



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

国家示范性微电子学院
School of Microelectronics

模拟集成电路设计课程

第5章 电流镜与偏置技术

程 林，韩 旭

eecheng@ustc.edu.cn



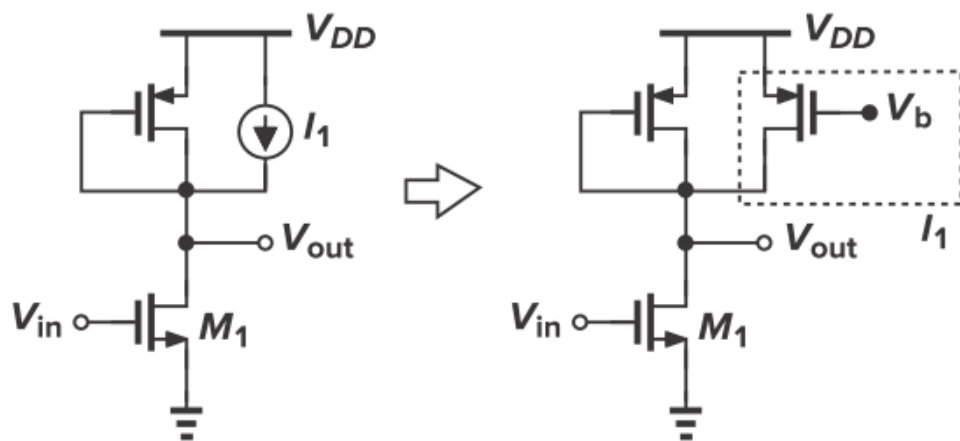
本章内容

- 5.1 基本电流镜
- 5.2 共源共栅电流镜
- 5.3 有源电流镜放大器
- 5.4 偏置技术 (自学)

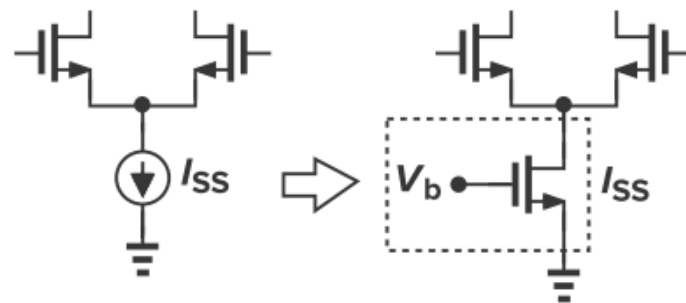


5.1 基本电流镜

- 工作在饱和区的MOS管可以当作电流源
- 电流源的要求：很大的输出电阻，且不消耗过多的电压余度



增大增益



尾电流源



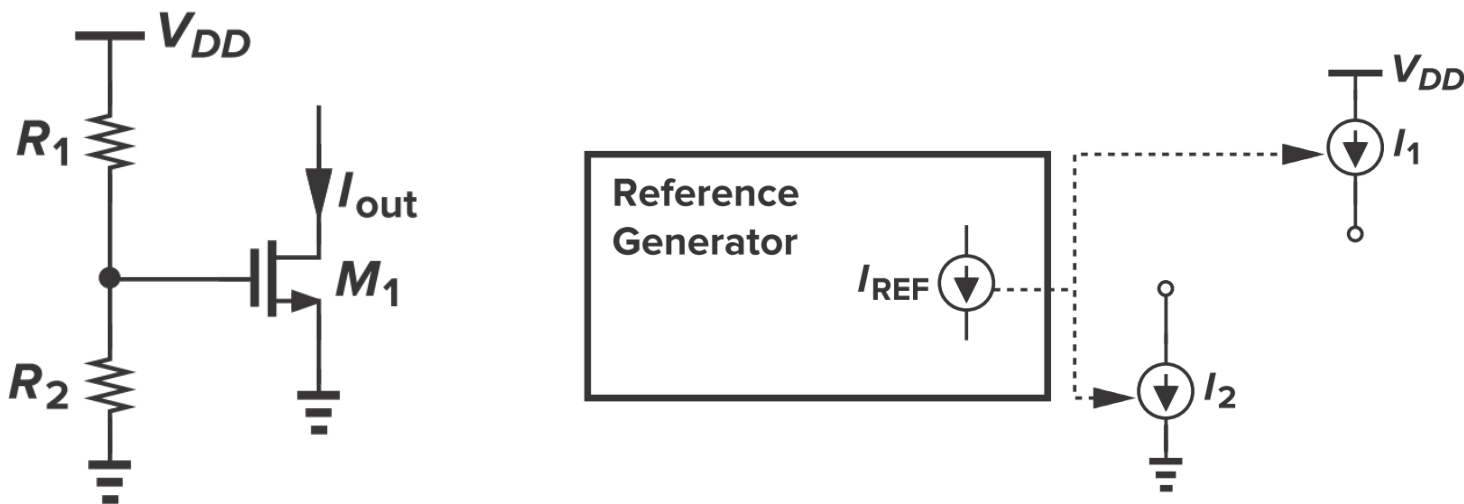
如何确定电流源的偏置？

- 电阻分压？

$$I_{out} \approx \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} - V_{TH} \right)^2$$

严重受PVT变化影响

- 即使给定了一个精确的栅源电压，电流也无法准确确定



- 在模拟电路中，电流源的设计是基于对基准电流的“复制”
- 基准电流 I_{REF} 由专门的基准产生电路提供



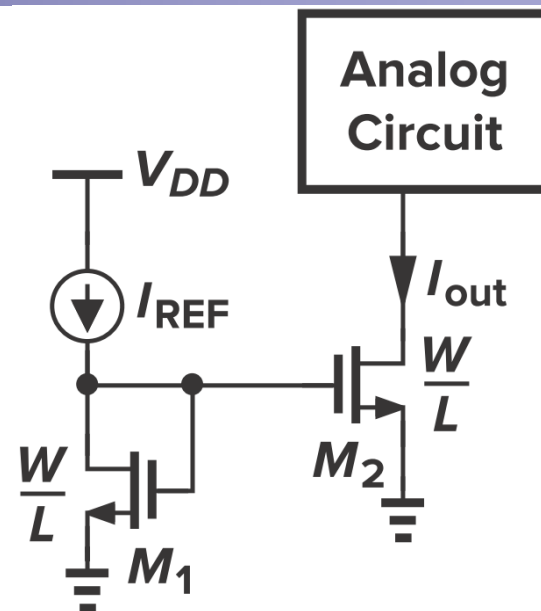
基本电流镜

- 忽略沟道长度调制效应

$$I_{REF} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_1 (V_{GS} - V_{TH})^2$$

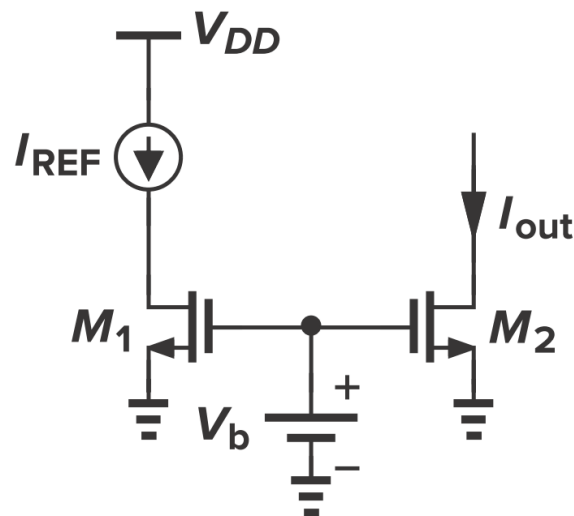
$$I_{out} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_2 (V_{GS} - V_{TH})^2$$

$$\Rightarrow I_{out} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{REF}$$



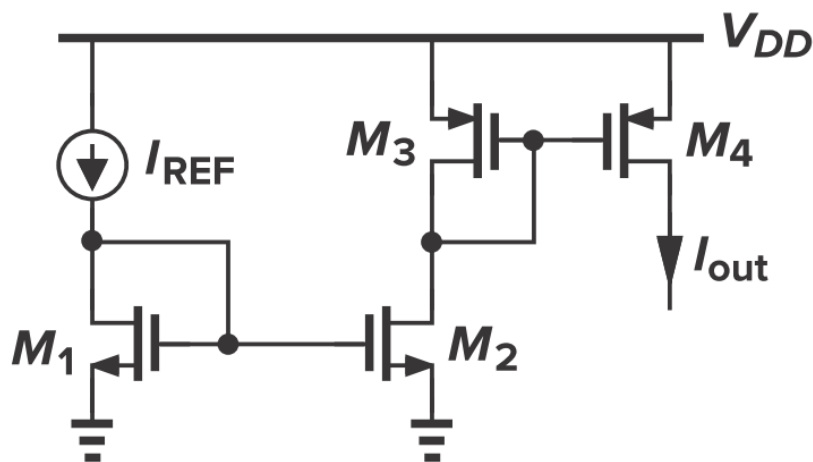
不受工艺和温度的影响，仅与器件尺寸比率相关

- V_{GS} 必须由 I_{REF} 产生，否则不能完成电流复制





例5.1 M_4 的漏电流?



$$I_{D2} = I_{REF}[(W/L)_2/(W/L)_1]$$

$$|I_{D3}| = |I_{D2}| \quad \Rightarrow \quad |I_{D4}| = \alpha \beta I_{REF}$$

$$I_{D4} = I_{D3} \times [(W/L)_4/(W/L)_3]$$

$$\alpha = (W/L)_2/(W/L)_1$$

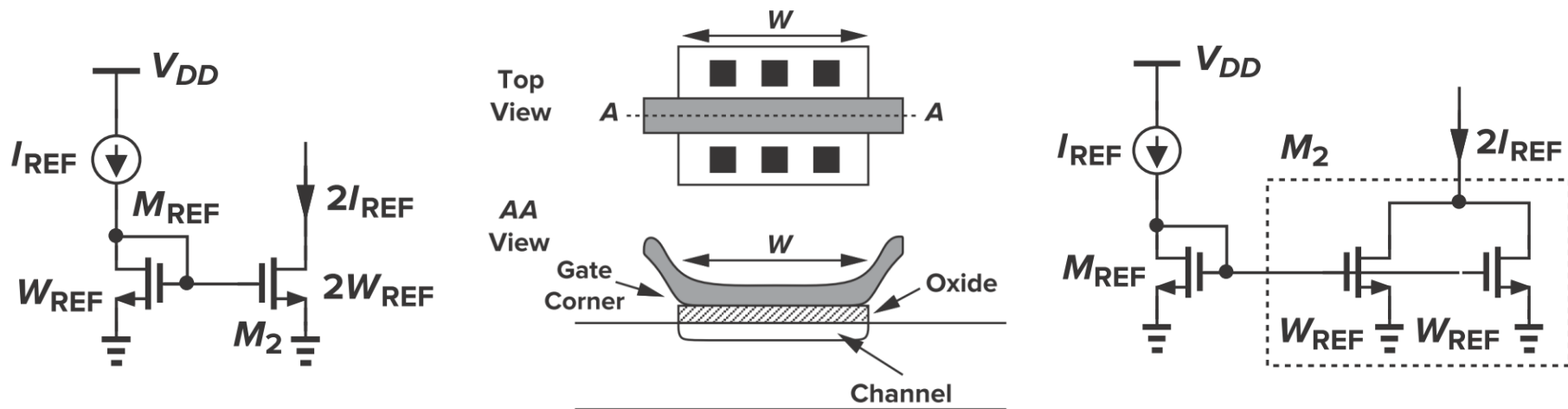
$$\beta = (W/L)_4/(W/L)_3$$

应避免长的电流镜链

可放大或缩小 I_{REF}



如何设计电流镜的尺寸？

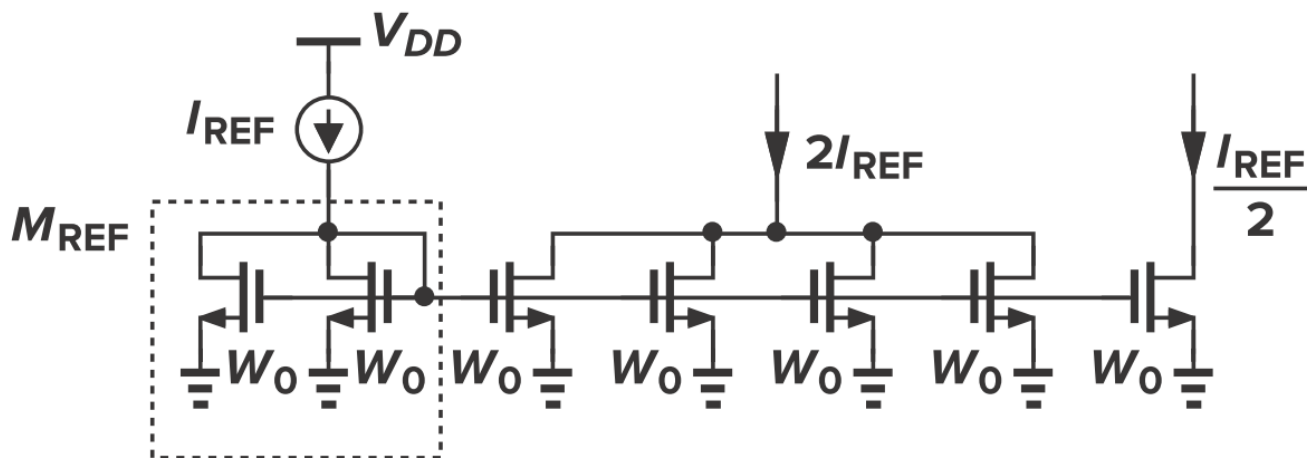


- 电流镜中的所有晶体管都采用相同的栅长
 - 保证相同的 L_{eff}
 - 短沟道器件的阈值电压对沟道长度有一定的依赖性
- 电流值之比只能通过调节晶体管的宽度来实现
- 采用“单元”晶体管，重复此器件实现电流复制

