

第六章 运算放大器（下）

刘鸣

liuming@semi.ac.cn

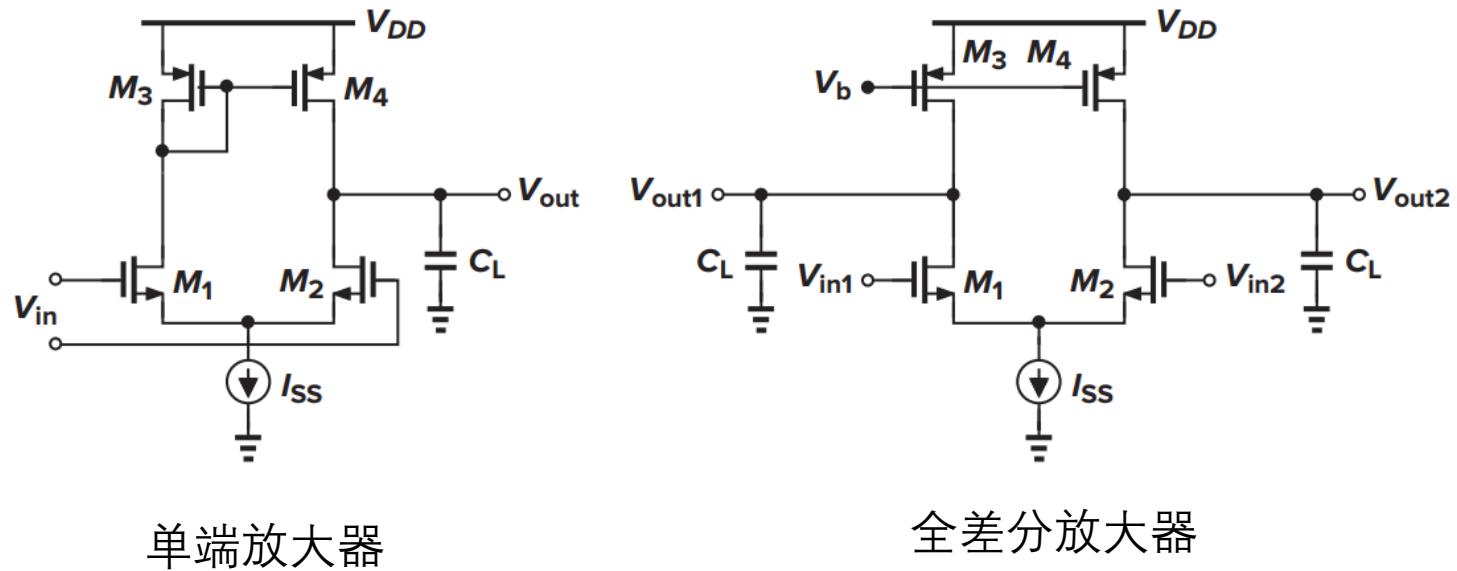
中国科学院半导体研究所

目录

- 一级放大器设计
- 两级放大器设计
- 运放的仿真

一级放大器设计

- 简单的一级放大器
 - 增益比较小 <10
 - 带宽由电容 C_L 决定
 - 镜像极点
 - 噪声贡献：4个晶体管



一级放大器设计

- 单位增益缓冲器（例）

- 共模输入范围

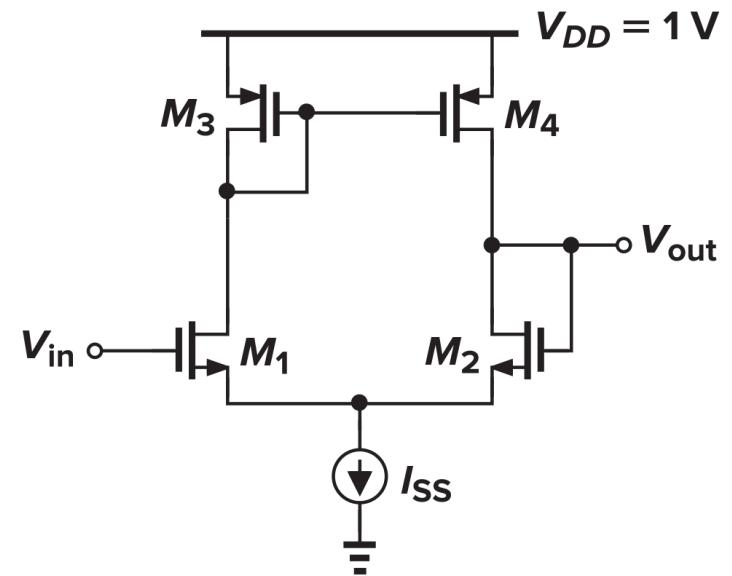
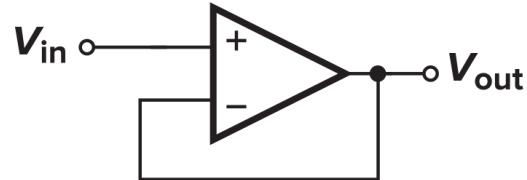
$$V_{in,min} = V_{GS1} + V_{ISS}$$

$$V_{in,max} = V_{DD} - |V_{GS3}| + V_{TH1}$$

- 输出电阻

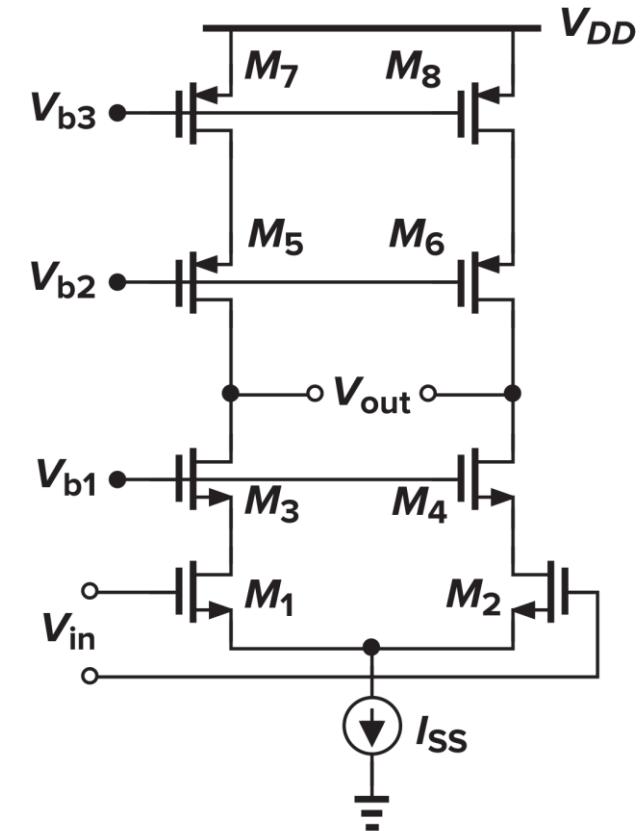
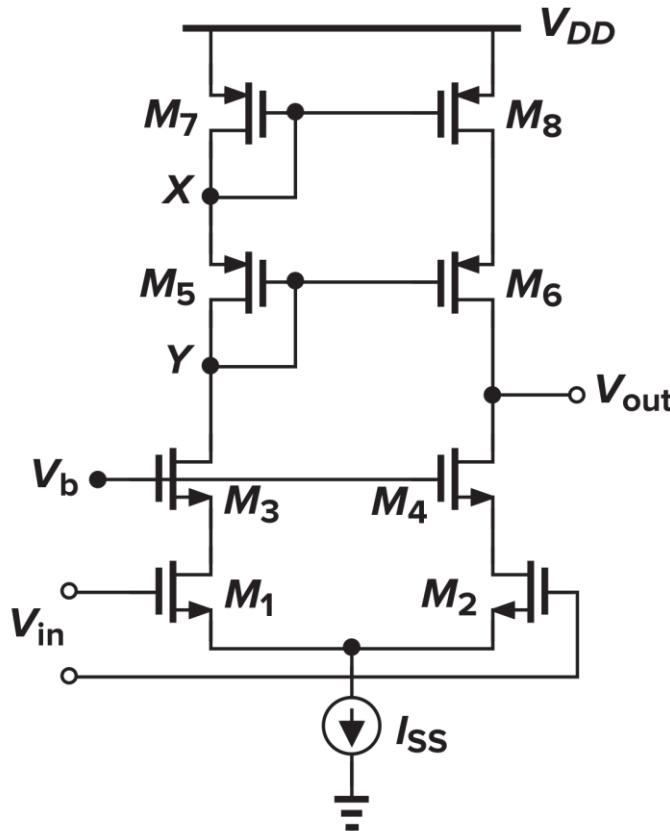
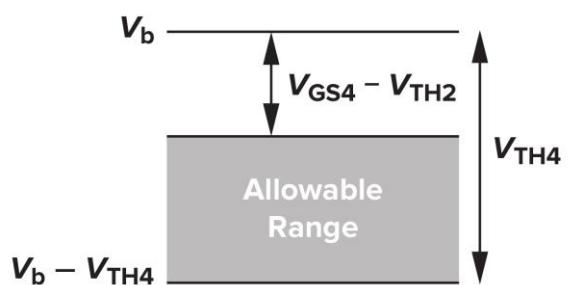
- 电压-电压反馈

$$r_{o,cl} = \frac{r_{o,ol}}{1 + A} \quad r_{o,ol} \approx r_{o4} // r_{o2} \quad A = g_{mn} * r_{o,ol}$$



一级放大器设计

- 提高增益的考虑
 - 套筒式结构
 - 牺牲了输出电压范围且不适合实现单位增益放



一级放大器设计

- 放大器设计主要用到的一些公式

$$g_m = \frac{2I_D}{V_{ov}} = \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{ov} \quad I_D: \text{偏置电流}$$

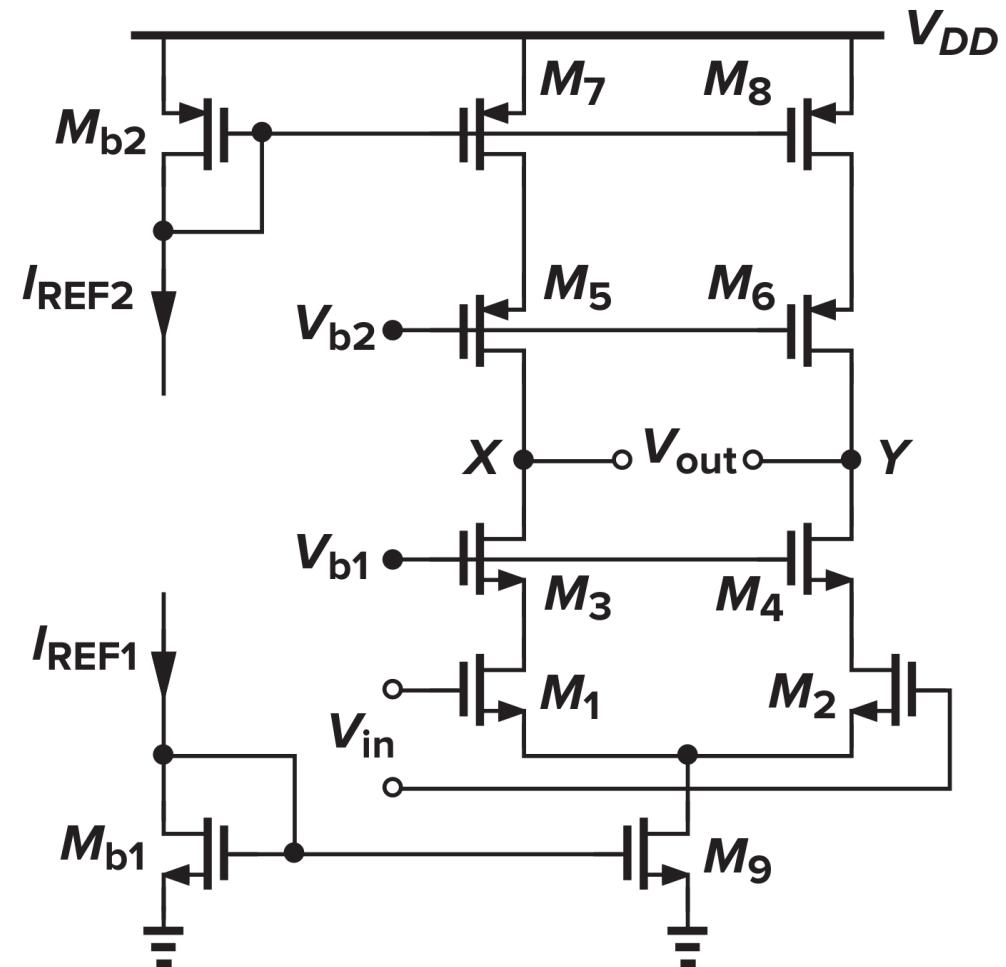
$$I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} V_{ov}^2 \quad r_o = \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{V_E L}{I_D}$$

$$\overline{i_m^2} = 4kT\gamma g_m \quad A_V = g_m r_o$$

$$|V_{DS}| \geq |V_{ov}| \quad \text{饱和区条件}$$

一级放大器设计

- 设计实例
- $V_{DD} = 3V$, 输出摆幅3V, 功耗=10mW, 增益=2000, $\mu_n C_{ox} = 60 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $\mu_p C_{ox} = 30 \mu\text{A}/\text{V}^2$, $\lambda_n = 0.1\text{V}^{-1}$, $\lambda_p = 0.2\text{V}^{-1}$ (有效沟道 = 0.5μm), $V_T = 0.7\text{V}$
- 功率预算。
 - M_9 的电流=3mA, M_{b1} 和 M_{b2} 的电流为330μA。
 - 每条支路的电流为1.5mA。
- 摆幅
 - X和Y点的电压摆幅为1.5Vpp
 - 每条之路的晶体管都工作在饱和区
 - $|V_{OD7}| + |V_{OD5}| + V_{OD3} + V_{OD1} + V_{OD9} = 1.5V$



