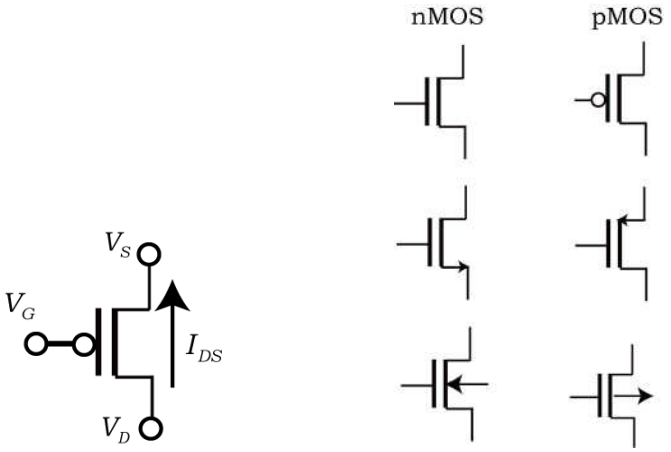
第 11 回講義メモ

今回はまず p-MOSFET の説明を行い、そのあと差動増幅器についての説明を行う。

まず p-MOSFET である。 p -MOSFET は nMOSFET の電源の正負だけをひっくり返して動作すると考えればよく、ディジタル回路の講義や電子デバイスの講義で習っているはずであるが、アナログ回路で何に使えるかと言えば、例えばカレントミラーの電流源をアース側ではなく電源側に入れたり、出力と電源側の間にあらたな負荷回路を作ったりするときに役に立つ。



通常 $I_{DS}<0$、$V_{GS}<0$、$V_{DS}<0$、$V_{eff}=V_{GS}-V_{th}<0$、$V_{th}<0$、$V_A<0$ であり、電流、電圧は全て負の値をとるが、

$g_m>0$、$g_{ds}>0$ であり、抵抗、コンダクタンスは正の値のままである。

$V_{GS}<V_{th}$ で電流が流れ、

$V_{DS}<V_{GS}-V_{th}$ の時は飽和状態で $I_{DS}=-\dfrac{W}{2L}\mu C_{OX}(V_{GS}-V_{th})^2(1+\dfrac{V_{DS}}{V_A})$ となり、

$V_{DS}>V_{GS}-V_{th}$ の時は線形状態で $I_{DS}=-\dfrac{W}{L}\mu C_{OX}\{(V_{GS}-V_{th})V_{DS}-\dfrac{V_{DS}{}^2}{2}\}$ となる。

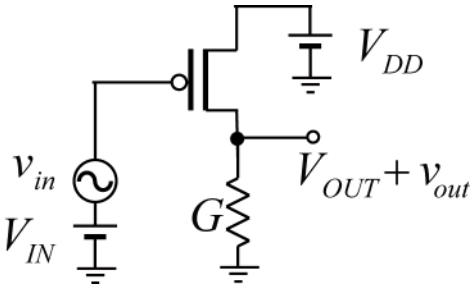
$|V_{DS}|$ や $|V_{GS}|$ が増えれば $|I_{DS}|$ が増えるのは同じ。

$$g_m=\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}=-\frac{W}{L}\mu C_{OX}(V_{GS}-V_{th})(1+\frac{V_{DS}}{V_A})=\frac{2I_{DS}}{V_{eff}}$$ （nMOS と同じ）

$$g_{ds}=\frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{DS}}=-\frac{W}{2L}\mu C_{OX}(V_{GS}-V_{th})^2\frac{1}{V_A}=\frac{I_{DS}}{V_A+V_{DS}}\simeq\frac{I_{DS}}{V_A}$$ （nMOS と同じ）