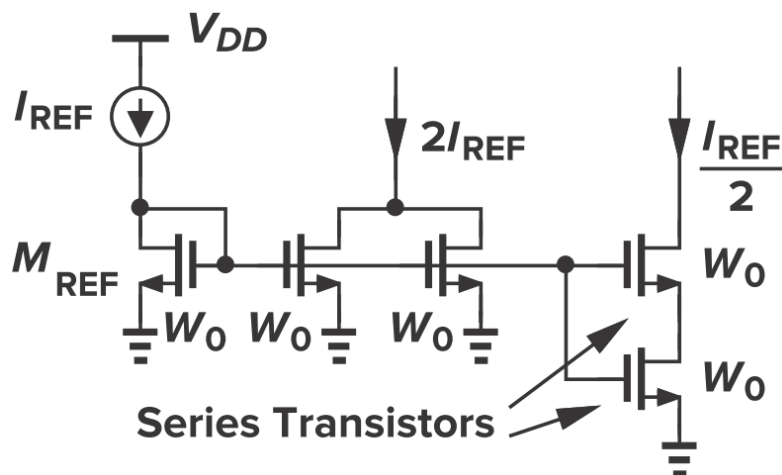


如何产生 $I_{REF}/2$ 的电流

- 二极管连接器件本身由两个“单元”器件构成



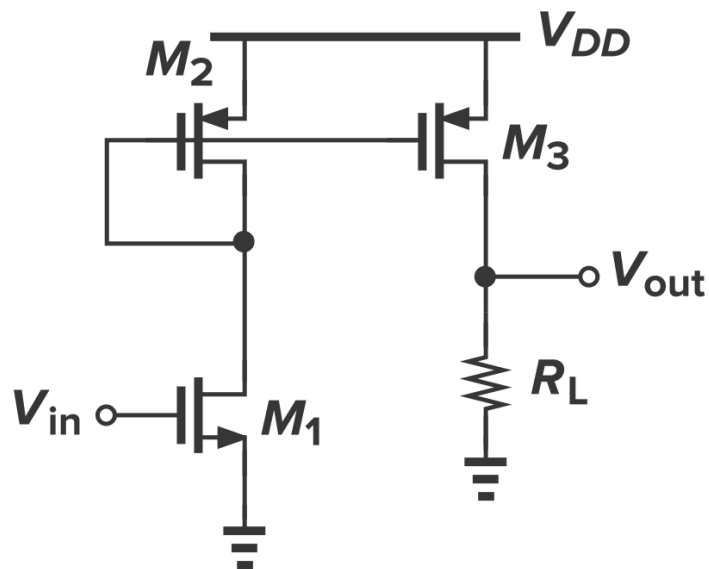
- 如果要生成多个电流，也可通过缩放沟道长度实现





例5.2 电流镜作为放大器

- 计算小信号增益

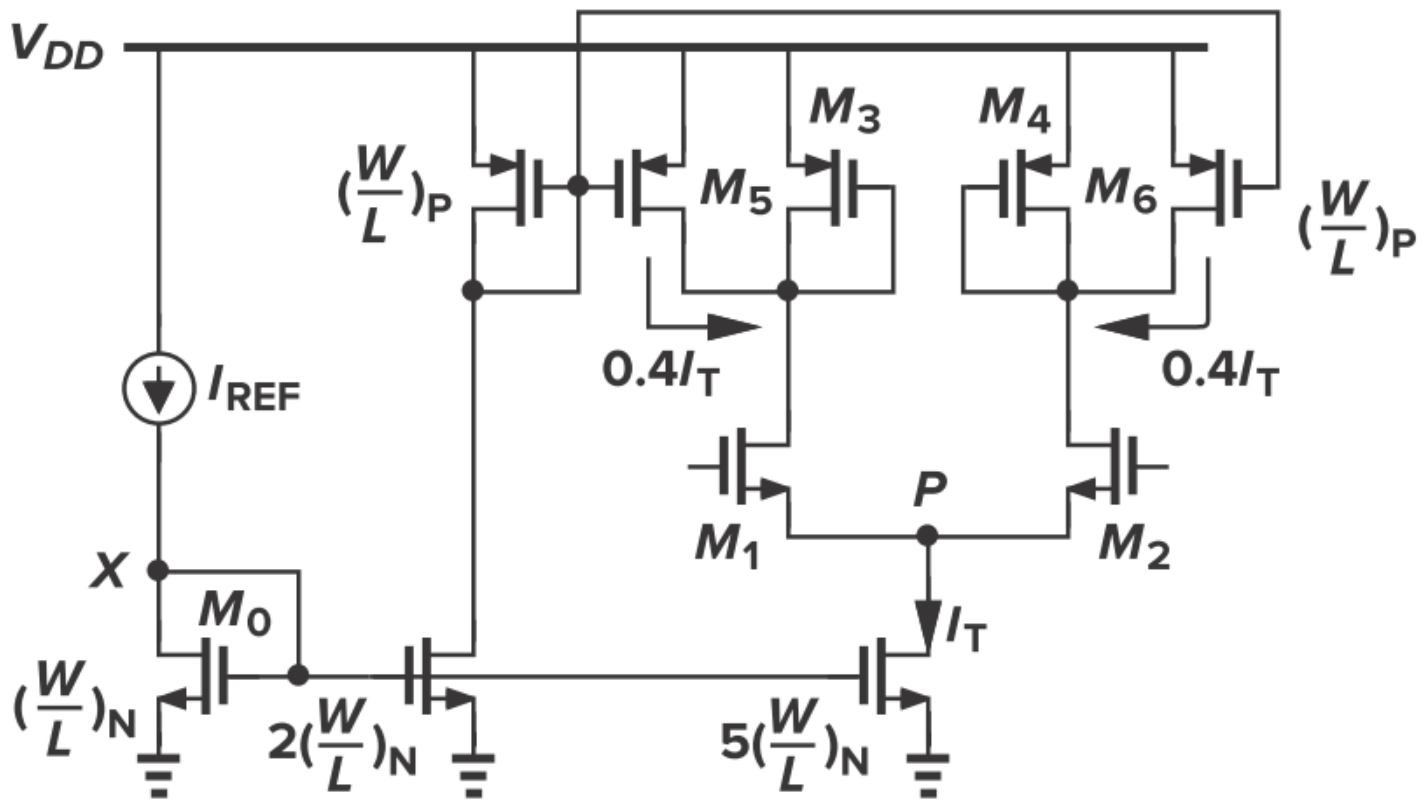


$$A_v = g_{m1} R_L (W/L)_3 / (W/L)_2$$

以功耗为代价！



基本电流镜应用实例





基本电流镜的问题

- 考虑沟道长度调制效应

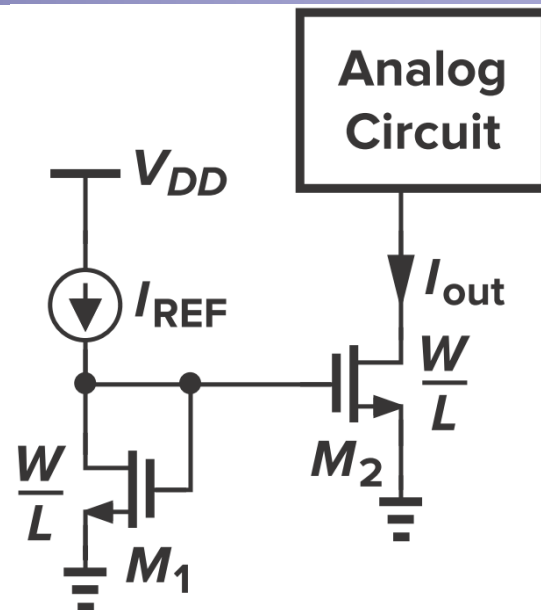
$$I_{D1} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_1 (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS1})$$

$$I_{D2} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L} \right)_2 (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS2})$$

$$\Rightarrow \frac{I_{D2}}{I_{D1}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \cdot \frac{1 + \lambda V_{DS2}}{1 + \lambda V_{DS1}}$$

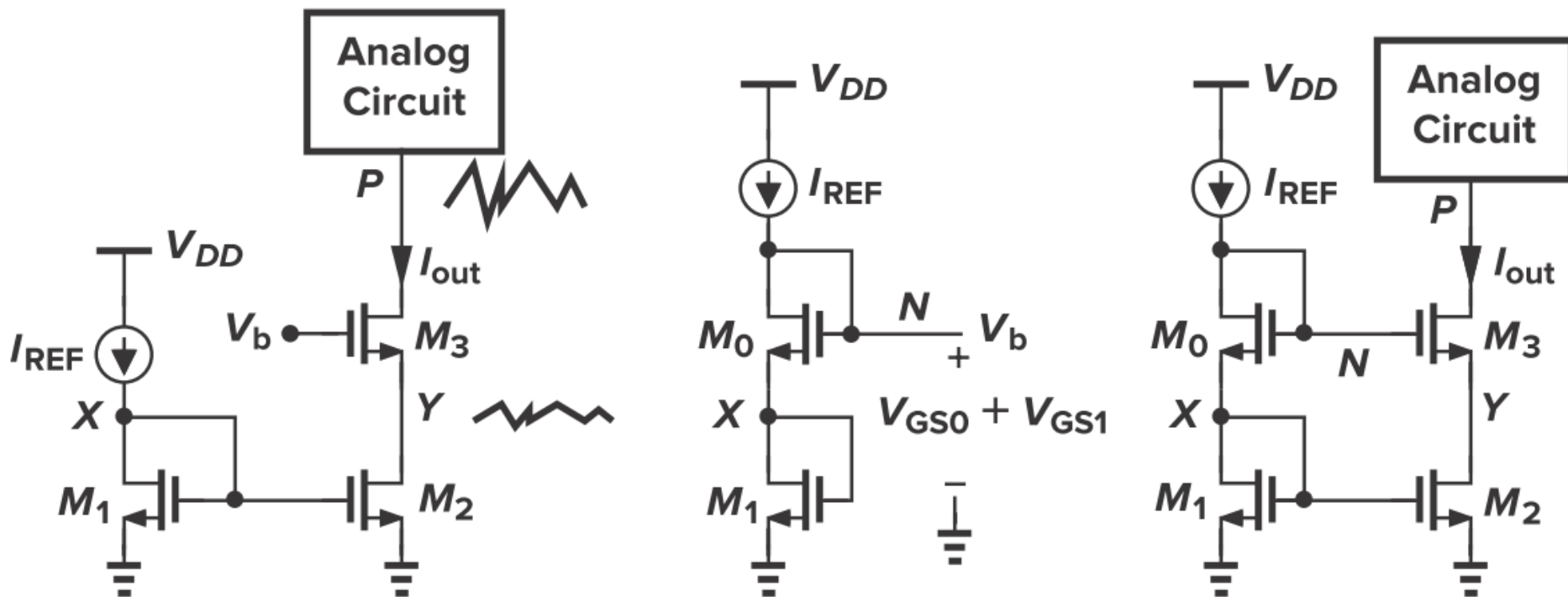
$$V_{DS1} = V_{GS1} = V_{GS2} \neq V_{DS2}$$

- 设计电路使得 V_{DS1} 和 V_{DS2} 相等
 - 迫使 V_{DS2} 等于 V_{DS1}
 - 迫使 V_{DS1} 等于 V_{DS2}





共源共栅电流镜



- 共源共栅器件可以起屏蔽作用，减小 V_Y 电压的变化
- $V_b - V_{GS3} = V_{DS2} = V_{GS1} \Rightarrow V_b = V_{GS3} + V_{GS1}$
- 通过设计 M_0 和 M_3 的宽长比使得 $V_{GS0} = V_{GS3}$



例 5.3

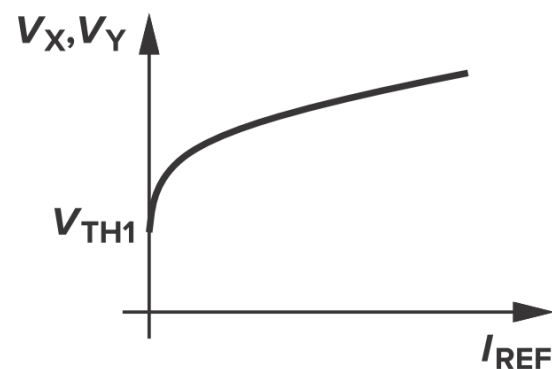
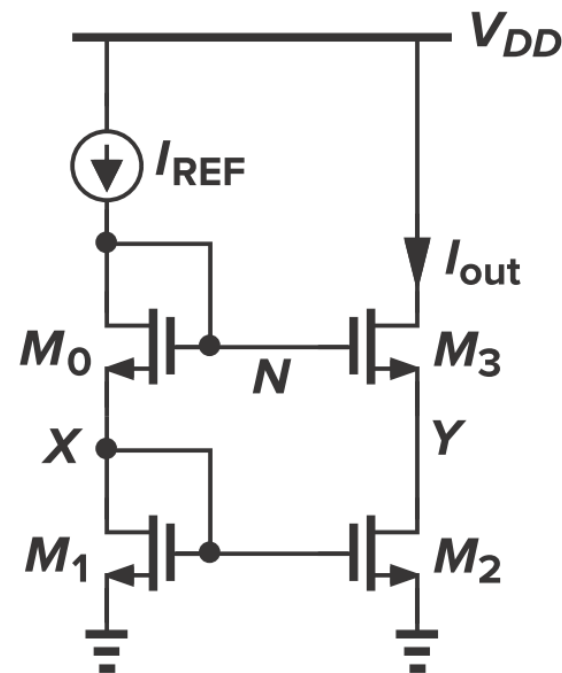
- 画出 V_X 和 V_Y 与 I_{REF} 的函数关系草图, 电流源两端需要的电压为 0.5V, 求出最大 I_{REF}

$$V_Y = V_X \approx \sqrt{2I_{REF}/[\mu_n C_{ox} (W/L)_1]} + V_{TH1}$$

$$V_N = V_{GS0} + V_{GS1}$$

$$= \sqrt{\frac{2I_{REF}}{\mu_n C_{ox}}} \left[\sqrt{\left(\frac{L}{W}\right)_0} + \sqrt{\left(\frac{L}{W}\right)_1} \right] + V_{TH0} + V_{TH1}$$

$$I_{REF,max} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{(V_{DD} - 0.5 \text{ V} - V_{TH0} - V_{TH1})^2}{(\sqrt{(L/W)_0} + \sqrt{(L/W)_1})^2}$$





