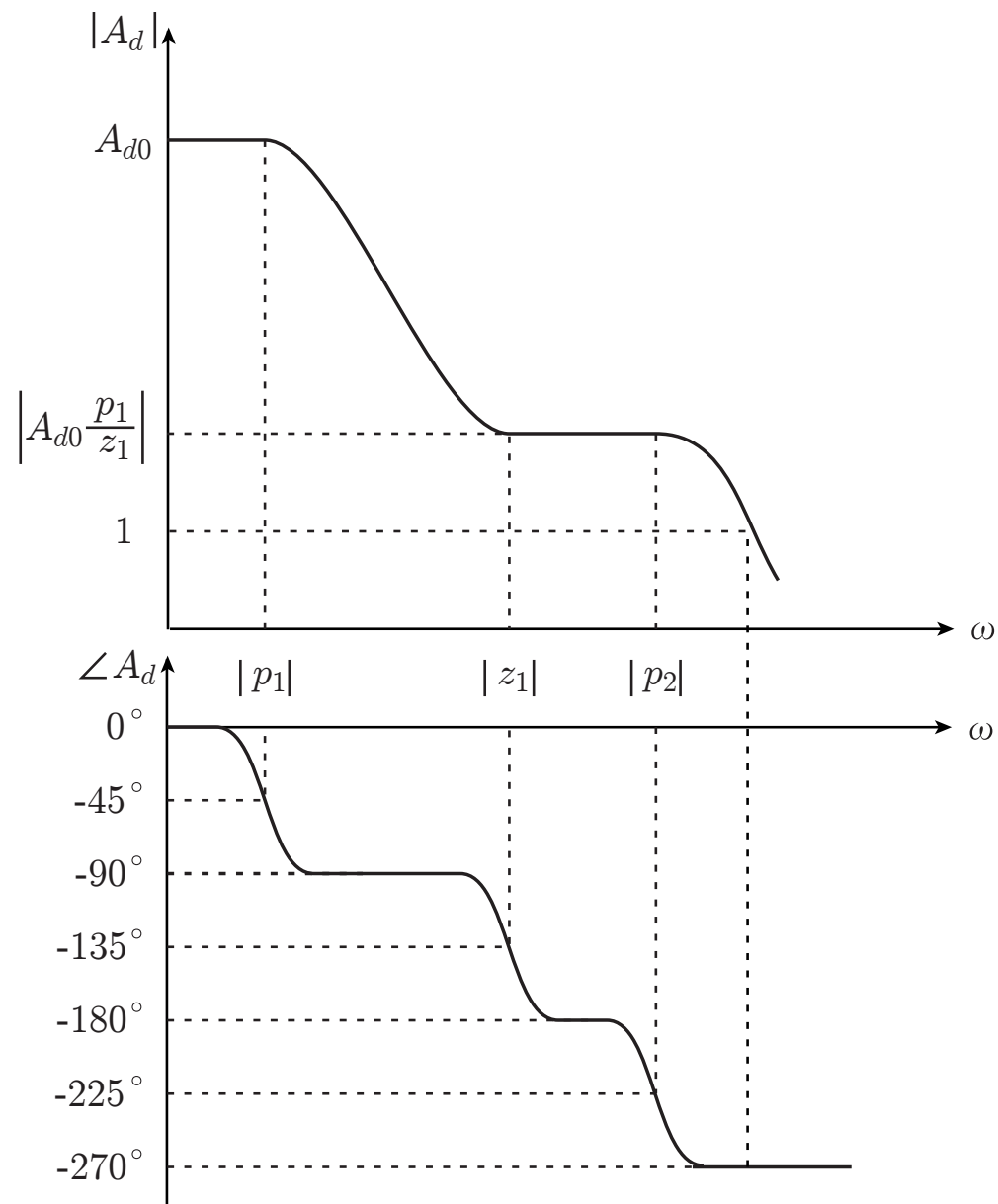
$$A_{d0} = g_{m1} R_0 R_1 g_{m5} \quad z_1 = \frac{g_{m5}}{C_C} \quad p_1 \approx \frac{-1}{C_C g_{m5} R_0 R_1} \quad p_2 \approx \frac{-g_{m5}}{C_0 + C_1}$$