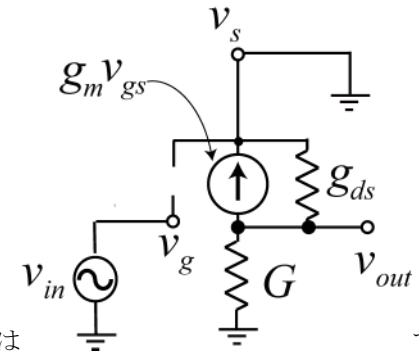
例題 1　PMOS ソース接地回路

$A_V=\dfrac{v_{out}}{v_{in}}$ を求めよう。

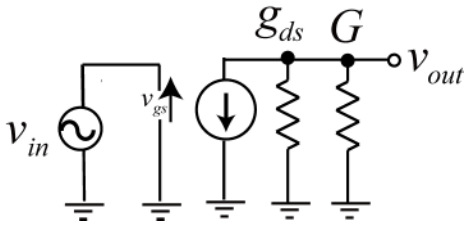


$$A_V = \frac{v_{out}}{v_{in}}$$

小信号回路は



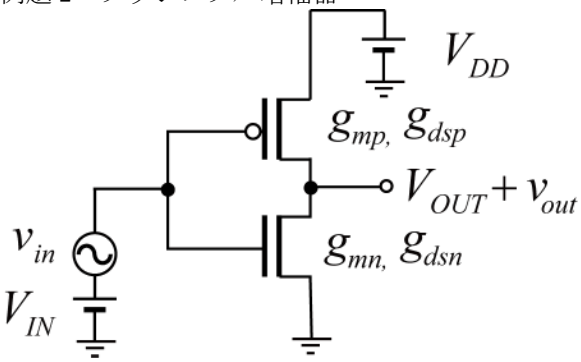
で、書き直すと



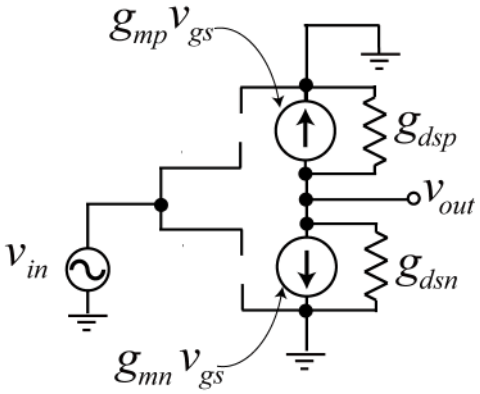
になる。小信号回路は電源 V_{DD} を接地とするので、全く nMOS の時と変わらない。

答えは $g_m v_{in} + (g_{ds} + G) v_{out} = 0$　　$A_V = -\dfrac{g_m}{g_{ds} + G}$

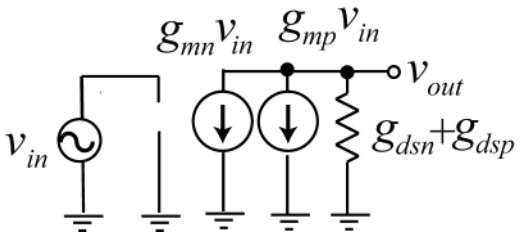
例題２　プッシュプル増幅器



小信号回路は、



で、

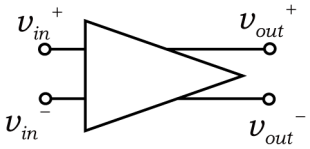


となる。

$$A_V = -\frac{g_{mn} + g_{mp}}{g_{dsn} + g_{dsp}}$$

差動増幅回路

二つの入力を持ち、その電圧差を増幅する。



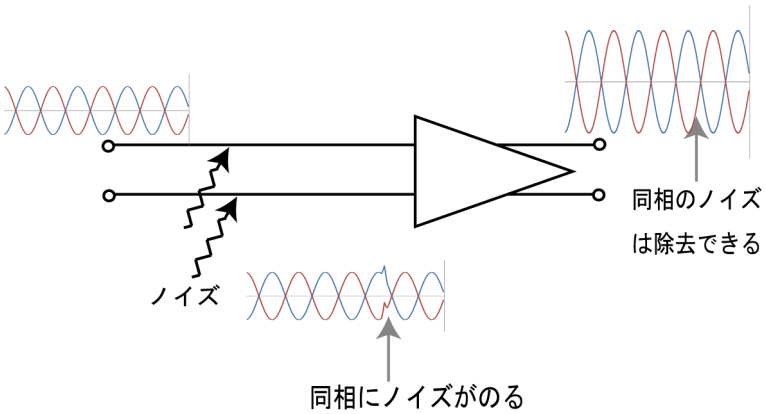
差動利得　$A_d = \dfrac{v_{out}^{+} - v_{out}^{-}}{v_{in}^{+} - v_{in}^{-}}$　大きい方が良い

