

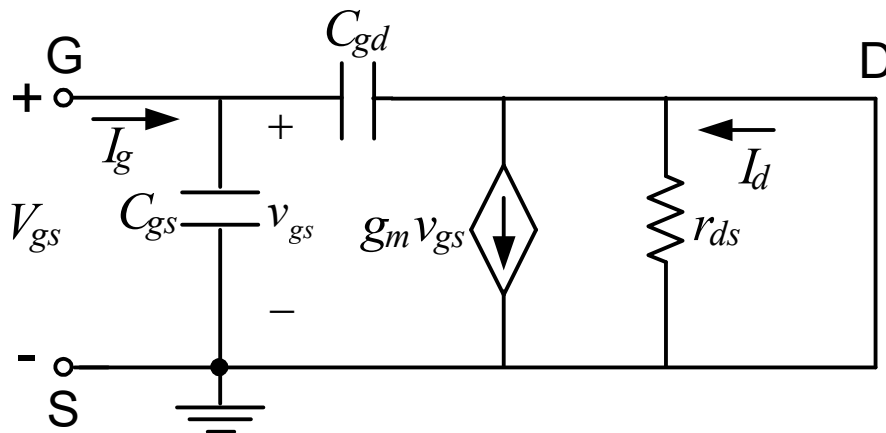
# CMOS模拟集成电路补充

- ◆ MOS晶体管特征频率
- ◆ 共源放大电路高频响应
- ◆ 共栅放大电路
- ◆ 共漏放大电路
- ◆ 共源共栅放大电路

# MOS晶体管的特征频率 $f_T$

输出交流短路时，电流增益为1的频率

$$f_T \approx \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$



一般地，MOS管 $C_{gs}$ 的典型值为0.1-0.5pF， $C_{gd}$ 的典型值为0.01-0.04pF。

随着纳米CMOS技术的进步，CMOS器件特征频率已达到几百GHz

注意，晶体管的特征频率 $f_T$ 不是晶体管放大器的上限工作频率，但它可以用来估计晶体管放大电路的最高工作频率。

晶体管放大器设计时，最高工作频率一般选为晶体管特征频率的1/10，振荡器的工作频率可达到特征频率的1/3。

所以特征频率越高，晶体管电路可以工作到更高的频率。晶体管特征频率 $f_T$ 为估计电路工作频率上界提供了依据

# MOS晶体管的特征频率 $f_T$

$$I_g = s(C_{gs} + C_{gd})V_{gs}$$

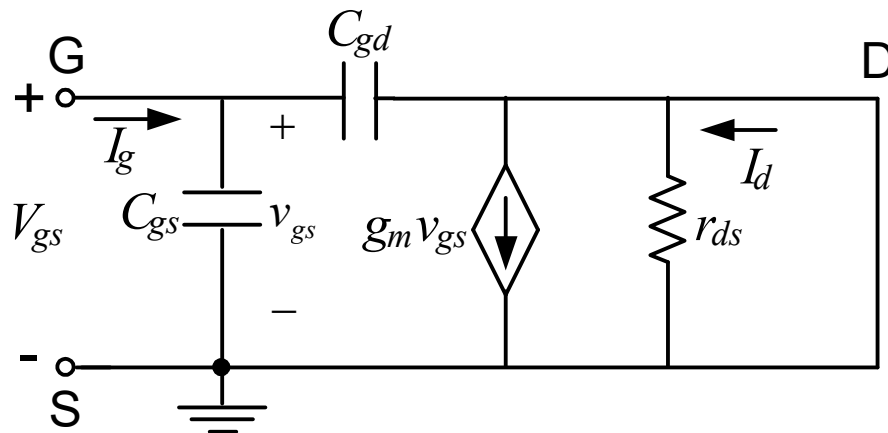
$$I_d = g_m V_{gs} - sC_{gd}V_{gs} = (g_m - sC_{gd})V_{gs}$$

联立解上2式，得到输出短路电流增益为

$$G_I = \frac{I_d}{I_g} = \frac{g_m - sC_{gd}}{s(C_{gs} + C_{gd})}$$

令 $s=j\omega$ ，上式成为

$$G_I|_{s=j\omega} = \frac{I_d}{I_g} = \frac{g_m - j\omega C_{gd}}{j\omega(C_{gs} + C_{gd})}$$



