7.集積回路設計

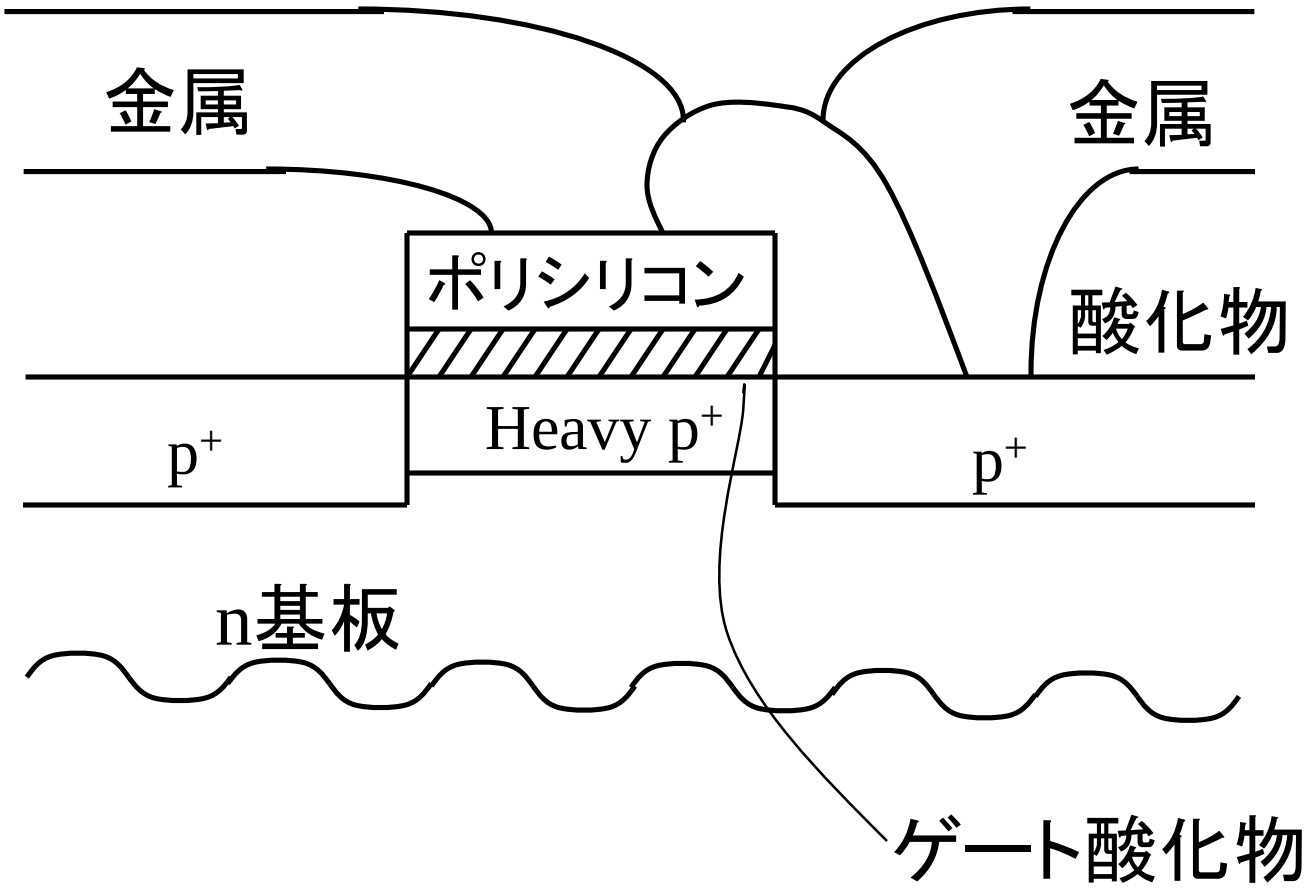
個別部品回路との違い

- 素子値の絶対精度が低い
- 同種の素子の相対精度は高い
- 大C、大L、大Rは作れない

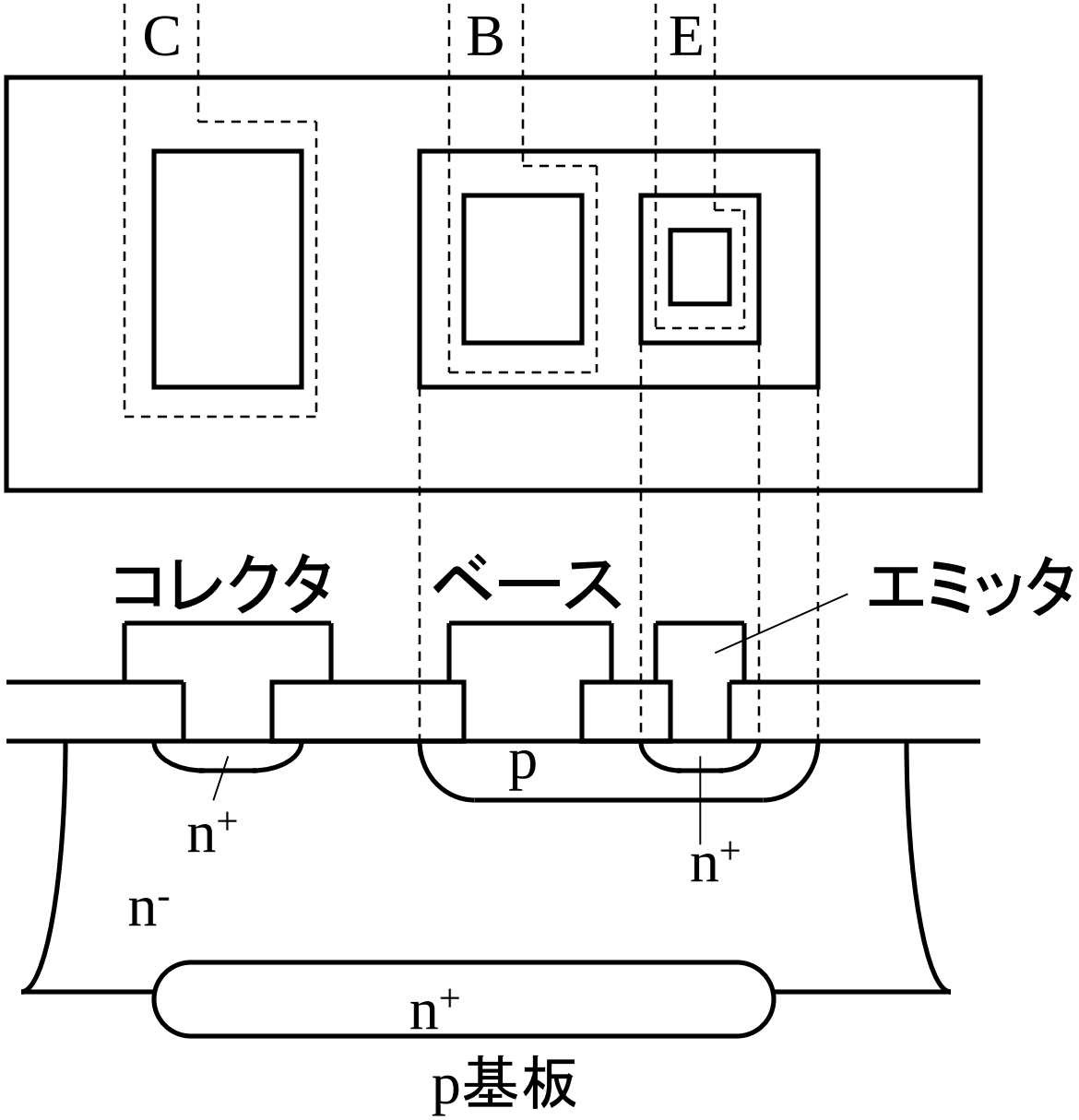
抵抗

- シリコンに、拡散またはイオン打ち込みで不純物をドーピングする
- 抵抗値の精度は
- 相対誤差は

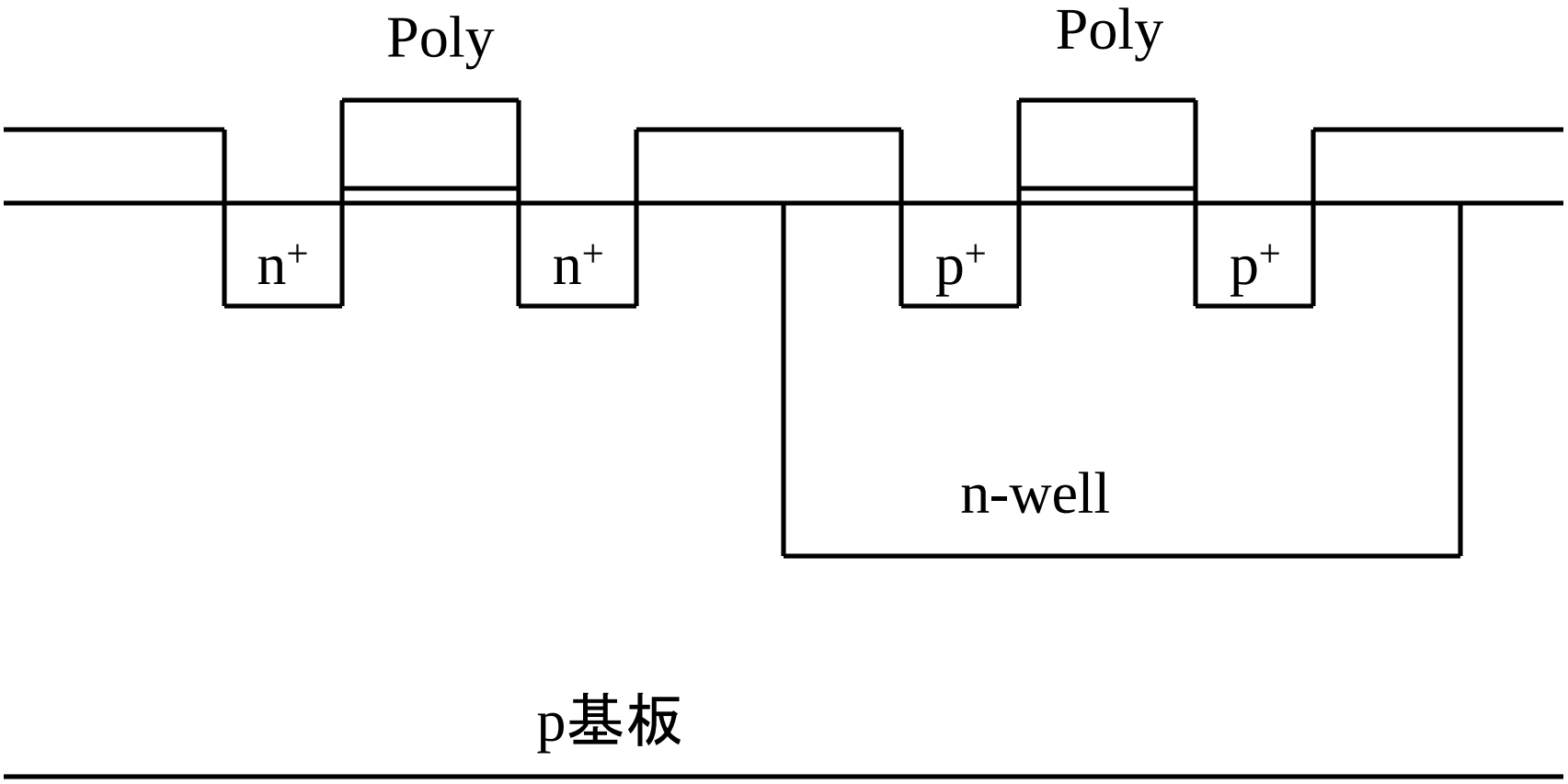
キャパシタ



BJT



MOS



サイズの差

- 最近のVLSIチップは1億個ものMOSデバイスを集積
- 個別部品で同じ回路を作ると十万倍～百万倍のサイズ
- 集積回路の制約
  - コア制約　　チップ内のスペースに作れる回路
  - パッド制約　外部と接続のためのボンディングパッド
    通常チップの周辺にあり大きい
  - ピン制約　　ピン数

コストの差

- 1973年ミニコンピュータ　SSI 2MHz,メモリ8kB　300万円
- 現在のプログラム電卓程度？　数千円

- 大量の素子を同時に作る
- 大量のチップを容易に作る

http://museum.ipsj.or.jp/heritage/okitac_4300.html
OKITAC-4300は日本の初期のミニコンピュータの1つで，1969年に開発され販売が開始された．全面的にIC化され，ステレオアンプ並みの筐体に中央処理装置と磁気コア記憶装置がコンパクトに収容され，記憶装置はユニット方式で32キロ語まで増設可能であった．演算速度は毎秒26万回という中型コンピュータ並みの高速性能が実現された．

素子の差

集積回路では

- 大抵抗（ $50k\Omega$以上）は作りにくい
- 大C（$100pF$以上）は作りにくい
- Lは作りにくい（せいぜい数nH）
- CRより　　のほうが小さい