g_m が十分大

θ : 位相余裕

MOS トランジスタの $g_m \ll$ バイポーラトランジスタの g_m



対策

$$A_d = \frac{g_{m1} R_0 R_1 (g_{m5} - s C_C)}{D_{Ad}(s)}$$



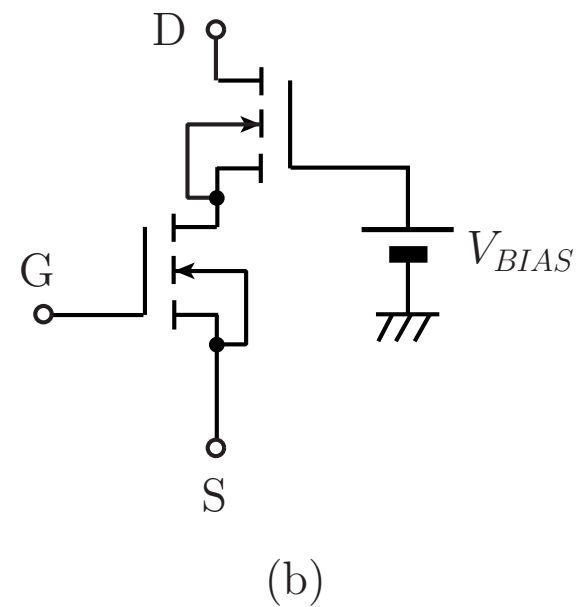
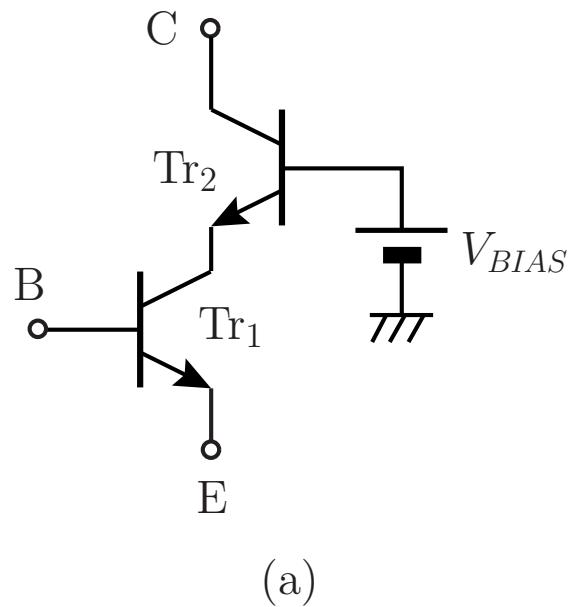
$$A_d = \frac{g_{m1} R_0 R_1 (g_{m5} - \frac{s C_C}{1 + s C_C R_C})}{D_{Ad}'(s)}$$