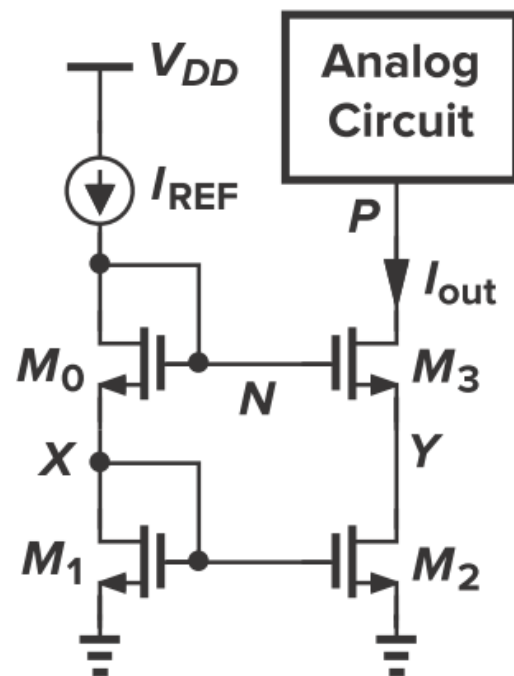
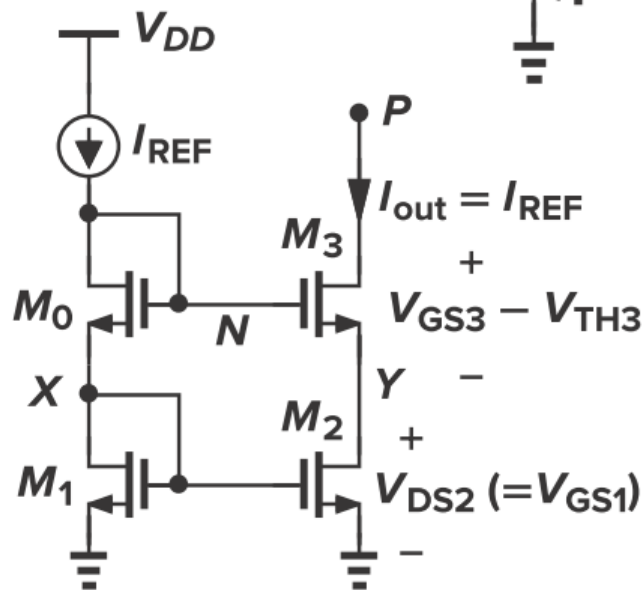
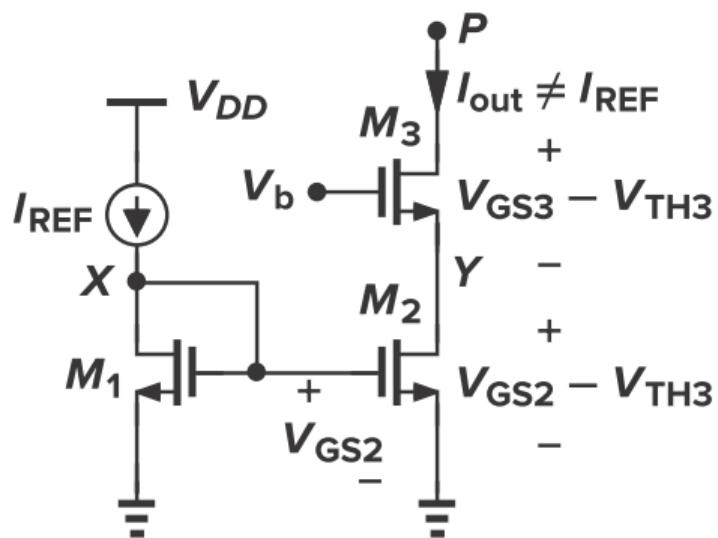
电压余度分析

- P点允许的最小电压为

$$V_N - V_{TH} = V_{GS0} + V_{GS1} - V_{TH}$$

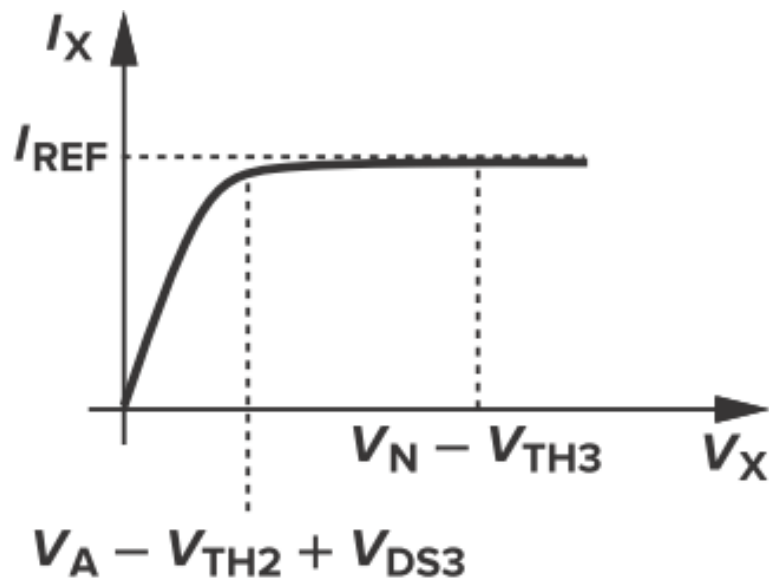
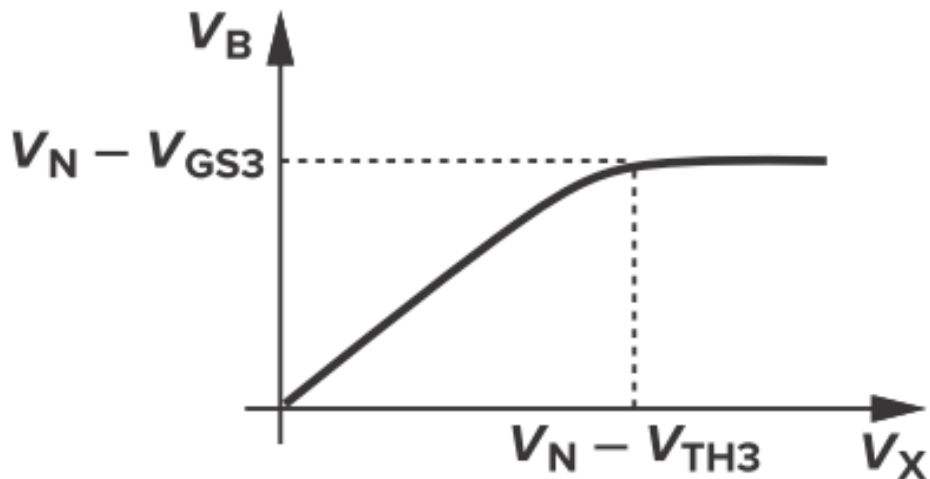
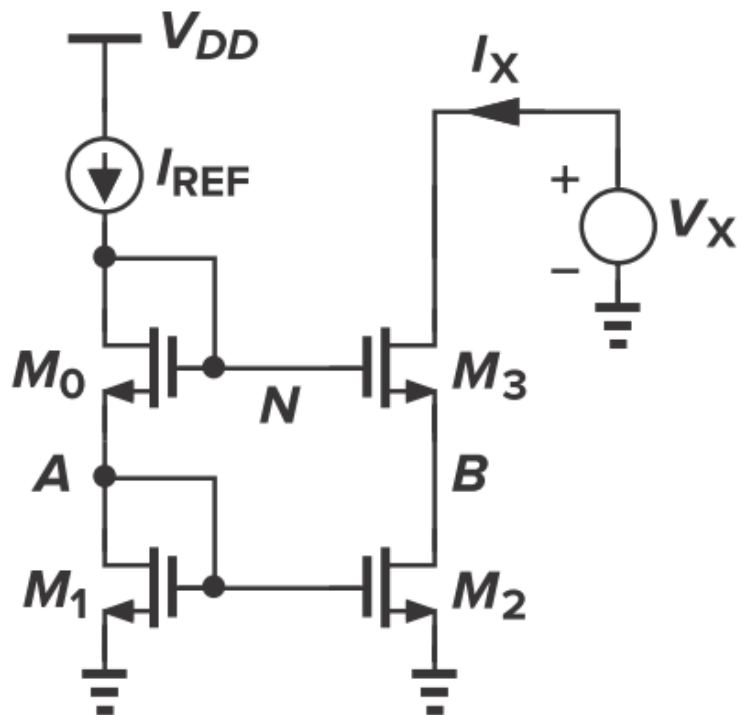
$$= (V_{GS0} - V_{TH}) + (V_{GS1} - V_{TH}) + V_{TH}$$

浪费了一个阈值电压的余度





例5.4 大信号分析

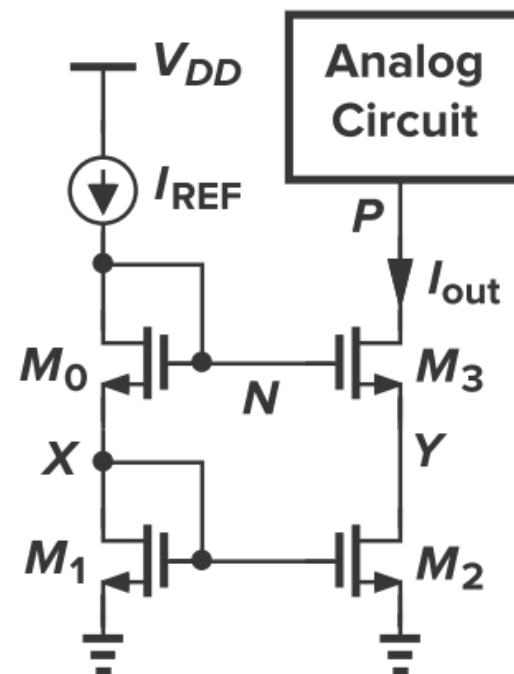
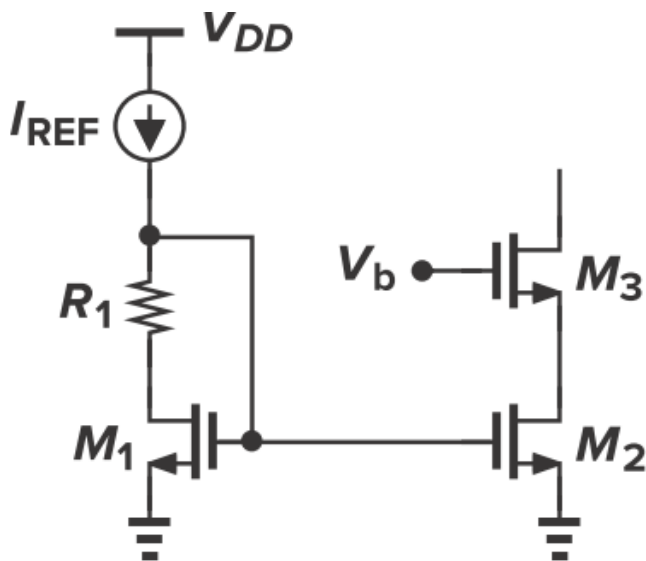


- M_2 和 M_3 谁先进入线性区？



如何减小电压余度的损失？

- 希望 V_{DS2} 只消耗一个过驱动电压
- 如何使 V_{DS1} 只消耗一个过驱动电压？



很难保证

$$R_1 I_{REF} \approx V_{TH1} \Rightarrow V_{DS1} = V_{GS1} - R_1 I_{REF} \approx V_{GS1} - V_{TH1}$$