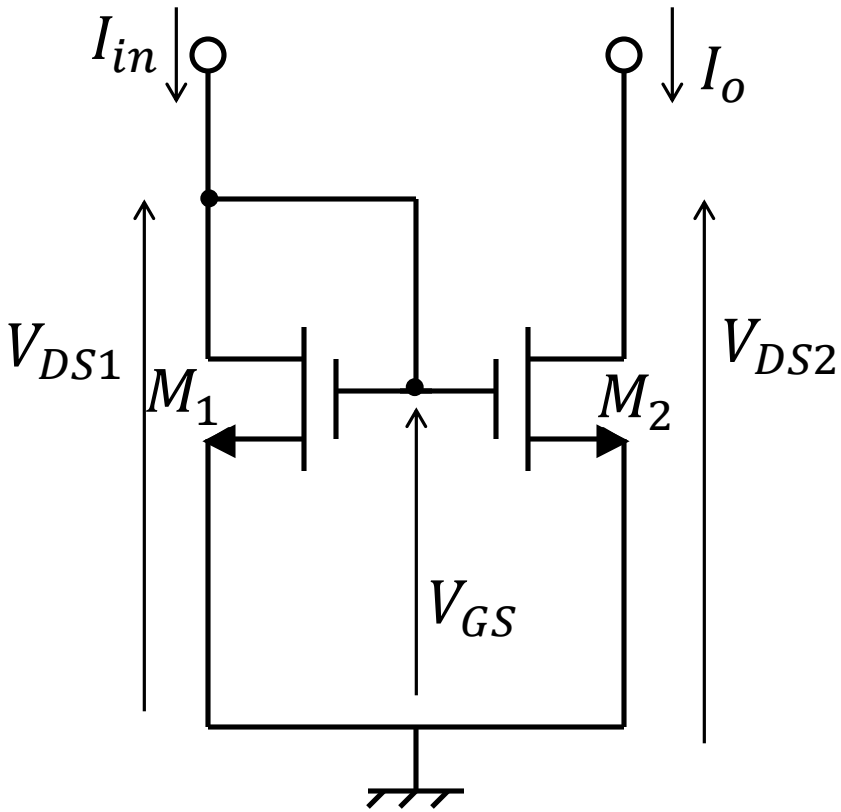
個別部品回路と集積回路

個別部品回路	集積回路
大きな広がりのC	Cは50～100pF以下
大きな広がりのR	Rは50kΩ以下
大きな広がりのL	Lは特に作っても数nH以下
精度の高い素子値	精度の低い素子値
周囲環境の影響を受けにくい	周囲環境の影響を受け易い
短時間で作れる	製造に時間がかかる
製造後の改変が容易	製造後に改変できない
少量生産は安価	少量生産は高価
高出力可能	出力電力に制限
大量生産は高価	大量生産は安価
大型	小型
電力消費が大	電力消費が小
設計は比較的容易	設計上複雑な考察が必要

8.MOSFET集積回路設計

- チャネルの幅と長さも設計パラメータ
  BJT回路と異なる
- 集積回路で特徴的な電流ミラー
  バイアスや能動負荷として使う

MOSFET電流ミラー



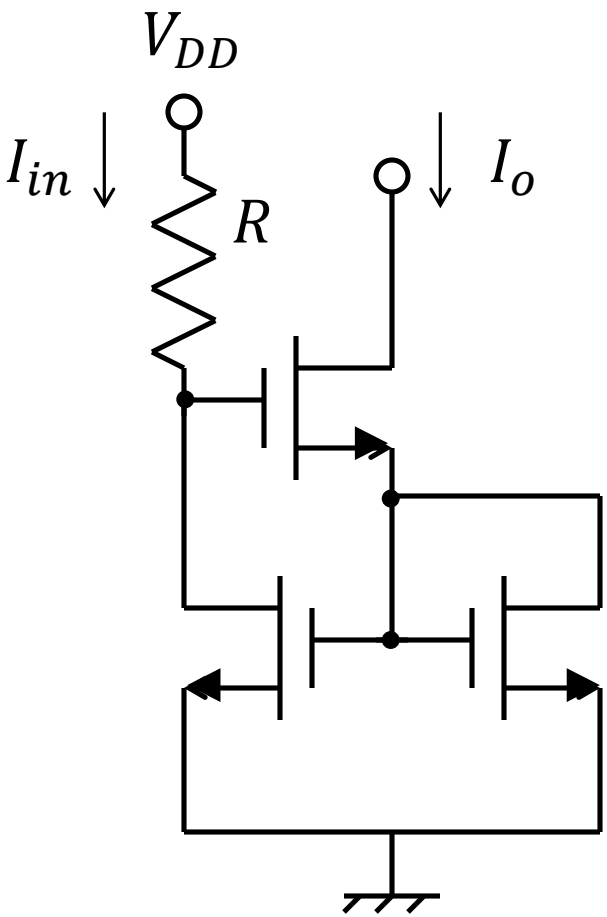
$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{L_1 W_2}{L_2 W_1}\left(\frac{V_{GS}-V_{TH2}}{V_{GS}-V_{TH1}}\right)^2 \frac{1+\lambda_2(V_{DS2}-V_{DSP2})}{1+\lambda_1(V_{DS1}-V_{DSP1})}\frac{\mu_2 C_{ox2}}{\mu_1 C_{ox1}}$$

二つのMOSFETが揃っていて$V_{DS1} = V_{DS2}$ならば$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{L_1 W_2}{L_2 W_1}$