同相利得　$A_c = \dfrac{v_{out}^{+} + v_{out}^{-}}{v_{in}^{+} + v_{in}^{-}}$　小さい方が良い

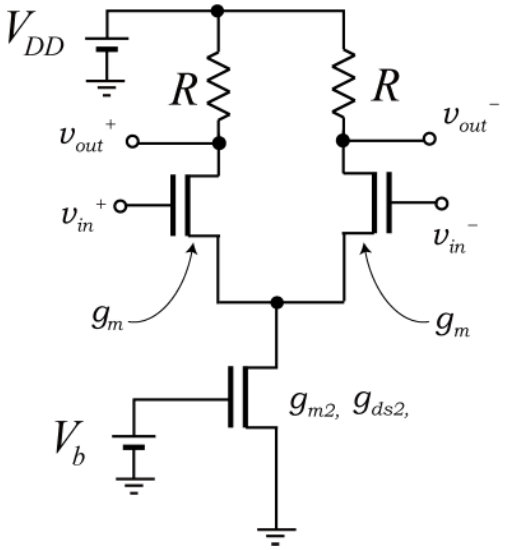
同相除去比（Common-mode rejection ratio ）$CMRR = \dfrac{A_d}{A_c}$

利点

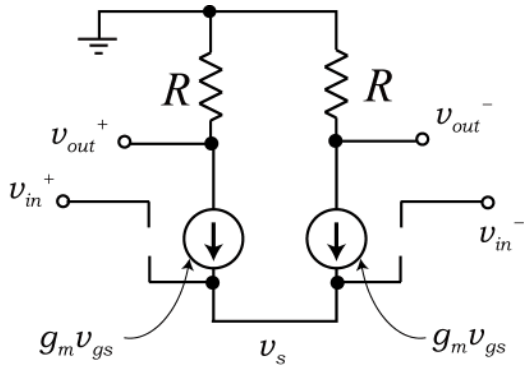
・帰還（次回行う）と組み合わせると正確な利得が得られる。
・信号線や電源線にノイズがのっても影響を受けにくい



例題 3



差動増幅回路は、通常電流源が下にあり、それを二つのトランジスタがとりあうという考え方をする。



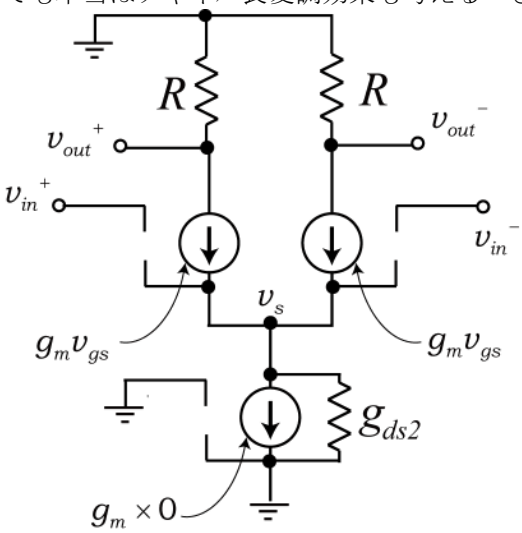
小信号成分では、電流源は直流なので、開放になる。

真ん中の電位をv_sとして、$v_{out}^{+} = -Rg_m(v_{in}^{+} - v_s)$　$v_{out}^{-} = -Rg_m(v_{in}^{-} - v_s)$

$g_m(v_{in}^{+} - v_s) + g_m(v_{in}^{-} - v_s) = 0$　ここから$v_{out}^{+} + v_{out}^{-} = 0$　$A_c = 0$

$$A_d = \frac{v_{out}^{+} - v_{out}^{-}}{v_{in}^{+} - v_{in}^{-}} = \frac{-Rg_m(v_{in}^{+} - v_s) + Rg_m(v_{in}^{-} - v_s)}{v_{in}^{+} - v_{in}^{-}} = -Rg_m$$