一级放大器设计

- 设计实例（续）

- 分配过驱动电压和确定尺寸

- M_9 和 $M_{1,3,5,7}$ $V_{od9}=0.5V$,

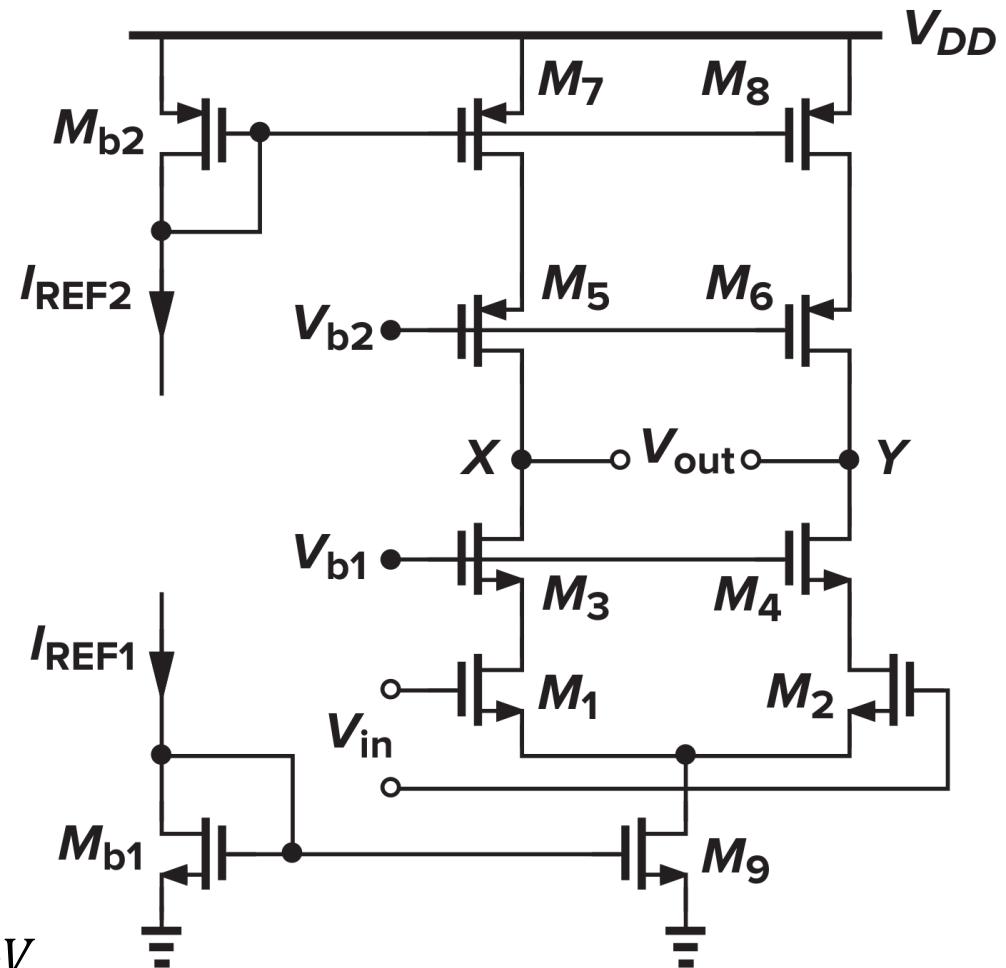
$$V_{od5\sim 8}=0.3V$$
$$V_{od1\sim 4}=0.2V$$

- 确定输出电阻

- 计算增益 $A_V = g_{m1}[(g_{m3}r_{o3}r_{o1})||(g_{m5}r_{o5}r_{o7})]$

- 共模电平的确定

$$V_{COM,min} = V_{GS1} + V_{OD9} = V_{TH1} + V_{OD1} + V_{OD9} = 1.4V$$



一级放大器设计

- 线性缩放
- W加倍, L保持不变
 - I_D 加倍
 - V_{ov} 不变
 - g_m 加倍
 - r_o 减半

增益和摆幅不变!

一级放大器设计

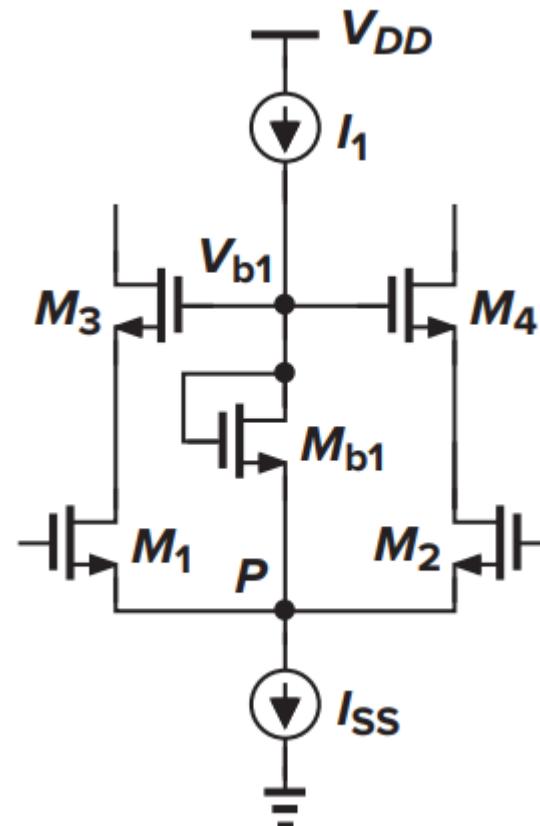
- 偏置电压的产生

$$V_{b1} = V_{in,CM} - V_{GS1,2} + V_{GS,b1}$$

为了使M₁和M₂工作在饱和区

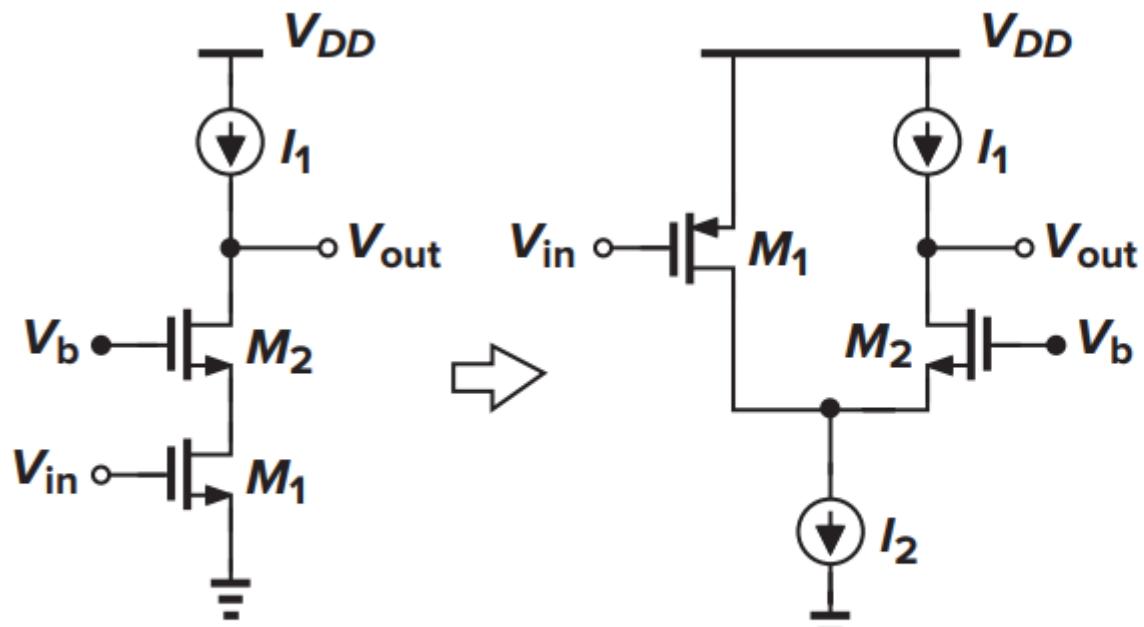
$$V_{b1} = V_{in,CM} - V_{TH1,2} + V_{GS3,4}$$