MOSFET電流ミラーの実際

- V_{DS2}の変化によるチャネル長変調
- V_{TH}のミスマッチ
- サイズのミスマッチ

Wilson電流ミラーのMOSFET版

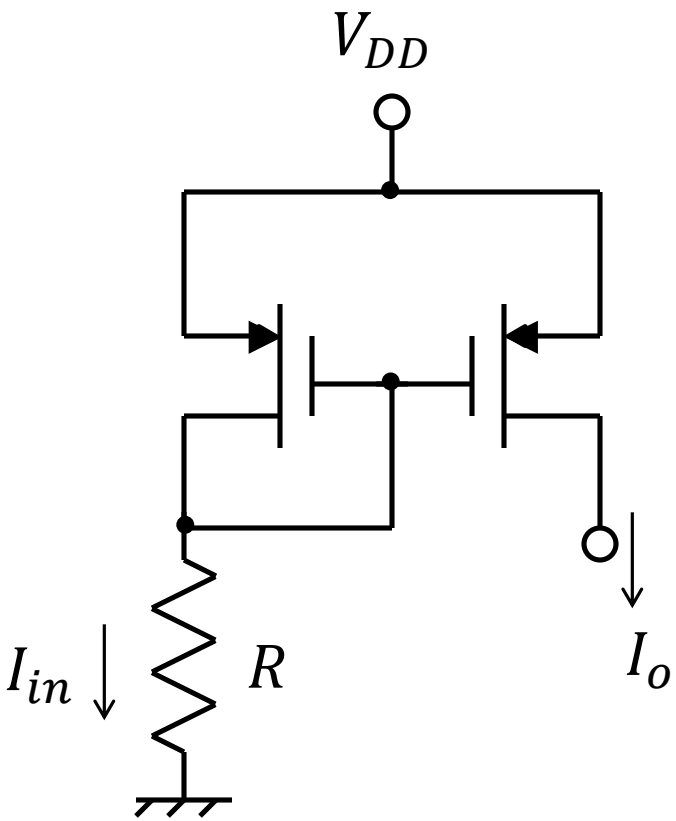


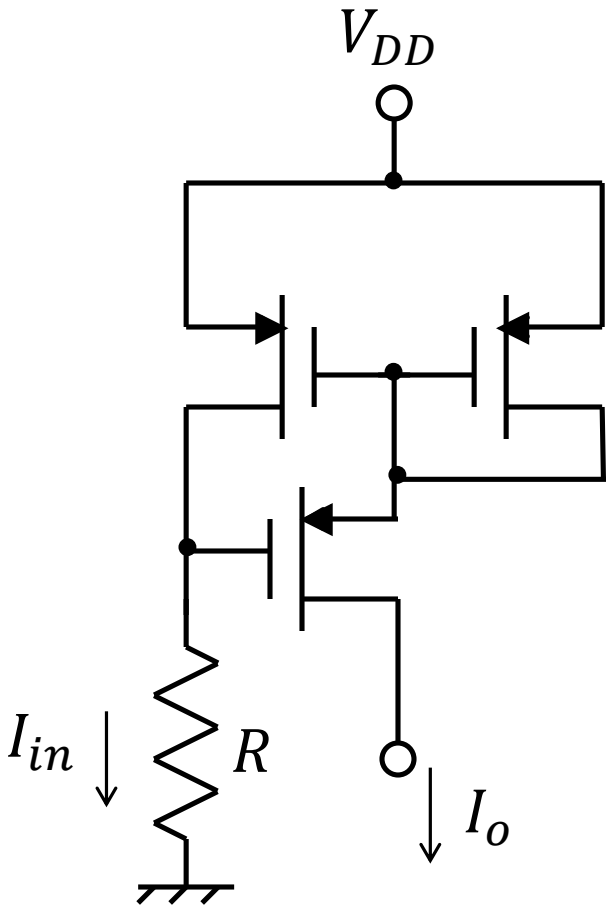
素子の[　　]を仮定

$$I_{in} = \frac{V_{DD} - 2V_{GS}}{R}$$

$$I_o = \frac{L_1 W_2}{L_2 W_1} I_{in}$$

pMOSによる電流ミラー

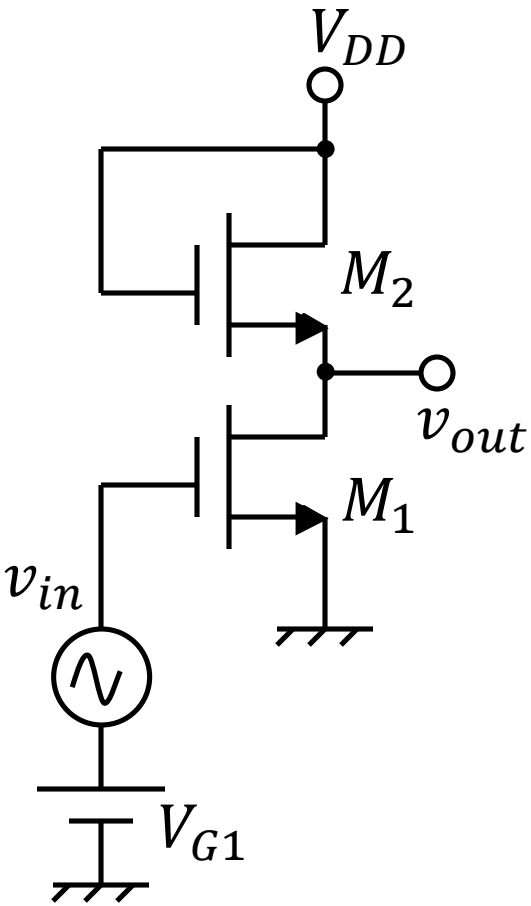


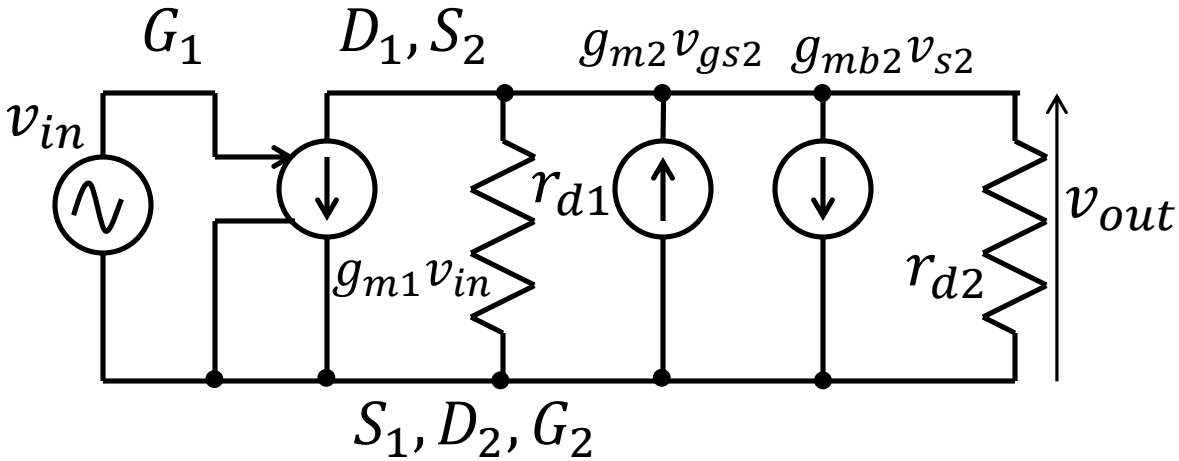


MOSFET集積回路の増幅回路

- 負荷に[　　]を用いない
- 負荷はMOS‥‥能動負荷