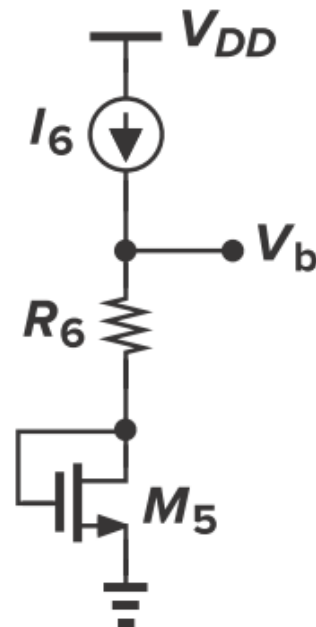
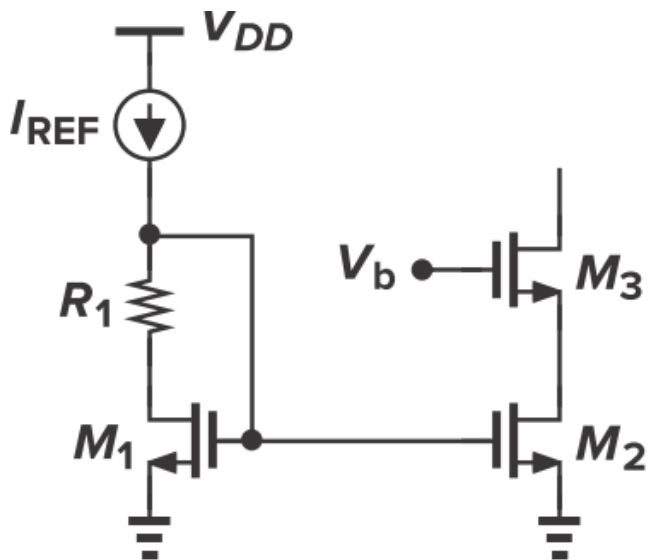
如何产生

$$V_b = V_{GS3} + (V_{GS1} - V_{TH1}) \Rightarrow V_{DS1} = V_{DS2}$$



如何产生 V_b

$$V_b = V_{GS3} + (V_{GS1} - V_{TH1})$$



$$V_b = V_{GS5} + R_6 I_6$$

$$V_{GS5} = V_{GS3}$$

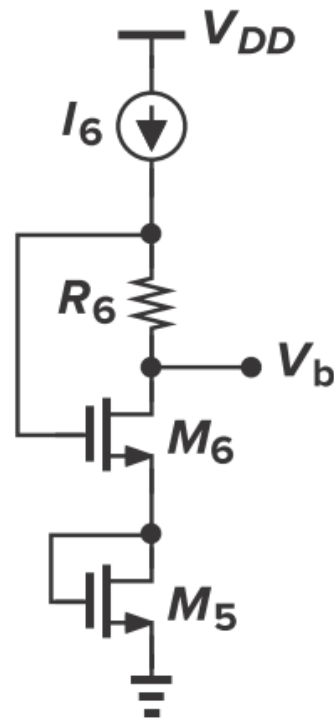
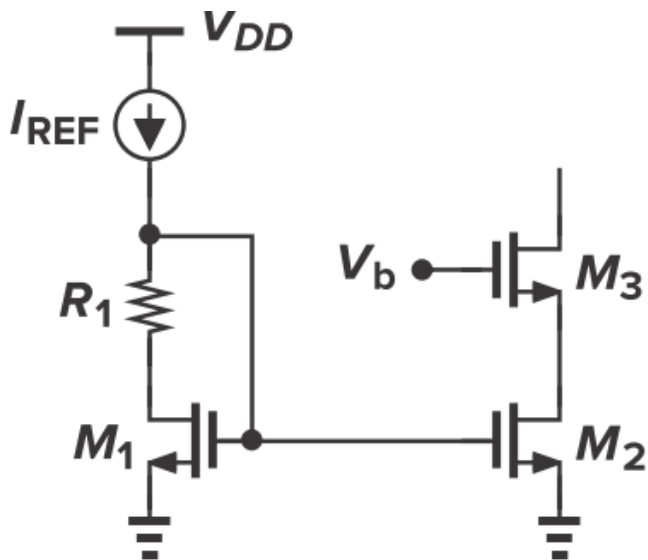
$$R_6 I_6 = V_{GS1} - V_{TH1} = V_{GS1} - R_1 I_{REF}$$

很难实现！



如何产生 V_b

$$V_b = V_{GS3} + (V_{GS1} - V_{TH1})$$

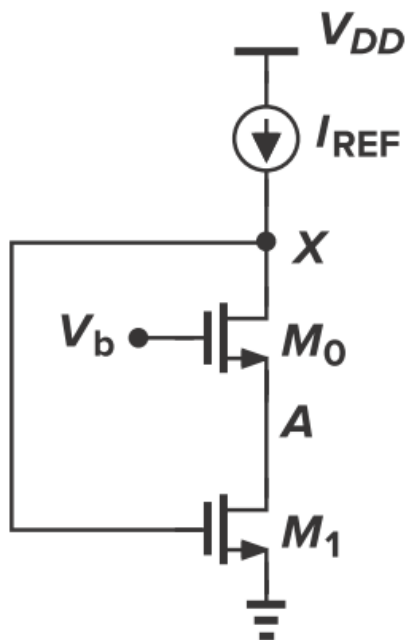


$$V_{GS5} = V_{GS3}$$

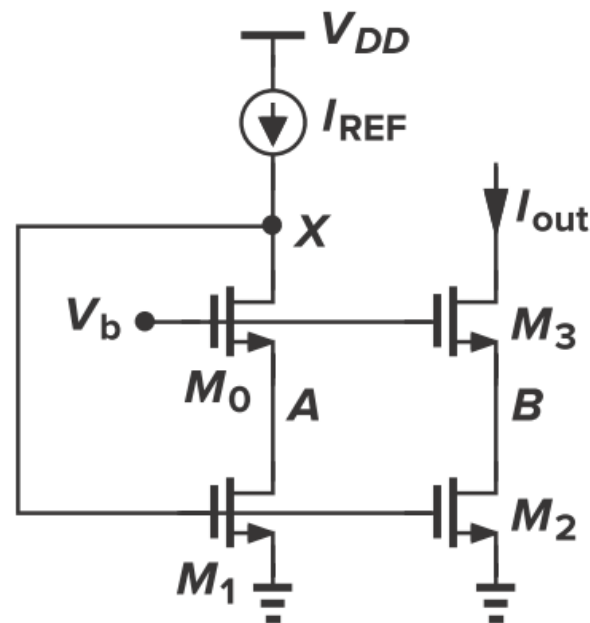
$$V_{GS6} - R_6 I_6 = V_{GS1} - V_{TH1} = V_{GS1} - R_1 I_{REF}$$



低压共源共栅电流镜



$$V_{DS1} = V_b - V_{GS0}$$



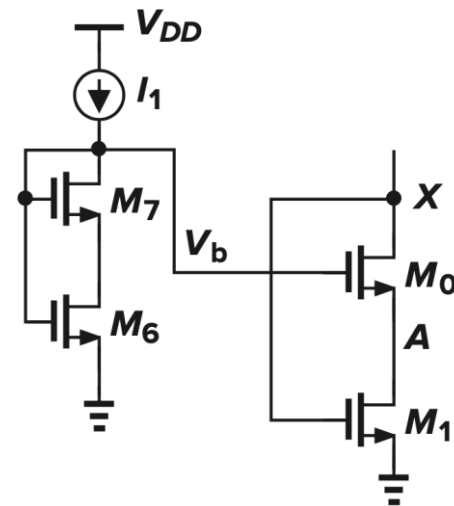
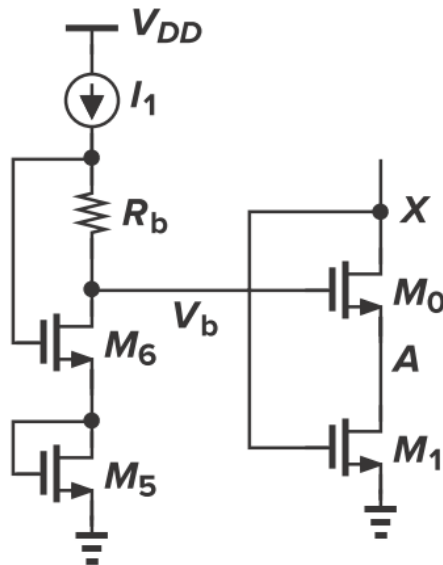
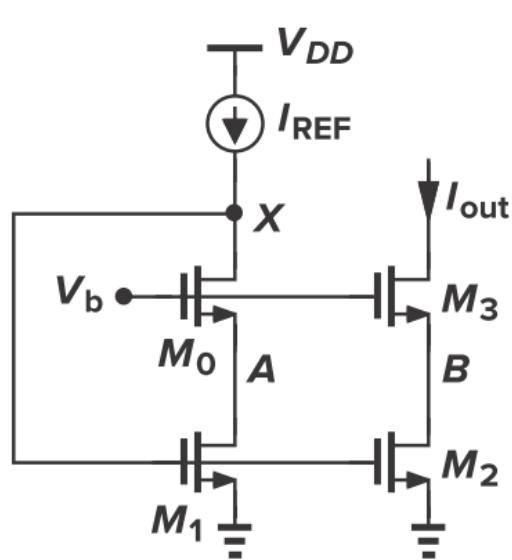
$$V_{GS0} = V_{GS3}$$

低压共源共栅结构

- 如何选择 V_b ?
- 如何产生 V_b ?



低压共源共栅电流镜



- 如何选择 V_b ?

M_0 工作在饱和区 $\Rightarrow V_b - V_{TH0} \leq V_X (= V_{GS1})$

M_1 工作在饱和区 $\Rightarrow V_{GS1} - V_{TH1} \leq V_A (= V_b - V_{GS0})$

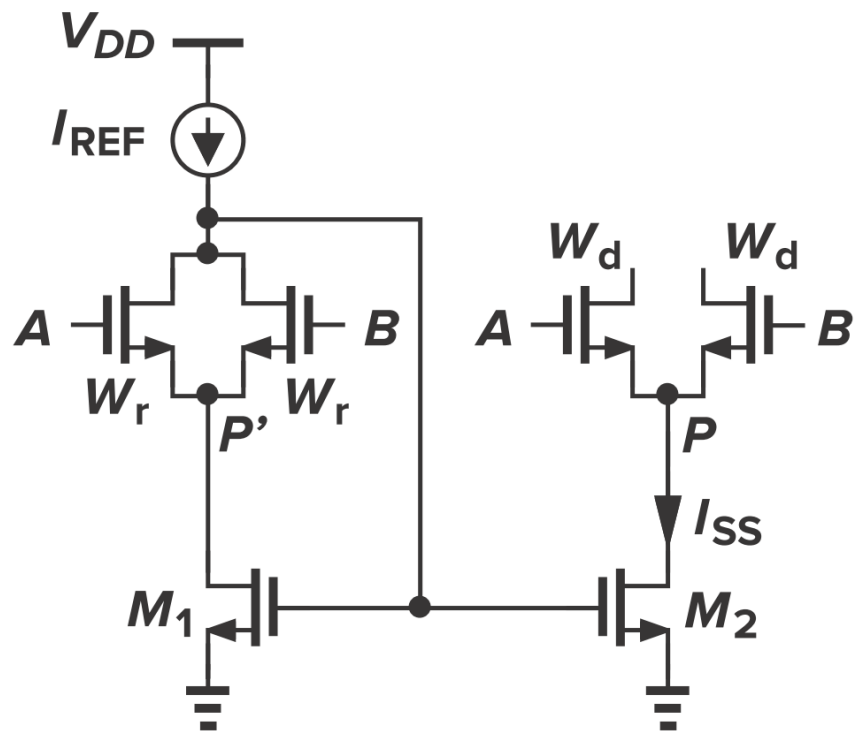
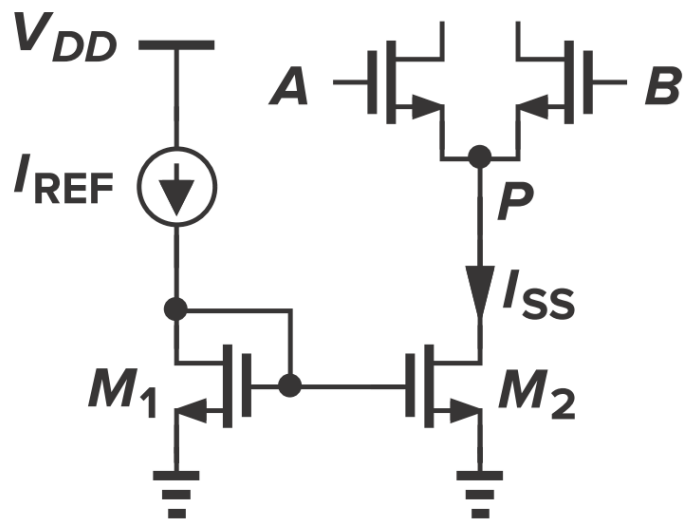
$$\Rightarrow V_{GS0} + (V_{GS1} - V_{TH1}) \leq V_b \leq V_{GS1} + V_{TH0}$$

- 如何产生 V_b ?



