วงจรขยายสัญญาณผลต่าง (differential amplifier)

- วงจรขยายสัญญาณผลต่างขยายสัญญาณ differential และกำจัดสัญญาณ common-mode

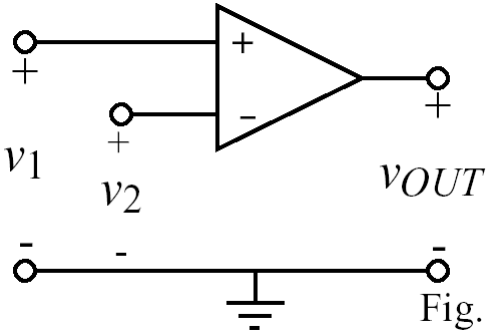


Fig.

- แรงดัน differential และแรงดัน common-mode
  - v_1 และ v_2 เป็นแรงดันข้างเดียว (อ้างอิงกับกราวนด์)
  - แรงดัน differential: $v_{ID} = v_1 - v_2$
  - แรงดัน common-mode: $v_{IC} = (v_1 + v_2)/2$

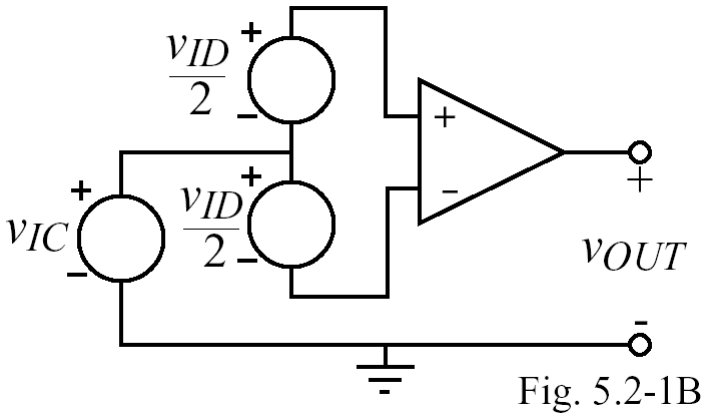


Fig. 5.2-1B

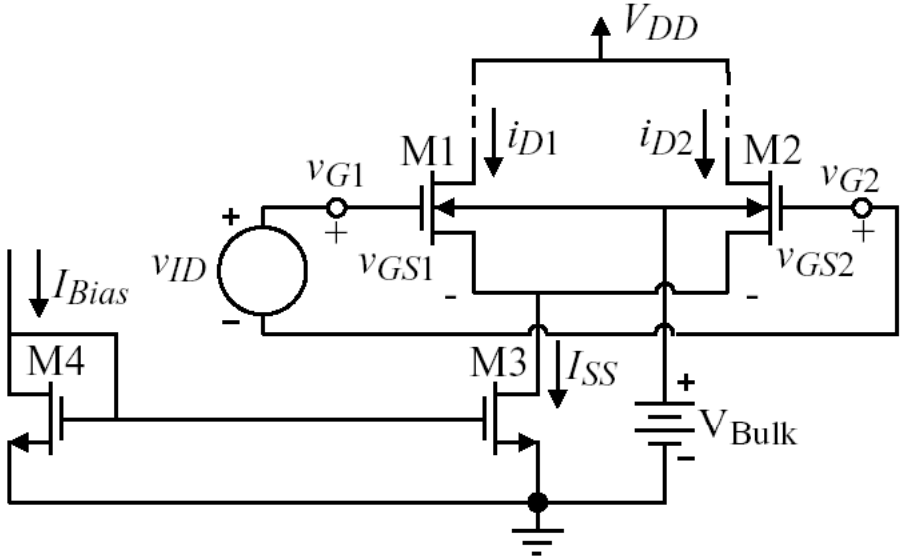
$$v_1 = v_{IC} + 0.5v_{ID} \qquad v_2 = v_{IC} - 0.5v_{ID}$$

A_{VD} = อัตราขยายแรงดัน differential

A_{VC} = อัตราขยายแรงดัน common-mode

$$v_{OUT} = A_{VD}v_{ID} \pm A_{VC}v_{IC} = A_{VD}(v_1 - v_2) \pm A_{VC}\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)$$

วงจรขยายสัญญาณผลต่างที่ใช้ MOSFET

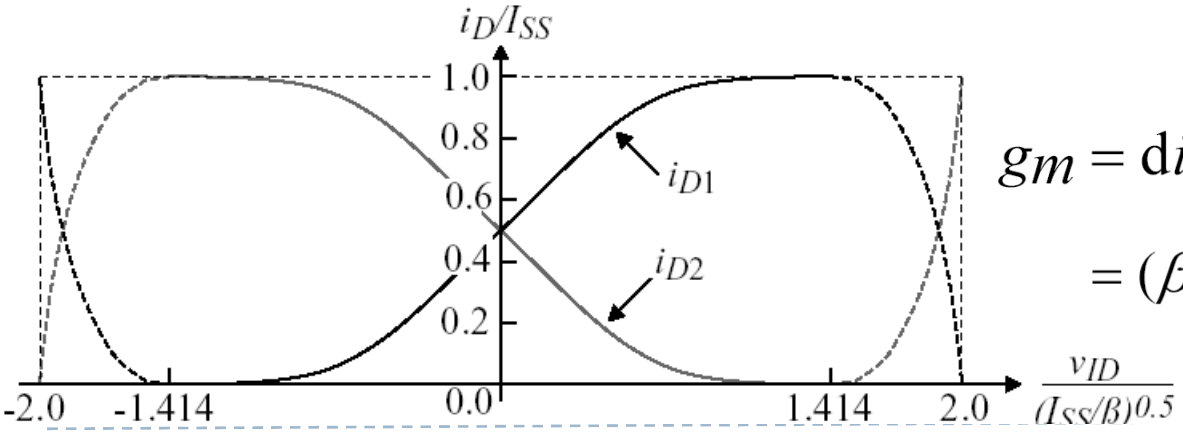


$$v_{ID} = v_{GS1} - v_{GS2} = \left(\frac{2i_{D1}}{\beta}\right)^{1/2} - \left(\frac{2i_{D2}}{\beta}\right)^{1/2}$$

$$I_{SS} = i_{D1} + i_{D2}$$

$$i_{D1} = \frac{I_{SS}}{2} + \frac{I_{SS}}{2}\left(\frac{\beta v_{ID}^2}{I_{SS}} - \frac{\beta^2 v_{ID}^4}{4I_{SS}^2}\right)^{1/2}$$