- 能動負荷により[　　]
- MOSFETの[　　]が重要

ダイオード接続負荷増幅回路

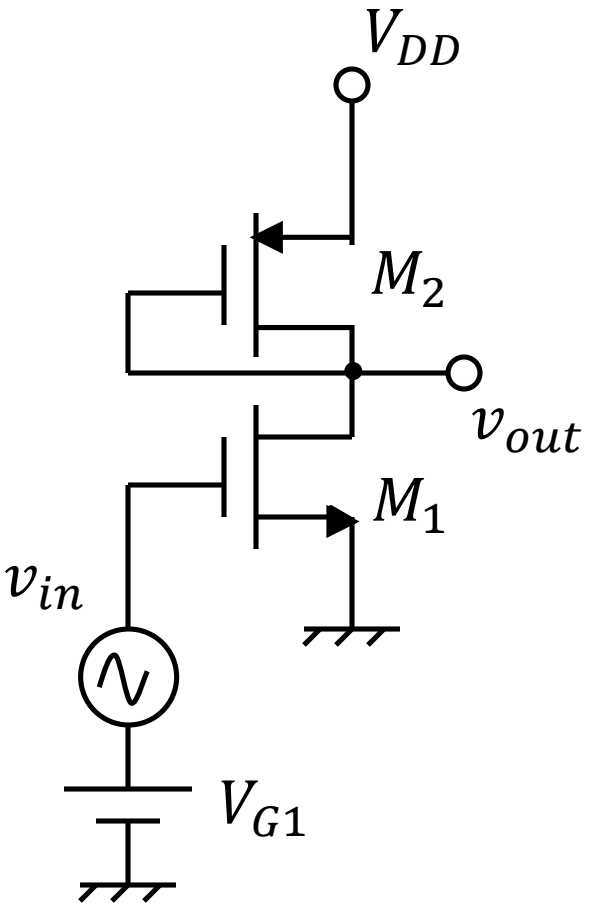




$$A_v = -\frac{g_{m1}}{g_{m2} + g_{mb2} + g_{d2} + g_{d1}} \cong -\frac{g_{m1}}{g_{m2}}$$

$g_m = \sqrt{2\mu C_{ox}\frac{W}{L}I_D}$ であるから　$A_v \cong -\sqrt{\frac{W_1 L_2}{L_1 W_2}}$

pMOS負荷増幅回路

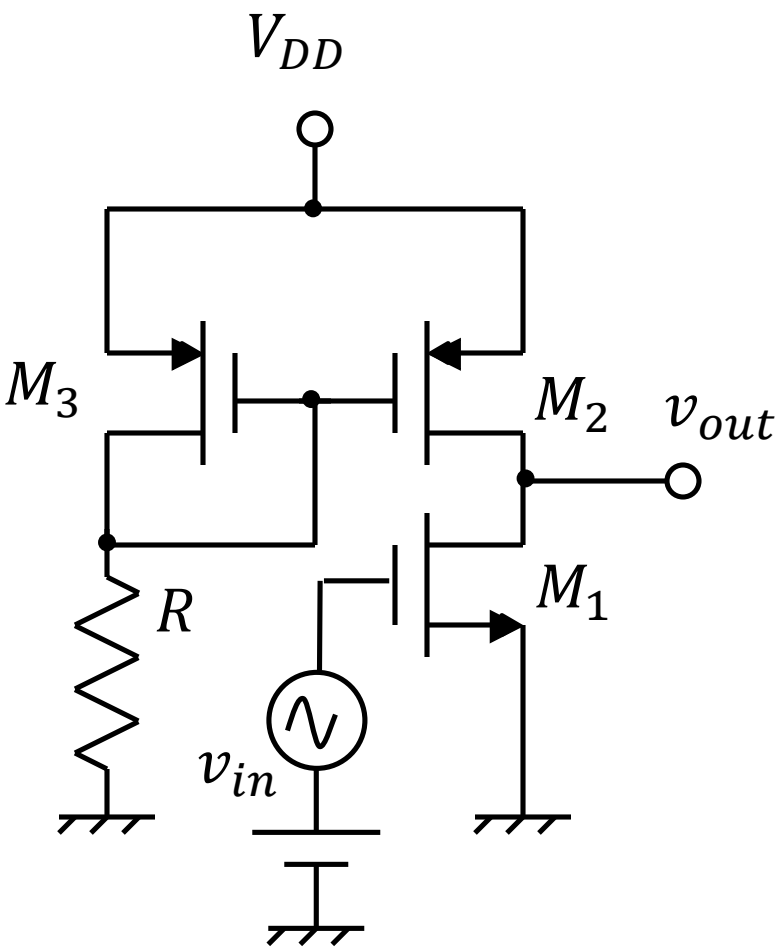


$$A_v = -\sqrt{\frac{\mu_n C_{oxn} \frac{W_1}{L_1}}{\mu_p C_{oxp} \frac{W_2}{L_2}}}$$