例 5.6 基本电流镜的改进

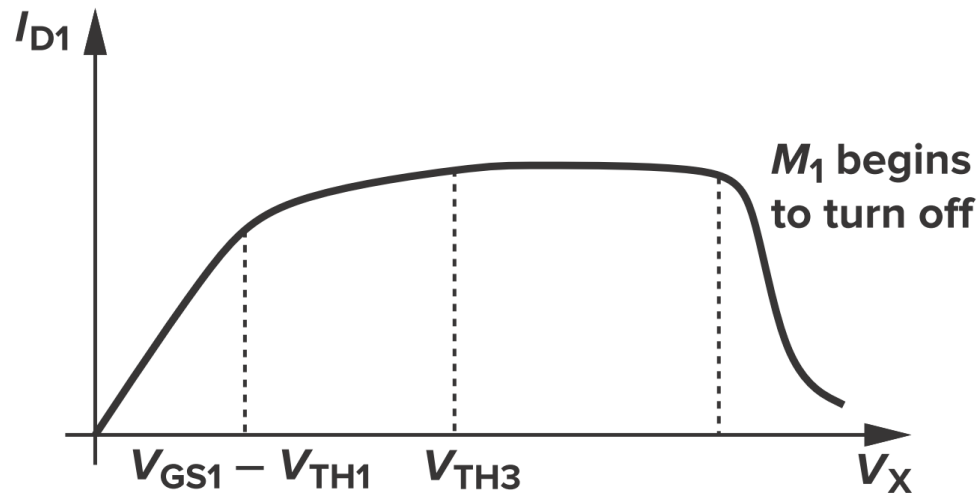
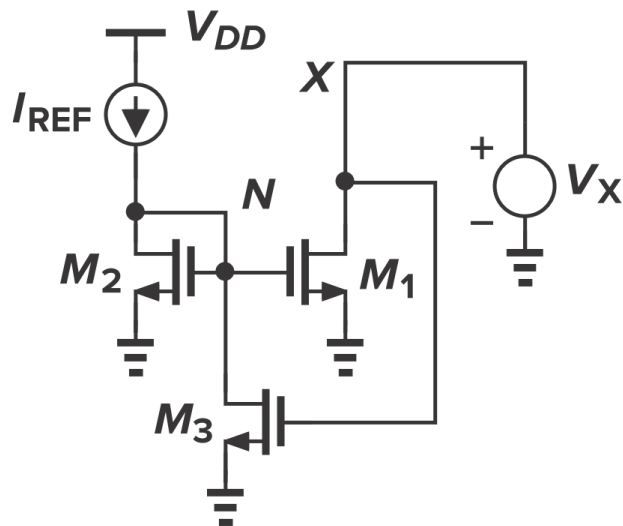
- 无法使用共源共栅电流镜



- 设法使 V_{DS1} 等于 V_{DS2}
- A点和B点共模输入电平不可过大，否则复制的差动对进入线性区，引入误差



例 5.7 另一种高输出阻抗的电流镜



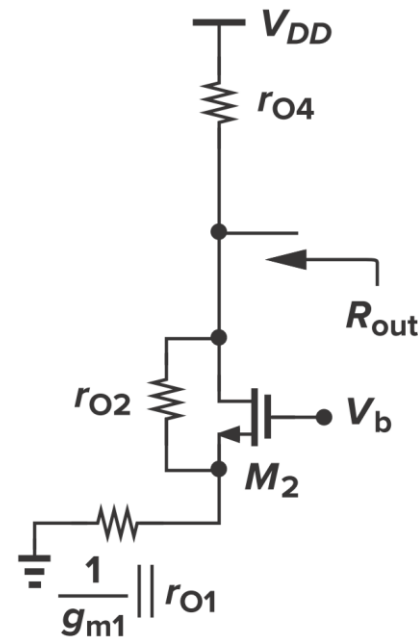
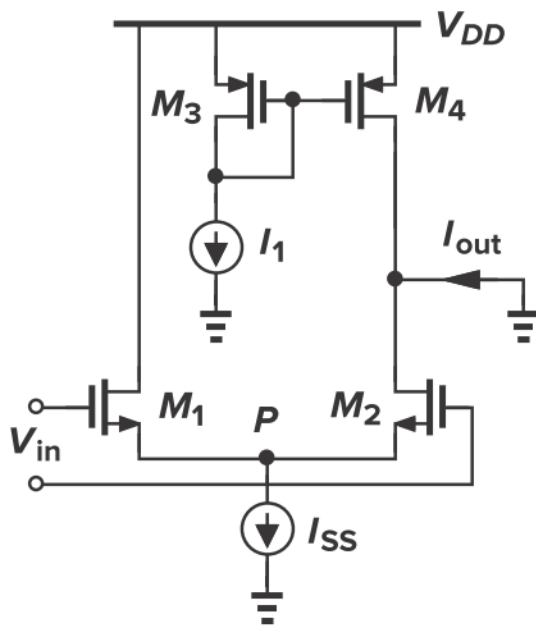
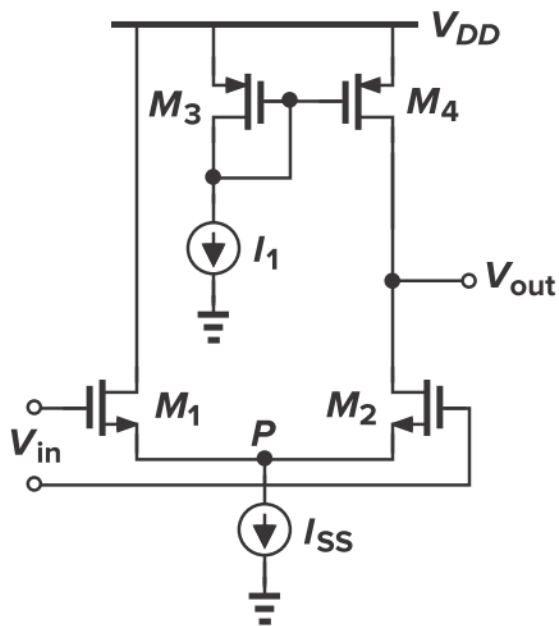
有电压余度限制,
 $V_X > V_{TH3}$

- 小信号特性?
- 大信号特性?



5.3 有源电流镜

- 电流镜作为单端输出差动放大器的电流源负载



$$|A_v| = G_m R_{out}$$

$$G_m = I_{out} / V_{in}$$

$$R_{deg} = (1/g_{m1}) \parallel r_{O1}$$

$$= (g_{m2} V_{in} / 2) / V_{in} \quad R_{out} = [(1 + g_{m2} r_{O2}) \bar{R}_{deg} + r_{O2}] \parallel r_{O4}$$

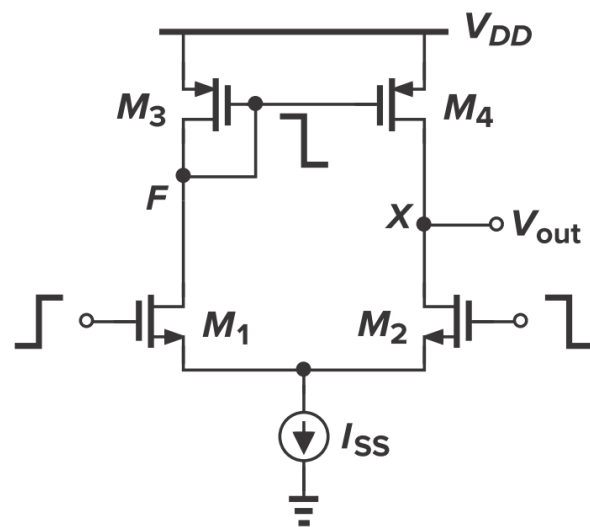
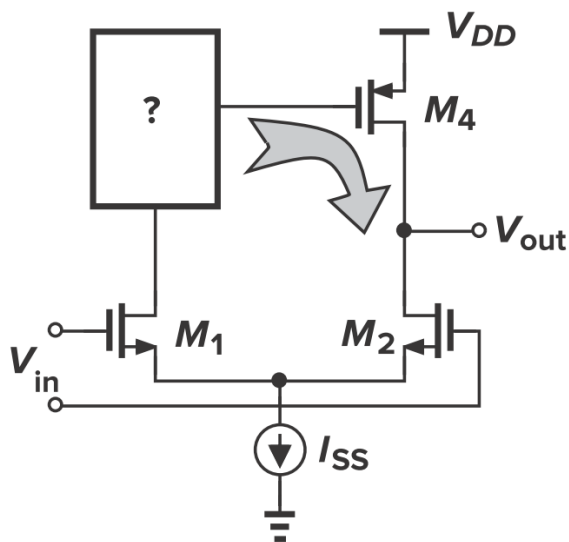
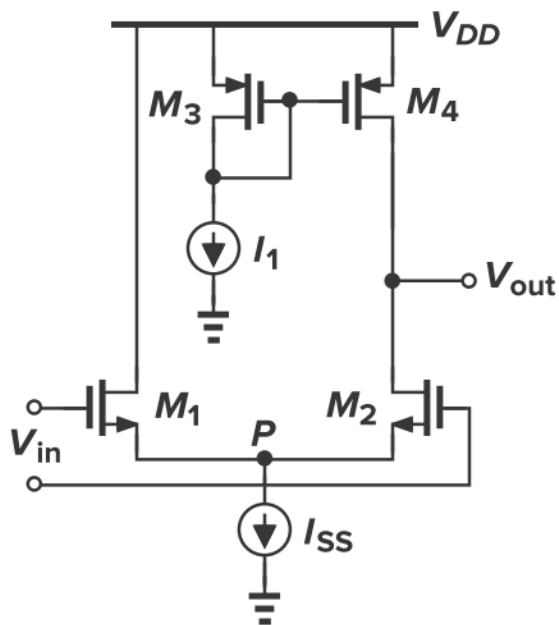
$$= g_{m2} / 2$$

$$= (2r_{O2}) \parallel r_{O4}$$

$$\Rightarrow |A_v| = \frac{g_{m2}}{2} [(2r_{O2}) \parallel r_{O4}]$$



有源负载差动对

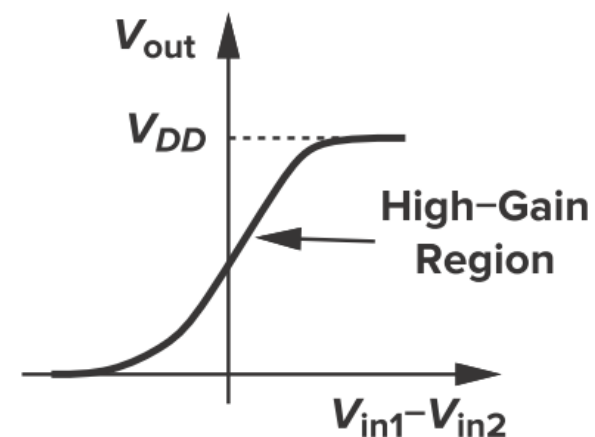
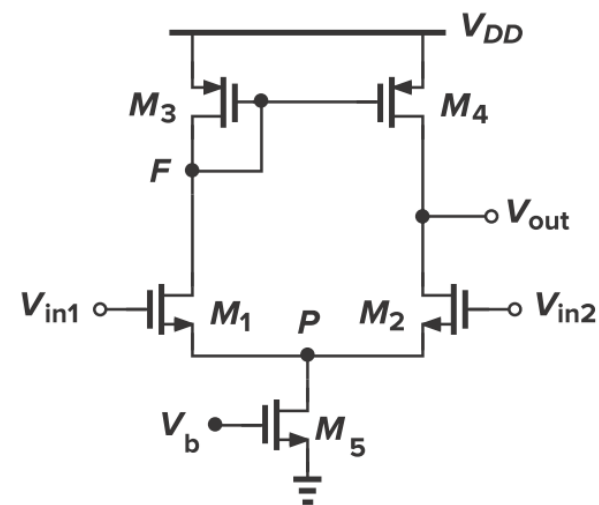


- M_1 的小信号漏电流被浪费了
- 如何把这部分电流利用起来？
- 五管OTA： M_3 和 M_4 相同且构成有源电流镜
- M_3 如何提高增益的？



大信号分析

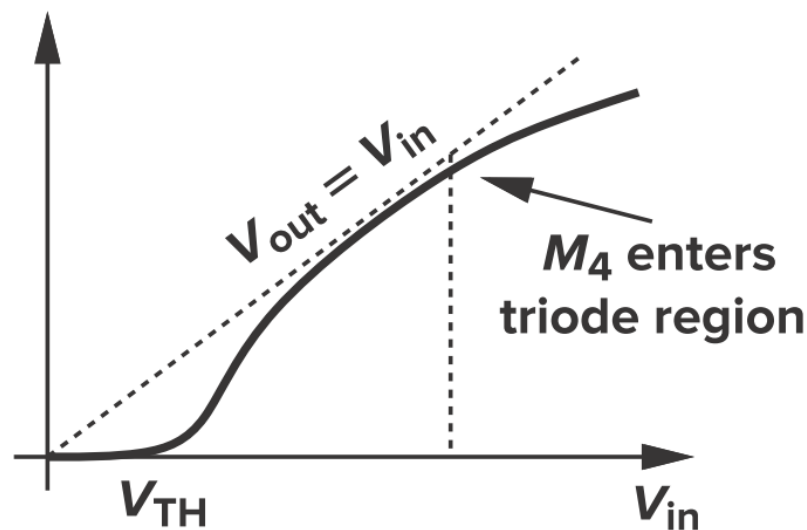
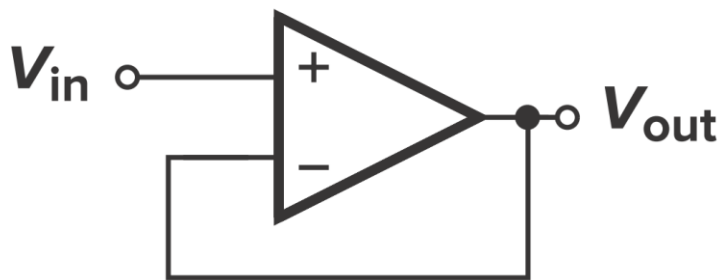
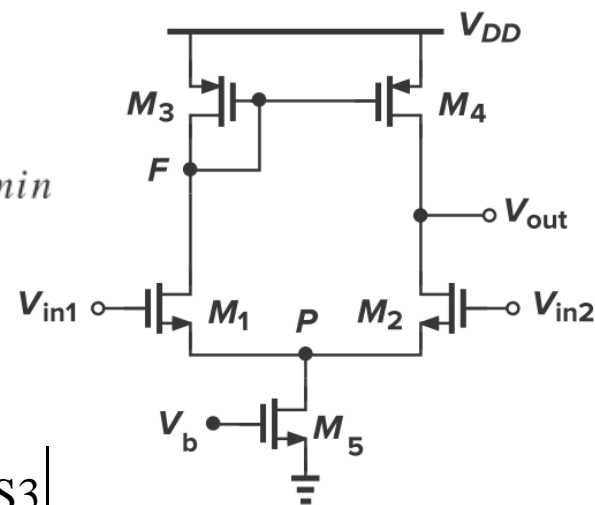
- 当 V_{in1} 比 V_{in2} 小很多, M_1 , M_3 和 M_4 均关断。没有电流能从 V_{DD} 流出, M_2 和 M_5 都工作在深线性区, $V_{out} = 0$ 。
- 当 V_{in1} 接近 V_{in2} , M_1 导通, 使 I_{D5} 的一部分流过 M_3 , 使 M_4 导通。 V_{out} 开始依赖于 I_{D4} 和 I_{D2} 之间的差值。
- 当 V_{in1} 和 V_{in2} 非常接近时, M_2 和 M_4 都工作在饱和区, 小信号增益很高。
- 当 V_{in1} 大于 V_{in2} 时, I_{D4} 增大而 I_{D2} 减小, V_{out} 增大, 最终使 M_4 进入线性区。
- 当 V_{in1} 比 V_{in2} 大很多, M_2 关断, M_4 的电流为0且工作的深线性区, $V_{out} = V_{DD}$