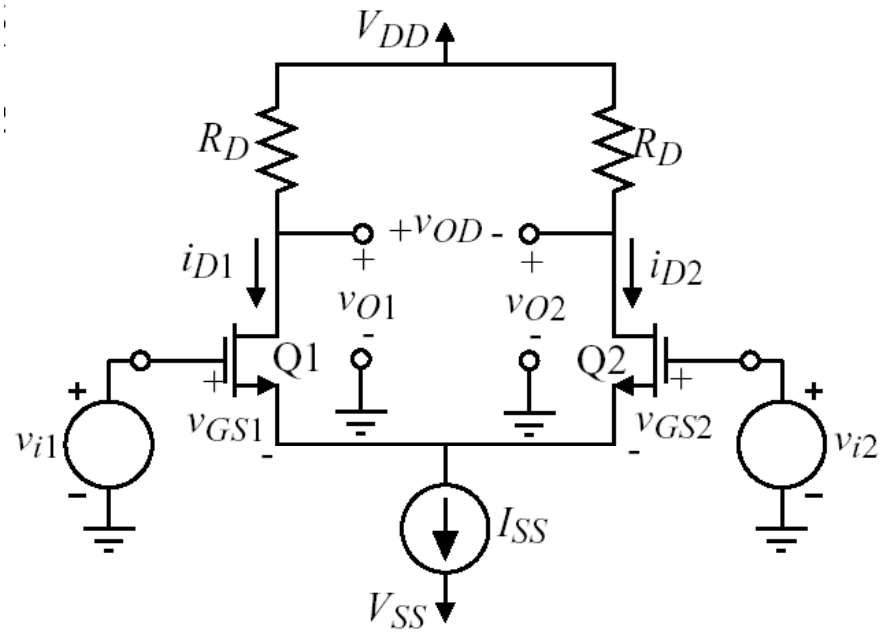
$$i_{D2} = \frac{I_{SS}}{2} - \frac{I_{SS}}{2}\left(\frac{\beta v_{ID}^2}{I_{SS}} - \frac{\beta^2 v_{ID}^4}{4I_{SS}^2}\right)^{1/2}$$

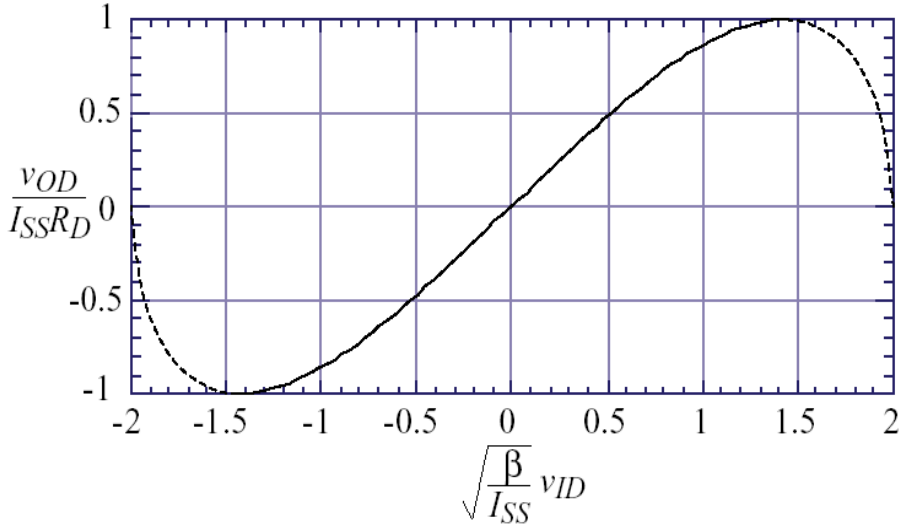


$$g_m = di_{D1}/dv_{ID}(V_{ID} = 0)$$

$$= (\beta I_{SS}/4)^{1/2} = \left(\frac{K'_1 I_{SS} W_1}{4L_1}\right)^{1/2}$$

วงจรขยายสัญญาณผลต่าง MOSFET ที่มีโหลดตัวต้านทาน





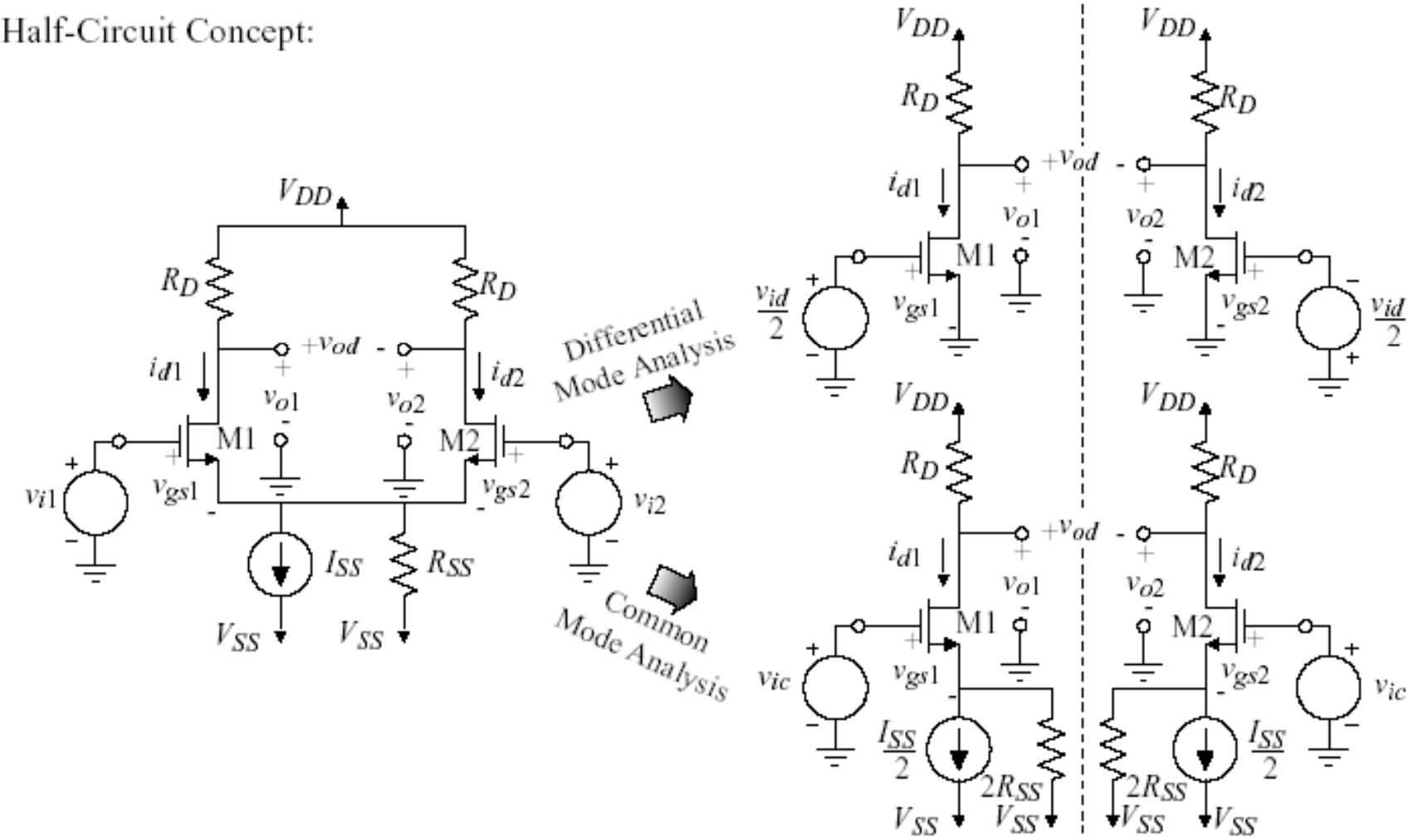
- มีช่วงเป็นเชิงเส้นที่กว้างกว่าวงจรขยายสัญญาณผลต่างที่ใช้ BJT