$$z_1 = \frac{g_{m5}}{C_C (1 - g_{m5} R_C)}$$

$$R_C = \frac{1}{g_{m5}} \Rightarrow z_1 = \infty$$

$$R_C = \frac{1}{g_{m5}} - \frac{1}{C_C p_2} \Rightarrow z_1 = p_2$$

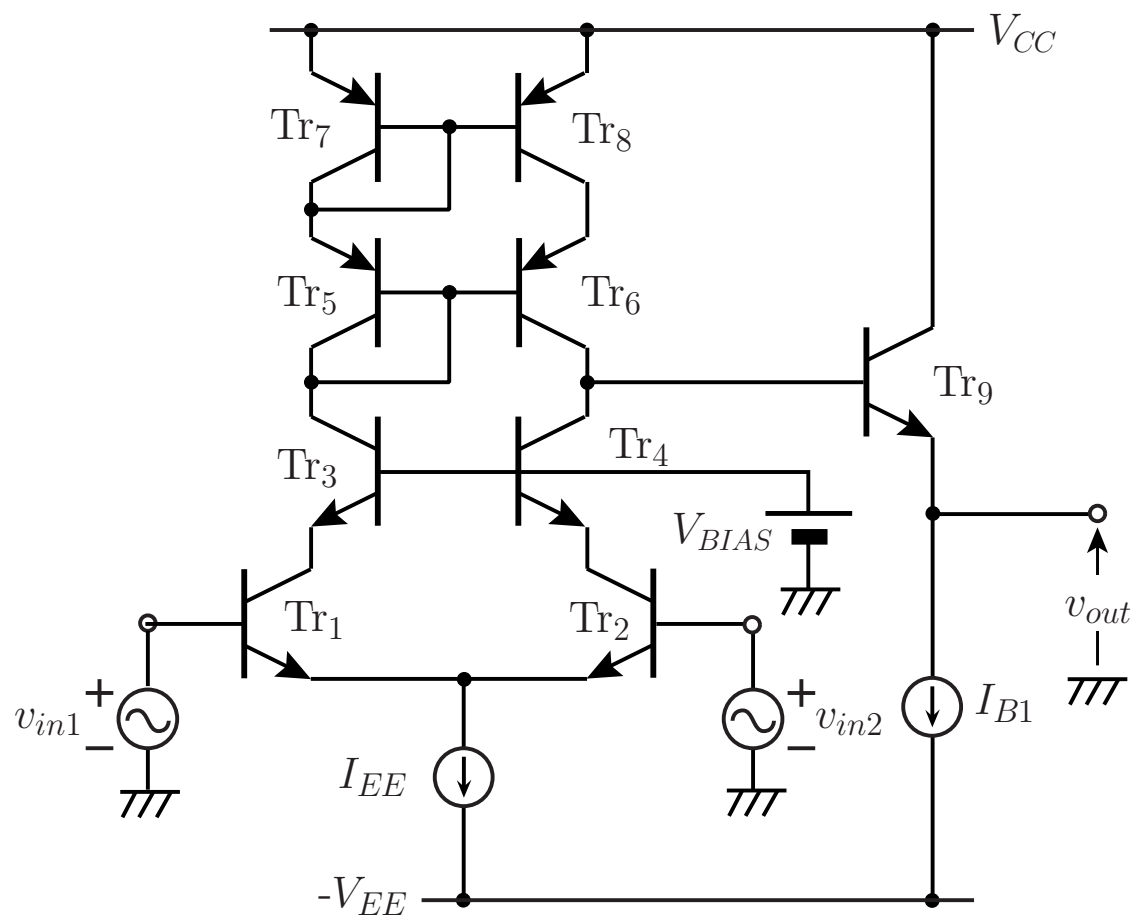
カスコード型演算増幅器