$|G_I|_{s=j\omega} = 1$  时的频率定义为特征频率 $f_T$ ，

如果  $g_m \gg \omega C_{gd}$ ，特征频率 $f_T$ 为

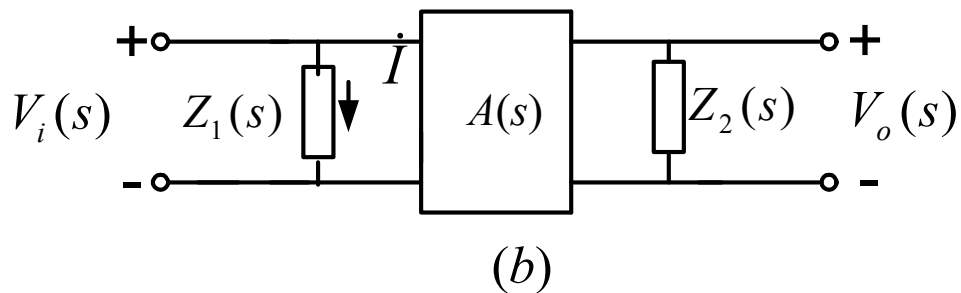
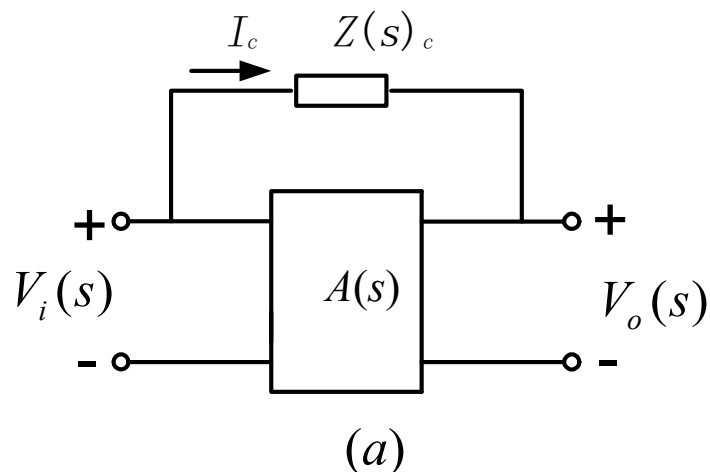
$$f_T \approx \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$

# 密勒定理

$$Z_1(s) = \frac{Z(s)}{1 - A(s)}$$

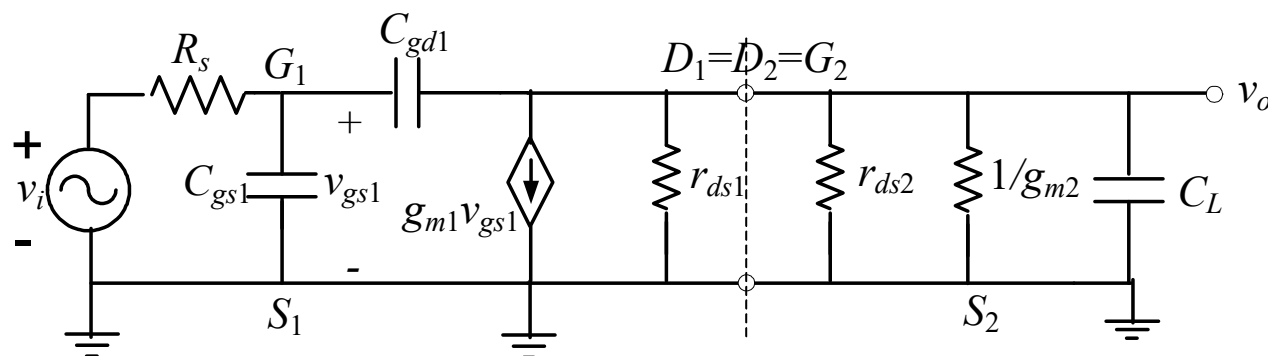
$$Z_2(s) = \frac{Z(s)}{1 - \frac{1}{A(s)}}$$