$$v_{OD} = V_{DD} - i_{D1}R_D - V_{DD} + i_{D2}R_D$$

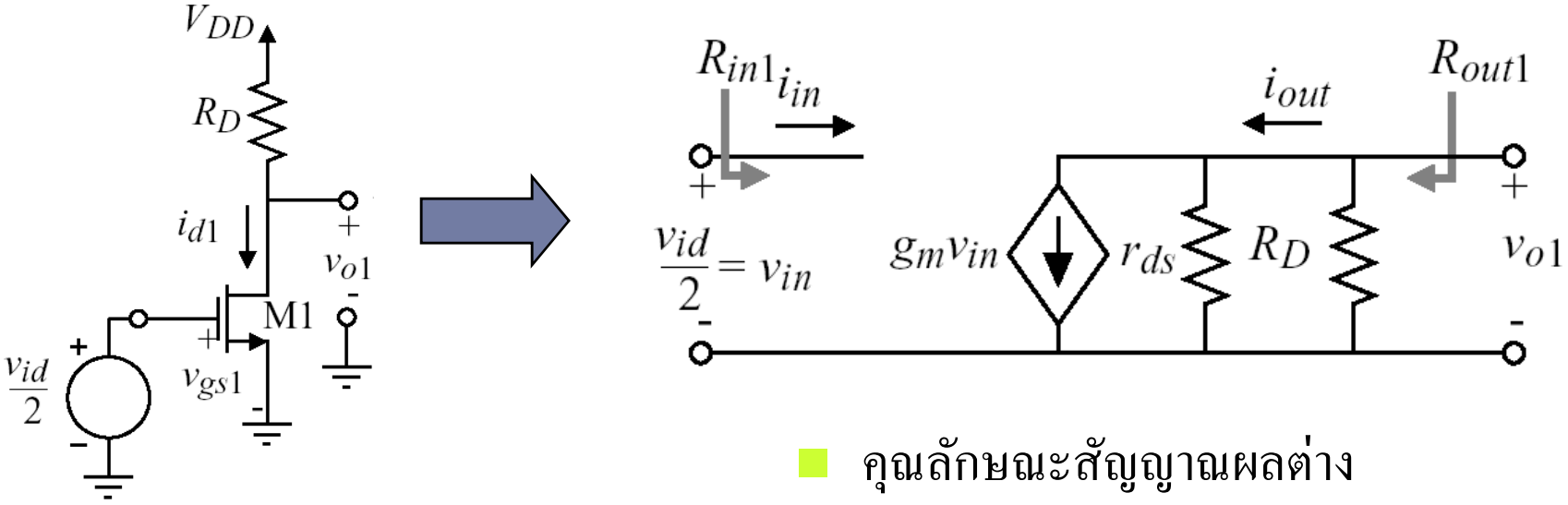
$$= R_D(i_{D2}-i_{D1}) = R_D\left(I_{SS}\sqrt{\frac{\beta v_{ID}^2}{I_{SS}} - \frac{\beta^2 v_{ID}^4}{4I_{SS}^2}}\right)$$

หลักการครึ่งวงจร

Half-Circuit Concept:



อัตราขยายสัญญาณผลต่าง (Differential-mode gain)



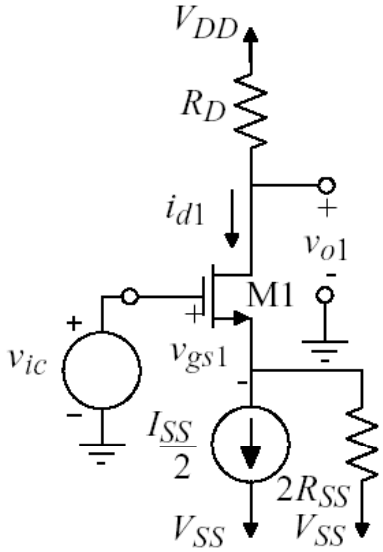
- คุณลักษณะครึ่งวงจร=>วงจรขยาย CS
  - $R_{in1} = \infty$, $R_{out1} \approx R_D$

$$\frac{v_{o1}}{v_{id}} = \frac{-g_{m1}R_D}{2}$$

- คุณลักษณะสัญญาณผลต่าง
  - $R_{id} = \infty$, $R_{od} \approx 2R_D$

$$\frac{v_{od}}{v_{id}} = \frac{v_{o1}}{v_{id}} - \frac{v_{o2}}{v_{id}}$$
$$= \frac{-g_{m1}R_D}{2} - \frac{+g_{m2}R_D}{2}$$
$$= -g_{m1}R_D$$

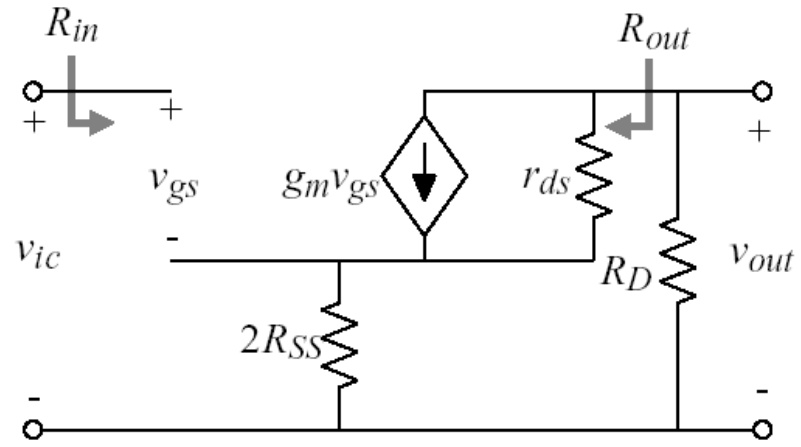
อัตราขยายสัญญาณร่วม (Common-mode voltage gain)



- คุณลักษณะครึ่งวงจร=>วงจรขยาย CS
  - $R_{in1} = \infty$

$$R_{out} = r_{ds}[1 + (g_m + g_{mbs})2R_{SS}] + 2R_{SS}$$

$$\frac{v_{o1}}{v_{o2}} \approx \frac{-g_m R_D}{1 + g_m 2R_{SS}}$$



- คุณลักษณะสัญญาณร่วม
  - $R_{ic} = \infty$,

$$R_{oc} = (r_{ds}[1 + (g_m + g_{mbs})2R_{SS}] + 2R_{SS}) || R_D$$

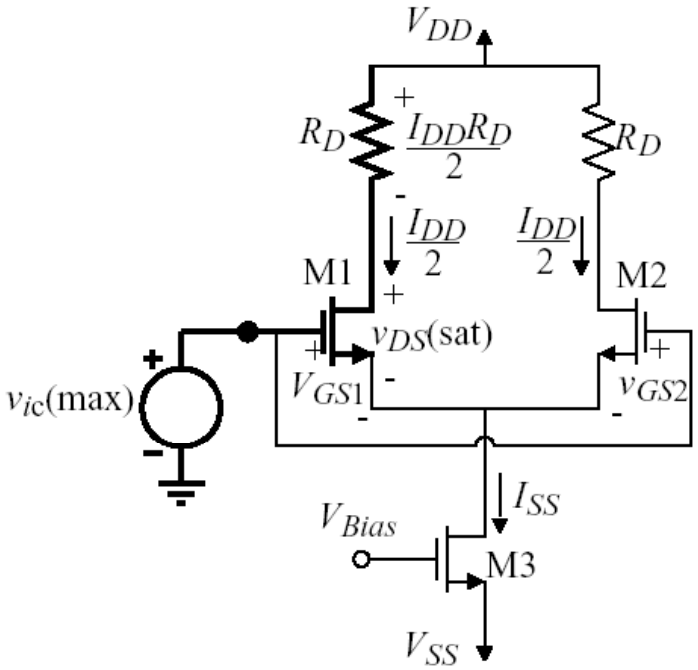
$$\frac{v_{oc}}{v_{ic}} \approx \frac{-g_m R_D}{1 + g_m 2R_{SS}}$$

สัดส่วนการกำจัดสัญญาณร่วม (common-mode rejection ratio)