→ $V_{GS,b1} = (V_{GS1,2} - V_{TH1,2}) + V_{GS3,4}$

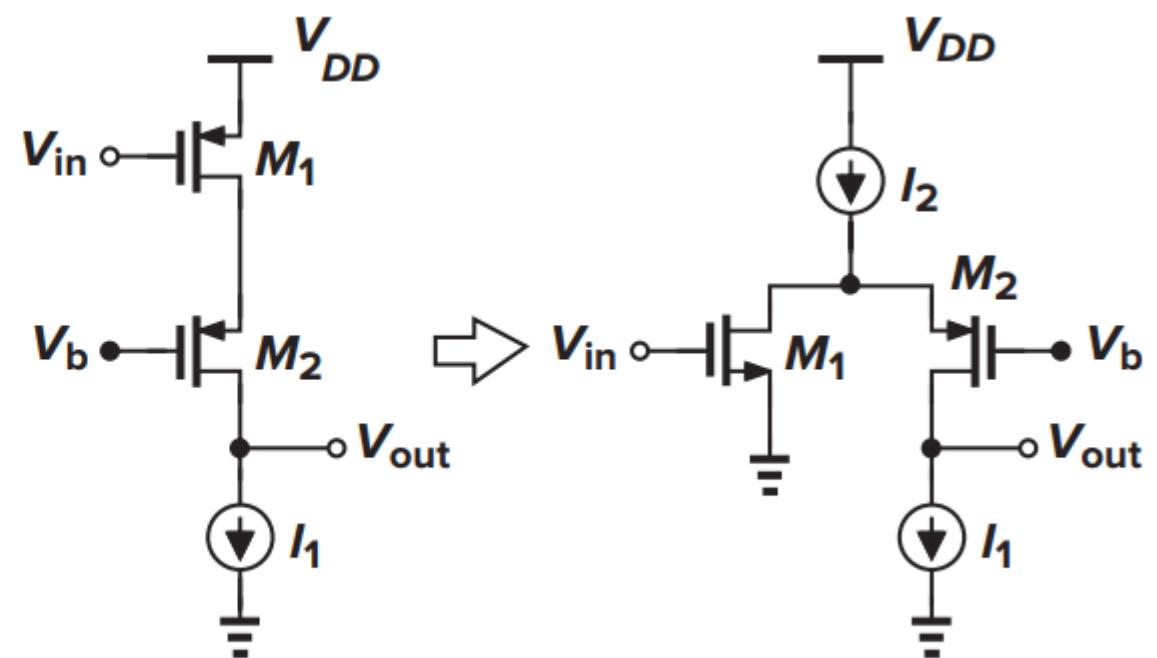


一级放大器设计

- 折叠式共源共栅运放的概念



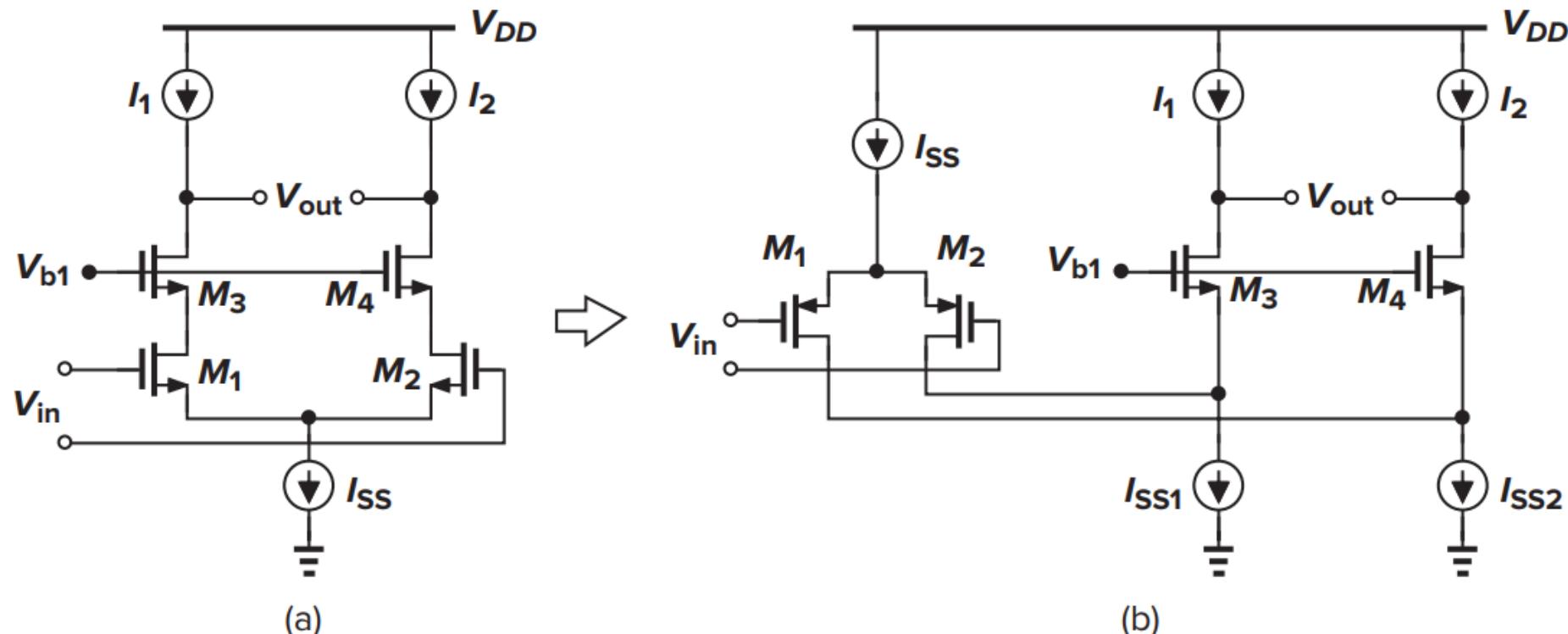
(a)



(b)

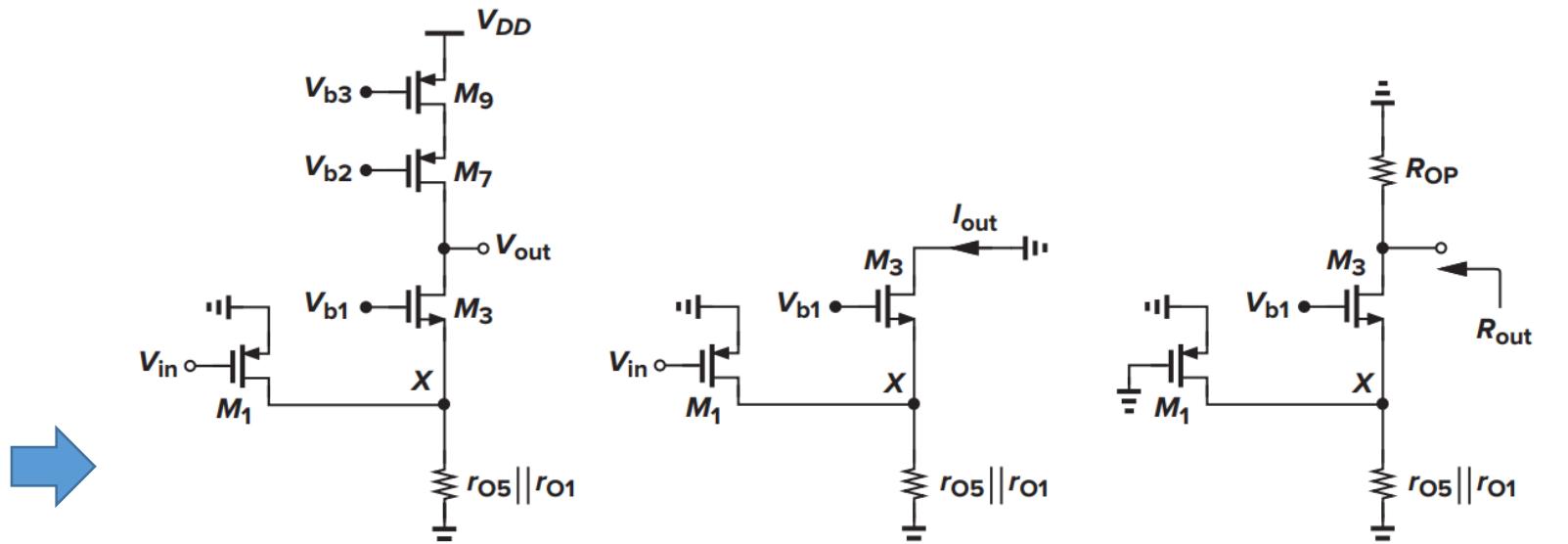
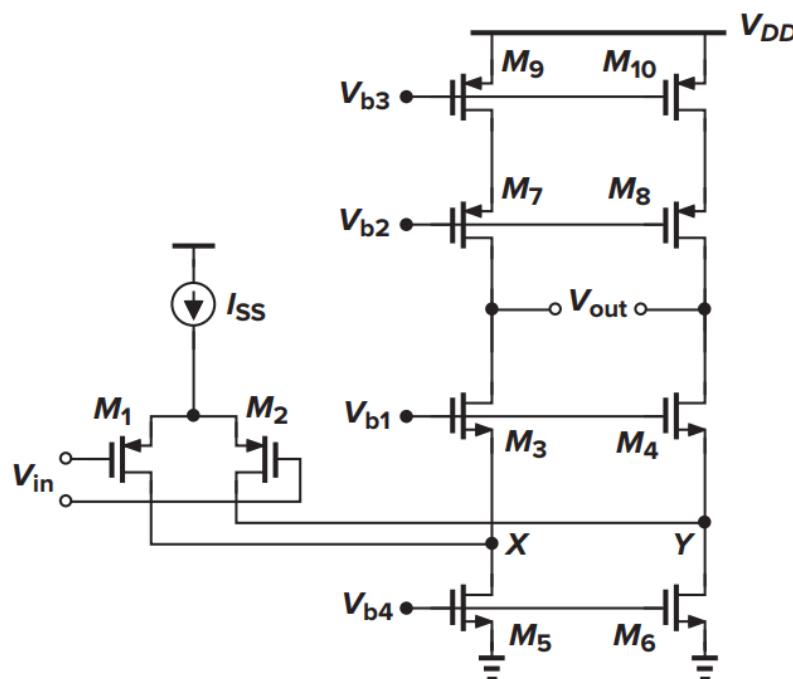
一级放大器设计

- 套筒式结构到折叠共源共栅



一级放大器设计

- 采用PMOS负载的折叠共源共栅放大器



半边等效电路

$$|A_v| \approx g_{m1} \{ [(g_{m3} + g_{mb3})r_{O3}(r_{O1} \parallel r_{O5})] \parallel [(g_{m7} + g_{mb7})r_{O7}r_{O9}] \}$$

$$R_{out} \approx R_{OP} \parallel [(g_{m3} + g_{mb3})r_{O3}(r_{O1} \parallel r_{O5})]$$

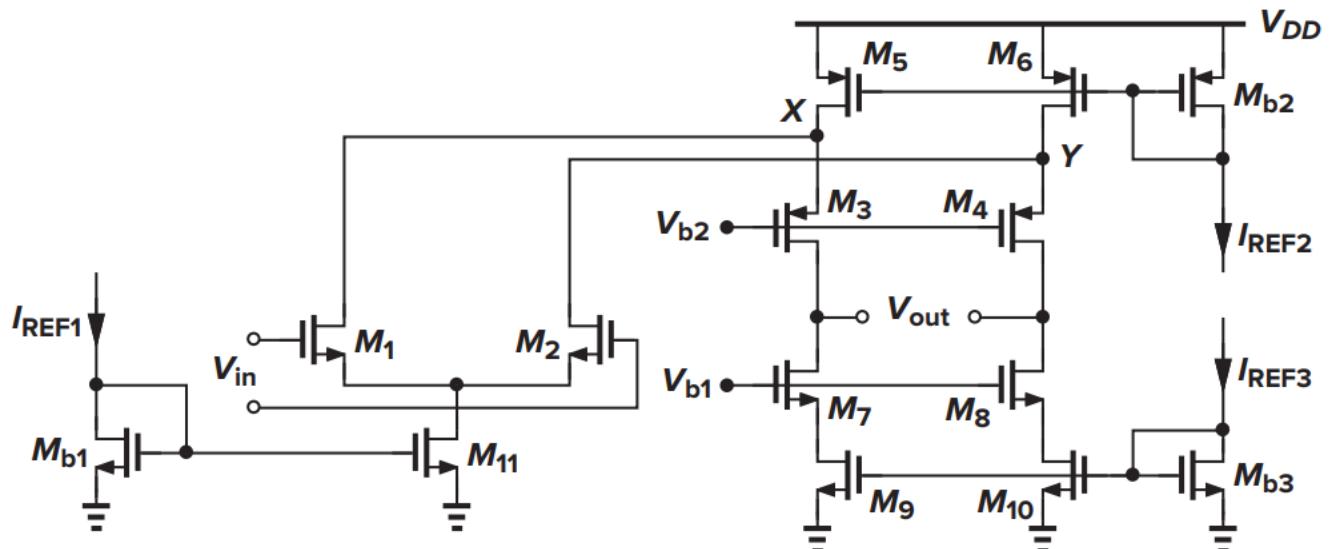
等效Gm计算

等效输出电阻计算

一级放大器设计

- 折叠式共源共栅和套筒式结构的比较

- 增益较小
- 较大的功耗
- 较大的噪声（为什么？）
- 输出电压摆幅大
- 更大的共模电平输入范围



一级放大器设计

- 折叠式共源共栅运放的设计（例）

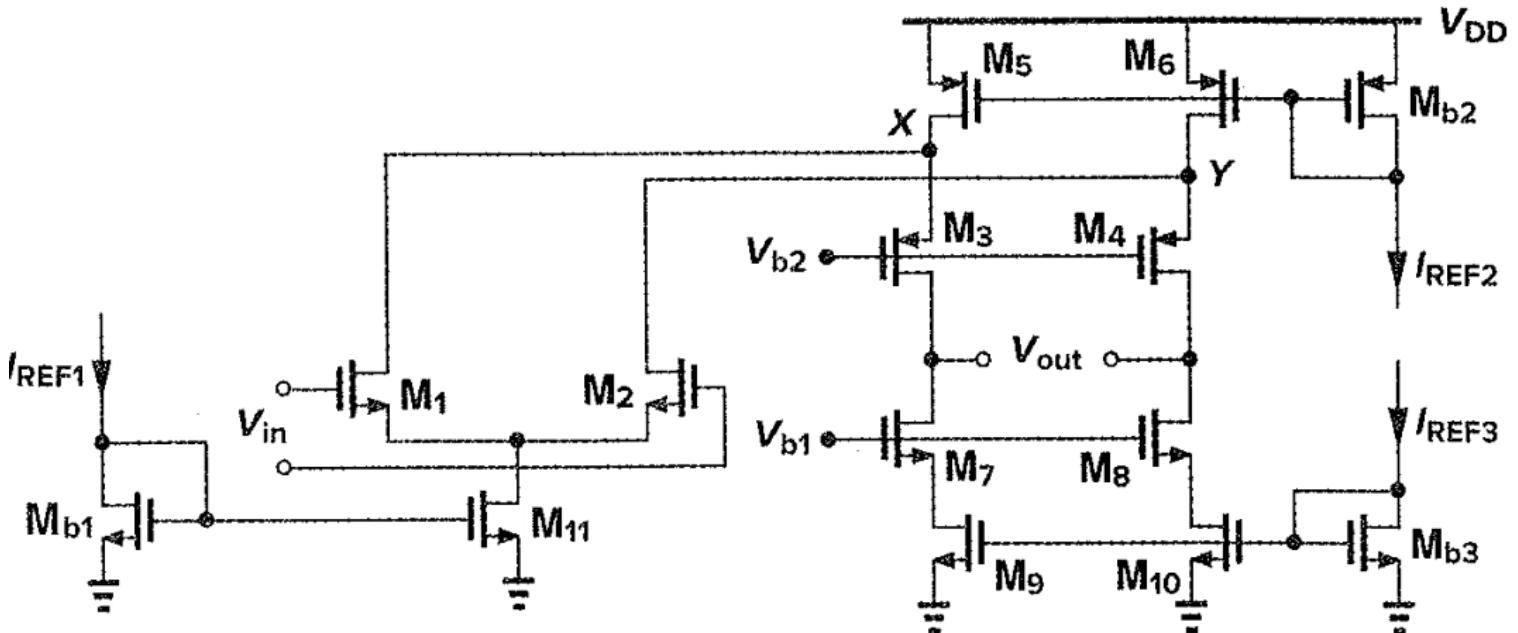
- 功耗预算=10mW

- 摆幅=3V

- 增益=2000

- $V_{DD} = 3V$

$$\begin{aligned}\mu_n C_{ox} &= 60 \mu\text{A}/\text{V}^2, \quad \mu_p C_{ox} \\ &= 30 \mu\text{A}/\text{V}^2, \quad \lambda_n \\ &= 0.1\text{V}^{-1}, \quad \lambda_p = 0.2\text{V}^{-1}, \quad V_T \\ &= 0.7\text{V}\end{aligned}$$