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

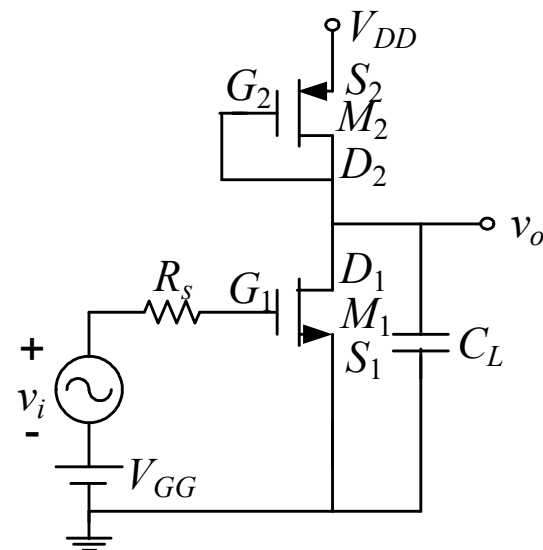


密勒定理使输出与输入去耦，简化分析

# 共源放大电路高频响应

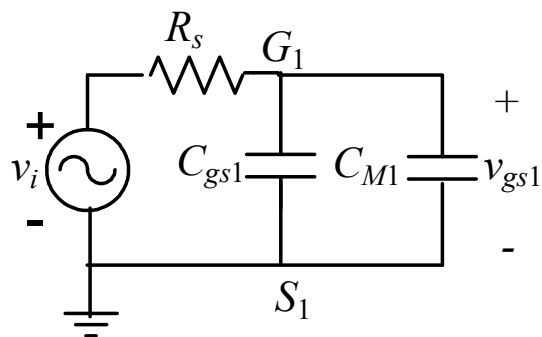


交流小信号等效电路

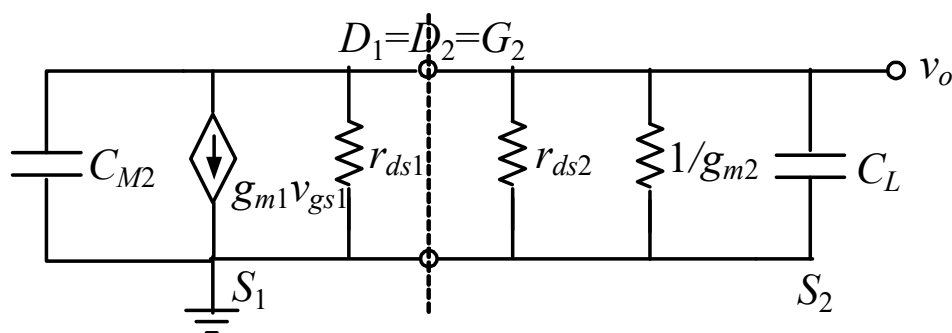


PMOS二极管负载

应用密勒定理化简

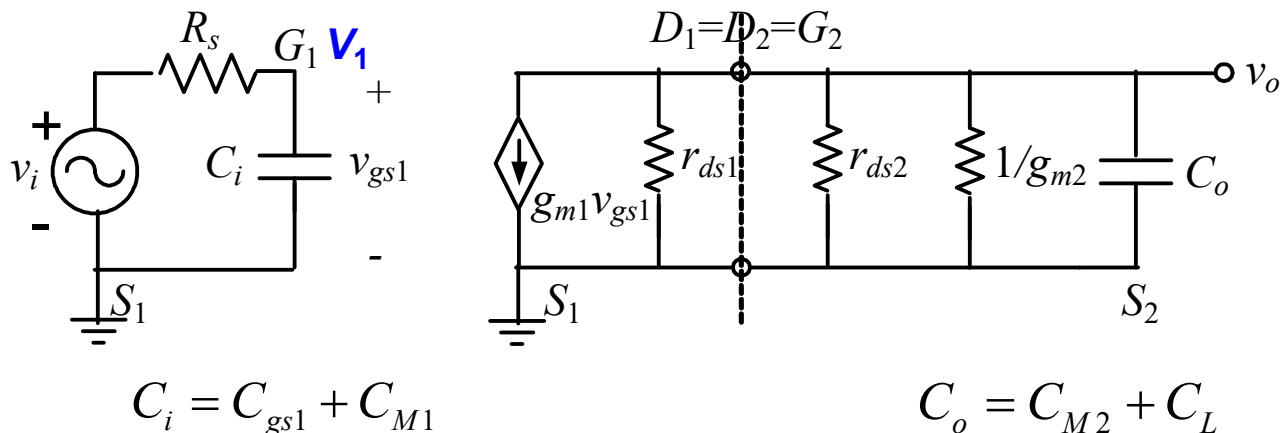


$$C_{M_1} = C_{gd_1} \left[ 1 - A(s) \right]$$



$$C_{M_2} = C_{gd_1} \left( 1 - \frac{1}{A(s)} \right)$$

# 高频响应



围绕结点  $G_1$ 、输出节点  $V_o$  列写 **KCL** 方程

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_1 - V_i}{R_s} + sC_i V_1 &= 0 \\ g_{ds1} V_o + g_{ds2} V_o + sC_o V_o + g_{m1} V_1 + g_{m2} V_o &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = - \frac{g_{m1}}{g_{m2} + g_{ds1} + g_{ds2}} \frac{1}{(1 + sC_i R_s)} \frac{1}{\left( 1 + sC_o \frac{1}{g_{m2} + g_{ds1} + g_{ds2}} \right)}$$