- วัดความสามารถของวงจรขยายสัญญาณผลต่างในการกำจัดสัญญาณร่วมและขยายสัญญาณผลต่าง

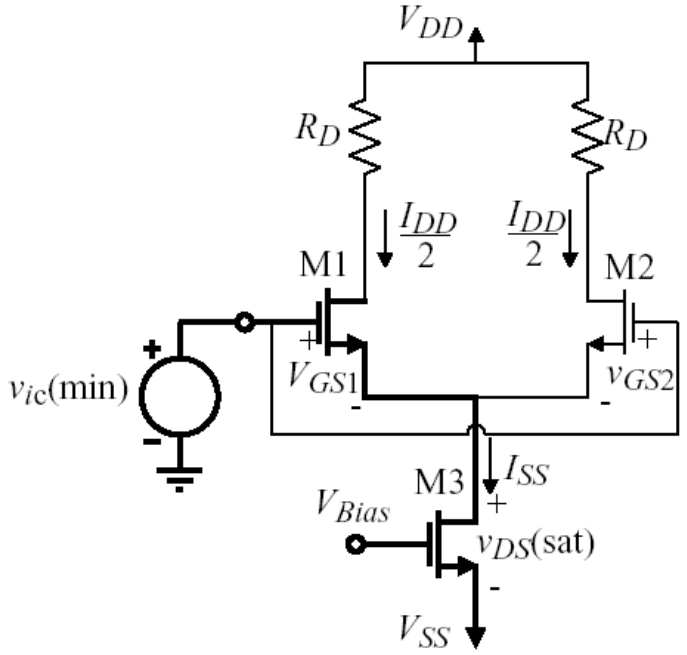
$$\text{CMRR} = \left|\frac{A_{dm}}{A_{cm}}\right| = \left|\frac{v_{o1}/v_{id}}{v_{o1}/v_{ic}}\right| \approx \frac{\frac{-g_m R_D}{2}}{\frac{-g_m R_D}{1+g_m 2R_{SS}}} \approx g_m R_{SS}$$

ช่วงแรงดันร่วมขาเข้า (input common-mode voltage range)



- แรงดันร่วมขาเข้าสูงสุด

$$v_{ic}(\text{max}) = V_{DD}\text{-}0.5I_{SS}R_D\text{-}v_{DS1}(\text{sat})+V_{GS1}$$
$$= V_{DD} - 0.5I_{SS}R_D + V_{T1}$$

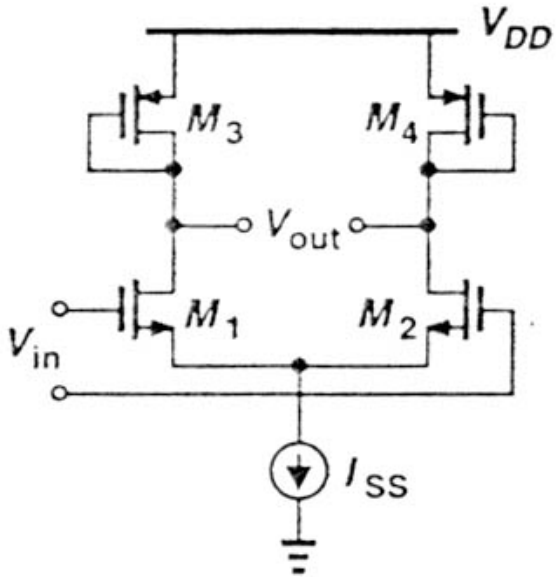


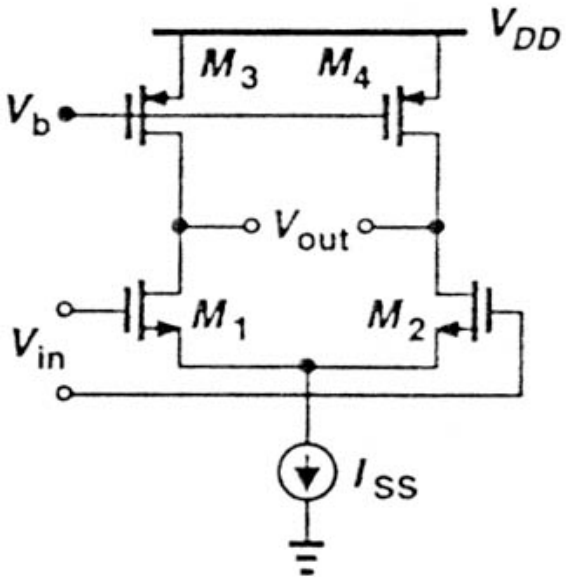
- แรงดันร่วมขาเข้าต่ำสุด

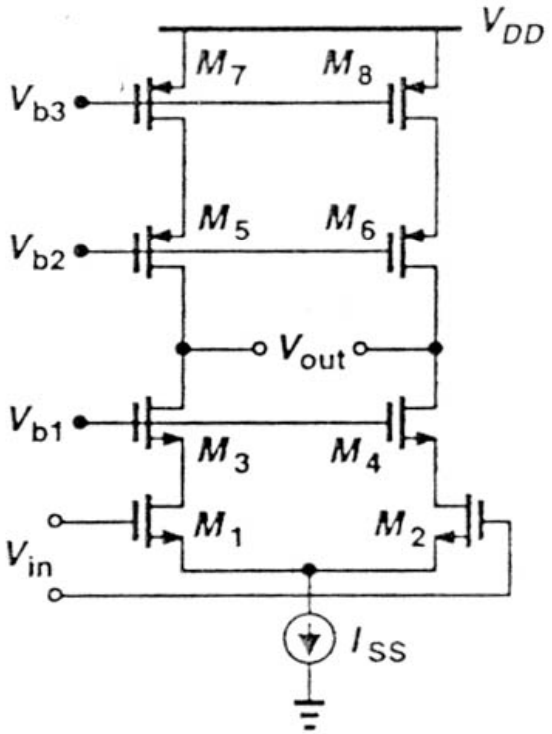
$$v_{ic}(\text{min}) = V_{SS}+v_{DS3}(\text{sat})+V_{GS1}$$
$$= V_{SS}+v_{DS3}(\text{sat})+v_{DS1}(\text{sat})+V_{T1}$$