一级放大器设计

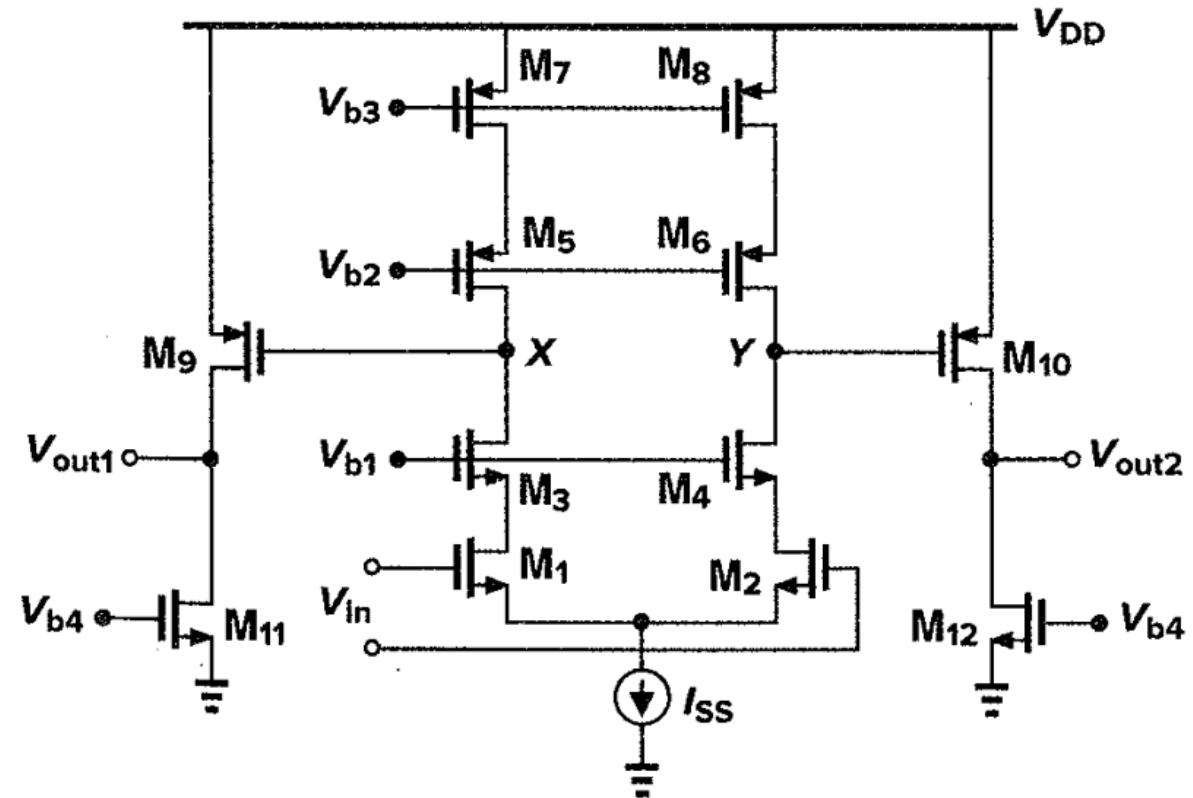
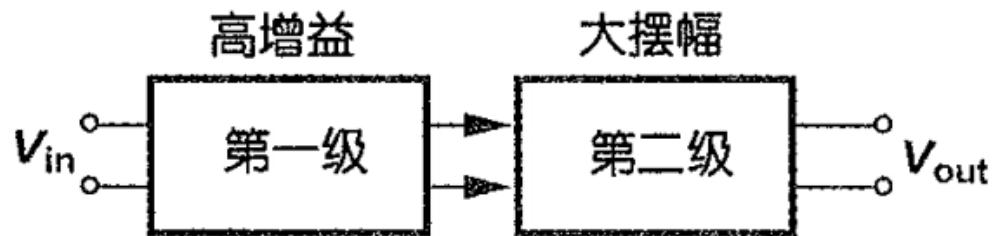
- 折叠式共源共栅运放的设计（例）
 - 设计步骤
 - (1) 电流分配：输入对=1.5mA，共源共栅支路=1.5mA，电流镜=330μA
 - (2) 过驱动电压： $M_{5,6}=500mV$, $M_{3,4}=400mV$, $M_{7~10}=300mV$, 可求得
 $(W/L)_{5,6,3,4,7~10}$ 的尺寸
 - (3) 输出最小和最大电压为0.6V和2.1V，输出共模电平1.35V
 - (4) 假定输入和输出共模电平相等，猜想 $V_{OD11}=0.4V \rightarrow V_{GS1}=0.95V \rightarrow V_{OD1,2}=0.25V \rightarrow (W/L)_{1,2}=400$
 - (5) 增益计算，3个 g_m ($g_{m1,2}, g_{m3,4}, g_{m7,8}$)，电阻 $r_{o1,2}, r_{o3,4}, r_{o5,6}$ ，输出阻抗，总增益 ≈ 400 。

目录

- 一级放大器设计
- 两级放大器设计
- 运放的仿真

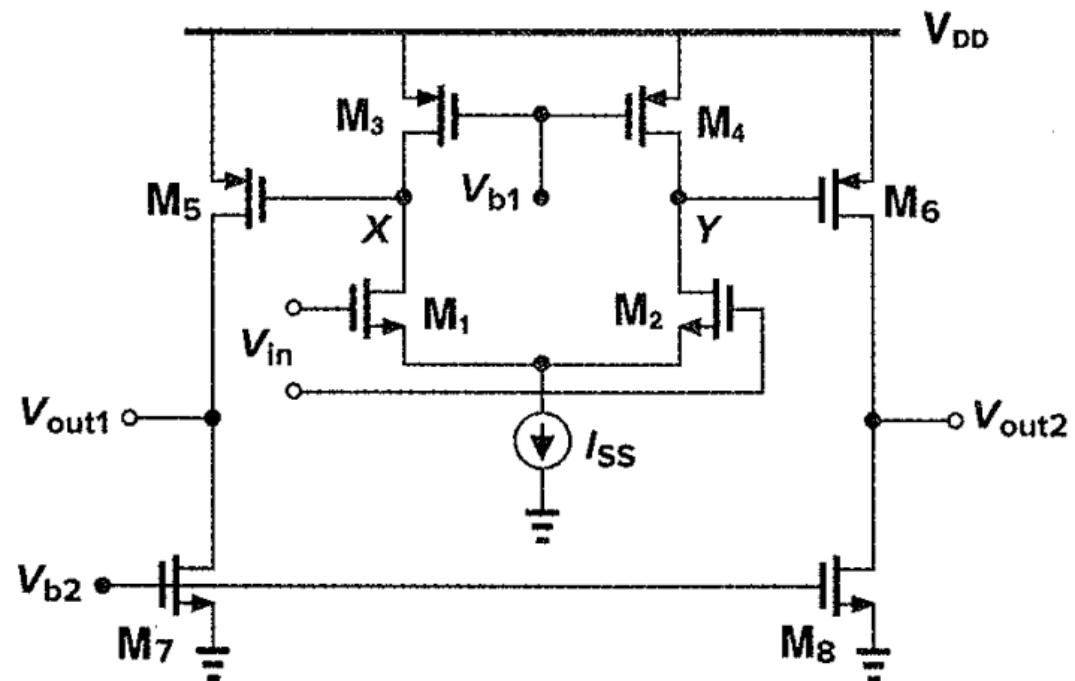
两级放大器设计

- 增大增益
- 低压，高摆幅的需求
- 多级运放会增加系统的不稳定性



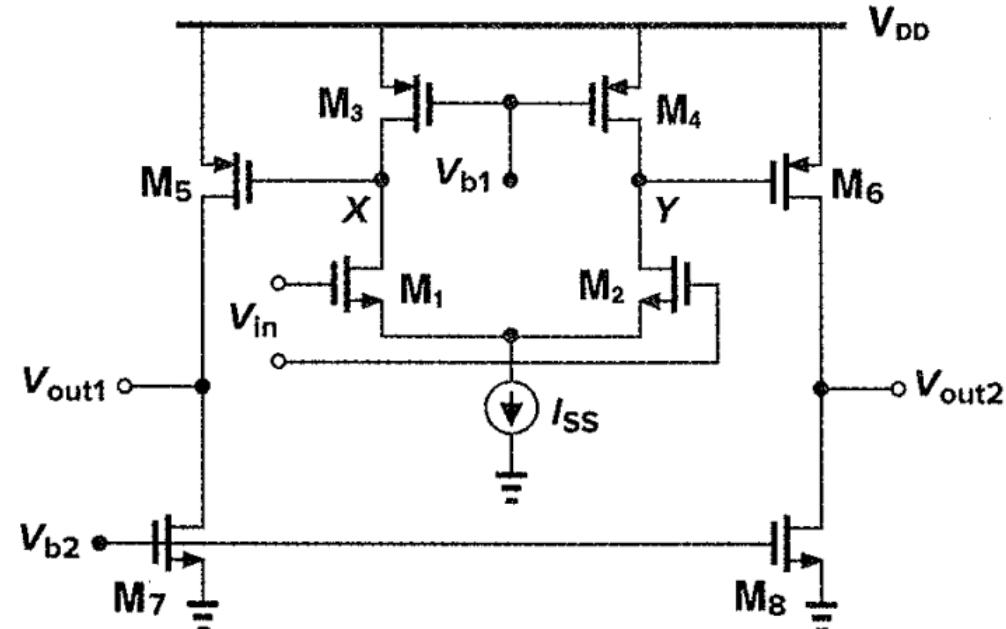
两级放大器设计

- 简单的例子
- 指标参数: $V_{DD}=1V$, 功率=0.5mW
- 1V的差动输出摆幅, $V_{thn}=0.3V$, $V_{thp}=-0.35V$
- Step1: 电流分配, 偏置电流 $480\mu A$ 给 $M_{1\sim 8}$, 并且平均分配 $120\mu A$
- Step2: 增益分配, 第二级选择增益5, 单端输出摆幅= $0.5V_{pp}$, $V_{x,y}=0.1V_{pp}$



两级放大器设计

- 简单的例子（续）
 - Step3: 过驱动电压的确定
 - $M_{1\sim 4}$ 以及 I_{SS} 的过驱动电压
 - $|V_{OD3}| + V_{OD1} + V_{ISS} = 1 - 0.1 = 0.9V$
 - $V_{DS3,4} = V_{GS5,6} = 400mV, |V_{OD3}|_{min} = 350mV$
 - 单端输出摆幅=0.5V，考虑噪声，选择300mV和200mV分别为 M_7 和 M_5 的 V_{ov}
 - Step4: 具体确定，输出级，由 I_D 和 V_{ov} 确定 g_m 和 r_o
 - 由此确定增益第二级增益为33，第二级增益为66。