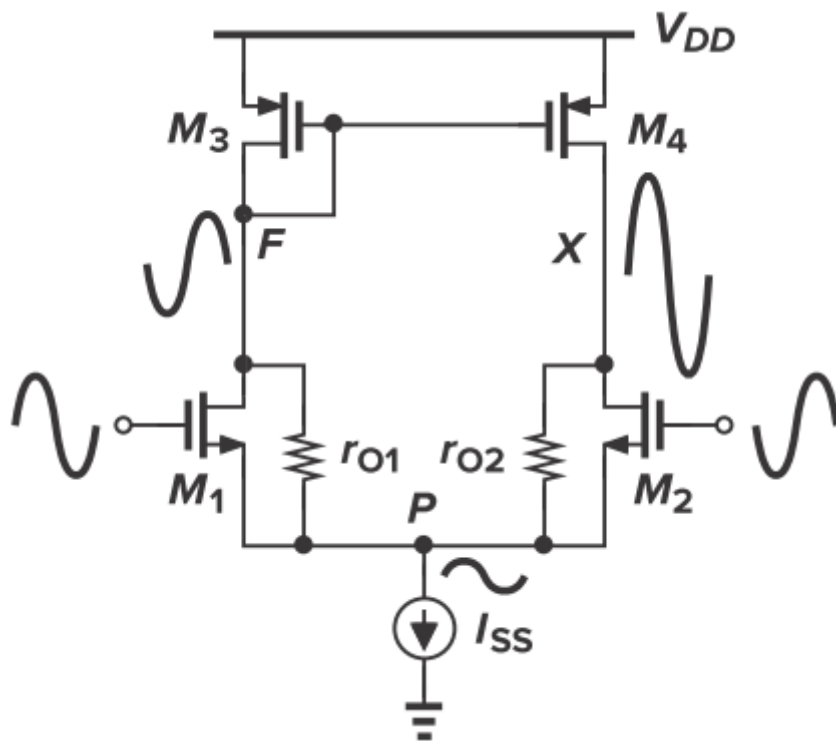
输入/输出共模电平

- 为了得到最大摆幅，输入共模电平应该尽可能低，最低值为 $V_{GS1,2} + V_{DS5,min}$
- 输入共模电平对输出摆幅的限制是此电路的一个严重缺点
- 如果电路完全对称， $V_{out} = V_F = V_{DD} - |V_{GS3}|$
- 由于电路存在不对称，会导致 V_{out} 产生一个大的偏差，容易使 M_2 或 M_4 进入线性区。该电路很少开环使用。





小信号分析

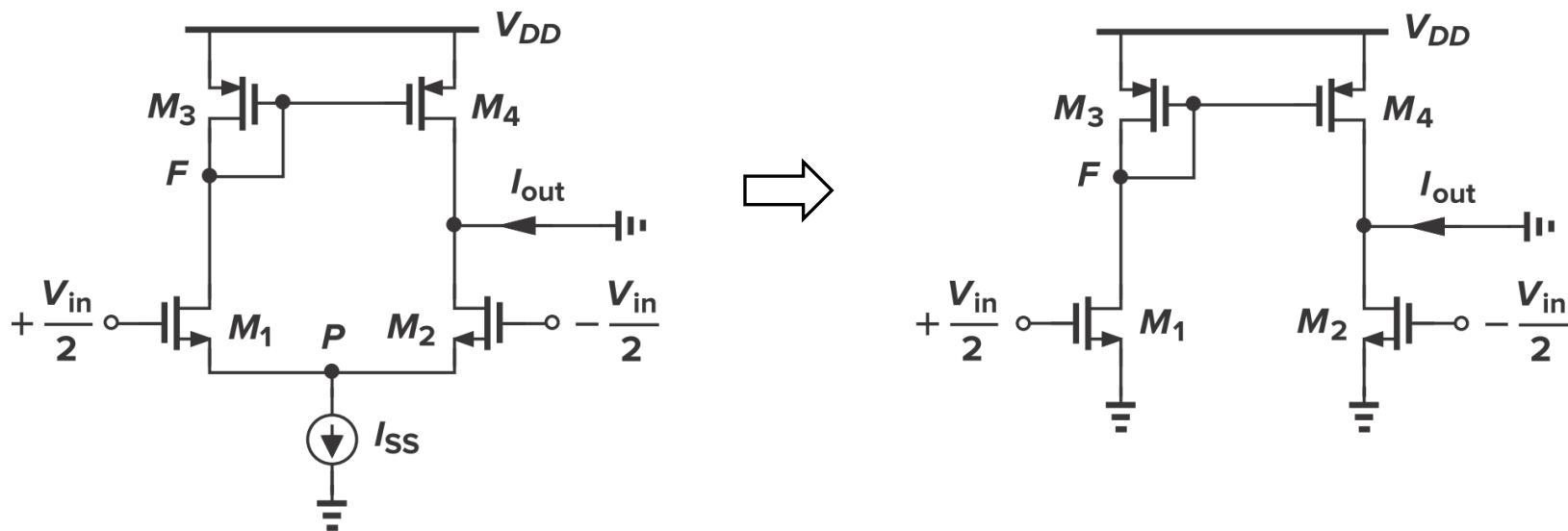


- 能否使用半边电路方法分析？
- Y点的电压变化幅度比F点大，左边是二极管连接负载，右边类似电流源负载



近似分析

- 计算 G_m



- 节点F的摆幅很小，F点对P点的影响可以忽略不计，P点可近似看成虚地点

$$I_{D1} = |I_{D3}| = |I_{D4}| = g_{m1,2} V_{in}/2$$

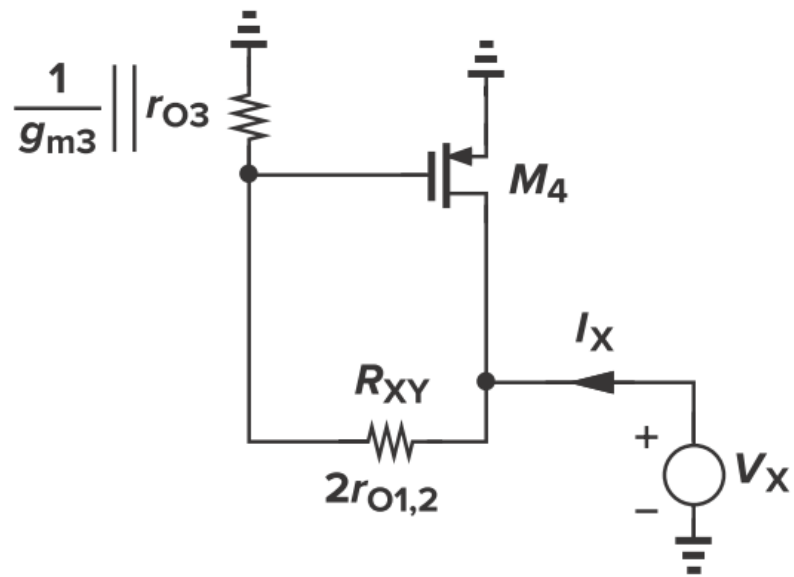
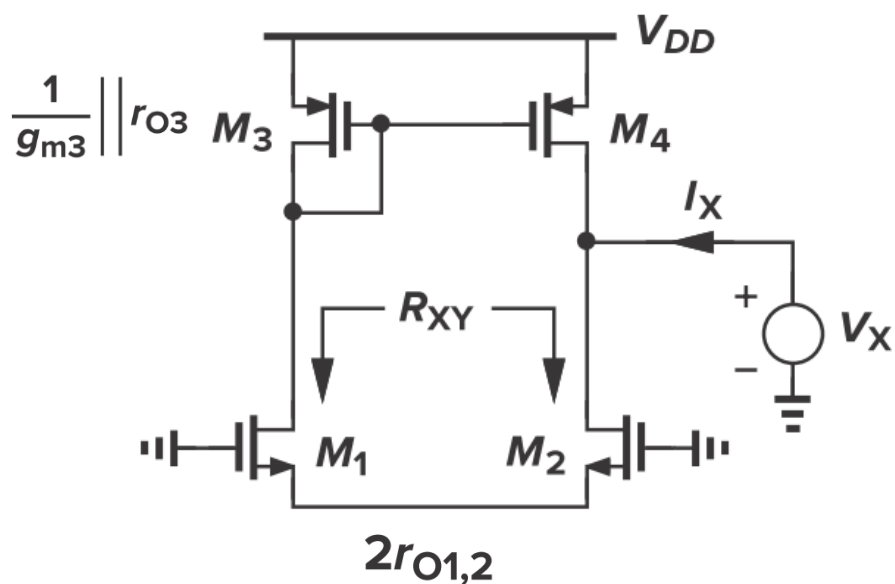
$$I_{D2} = -g_{m1,2} V_{in}/2$$

$$\Rightarrow I_{out} = -g_{m1,2} V_{in} \Rightarrow |G_m| = g_{m1,2}$$



近似分析

- 计算 R_{out}



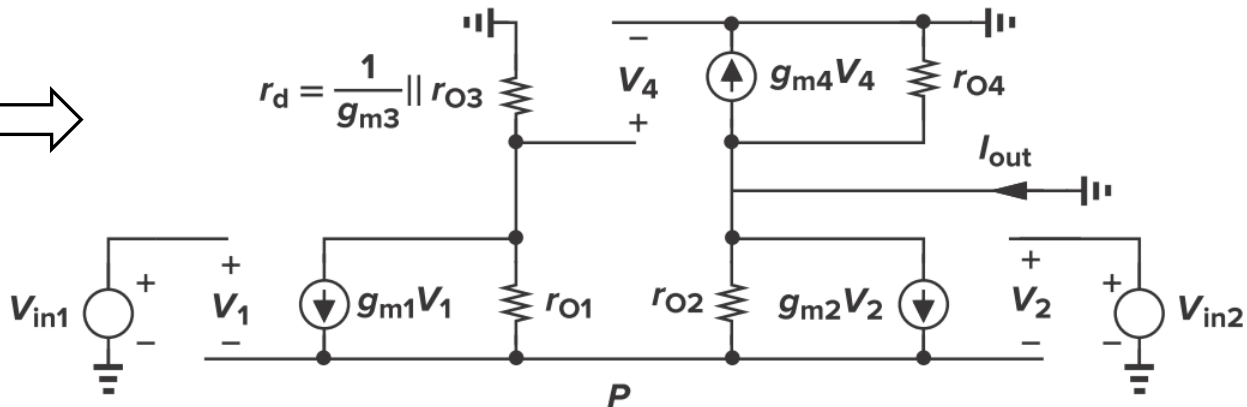
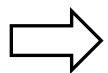
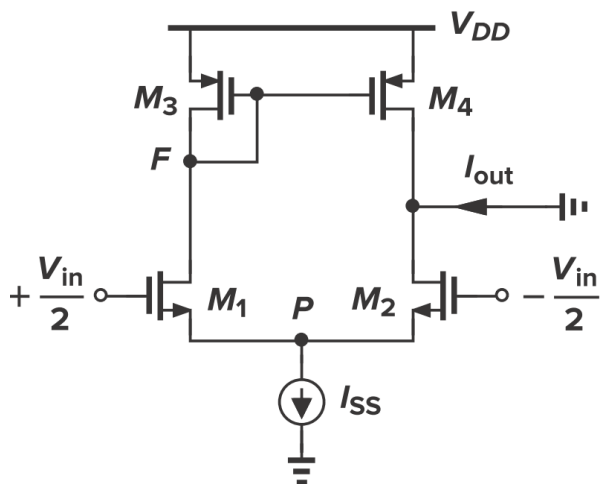
$$I_X = \frac{V_X}{2r_{O1,2} + \frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3}} \left[1 + \left(\frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3} \right) g_{m4} \right] + \frac{V_X}{r_{O4}}$$

$$\Rightarrow R_{out} \approx r_{O2} \parallel r_{O4} \quad \Rightarrow |A_v| = G_m R_{out} = g_{m1,2} (r_{O2} \parallel r_{O4})$$