ตัวอย่างวงจรขยายผลต่างที่ใช้แอกทีฟโหลด

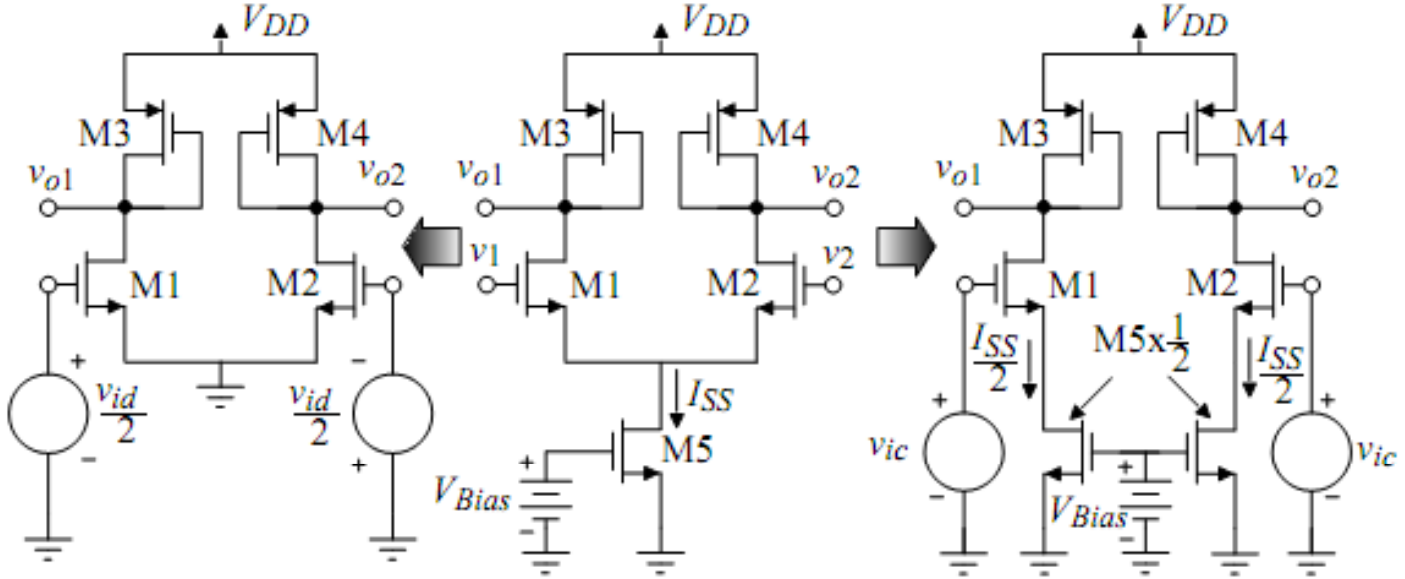
- อัตราขยายวงจร = ทรานส์คอนดักแตนซ์อินพุท X ความต้านทานเอาท์พุท







Analysis of Differential-mode and common-mode voltage gains



Differential-Mode Analysis:

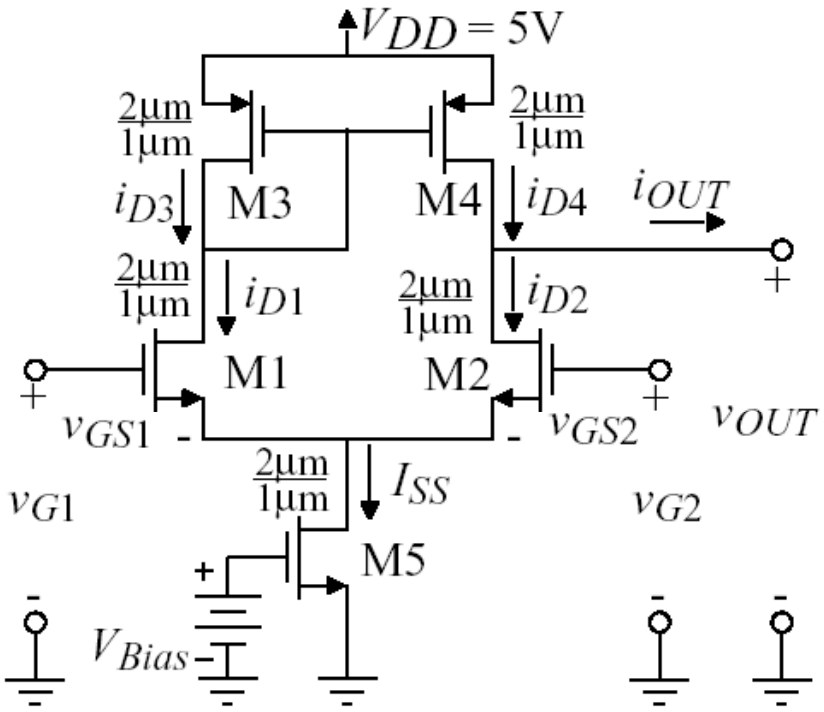
$$\frac{v_{o1}}{v_{id}} \approx -\frac{g_{m1}}{2g_{m3}} \qquad \text{and} \qquad \frac{v_{o2}}{v_{id}} \approx +\frac{g_{m2}}{2g_{m4}}$$

Common-Mode Analysis:

$$\frac{v_{o1}}{v_{ic}} = -\frac{g_{m1}[r_{ds3}\|(1/g_{m3})]}{1+2g_{m1}r_{ds5}} \approx -\frac{(g_{m1}/g_{m3})}{1+2g_{m1}r_{ds5}} \approx -\frac{g_{ds5}}{2g_{m3}}$$

$$CMRR = \frac{|v_{o1}/v_{id}|}{|v_{o1}/v_{ic}|} = \frac{g_{m1}/2g_{m3}}{g_{ds5}/2g_{m3}} = g_{m1}r_{ds5}$$