两级放大器设计

- 共源极节点分析方法

$$A_v = g_m r_o$$

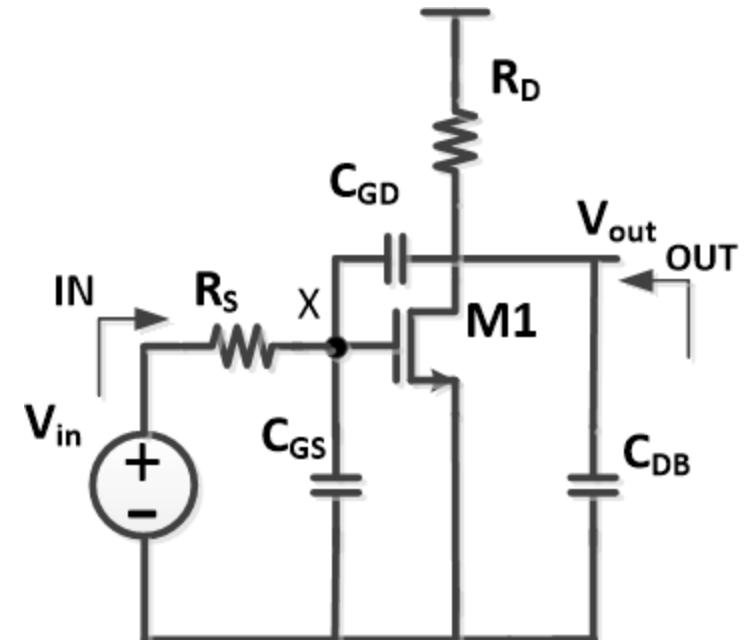
$$C_X = C_{GS} + (1 + A_v)C_{GD}$$

$$\omega_{in} = \frac{1}{R_S C_X}$$

$$C_{OUT} = C_{DB} + \left(1 + \frac{1}{A_v}\right) C_{GD} \approx C_{DB} + C_{GD}$$

$$\omega_{out} = \frac{1}{(r_o // R_D) C_{OUT}}$$

$$H(S) = -\frac{A_v}{(1 + \frac{S}{\omega_{in}})(1 + \frac{S}{\omega_{OUT}})}$$



两级放大器设计

- 共源极传输函数法

$$\frac{V_{OUT}}{V_{in}} = \frac{(C_{GD}s - g_m)R_D}{R_S R_D \xi s^2 + [R_S(1 + g_m R_D)C_{GD} + R_S C_{GS} + R_D(C_{GD} + C_{DB})]s + 1}$$

$$D = \frac{s^2}{\omega_{p1}\omega_{p2}} + \left(\frac{1}{\omega_{p1}} + \frac{1}{\omega_{p2}} \right) s + 1 \quad \xi = C_{GS}C_{GD} + C_{GS}C_{DB} + C_{GD}C_{DB}$$

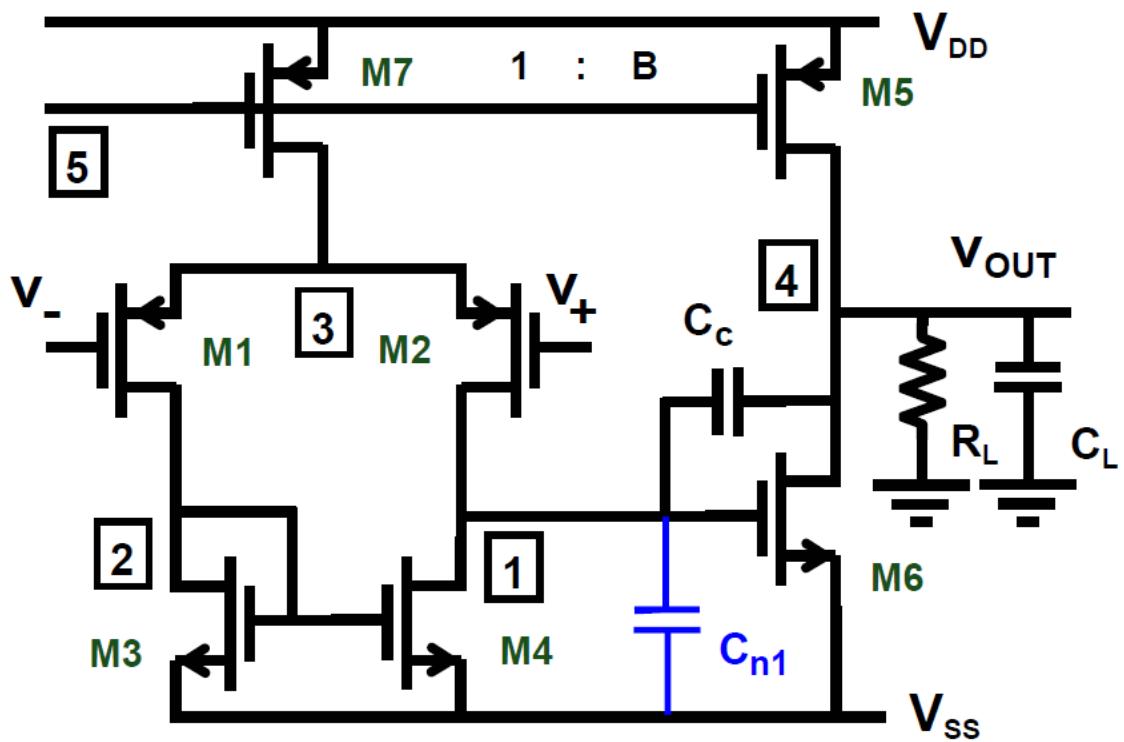
假定 $|\omega_{p2}| \gg |\omega_{p1}|$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{R_S C_X + R_D(C_{GD} + C_{DB})}$$

$$\omega_{p2} = \frac{R_S(1 + g_m R_D)C_{GD} + R_S C_{GS} + R_D(C_{GD} + C_{DB})}{R_D R_S \xi}$$

两级放大器设计

- 例2，带Miller电容的两级放大器



Two nodes

1

**with high
Impedance**

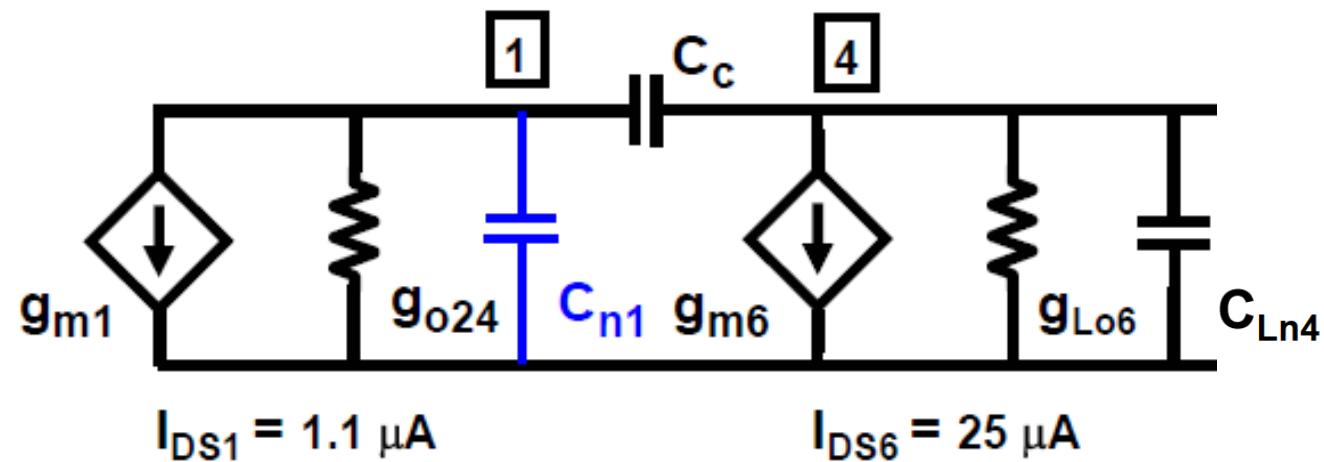
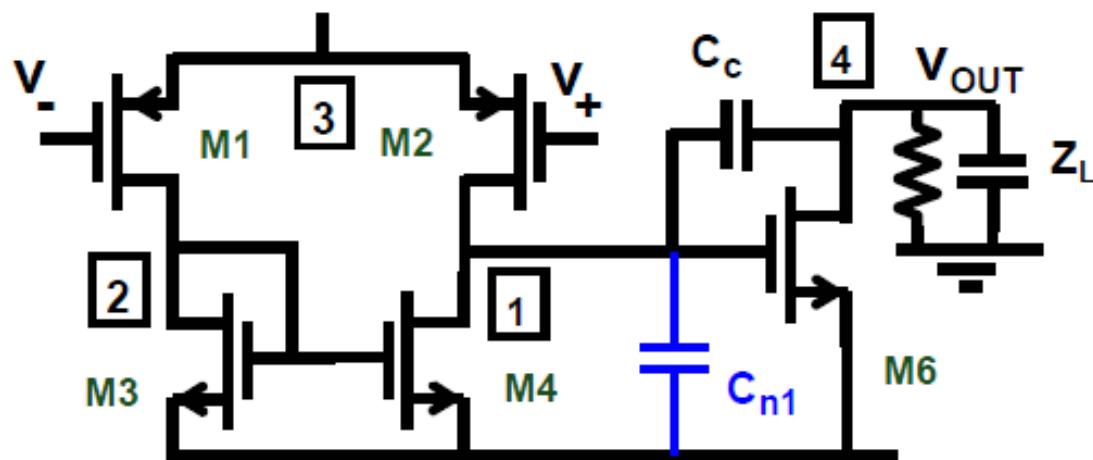
cause
two poles