精确分析

• 计算 G_m



$$\left(-\frac{V_4}{r_d} - g_{m1}V_1\right)r_{O1} + V_{in1} - V_1 = V_4$$

$$g_{m2}V_2 - \frac{V_{in2} - V_2}{r_{O2}} = \frac{V_4}{r_d}$$

$$V_1 - V_2 = V_{in1} - V_{in2}$$

$$I_{out} = g_{m4}V_4 + V_4/r_d$$

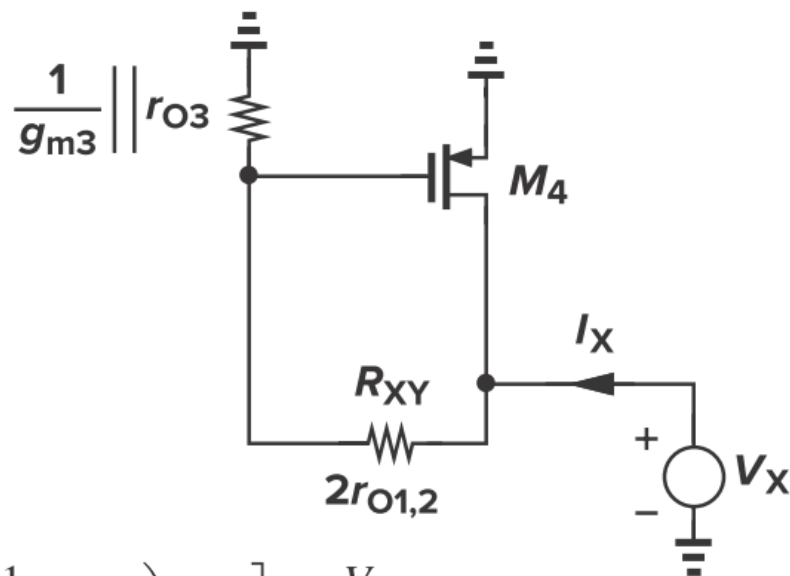
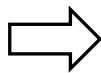
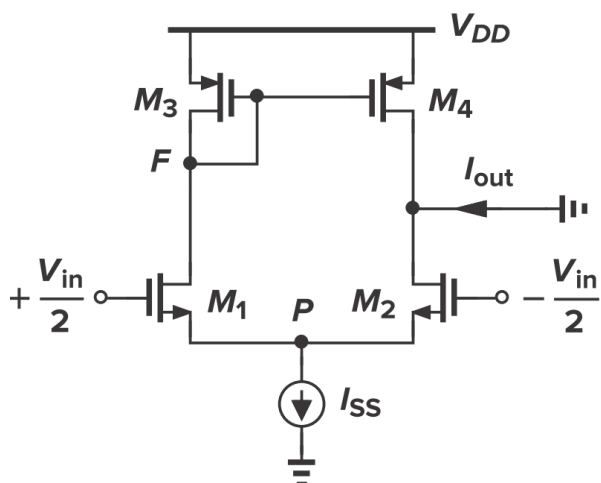
$$\Rightarrow I_{out} = -g_{m1}r_{O1} \frac{g_{m4}r_d + 1}{r_d + 2r_{O1}} (V_{in1} - V_{in2})$$

$$\Rightarrow G_m = -g_{m1}r_{O1} \frac{g_{m4}r_d + 1}{r_d + 2r_{O1}}$$



精确分析

- 计算 R_{out}



$$I_X = \frac{V_X}{2r_{O1,2} + \frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3}} \left[1 + \left(\frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3} \right) g_{m4} \right] + \frac{V_X}{r_{O4}}$$

$$\Rightarrow \frac{I_X}{V_X} = \frac{1 + g_{m4}r_d}{2r_{O1} + r_d} + \frac{1}{r_{O4}} = \frac{(1 + g_{m4}r_d)r_{O4} + 2r_{O1} + r_d}{(2r_{O1} + r_d)r_{O4}}$$

$$\Rightarrow G_m R_{out} = -g_{m1}r_{O1} \frac{(g_{m4}r_d + 1)r_{O4}}{(g_{m4}r_d + 1)r_{O4} + 2r_{O1} + r_d}$$



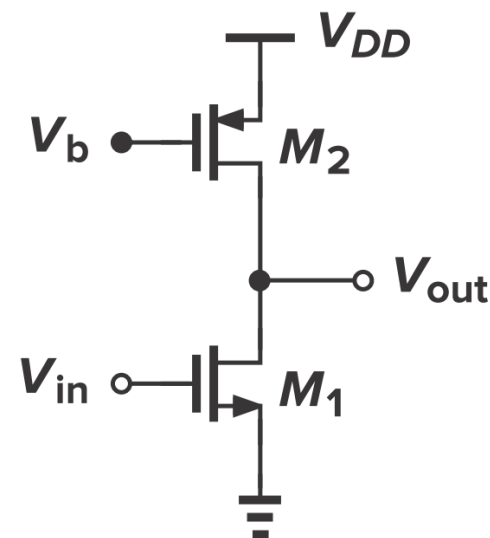
精确分析

- 计算 $G_m R_{out}$

$$G_m R_{out} = -g_{m1} r_{O1} \frac{(g_{m4} r_d + 1) r_{O4}}{(g_{m4} r_d + 1) r_{O4} + 2r_{O1} + r_d}$$

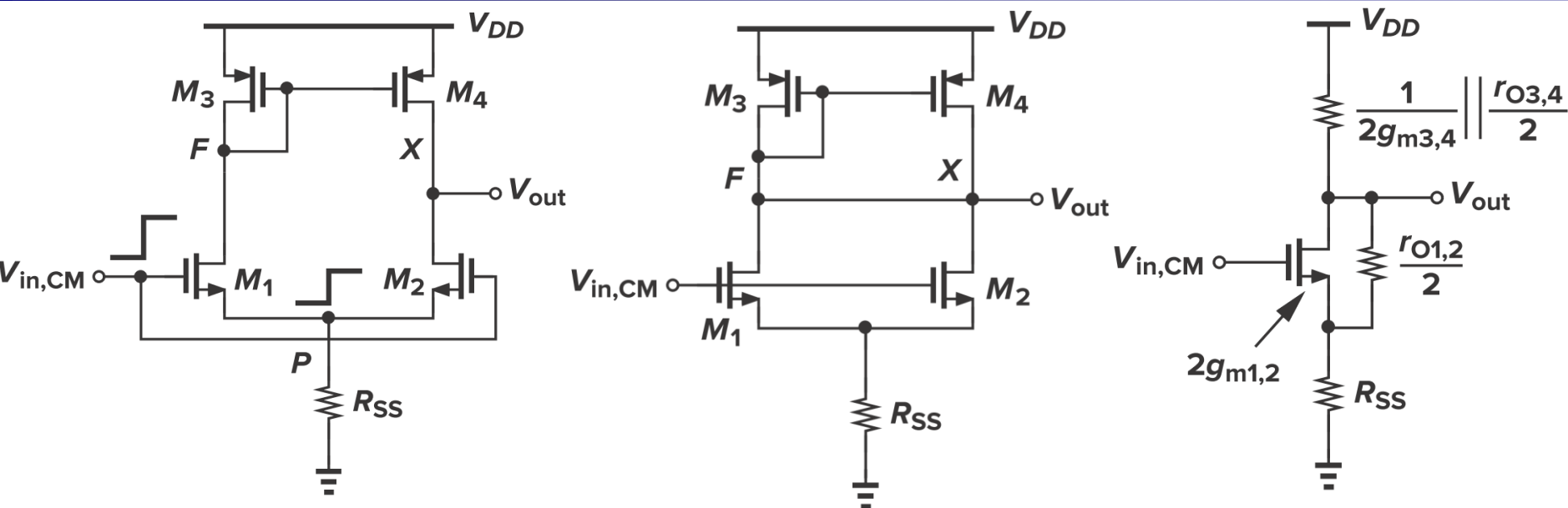
$$\Rightarrow G_m R_{out} = -g_{m1} r_{O1} r_{O4} \frac{2g_{m3} r_{O3} + 1}{(2g_{m3} r_{O3} + 1) r_{O4} + 2r_{O1} (1 + g_{m3} r_{O3}) + r_{O3}}$$
$$= -\frac{g_{m1} r_{O1} r_{O4}}{r_{O1} + r_{O3}} \cdot \frac{2g_{m3} r_{O3} + 1}{2(g_{m3} r_{O3} + 1)}$$

$$\Rightarrow |A_v| = \boxed{g_{m1} (r_{O1} || r_{O4})} \frac{2g_{m4} r_{O4} + 1}{2(g_{m4} r_{O4} + 1)}$$





共模特性



- 共模增益：输入共模电平的变化产生的单端输出的变化

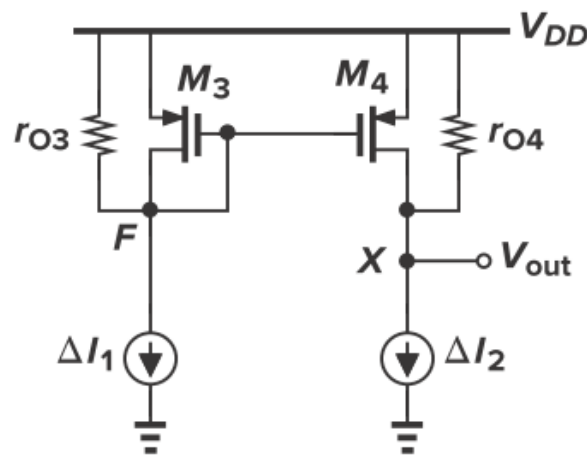
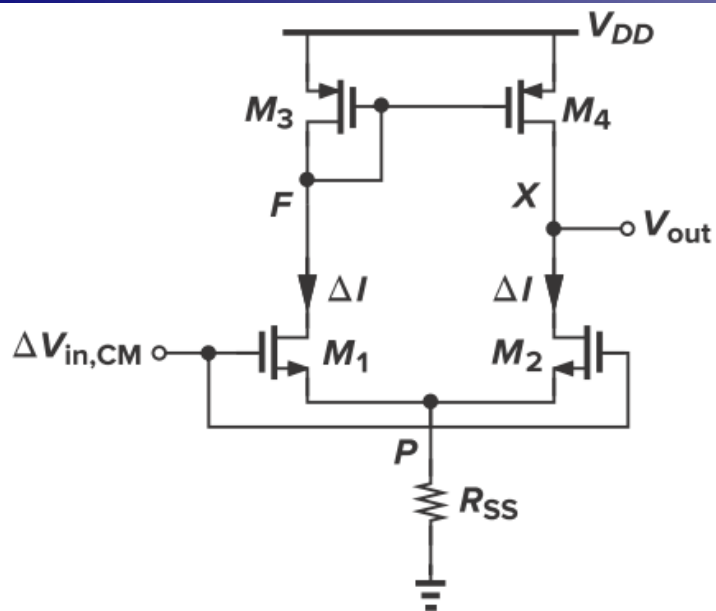
$$A_{CM} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in,CM}}$$

- 不考虑 M_1 和 M_2 的沟道长度调制效应

$$A_{CM} \approx \frac{-\frac{1}{2g_{m3,4}} \parallel \frac{r_{O3,4}}{2}}{\frac{1}{2g_{m1,2}} + R_{SS}} = \frac{-1}{1 + 2g_{m1,2}R_{SS}} \frac{g_{m1,2}}{g_{m3,4}}$$



共模特性



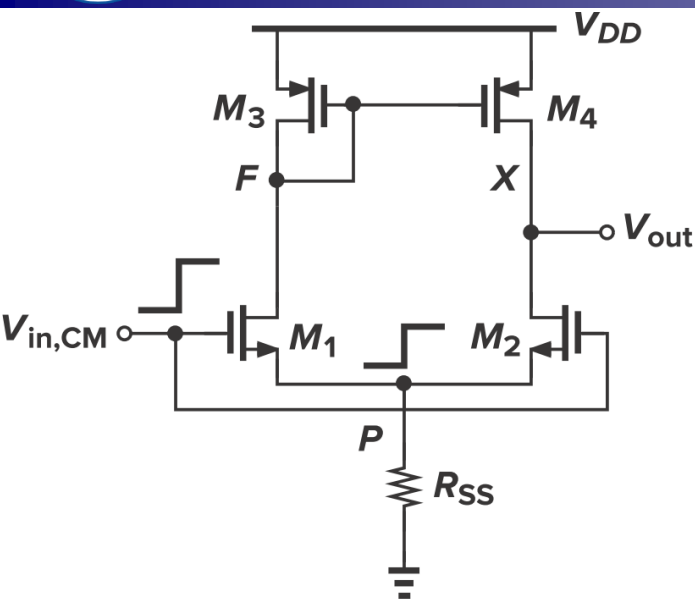
- 为什么共模增益不是0?

$$\Delta V_F = \Delta I_1 \left(\frac{1}{g_{m3}} \parallel r_{O3} \right) \Rightarrow |\Delta I_{D4}| = g_{m4} \Delta V_F = g_{m4} \Delta I_1 \frac{r_{O3}}{1 + g_{m3} r_{O3}}$$

$$\Rightarrow \Delta V_{out} = (\Delta I_1 g_{m4} \frac{r_{O3}}{1 + g_{m3} r_{O3}} - \Delta I_2) r_{O4} = -\Delta I \frac{1}{g_{m3} r_{O3} + 1} r_{O4}$$