วงจรขยายสัญญาณผลต่าง MOS ที่ใช้โหลดวงจรสะท้อนกระแส



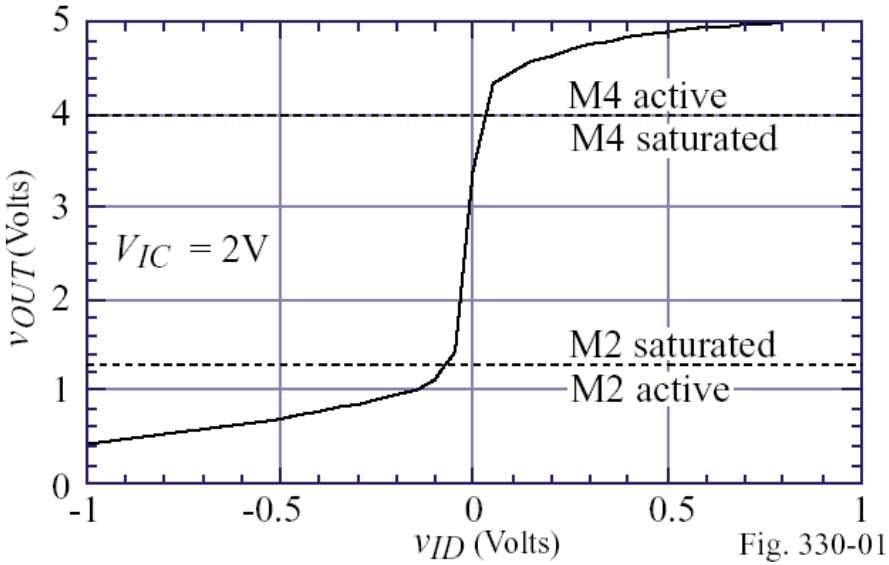


Fig. 330-01

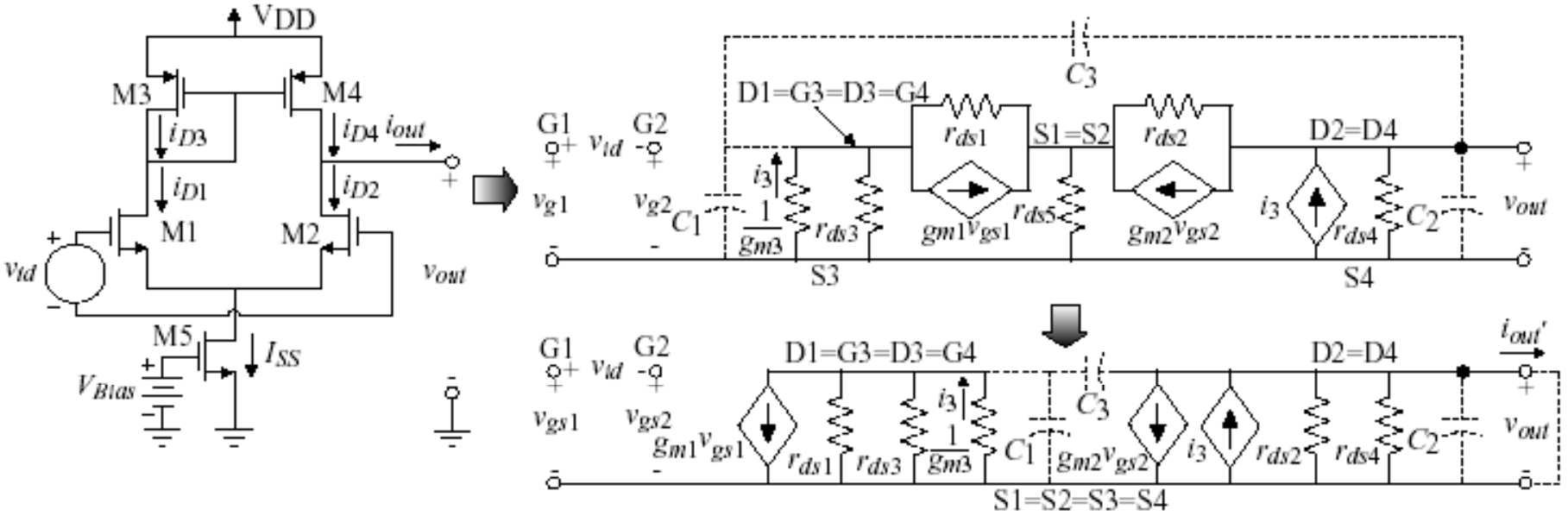
$$V_{o1} - V_{o2} = (i_{D1} - i_{D2})(r_{ds2} // r_{ds4})$$

$$v_o/v_{id} = (0.5g_{m1} - [-0.5g_{m2}])\ (r_{ds2} // r_{ds4})$$

$$V_{IC}(\max) = V_{DD} - V_{SG3} + V_{TN1}$$

$$V_{IC}(\min) = V_{SS} + V_{DS5}(\text{sat}) + V_{GS1}$$

อัตราขยายสัญญาณขนาดเล็ก



$$i_{out}' = v_{gs1}g_{m1}(r_{ds1}//r_{ds3}//[1/g_{m3}])g_{m4} - v_{gs2}g_{m2}$$

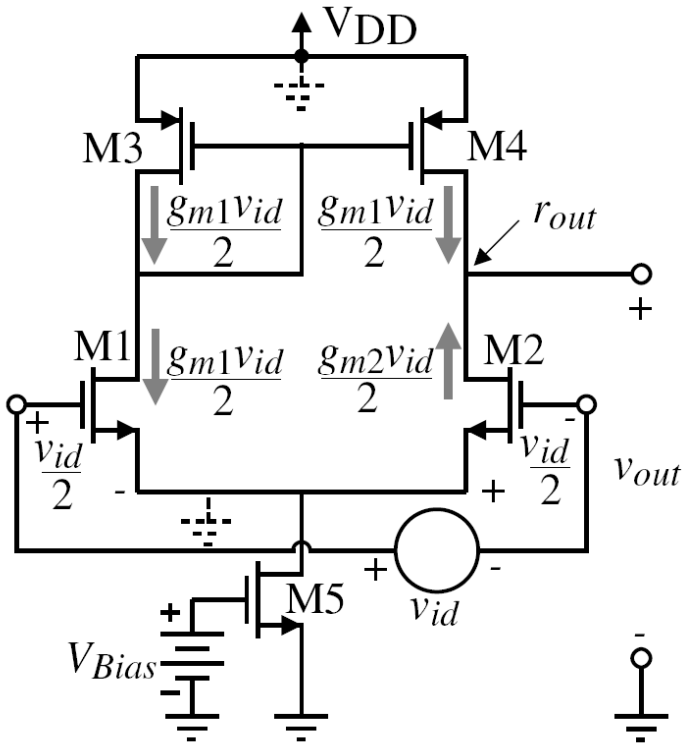
$$\approx v_{gs1}g_{m1}(1/g_{m3})g_{m4} - v_{gs2}g_{m2}$$

$$\approx v_{gs1}g_{m1} - v_{gs2}g_{m2} = gmdvid$$

$$r_{out} = \frac{1}{g_{ds2} + g_{ds4}} = r_{ds2}||r_{ds4}$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{id}} = \frac{gmd}{g_{ds2} + g_{ds4}} = \frac{2}{\lambda_2 + \lambda_4}\left(\frac{K'_1 W_1}{I_{SS} L_1}\right)^{1/2}$$

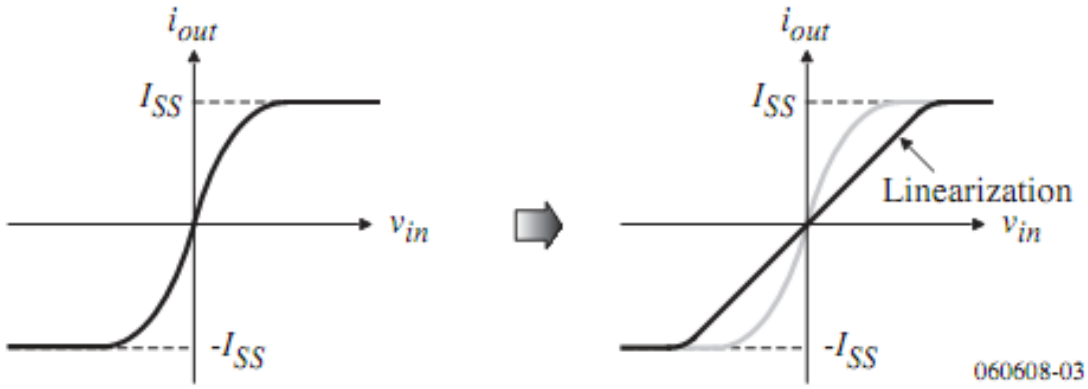
เทคนิคการวิเคราะห์แบบความเข้าใจ (intuitive analysis)



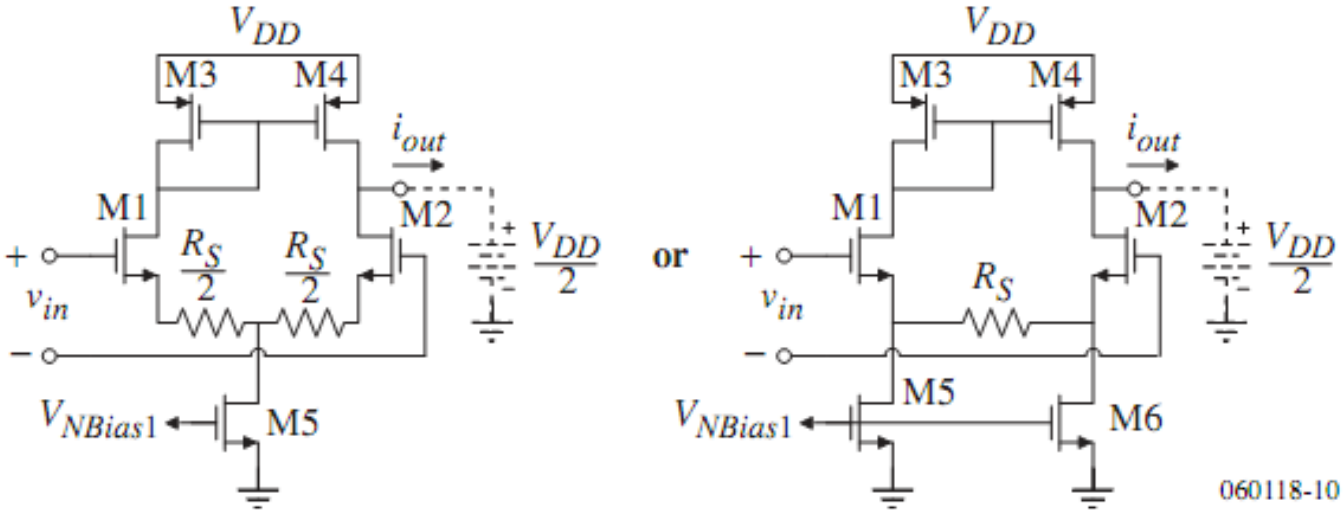
- $i_1=0.5g_{m1}v_{id}$, $i_2=-0.5g_{m1}v_{id}$
- $i_3=i_4=i_1$
- $r_{out}=r_{ds2}//r_{ds4}$
- $v_{out}=(i_4-i_2)r_{out}$
  $= g_{m1}v_{in}/(g_{ds2}+g_{ds4})$
- $v_{out}/v_{in}=g_{m1}/(g_{ds2}+g_{ds4})$