μ_pはμ_nの1/3程度

$$A_v \cong -\sqrt{\frac{3W_1 L_2}{L_1 W_2}}$$

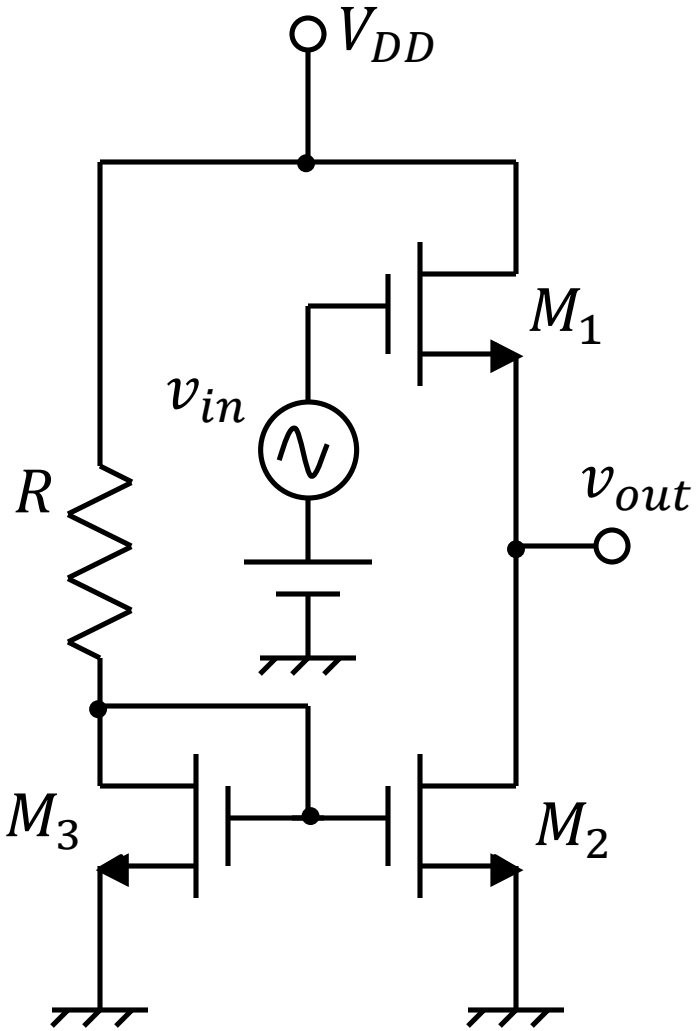
能動負荷増幅回路

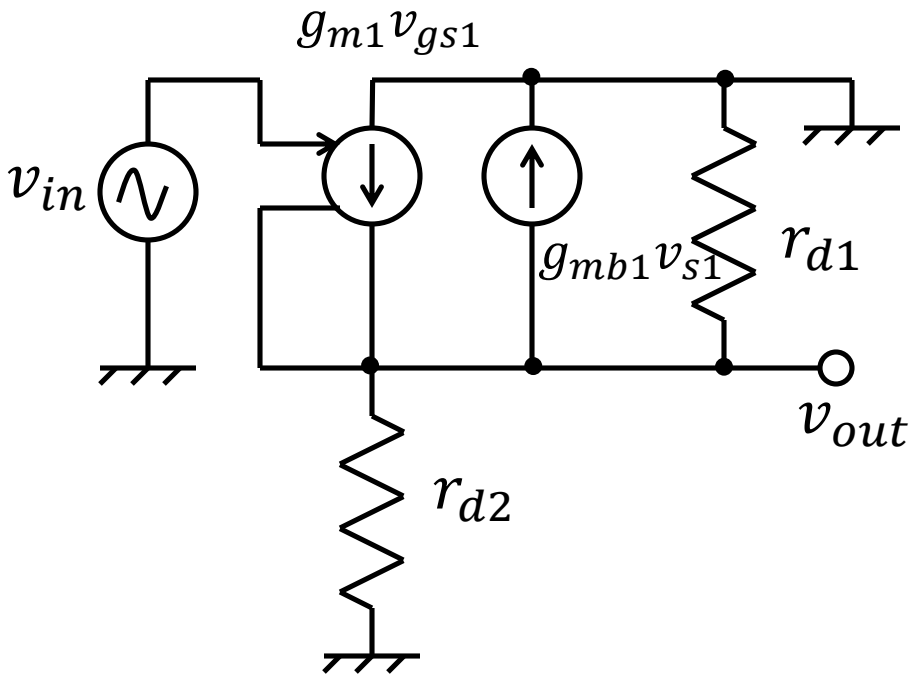


$$A_v = -g_m R_{out}$$

$$R_{out} = r_{d1} \,//\, r_{d2}$$

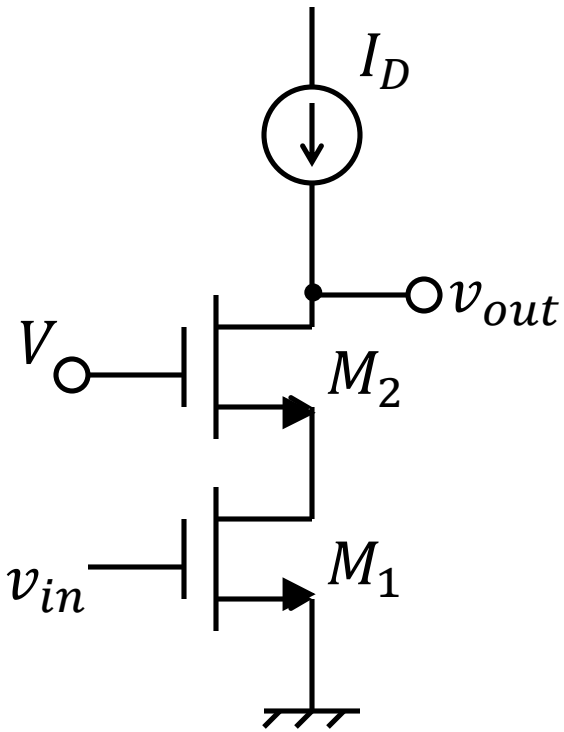
能動負荷ソースフォロア

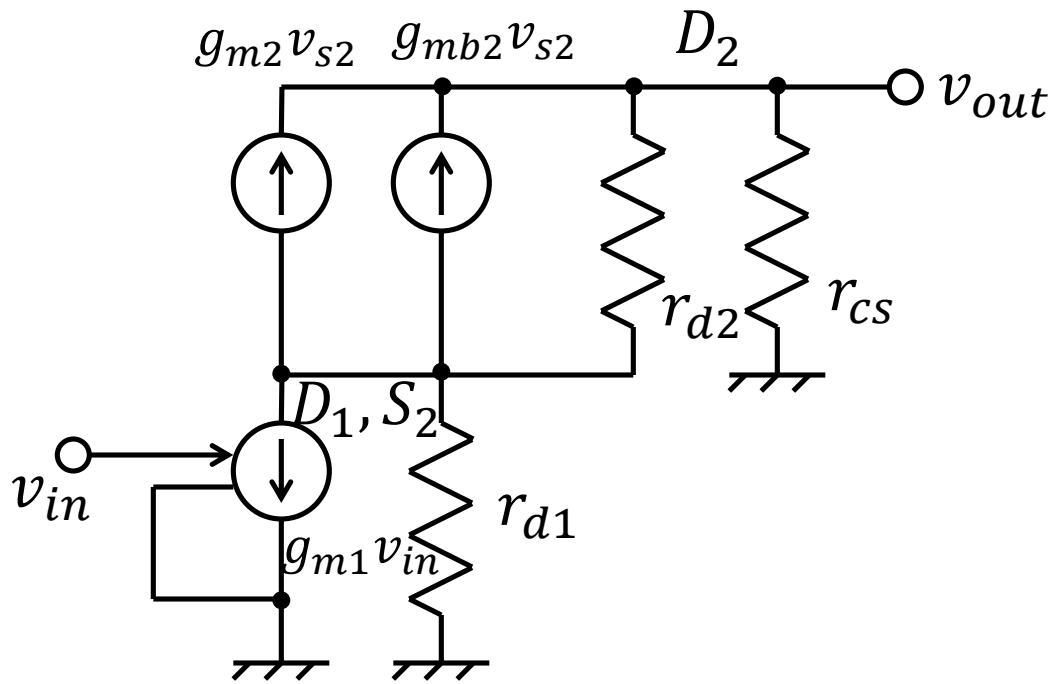




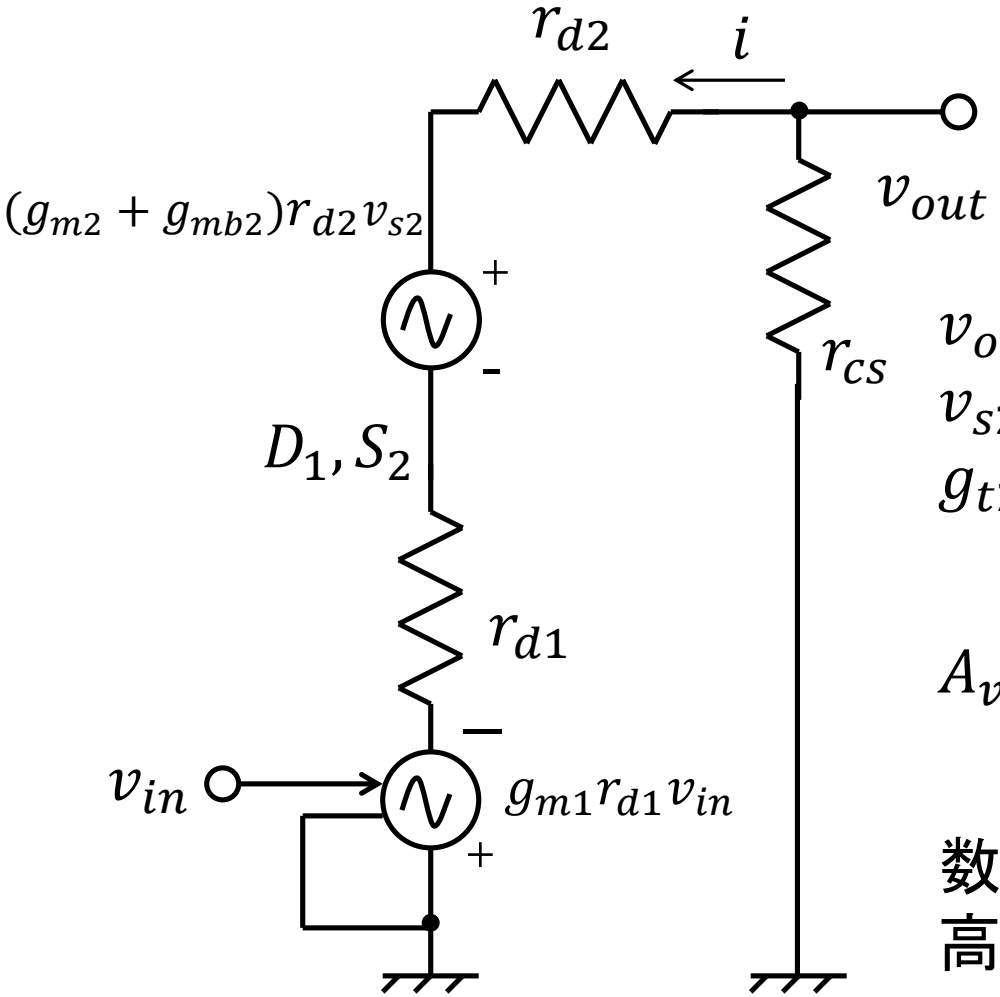
$$A_v = \frac{g_{m1}}{g_{m1} + g_{mb1} + g_{d1} + g_{d2}}$$

カスコード接続


I_D
v_{out}
V
M_2
v_{in}
M_1


$g_{m2}v_{s2}$
$g_{mb2}v_{s2}$
D_2
v_{out}
r_{d2}
r_{cs}
D_1, S_2
v_{in}
r_{d1}
$g_{m1}v_{in}$

電圧源に等価変換

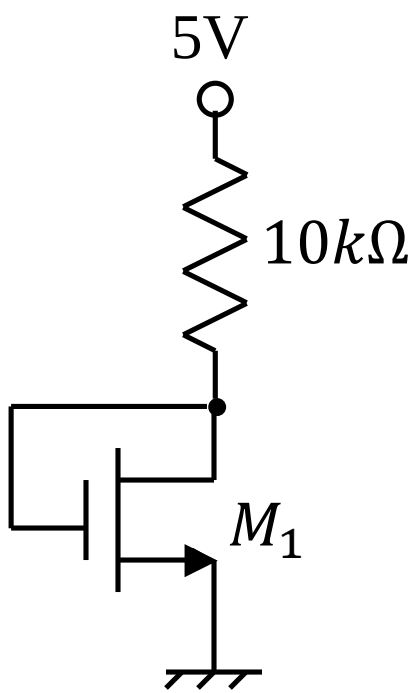


$$v_{out} = -ir_{cs}$$