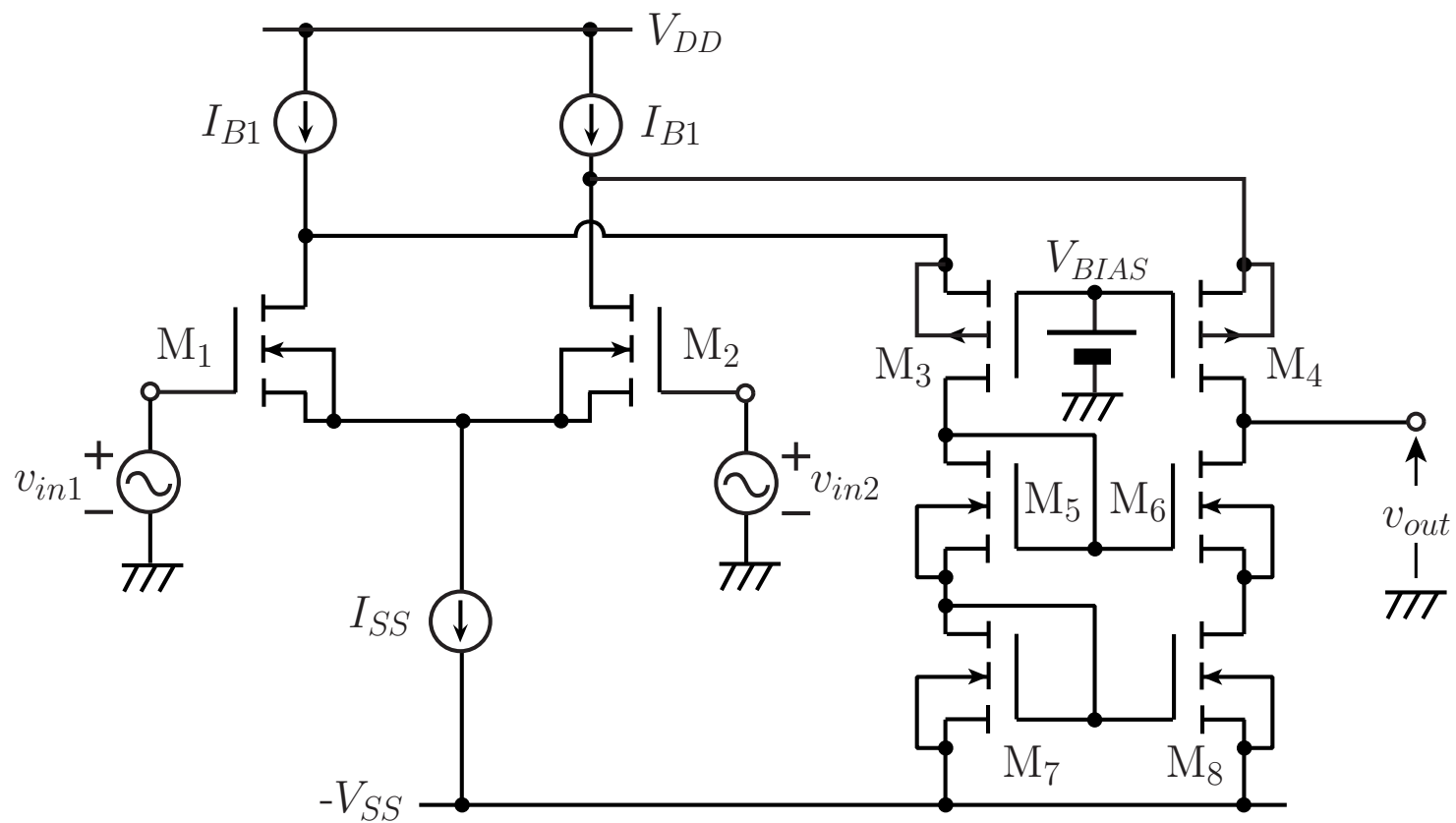
カスコード接続

出力抵抗の増加

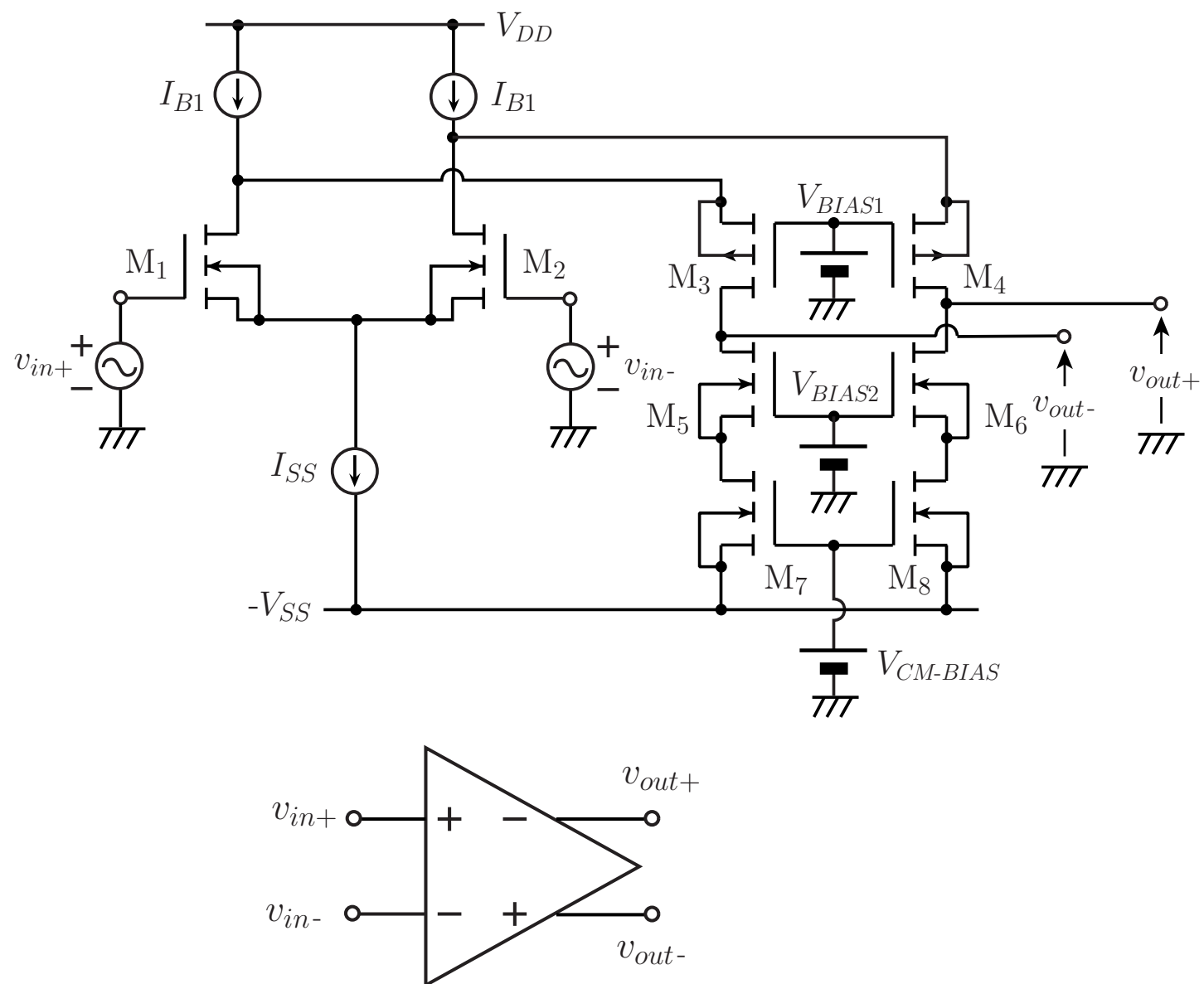