# 高频响应

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{g_{m1}}{g_{m2} + g_{ds1} + g_{ds2}} \frac{1}{(1 + sC_i R_s)} \frac{1}{\left(1 + sC_o \frac{1}{g_{m2} + g_{ds1} + g_{ds2}}\right)}$$

$$G(s) = -\frac{g_{m1}}{g_{m2} + g_{ds1} + g_{ds2}} \frac{1}{(1 + s\tau_i)} \frac{1}{(1 + s\tau_o)}$$

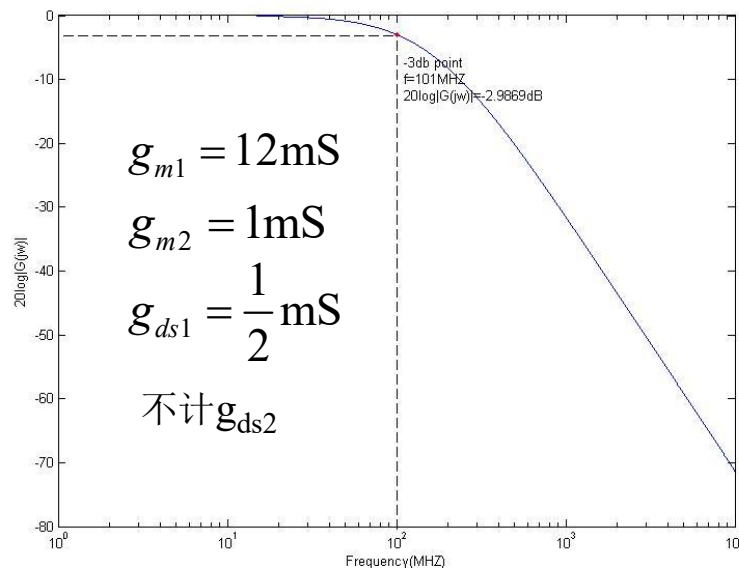
$$\tau_i = R_s C_i \quad \tau_o = \frac{1}{g_{m1} + g_{ds1} + g_{ds2}} C_o$$

$$G(j\omega) = G(s) \Big|_{s=j\omega}$$

$$= -\frac{g_{m1}}{g_{m2} + g_{ds1} + g_{ds2}} \frac{1}{\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_i}\right)} \frac{1}{\left(1 + \frac{j\omega}{\omega_o}\right)}$$