共模特性



$$A_{CM} \approx \frac{-\frac{1}{2g_{m3,4}} \parallel \frac{r_{O3,4}}{2}}{\frac{1}{2g_{m1,2}} + R_{SS}} = \frac{-1}{1 + 2g_{m1,2}R_{SS}} \frac{g_{m1,2}}{g_{m3,4}}$$

$$A_{DM} = g_{m1}(r_{O1} \parallel r_{O4})$$

$$\Rightarrow \text{CMRR} = \left| \frac{A_{DM}}{A_{CM}} \right| = g_{m1,2}(r_{O1,2} \parallel r_{O3,4}) \frac{g_{m3,4}(1 + 2g_{m1,2}R_{SS})}{g_{m1,2}}$$

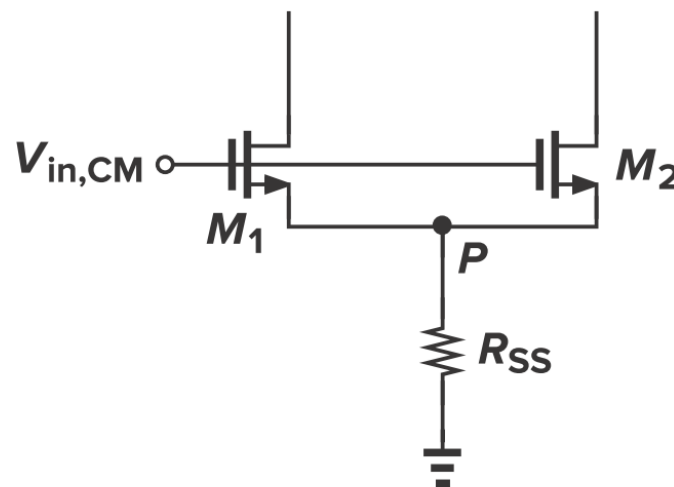
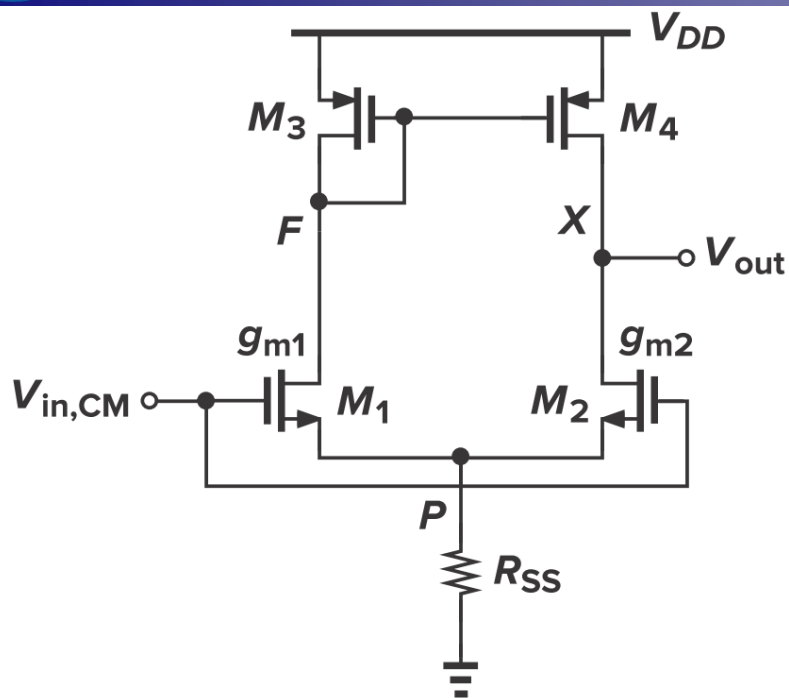
CMRR的数量级是
 $(g_m r_o)^2$

$$= (1 + 2g_{m1,2}R_{SS})g_{m3,4}(r_{O1,2} \parallel r_{O3,4})$$

- 即使完全匹配，输出信号也会因为输入信号共模变化而变差，特别是在高频时。



失配的影响



$$\Delta I_{D1} = g_{m1}(\Delta V_{in,CM} - \Delta V_P)$$

$$= \frac{\Delta V_{in,CM}}{R_{SS} + \frac{1}{g_{m1} + g_{m2}}} \frac{g_{m1}}{g_{m1} + g_{m2}}$$

$$\Delta I_{D2} = g_{m2}(\Delta V_{in,CM} - \Delta V_P)$$

$$= \frac{\Delta V_{in,CM}}{R_{SS} + \frac{1}{g_{m1} + g_{m2}}} \frac{g_{m2}}{g_{m1} + g_{m2}}$$

$$\Delta V_P = \Delta V_{in,CM} \frac{R_{SS}}{R_{SS} + \frac{1}{g_{m1} + g_{m2}}} \Rightarrow$$

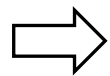


失配的影响

$$|\Delta I_{D4}| = g_{m4}[(1/g_{m3}) \parallel r_{O3}] \Delta I_{D1}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta V_{out} &= \left[\frac{g_{m1} \Delta V_{in,CM}}{1 + (g_{m1} + g_{m2}) R_{SS}} \frac{r_{O3}}{r_{O3} + \frac{1}{g_{m3}}} - \frac{g_{m2} \Delta V_{in,CM}}{1 + (g_{m1} + g_{m2}) R_{SS}} \right] r_{O4} \\ &= \frac{\Delta V_{in,CM}}{1 + (g_{m1} + g_{m2}) R_{SS}} \frac{(g_{m1} - g_{m2}) r_{O3} - g_{m2}/g_{m3}}{r_{O3} + \frac{1}{g_{m3}}} r_{O4} \end{aligned}$$

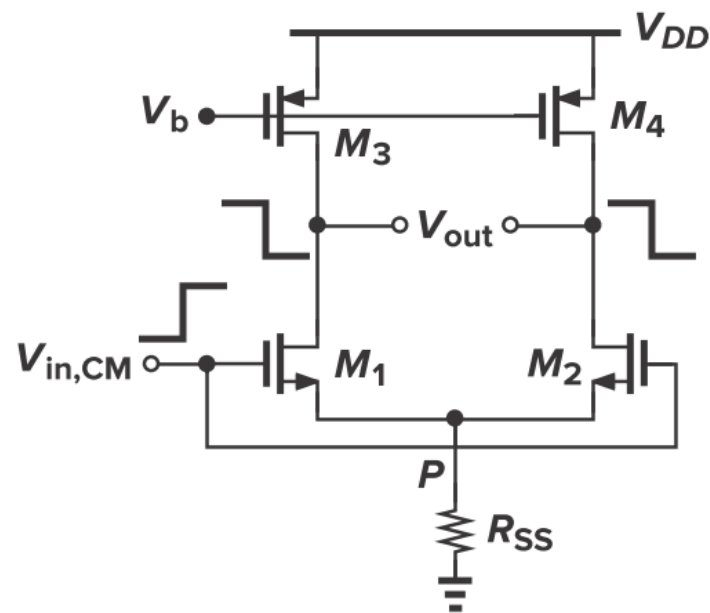
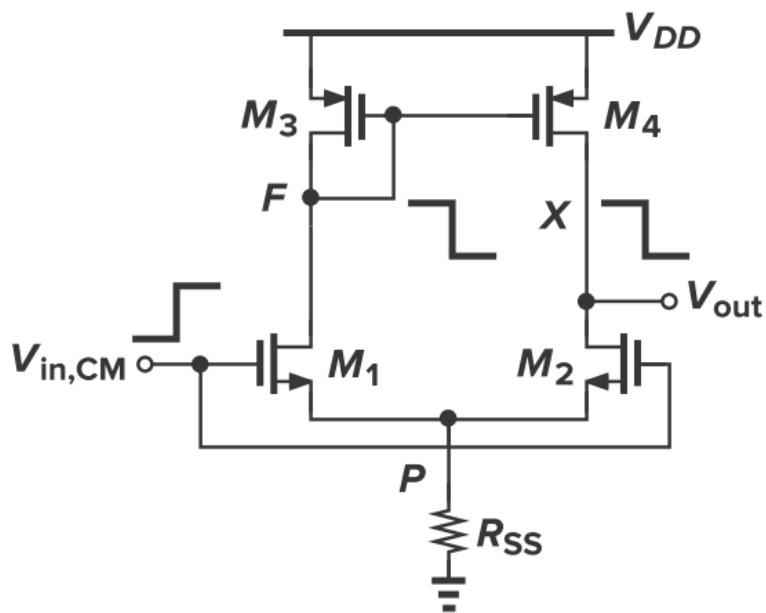
$$r_{O3} \gg 1/g_{m3}$$



$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in,CM}} \approx \frac{(g_{m1} - g_{m2}) r_{O3} - g_{m2}/g_{m3}}{1 + (g_{m1} + g_{m2}) R_{SS}}$$



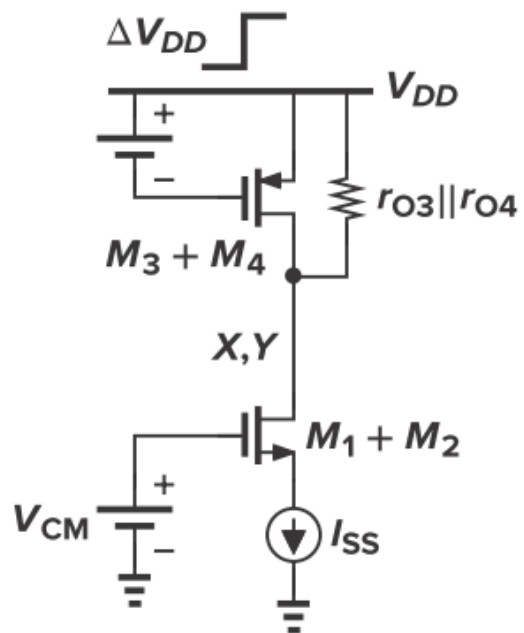
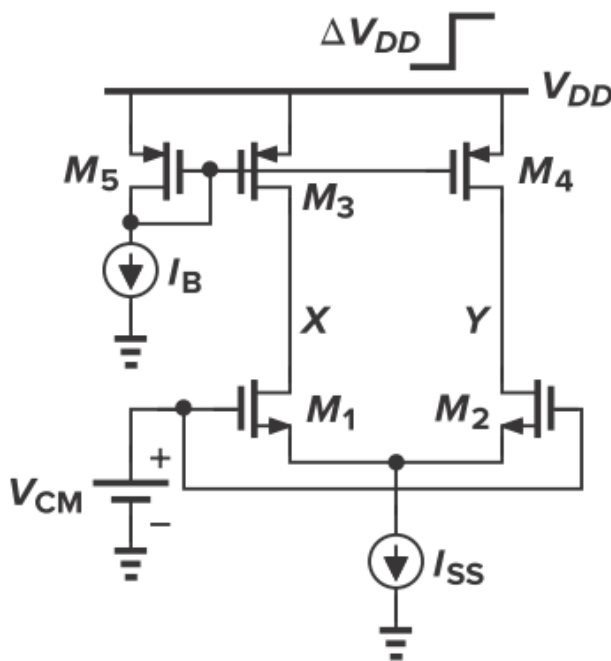
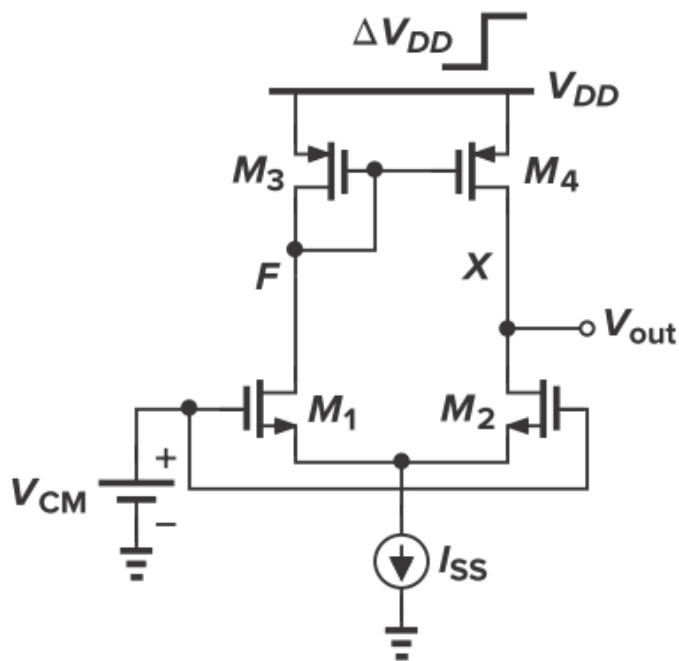
五管OTA与全差分结构的对比



- 五管OTA的两个缺点：
 - 即使电路完全匹配，电路的CMRR仍然有限



五管OTA与全差分结构的对比



- 五管OTA的两个缺点：
 - 即使电路完全匹配，电路的CMRR仍然有限
 - 电源抑制性能较差



本章总结

- 基本电流镜
 - 电流仅于晶体管宽长比的比率有关
 - 采用“单元”晶体管实现比例的缩放
 - 精度受到沟道长度调制效应影响
- 共源共栅电流镜
 - 电压余度问题
 - 低压共源共栅结构
- 有源电流镜（五管OTA）
 - 大信号分析
 - 小信号分析
 - 共模特性

Thank you

程 林

Email: eecheng@ustc.edu.cn