split by C_c

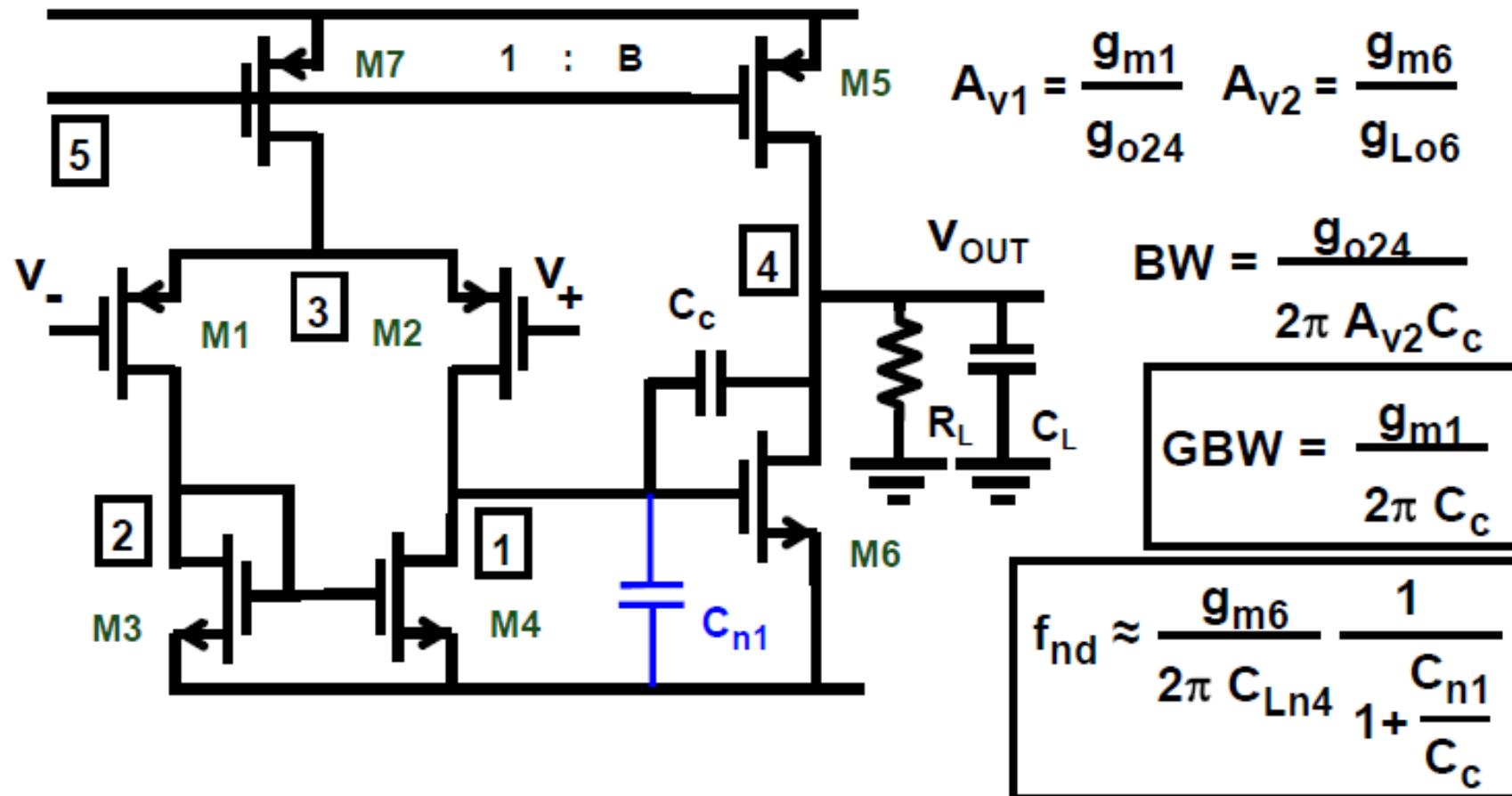
- C_c : 密勒电容
 - C_{n1} : 节点1的寄生电容

两级放大器设计

- (例续) 小信号模型



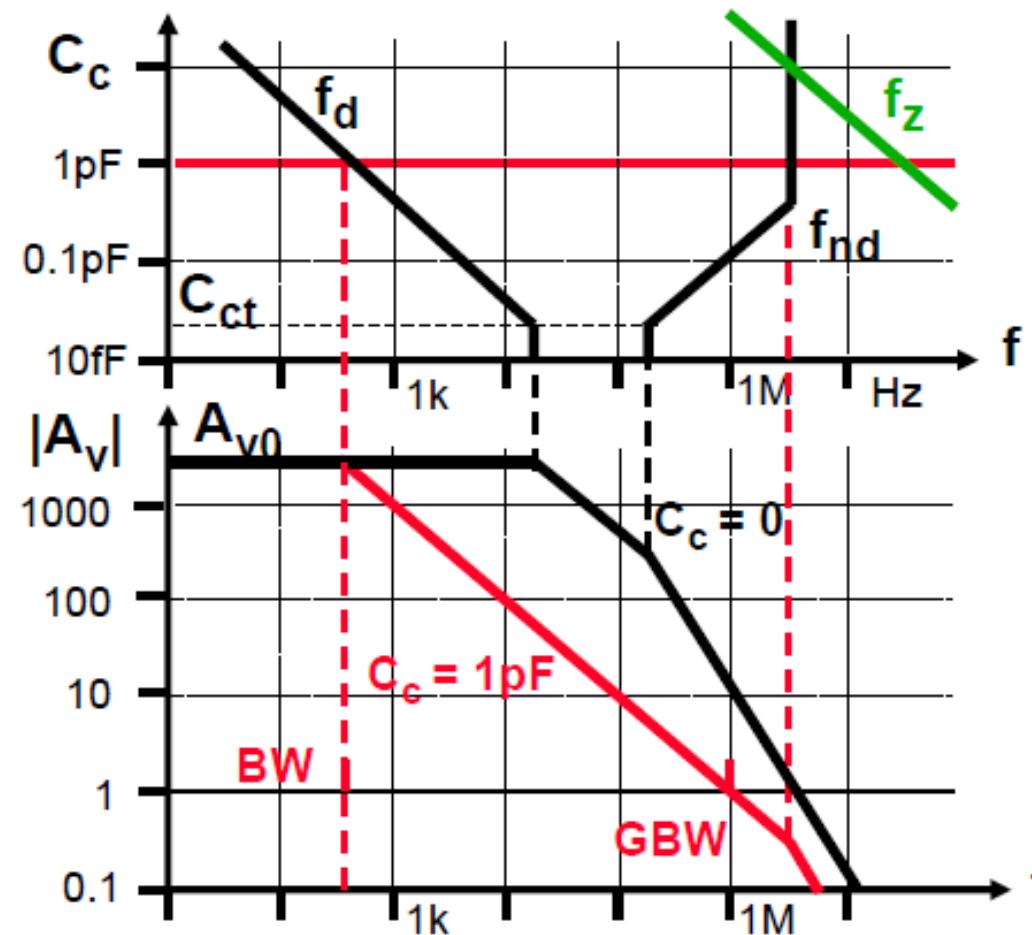
两级放大器设计



$$\begin{aligned} g_{m1} &= 7.5 \mu\text{s} \\ g_{o24} &= 0.03 \mu\text{s} \\ C_{n1} &= 0.37 \text{ pF} \\ C_c &= 1 \text{ pF} \\ g_{m6} &= 246 \mu\text{s} \\ g_{L_{06}} &= 120 \mu\text{s} \\ C_{Ln4} &= 10.2 \text{ pF} \end{aligned}$$

两级放大器设计

- 密勒补偿



Pole splitting
starts at

$$C_{ct} \approx \frac{C_{n1}}{A_{v2}} \approx 20 \text{ fF}$$

but is sufficient
for $C_c = 1\text{pF}$

$$f_z = \frac{g_{m6}}{2\pi C_c}$$

两级放大器设计

- 给定GBW和PM

$$GBW = \frac{g_{m1}}{2\pi C_c}$$

GBW = 100 MHz and $C_L = 2 \text{ pF}$

$$f_{nd} \approx \frac{g_{m6}}{2\pi C_{Ln4}} \frac{1}{1 + \frac{C_{n1}}{C_c}}$$

Two equations for

Three variables g_{m1} , g_{m6} and C_c ?!?

Solution : choose g_{m1} or g_{m6} or C_c !!!

两级放大器设计

- C_c 的取值

Choose $C_c \approx 3 C_{n1}$

$$GBW = \frac{g_{m1}}{2\pi C_c}$$

$$3GBW \approx \frac{g_{m6}}{2\pi C_{L_{n4}}} \cdot \frac{1}{1.3}$$

$$\frac{g_{m6}}{g_{m1}} \approx 4 \frac{C_L}{C_c}$$

$$GBW = 100 \text{ MHz} \text{ and } C_L = 2 \text{ pF}$$

Choose $C_{n1} < C_c < C_L$

Choice $C_c = 1 \text{ pF}$ gives $g_{m1} = 0.6 \text{ mS}$ and $g_{m6} = 4.8 \text{ mS}$

两级放大器设计

• 优化设计

$$GBW = \frac{g_{m1}}{2\pi C_c}$$

$$f_{nd} = \frac{g_{m6}}{2\pi C_L} \frac{1}{1 + C_{n1}/C_c}$$

$$C_L = \alpha C_c \quad \alpha \approx 2$$

$$C_c = \beta C_{n1} = \beta C_{GS6} \quad \beta \approx 3$$

$$f_{nd} = \gamma GBW \quad \gamma \approx 2$$

$$C_{GS} = kW \quad k = 2 \cdot 10^{-11} F/cm$$

$$GBW = \frac{f_{nd}}{\gamma} = \frac{g_{m6}}{2\pi C_L} \frac{1}{\gamma (1 + 1/\beta)}$$

$$C_L = \alpha C_c = \alpha \beta C_{n1} = \alpha \beta C_{GS6} = \alpha \beta kW_6$$

$w_6 \uparrow$ if $C_L \uparrow$

两级放大器设计

- 优化设计 **Elimination of C_L yields**

经验公式

$$GBW = \frac{g_{m6}}{\underbrace{2\pi kW_6}_{f_{T6}}} \frac{1}{\alpha \beta \gamma (1 + 1/\beta)}$$

$$g_m = \frac{W}{L} \frac{17 \cdot 10^{-5}}{1 + 2.8 \cdot 10^4 L / V_{GST}}$$

W, L in cm

$$GBW = \frac{1}{2\pi L_6} \frac{1}{\alpha \beta \gamma (1 + 1/\beta)} \frac{8.5 \cdot 10^6}{1 + 2.8 \cdot 10^4 L_6 / V_{GST6}}$$

L in cm

GBW is not determined by C_L , only by L (and V_{GST}) !!

f_T is also determined by L !!!

两级放大器设计

- 优化设计

Substitution for f_T yields

$$\text{GBW} = \frac{f_{T6}}{\alpha \beta \gamma (1 + 1/\beta)}$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_{GS}}$$

$$f_T = \frac{1}{L} \cdot \frac{1.35}{1 + 2.8 \cdot 10^4 \cdot L / V_{GST}}$$

L in cm

f_T in MHz

GBW is not determined by C_L , only by f_T

f_T is determined by L (and V_{GST}) !!!

If $V_{GST} = 0.2$ V, v_{sat} takes over for $L < 65$ nm (If 0.5 V for $L < 0.15$ μ m)

两级放大器设计

- 设计流程
 - Choose $\alpha \beta \gamma$
 - Find minimum f_{T6} for specified GBW
 - Choose maximum channel length L_6 (max. gain)
for a chosen $V_{GS6}-V_T$
 - W_6 is calculated from C_L ,
and determines I_{DS6}
 - C_c is calculated from C_L through α
 - g_{m1} and I_{DS1} are calculated from C_c
 - Noise is determined by g_{m1} or C_c

两级放大器设计

- 正向设计实例 ($GBW=0.5\text{GHz}$, $C_L=4\text{pf}$)
- Step 1: 选取 α , β , γ 。 $\alpha=2$, $\beta=3$, $\gamma=2$ 。
- Step 2: 根据 GBW , 计算所需的小 f_T 。

$$f_{T6} = \alpha\beta\gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)GBW = 2 \times 3 \times 2 \times (1 + 1/3) \times 0.5\text{GHz} = 7.8\text{GHz}$$

- Step3: 选定 V_{ov} , 计算所需的最大的 L_6 。
 - 选定 $V_{ov}=0.2\text{V}$, $L_6 \approx 0.3\text{mm}$

$$f_T = \frac{1}{L} \frac{1.35}{1 + 2.8 \times 10^4 L/V_{ov}}, \text{L in cm, } f_T \text{ in MHz}$$

两级放大器设计

- 正向设计实例（续）
- Step4：计算 W_6 和 I_{ds6}

$$W_6 = \frac{C_L}{\alpha\beta k} = 333\mu m$$

$$C_{GS6} = kW_6 = 0.67 pF$$

$$g_{m6} = 2\pi f_{T6} C_{GS6} = 32.8 mS$$

$$I_{DS6} = 0.5 g_{m6} V_{ov} = 3.28 mA$$

对于UMC 180nm工艺，

$$k_n = 260 \mu A/V^2,$$

$$k_p = 94 \mu A/V^2$$

两级放大器设计

- Step5: 计算 C_c 。

$$C_c = C_L / \alpha = 2 \text{ pF}$$

- Step6: 计算 g_{m1} 和 I_{DS1} 。

$$g_{m1} = 2\pi C_c GBW = 6.3 \text{ mS}$$

$$I_{DS1} = 0.5V_{ov} g_{m1} = 0.63 \text{ mA}$$

$$L_1 = 0.3 \mu\text{m}, W_1 = 100 \mu\text{m}$$

两级放大器设计

- Step7: M3、M4处存在极点和零点，我们将该极点和零点放置于3GBW处，第一级负载的 V_{ov} 也可略大，取 $V_{ov}=0.3V$ 。

$$f_{p3} = 1.5GHz = f_{T3} / 2 \Rightarrow f_{T3} = 3GHz$$

$$f_T = \frac{1}{L} \frac{1.35}{1 + 2.8 \times 10^4 L / V_{ov}}, \text{L in cm, } f_T \text{ in MHz}$$

$$f_{p3} = 1.5GHz = f_{T3} / 2 \Rightarrow f_{T3} = 3GHz, L_3 = 0.65\mu m$$

对于UMC 180nm工艺， $k_n=260\mu A/V^2$ ， $k_p=94\mu A/V^2$

$$W_3 = 54 \times 0.65\mu m = 35\mu m$$

两级放大器设计

- Step8: 加入消零点电阻。

$$1/g_{m6} < R_c < \frac{1}{3g_{m1}}$$

$$1/g_{m6} = 30\Omega, 1/(3g_{m1}) = 52\Omega$$

$$f_z = \frac{1}{2\pi C_c (1/g_{m6} - R_c)}$$

■ 消零电阻不能太小:

$$R_c > 1/g_{m6}$$

■ 消零电阻不能太大:

$$\frac{1}{2\pi R_c C_c} \approx 3GBW = \frac{3g_{m1}}{2\pi C_c}$$

- 实际设计出来的电路可能要经过进一步的调整，为了能够达到指标，设计时可将指标略调高，如调高1.5倍，即按照GBW=0.75GHz设计。

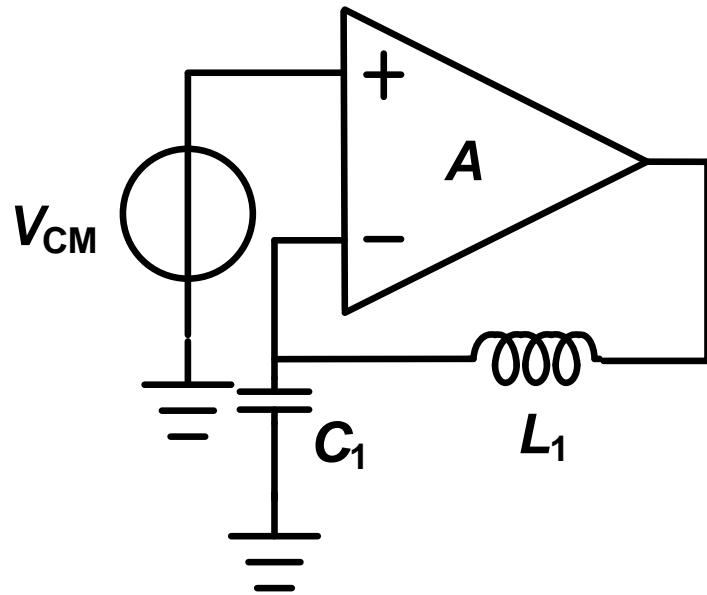
目录

- 一级放大器设计
- 两级放大器设计
- 运放的仿真

本章内容

- 直流工作点仿真
- 直流增益和共模输入范围
- 交流特性：GBW, PM, 噪声, CMRR, PSRR
- 瞬态特性：建立, 非线性

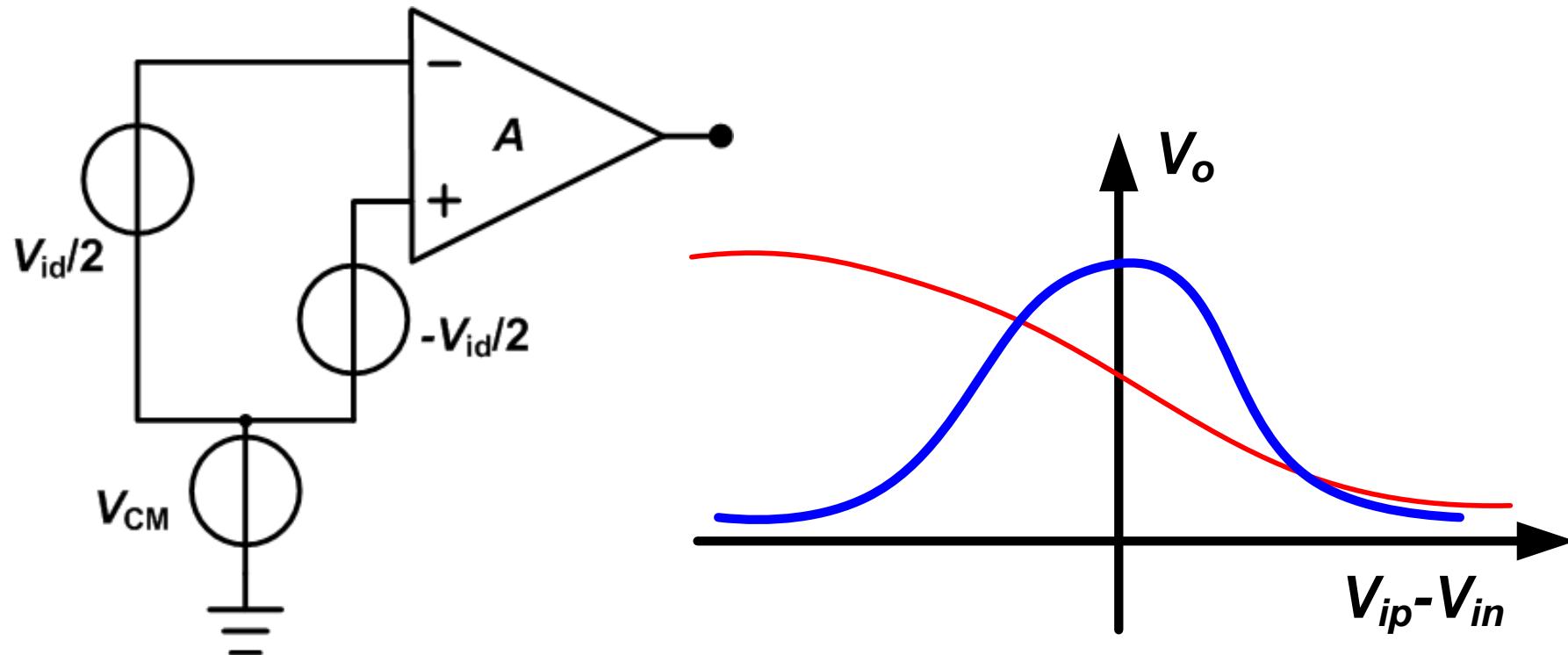
仿真1-直流工作点



$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \ll f_d$$

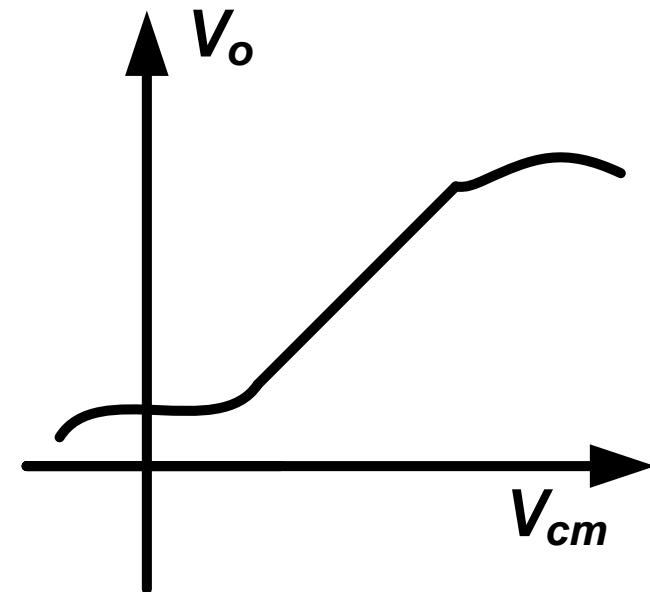
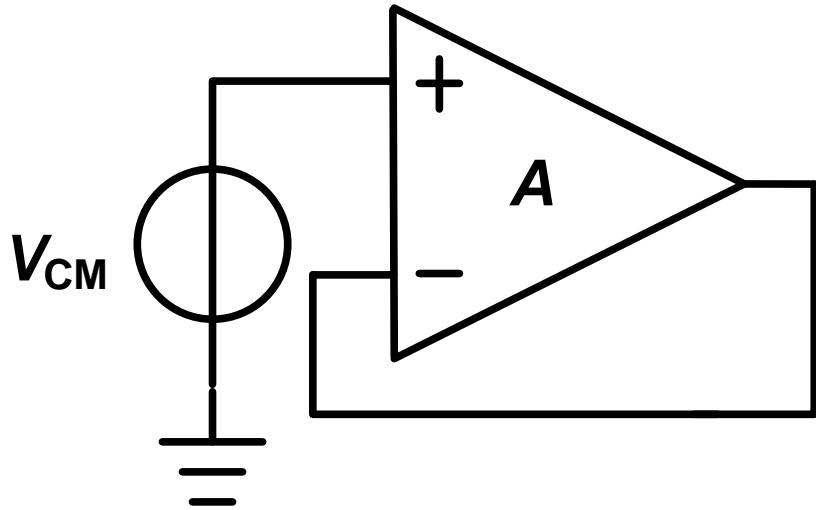
- 由于放大器增益很高，开环下直流工作点是不确定的；
- 仿真时可采用上述模型， L 可提供直流通路而阻断交流。

仿真2- 直流增益



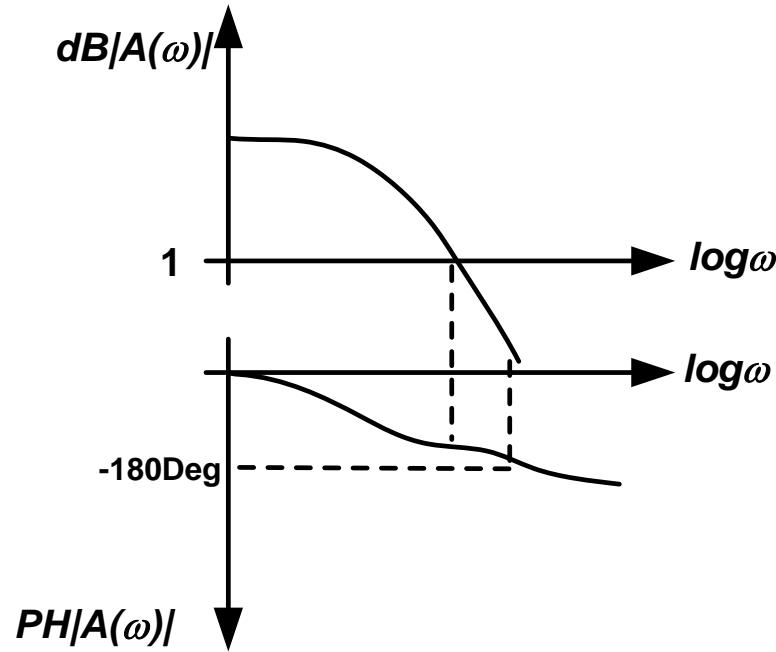
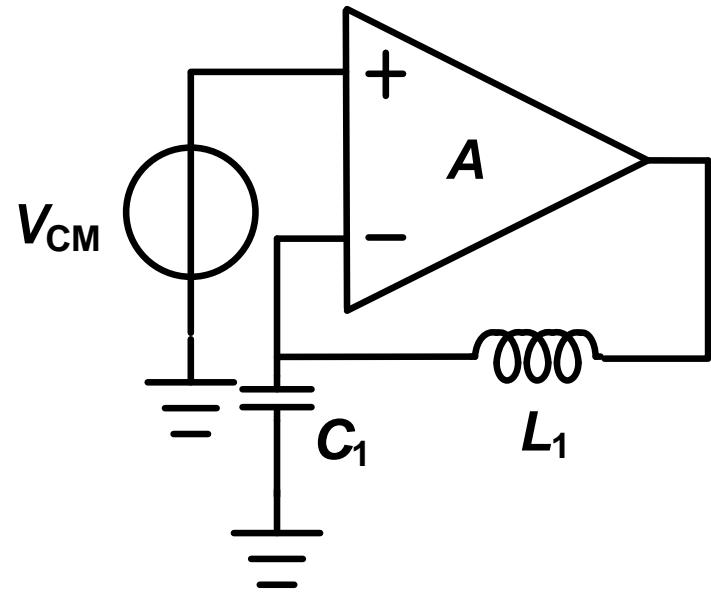
- 直流扫描得到直流传输曲线；取微分后得到增益；
- 增益具有非线性，增益与输出有关，可用增益定义输出范围。

仿真3-共模输入范围



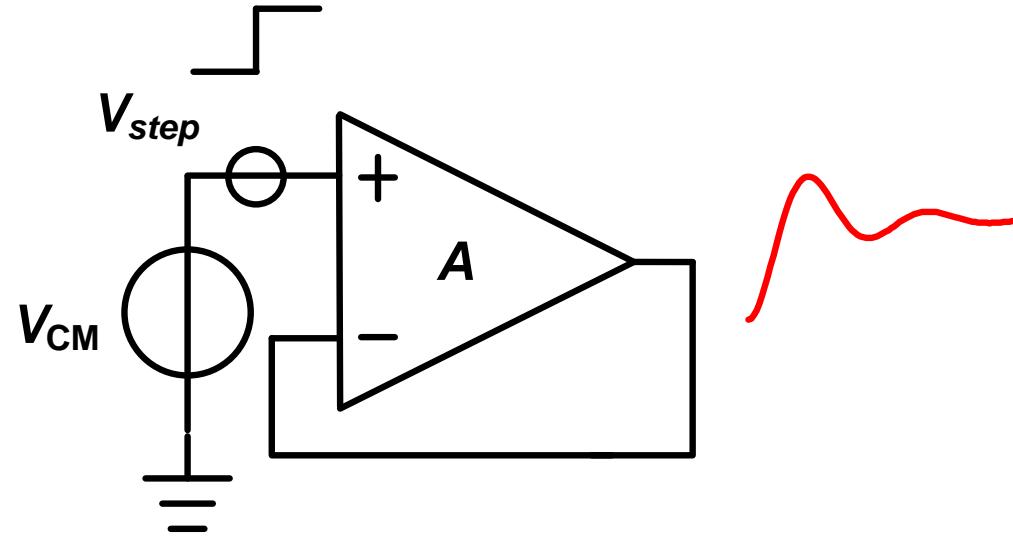
- 共模处于合适区间时，放大器所有晶体管处于饱和区，放大器的增益很高，电路表现出很好的跟随特性；
- 若超过共模范围，放大器的增益急剧下降，跟随特性变差。