バイポーラトランジスタを用いたカスコード型演算増幅器



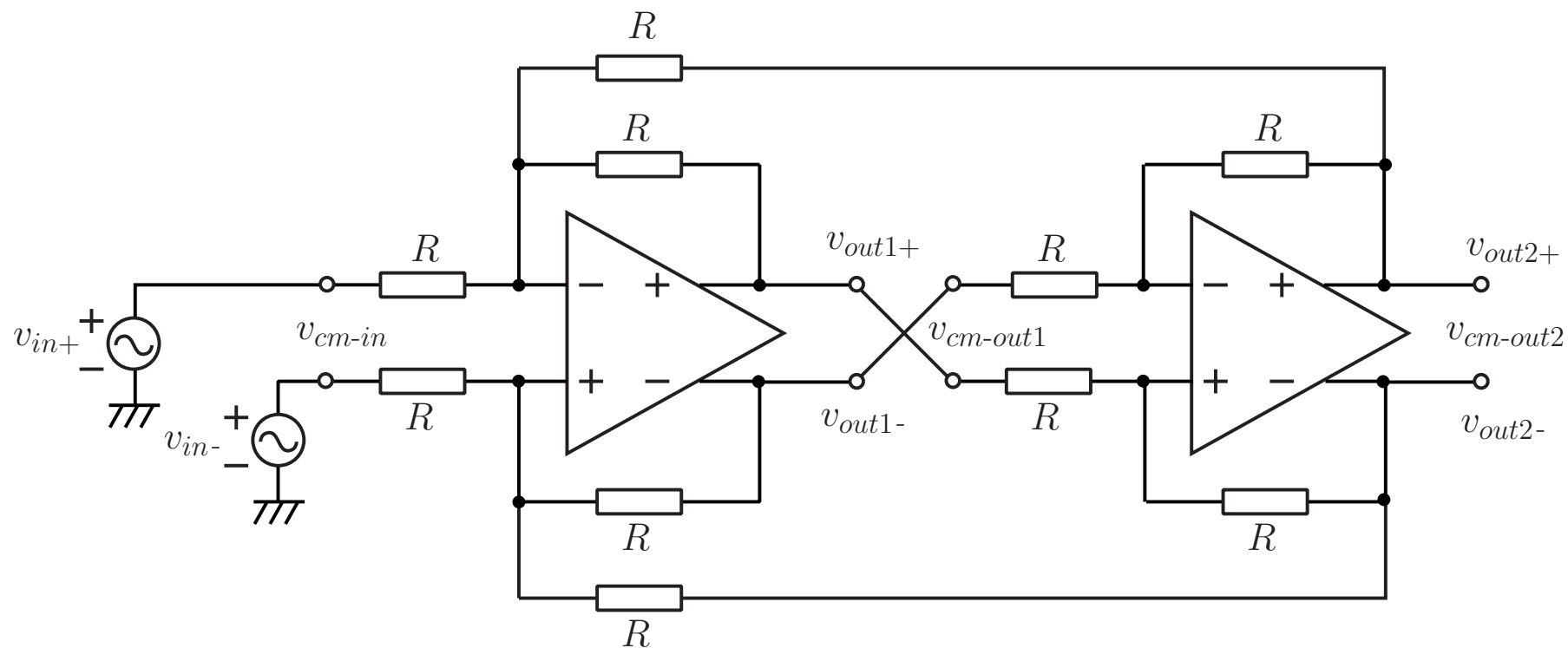
MOSTランジスタを用いたカスコード型演算増幅器