$$\omega_i = 1 / \tau_i = 800 \times 10^6 \text{ rad/s}$$

$$\omega_o = 1 / \tau_o = 1350 \times 10^6 \text{ rad/s}$$



# 共栅放大电路

以镜像电流源作负载为例

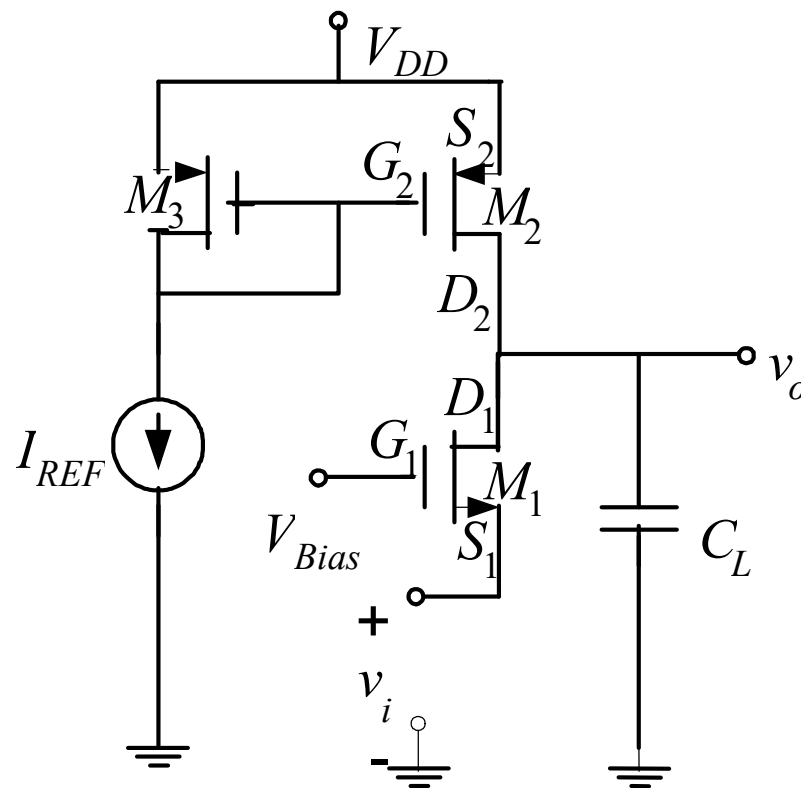
放大机理：

**M1**将信号电压转变为电流；

此电流流过作负载的镜像电流源，将电流又转变为电压；

如果负载电阻足够大，此电压比输入信号电压大，就实现了信号的放大。

**M1**起到中介作用。





# 直流大信号电压转移特性

输出摆幅  $V_{o,max} - V_{o,min}$

当  $V_{GS1} = V_b - V_i \leq V_{TN1}$ ,

或  $(V_i \geq V_b - V_{TN1})$  时

$M_1$ 处于关断状态, 而作为负载的镜像电流源,  $M_2$ 总处于导通状态, 所以输出电压  $V_{omax} = V_{DD}$ 。

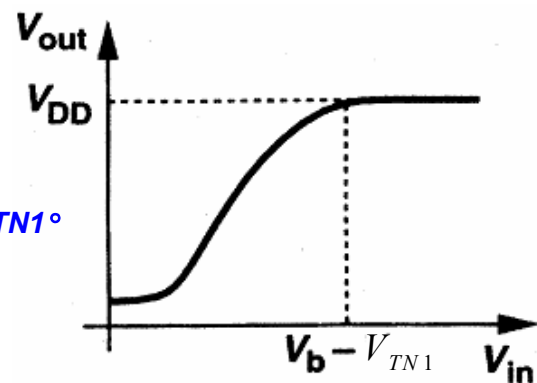
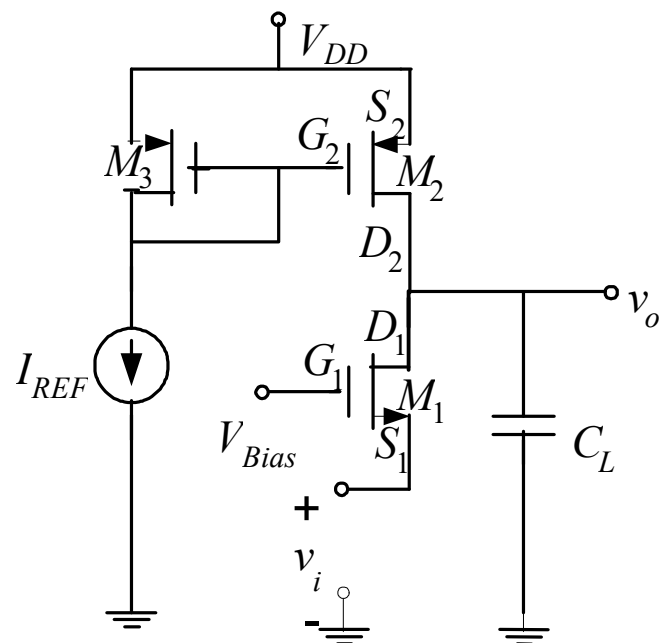
当  $V_i \leq V_b - V_{TN1}$  或  $(V_{GS1} \geq V_{TN1})$  时