$$v_{s2} = -g_{m1}r_{d1}v_{in} + ir_{d1}$$
$$g_{t2} = g_{m2} + g_{mb2}$$ とする

$$A_v = -\frac{(g_{m1}r_{d1} + g_{t2}g_{m1}r_{d1}r_{d2})r_{cs}}{r_{d1} + r_{d2} + r_{cs} + g_{t2}r_{d1}r_{d2}}$$

数千倍
高域遮断周波数が高い

練習問題1



$\frac{1}{2}\mu C_{ox}\frac{W}{L} = 50\mu A/V^2$、$V_{TH} = 0.5V$、$\lambda = 0.02$の時、ドレイン電流を計算せよ。

$V_{DS} = V_{GS} > V_{GS} - V_{TH}$なので飽和領域。

$$I_D = \frac{\mu}{2}\frac{W}{L}C_{OX}(V_{GS} - V_{TH})^2[1 + \lambda(V_{DS} - V_{DSP})],$$

$V_{DSP} = V_{GS} - V_{TH}, V_{DS} = V_{DD} - RI_D$より、

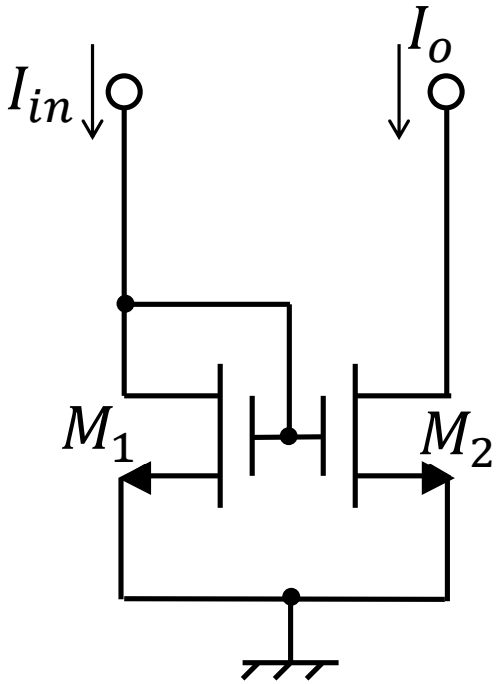
$$\frac{V_{DD} - V_{GS}}{R} = \frac{\mu}{2}\frac{W}{L}C_{OX}(V_{GS} - V_{TH})^2(1 + \lambda V_{TH})$$