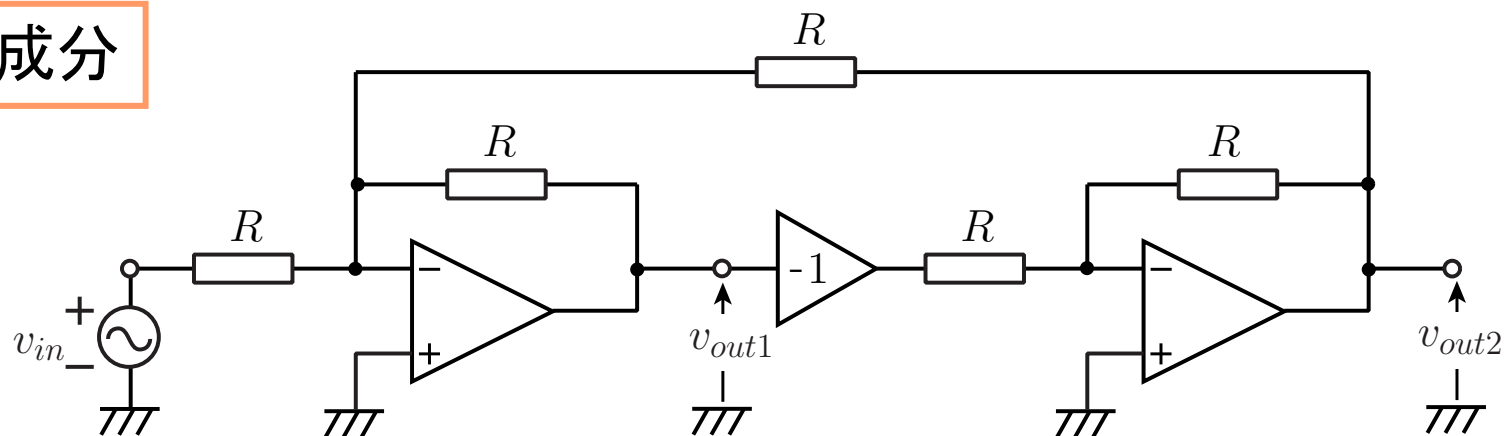
平衡型演算增幅器

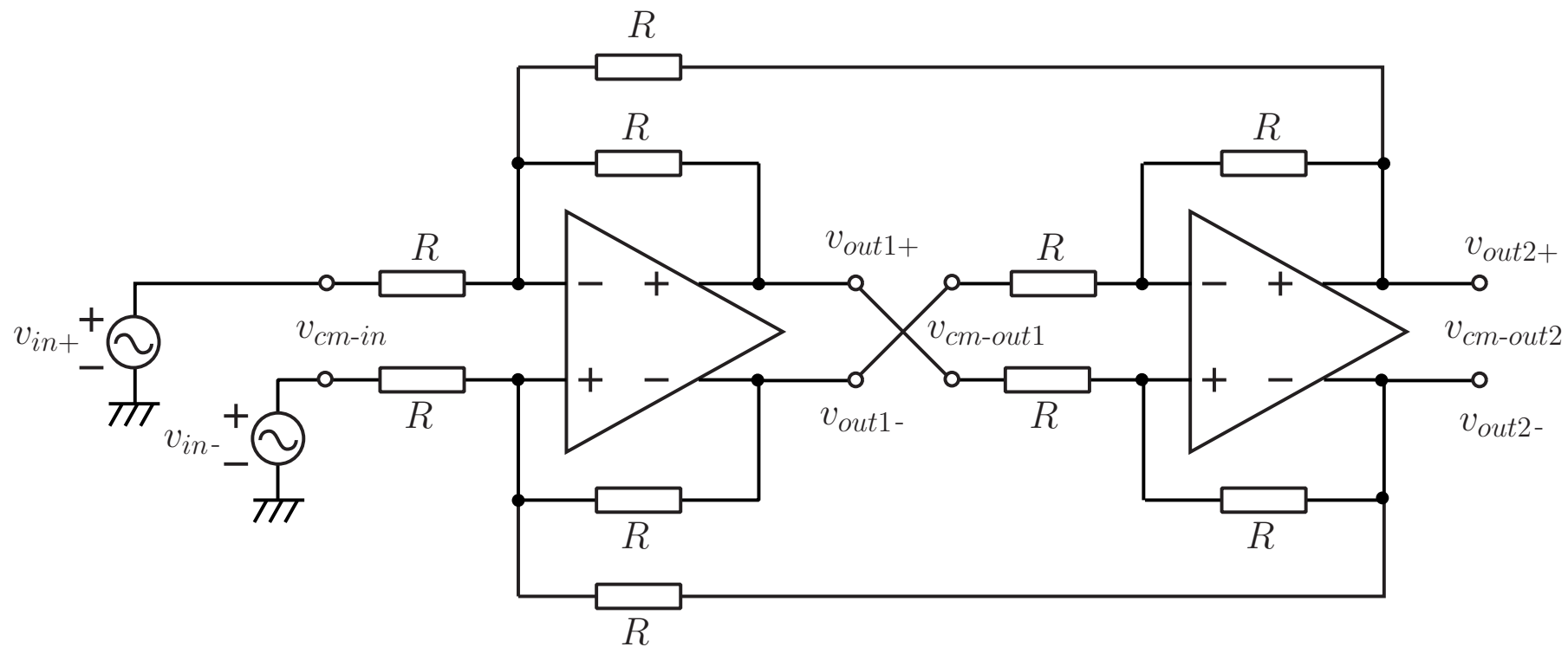


平衡型回路における同相帰還