仿真4-交流增益



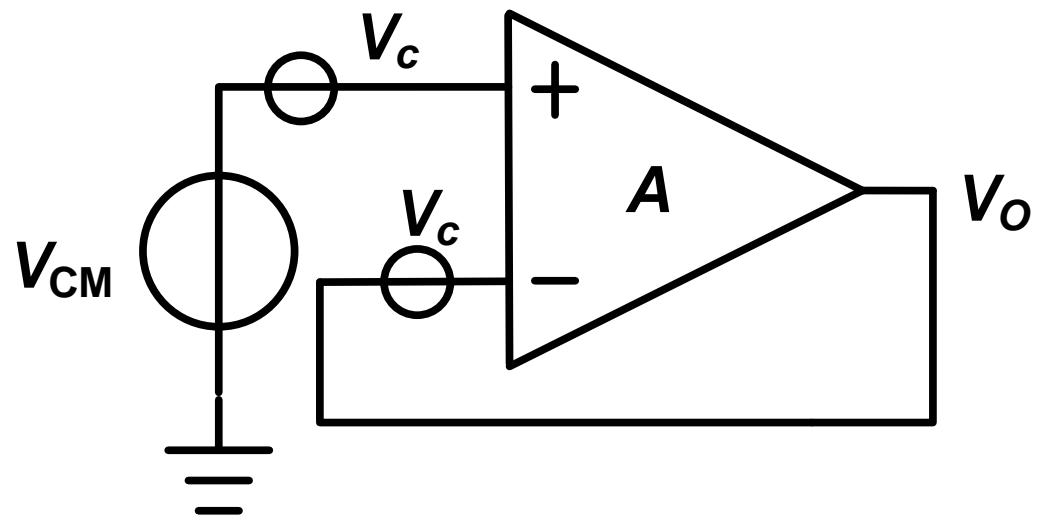
- 仿真器对电路进行小信号分析，可得到电路的频率特性；
- 可确定电路的低频增益，GBW，PM等。

仿真5-小信号建立特性



- 在输入端施加阶跃信号，观察放大器的瞬态响应，确认放大器的稳定性、建立速度等；
- 一般瞬态仿真不含电路噪声，而阶跃信号包含的频率分量非常丰富，可以判断放大器是否稳定。

仿真6-CMRR

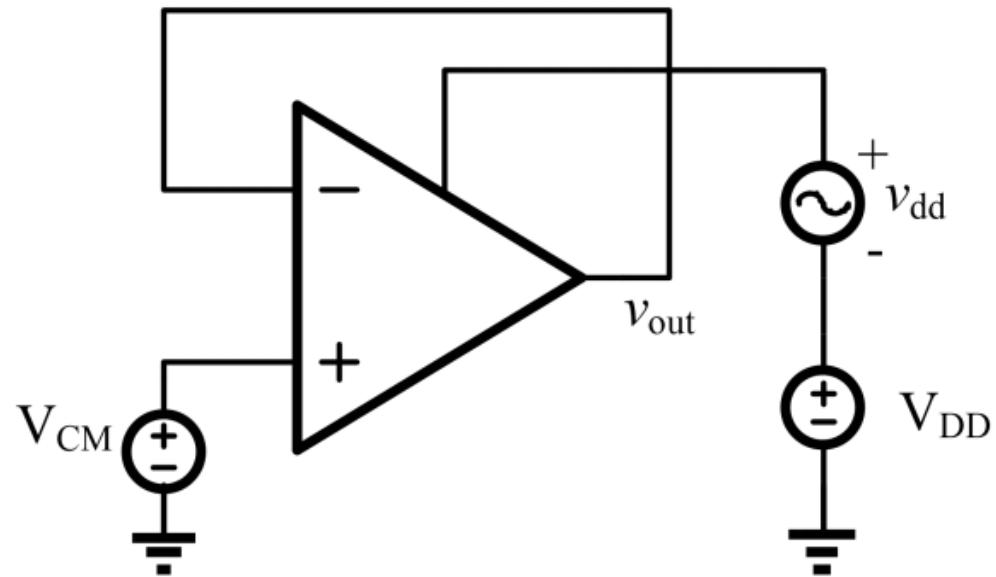


$$V_o / V_c \approx 1 / CMRR \quad V_+ = V_c, V_- = V_o + V_c$$

$$V_o = A_d (V_+ - V_-) + \frac{A_c}{2} (V_+ + V_-) = -A_d V_o + \frac{A_c}{2} (V_o + 2V_c)$$

$$\frac{V_o}{V_c} = \frac{A_c}{1 + A_d - A_c / 2} \approx \frac{1}{CMRR}$$

仿真7-PSRR

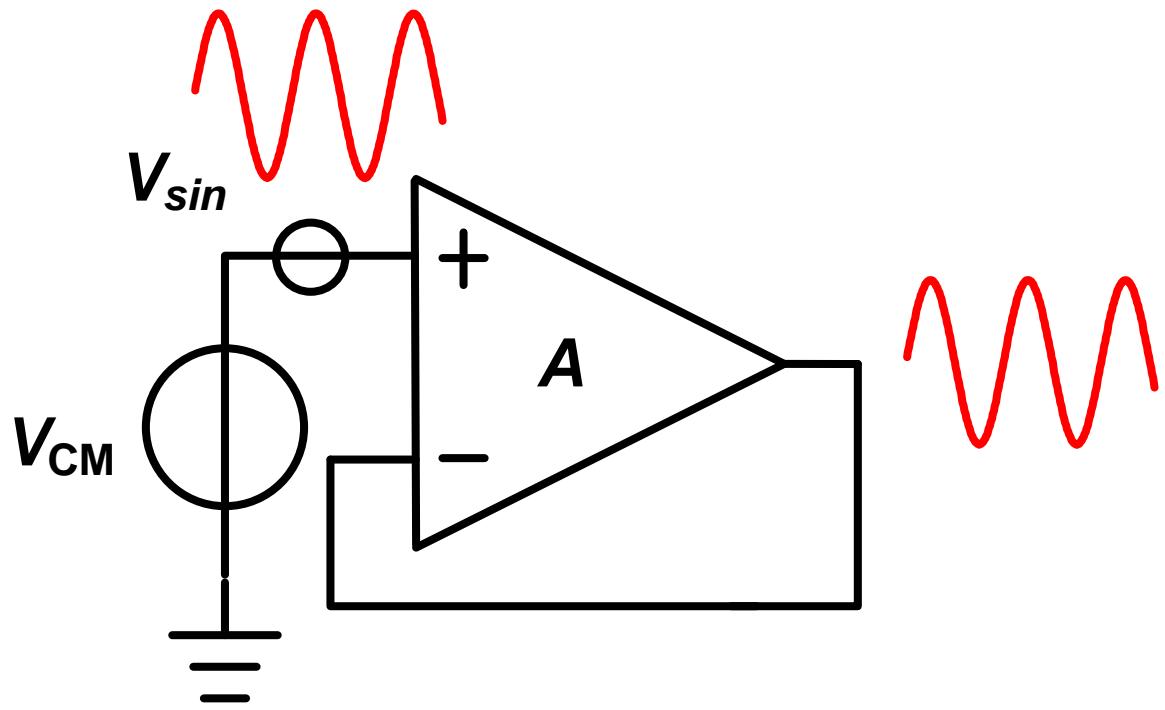


- v_{dd} 是叠加在电源和地上的小信号；

$$v_{out} = A_v(0 - v_{out}) + A_{DD}v_{dd}$$

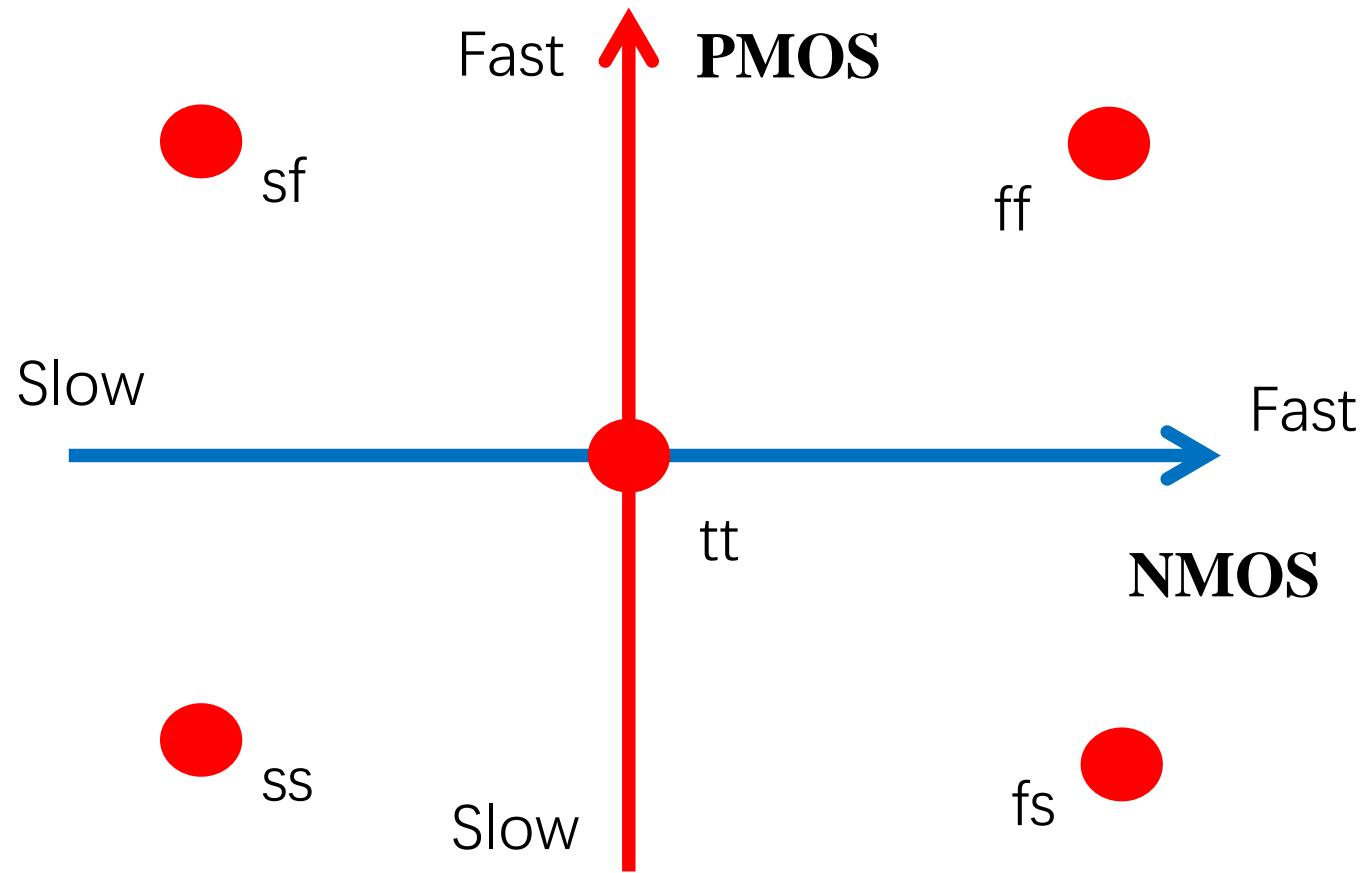
$$\frac{v_{out}}{v_{dd}} = \frac{A_{DD}}{1 + A_v} \approx \frac{1}{PSRR}$$

仿真8-非线性



- 对输出进行采样，对输出信号进行FFT分析；
- 需要注意FFT的频率混叠，频谱泄露等问题；
- 还需注意仿真器的精度，需用 max_{step} 参数对瞬态仿真进行约束。

仿真9-工艺角



- 广义上工艺角还需包含电源变化，偏置电流变化，温度变化等等。

仿真10-蒙特卡洛

- **Process** 蒙特卡洛仿真：目前仿真器以及工艺文件可以支持蒙特卡洛仿真，其中一种设置为“**Process Only**”，这与工艺角仿真差别不大；
- **Mismatch Only**：仿真器可根据设置自动确定器件匹配度，用该仿真可得到放大器的失调等参数，还得对共差转换等进行仿真。

作业

- 9.7, 9.8, 9.19