これを解いて($V_{GS} > 0$を用いて)

$V_{GS} = 2.859V,\ I_D = 0.214mA$

練習問題2

$\frac{1}{2}\mu C_{ox}\frac{W}{L} = 50\mu A/V^2$、$V_{TH} = 0.5V$、$\lambda = 0.02$で、
$I_{in} = 85\mu A$、$V_{DS2} = 5V$の時、I_oを求めよ。



$$I_{in} = \frac{\mu}{2}\frac{W}{L}C_{OX}(V_{GS1} - V_{TH})^2[1 + \lambda(V_{DS1} - V_{DSP1})],$$

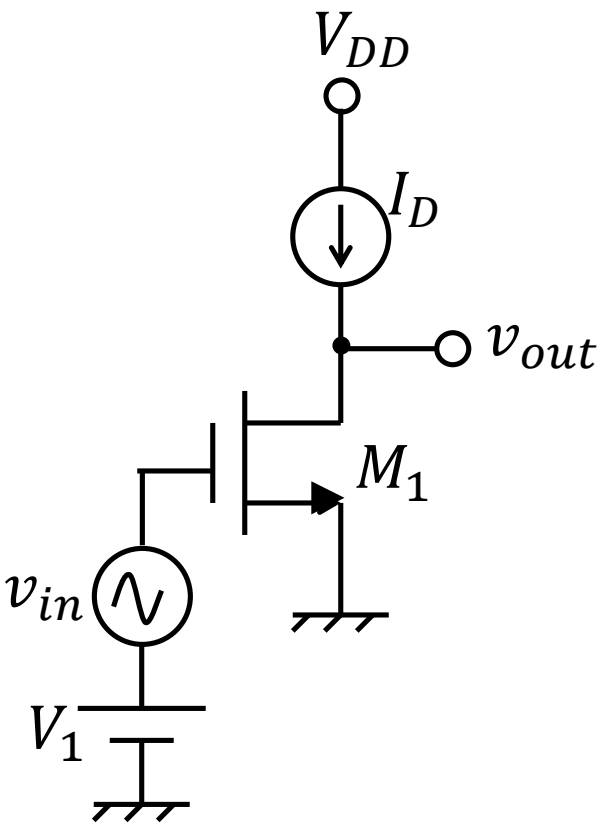
$V_{DS1} = V_{GS1}, V_{DSP1} = V_{GS1} - V_{TH}$より

$$85\mu = 50\mu(V_{DS1} - 0.5)^2(1 + 0.01)$$

$$V_{DS1} = 1.8V$$

$$I_o = 50\mu(1.8 - 0.5)^2[1 + 0.02(5 - 1.8 + 0.5)]$$
$$= 90.8\mu A$$

練習問題3



$I_D = 100\mu A$、電流源の内部抵抗$r_{cs} = 100k\Omega$、$M1$のゲート長$\mathrm{L} = 1\mu$、$\mu C_{OX} = 0.06mA/V^2$、$\lambda = 0.03V^{-1}$として、中域利得が100倍となるようにゲート幅Wを求めよ。

$$A_{MB} = -g_m R_{out}$$

$$r_{ds1} = \frac{1}{\lambda I_D} == \frac{1}{0.03\times 0.1} = 333k\Omega$$ より

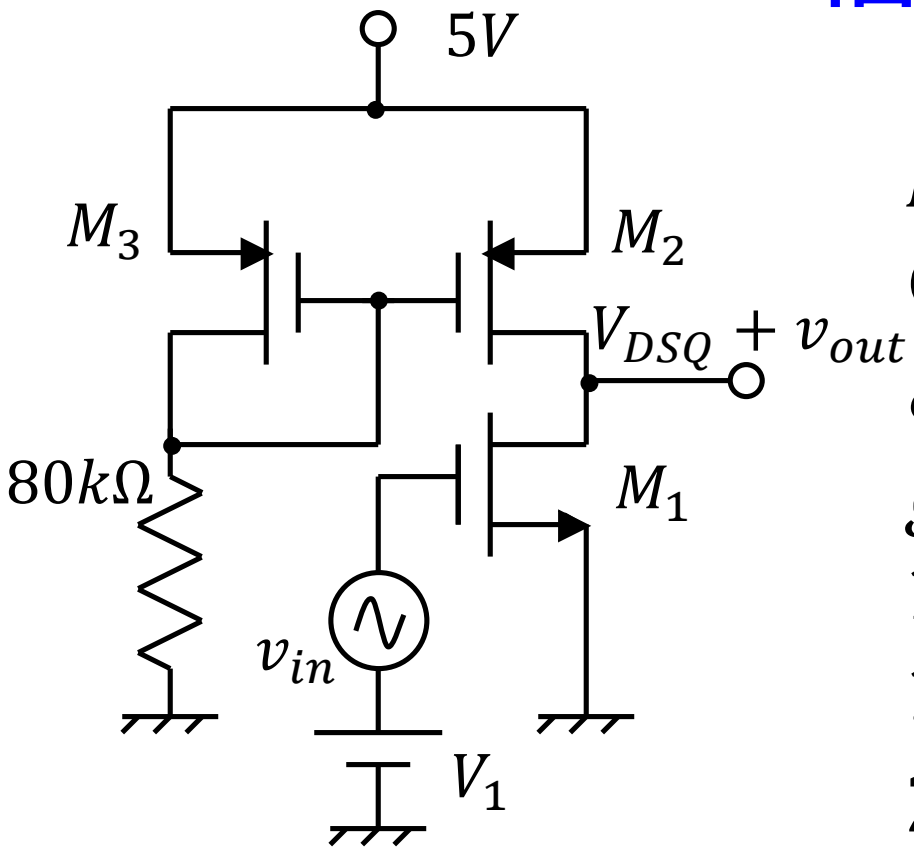
$$R_{out} = r_{cs} \parallel r_{ds1} = 100 \parallel 333 = 76.9\mathrm{k}\Omega$$

$$g_m = \sqrt{2\mu C_{OX}\frac{W}{L}I_D}$$ であるから、

$$|A_{MB}| = \sqrt{2 \times 0.06 \times \frac{W}{L} \times 0.1 \times 76.9} = 100$$

より、$W = 141\mu$。

宿題7



M_2, M_3の電流ミラーは$50\mu A$の電流を流し、$V_{DSQ} = 2.4V$となるようにV_1を調整した。$g_{m1} = 0.2mS, g_{ds1} = 1\mu S, g_{ds2} = 2\mu S, C_{db1} = 12fF, C_{db2} = 30fF, C_{gd1} = 2fF, C_{gd2} = 5fF$としたとき

1. 中域利得v_{out}/v_{in}を求めよ
2. 高域遮断周波数を求めよ