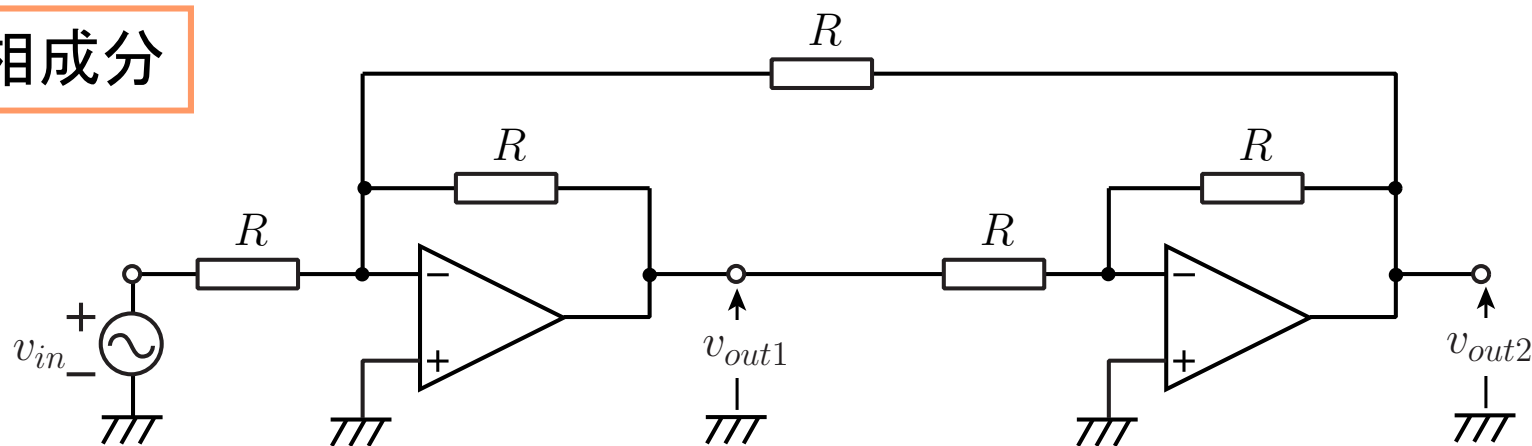


差動成分

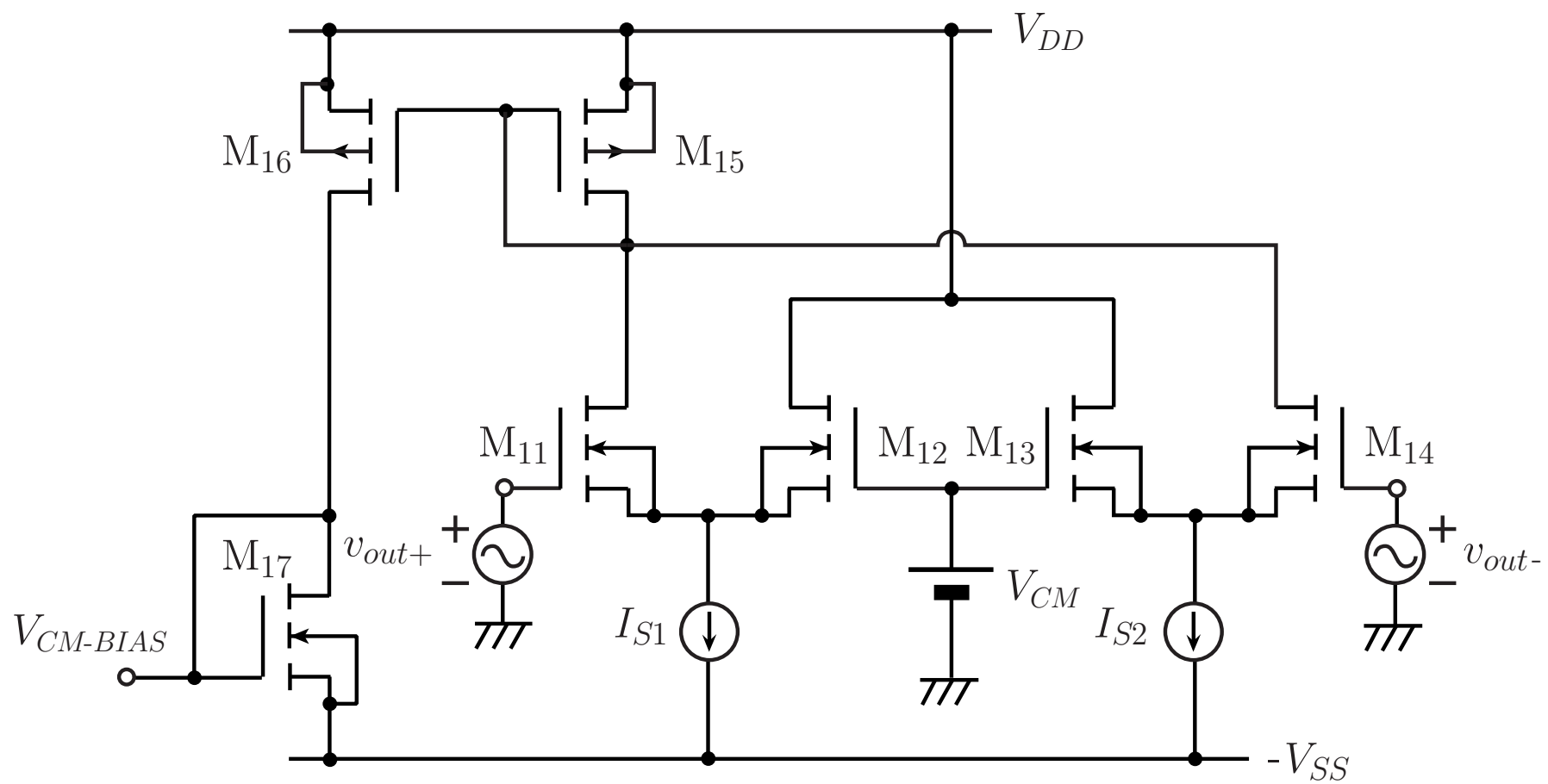




同相成分



バイアスの安定化



平衡型演算增幅器(全回路)