でも本当はチャネル長変調効果も考えるべき。



$v_{out}^{+} = -Rg_m(v_{in}^{+} - v_s)$

$v_{out}^{-} = -Rg_m(v_{in}^{-} - v_s)$

$g_m(v_{in}^{+} - v_s) + g_m(v_{in}^{-} - v_s) = g_{ds2} v_s$

$$\rightarrow \quad g_m(v_{in}^{+} + v_{in}^{-}) = (2g_m + g_{ds2})v_s \quad v_s = g_m \frac{v_{in}^{+} + v_{in}^{-}}{2g_m + g_{ds2}}$$

上の二つを引き算すれば、$A_d = \dfrac{v_{out}^{+} - v_{out}^{-}}{v_{in}^{+} - v_{in}^{-}} = -Rg_m$　差動は一緒

上の二つを足し算して、$v_s = g_m \dfrac{v_{in}^{+} + v_{in}^{-}}{2g_m + g_{ds2}}$を代入

$$v_{out}^{+}+v_{out}^{-}=-Rg_m(v_{in}^{+}+v_{in}^{-}-2v_s)=Rg_m(-1+\frac{2g_m}{2g_m+g_{ds2}})(v_{in}^{+}+v_{in}^{-})$$

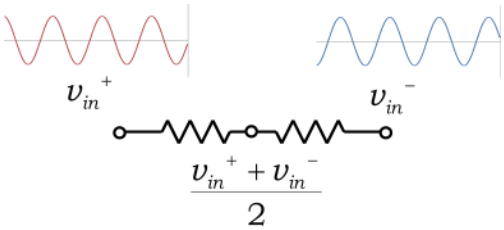
すれば

$$=Rg_m(\frac{-g_{ds2}}{2g_m+g_{ds2}})(v_{in}^{+}+v_{in}^{-})\simeq\frac{-Rg_{ds2}}{2}(v_{in}^{+}+v_{in}^{-})$$

$A_c=\dfrac{v_{out}^{+}+v_{out}^{-}}{v_{in}^{+}+v_{in}^{-}}\simeq\dfrac{-Rg_{ds2}}{2}$ となる。

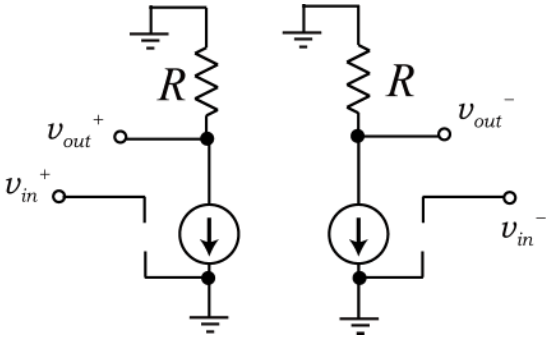
$$CMRR\simeq\frac{2}{-Rg_{ds2}}(-Rg_m)=\frac{2g_m}{g_{ds2}}$$

別解



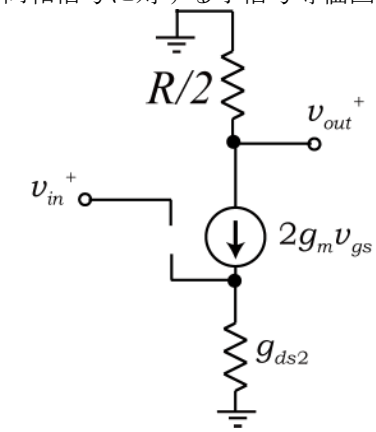
v_{in}^{+} と v_{in}^{-} が完全な差動信号（$v_{in}^{+}=-v_{in}^{-}$）のとき、対称な回路の中点の電位は変化しない。
→小信号的には $v=0$　これを仮想接地と呼ぶ。