Linearization of Gm : Source degeneration

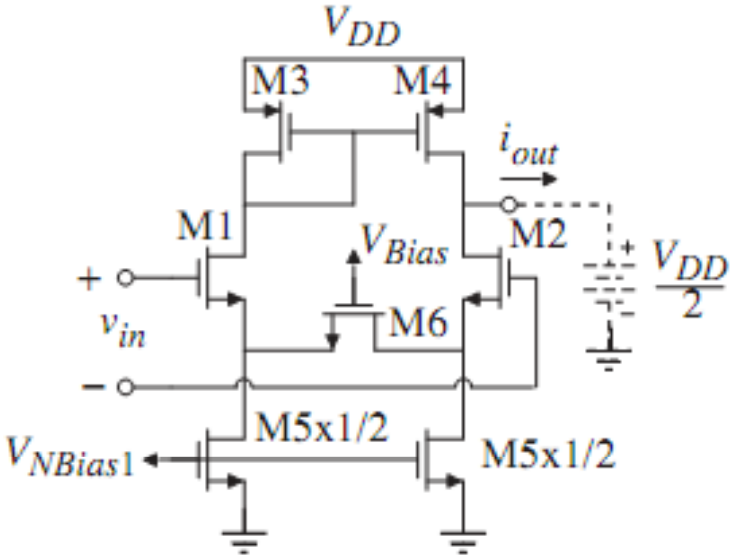
Goal:



Method (degeneration):

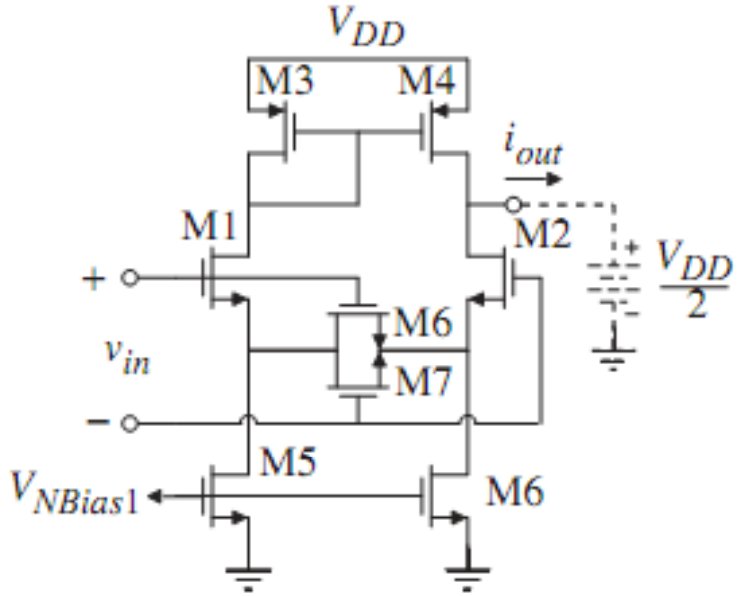


Source degeneration using triode MOSFETs



M6 is in deep triode region

or



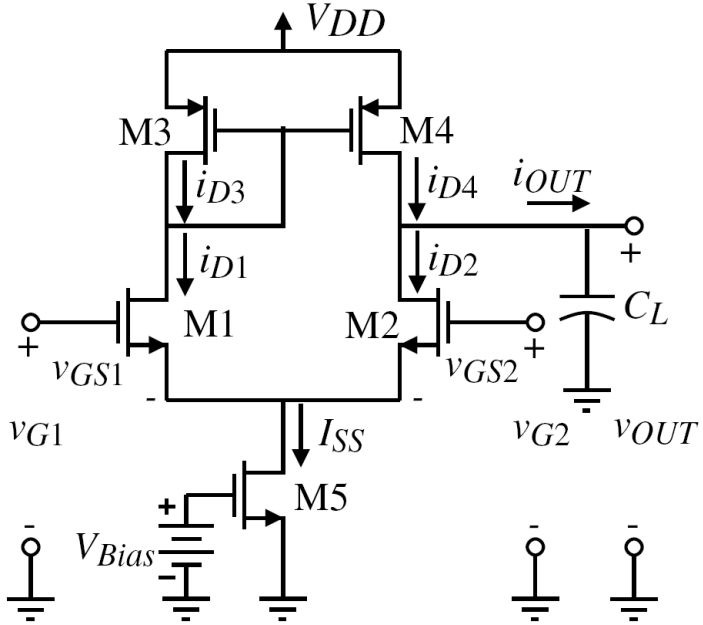
M6 and M7 are in the triode region

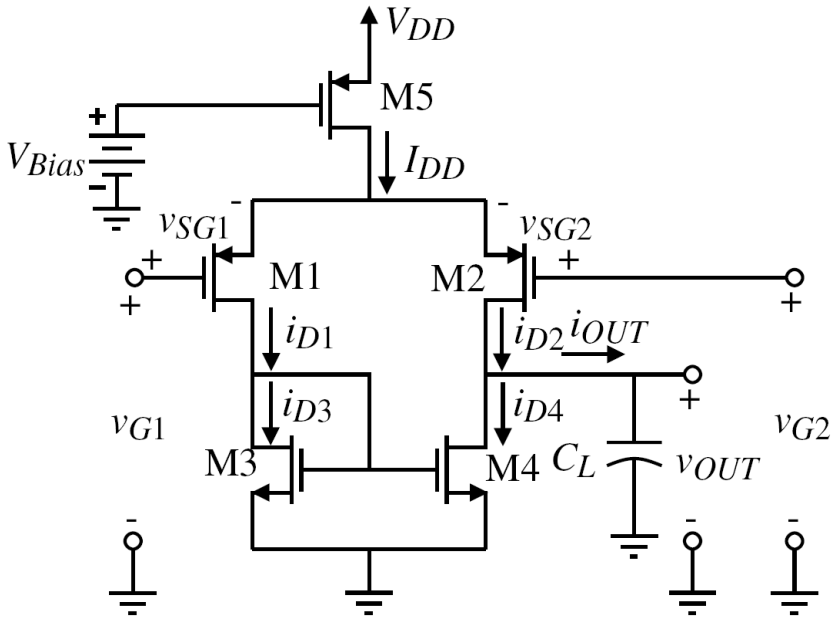
060608-05

อัตราสลูว์ของวงจรขยายผลต่าง

- อัตราสลูว์คืออัตราสูงสุดของการเปลี่ยนแรงดันเอาท์พุท ซึ่งถูกกำหนดโดยขนาดของกระแสเอาท์พุทสูงสุดที่ไปชาร์จตัวเก็บประจุโหล