差動信号に対する小信号等価回路



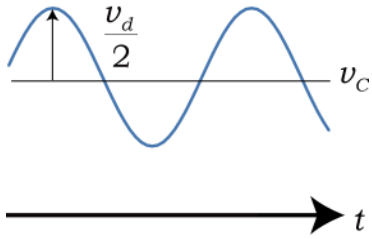
$$\frac{v_{out}^{+}}{v_{in}^{+}}=\frac{v_{out}^{-}}{v_{in}^{-}}=-Rg_m \qquad A_d=\frac{v_{out}^{+}-v_{out}^{-}}{v_{in}^{+}-v_{in}^{-}}=-Rg_m$$

同相信号に対する小信号等価回路



ソースディジェネレーション付きソース接地 $A_V = \dfrac{-Rg_m}{1+g_m R_s}$ と同じ

$$A_c = \frac{-Rg_m}{1+\dfrac{2g_m}{g_{ds2}}} = \frac{-Rg_m g_{mds2}}{g_{ds2}+2g_m}$$

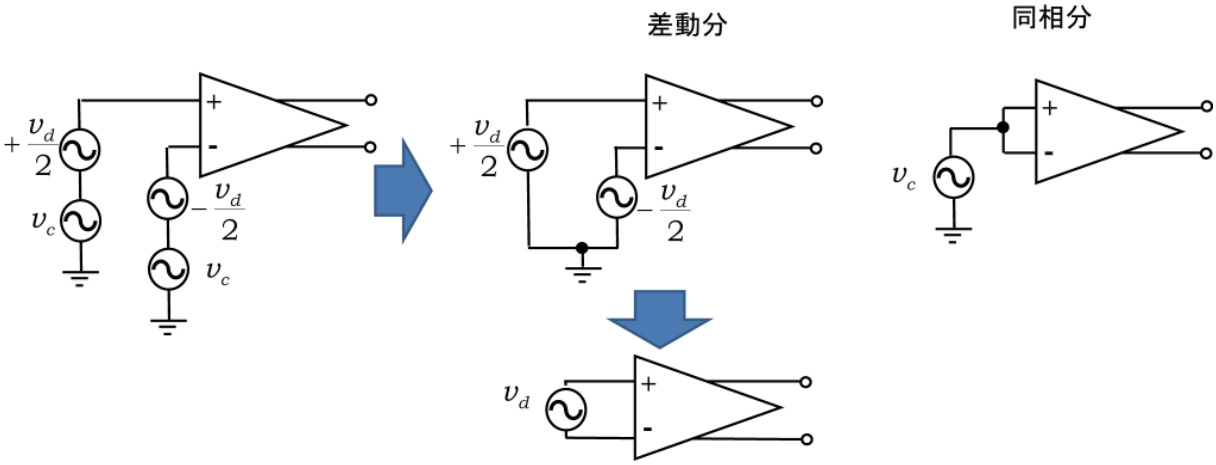


また $v_{in}{}^{+} - v_{in}{}^{-} = v_d$ （差動成分） $\dfrac{v_{in}{}^{+} + v_{in}{}^{-}}{2} = v_c$ （同相成分）

とすると

$v_{in}{}^{+} = \dfrac{v_d}{2} + v_c$ $v_{in}{}^{-} = -\dfrac{v_d}{2} + v_c$ となる。

つまり



同様に

$v_{out}{}^{+} - v_{out}{}^{-} = A_d\left(v_{in}{}^{+} - v_{in}{}^{-}\right)$ $v_{out}{}^{+} + v_{out}{}^{-} = A_c\left(v_{in}{}^{+} + v_{in}{}^{-}\right)$

なので、

$$v_{out}{}^{+} = \frac{1}{2}A_d\left(v_{in}{}^{+} - v_{in}{}^{-}\right) + \frac{1}{2}A_c\left(v_{in}{}^{+} + v_{in}{}^{-}\right) = \frac{1}{2}A_d v_d + A_c v_c$$

$$v_{out}{}^{-} = -\frac{1}{2}A_d\left(v_{in}{}^{+} - v_{in}{}^{-}\right) + \frac{1}{2}A_c\left(v_{in}{}^{+} + v_{in}{}^{-}\right) = -\frac{1}{2}A_d v_d + A_c v_c$$