$$i_{OUT} = C_L \frac{dv_{OUT}}{dt}$$

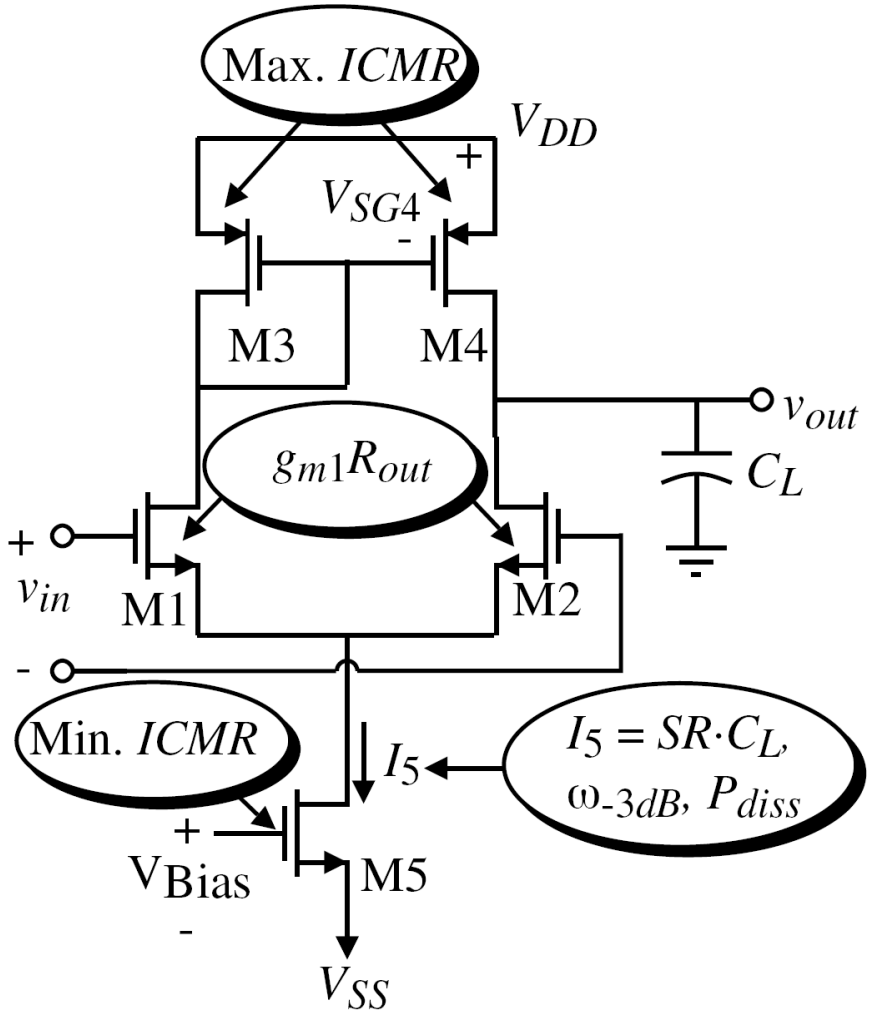




- การสลูว์จะเกิดขึนเมือสัญญาณอินพุทมีขนาดใหญ่จนทำให้กระแส I_{SS} ไหลข้างเดียว

$$SR = \frac{I_{SS}}{C_L} = \frac{I_{DD}}{C_L}$$

การออกแบบวงจรขยายผลต่างที่ใช้โหลดวงจรสะท้อนกระแส



1. จากค่าของ C_L หรือข้อกำหนดของการกินกำลังงาน เลือกกระแส I_{SS} ที่ให้ค่า SR ตามที่กำหนด
2. ตรวจค่า R_{out} ว่าได้ตามข้อกำหนดทางความถี่หรือไม่ ถ้าไม่ได้ ให้ปรับค่า I_{SS}
3. คำนวณค่า $(W/L)_3$ และ $(W/L)_4$ ให้ได้ค่าแรงดันอินพุทร่วมสูงสุดที่กำหนด
4. คำนวณค่า $(W/L)_1$ และ $(W/L)_2$ ให้ได้อัตราขยายที่กำหนด
5. คำนวณค่า $(W/L)_5$ ให้ได้ค่าแรงดันอินพุทร่วมต่ำสุดที่กำหนด
6. แก้ไขปรับปรุงให้ได้ตามข้อกำหนด

ตัวอย่างการออกแบบวงจรขยายผลต่าง

- ข้อกำหนด: $V_{DD}=-V_{SS}=2.5V$, $SR>10V/\mu s$ ($C_L=5pF$), $f_{-3dB}>100kHz$, $A_v=100$, $-1.5V<ICMR<2V$, $P_{diss}<1mW$ โดยให้ $K'_n=110\mu A/V^2$, $K'_p=50\mu A/V^2$, $V_{TN}=-V_{TP}=0.7V$, $\lambda_N=0.04V^{-1}$, $\lambda_P=0.05V^{-1}$

1. เพื่อให้ได้ SR, $I_{SS}>50\mu A$ และ $I_{SS}<200\mu A$ สำหรับ P_{diss}
2. สำหรับ $f_{-3dB}>100kHz$ จะได้ $R_{out} < 318\ k\Omega$, ดังนั้น

จะได้ว่า $I_{SS}>70\mu A$ ดังนั้นเลือกค่า $I_{SS}=100\mu A$ $R_{out}=\frac{2}{(\lambda_N+\lambda_P)I_{SS}}\le 318k\Omega$

3. $V_{IC}(max)=V_{DD}-V_{SG3}+V_{TN1} \rightarrow 2V=2.5-V_{SG3}+0.7$

$$V_{SG3}=1.2V=\sqrt{\frac{2\cdot 50\mu A}{50\mu A/V^2(W_3/L_3)}}+0.7$$

$$\therefore \quad \frac{W_3}{L_3}=\frac{W_4}{L_4}=\frac{2}{(0.5)^2}=8$$

ตัวอย่างการออกแบบวงจรขยายผลต่าง

4. คำนวณค่า $(W/L)_1$ และ $(W/L)_2$ ให้ได้อัตราขยายที่กำหนด

$$100=g_{m1}R_{out}=\frac{g_{m1}}{g_{ds2}+g_{ds4}}=\frac{\sqrt{2\cdot 110\mu A/V^2(W_1/L_1)}}{(0.04+0.05)\sqrt{50\mu A}}=23.31\sqrt{\frac{W_1}{L_1}} \rightarrow \frac{W_1}{L_1}=\frac{W_2}{L_2}=18.4$$

5. คำนวณค่า $(W/L)_5$ ให้ได้ค่าแรงดันอินพุทร่วมต่ำสุดที่กำหนด

$$V_{IC}(\min) = V_{SS} + V_{DS5}(\text{sat}) + V_{GS1} \rightarrow -1.5 = -2.5 + V_{DS5}(\text{sat}) + \sqrt{\frac{2\cdot 50\mu A}{110\mu A/V^2(18.4)}} + 0.7$$

$$V_{DS5}(\text{sat}) = 0.3 - 0.222 = 0.0777!! \Rightarrow \frac{W_5}{L_5}=\sqrt{\frac{2I_{SS}}{K_N' V_{DS5}(\text{sat})^2}}=300$$

- ควรเพิ่มค่า $(W/L)_1$ เพื่อลด V_{GS1} และ $(W/L)_5$