$M_1$ 导通, 并进入饱和区, 输出电压  $V_o$ 为

$$V_o = V_{ds1} + V_i$$

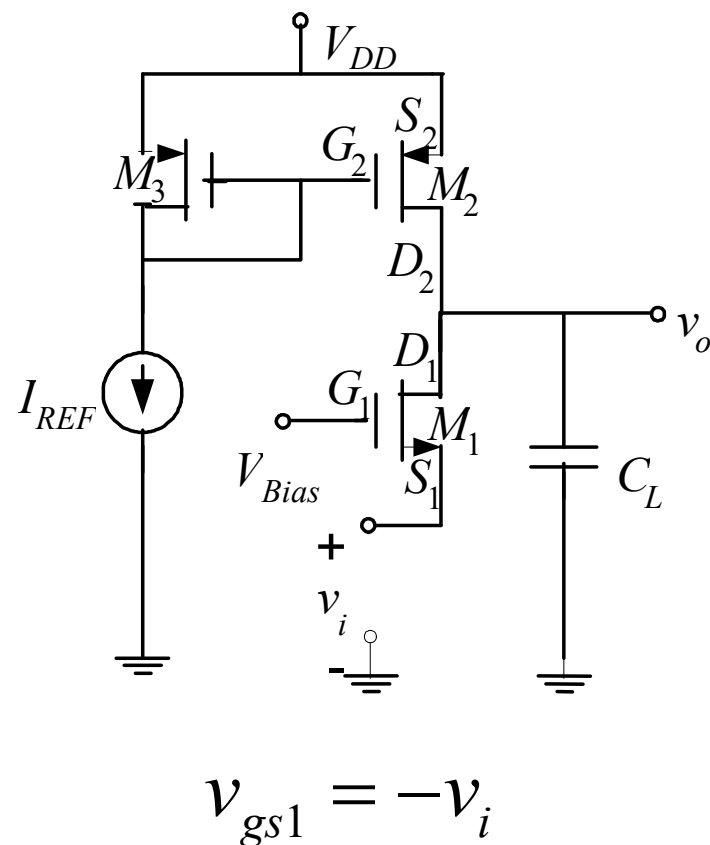
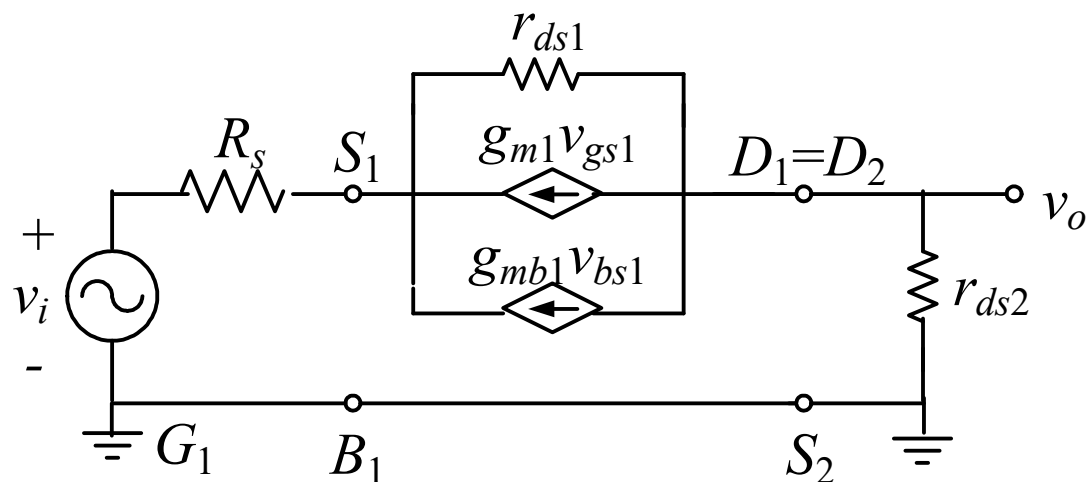
如果  $V_b$ 固定, 随着  $V_i$ 减小输出电压  $V_o$ 也减小, 最终  $V_{o,min}$ 接近  $V_b - V_{TN1}$ 。

如果  $V_i$ 进一步减小,  $M_1$ 将进入线性区。



# 交流小信号等效电路

低频小信号情况下镜像电流源作有源负载时，  
其对 $M_1$ 的影响可用 $M_2$ 的输出电阻 $r_{ds2}$ 等效。

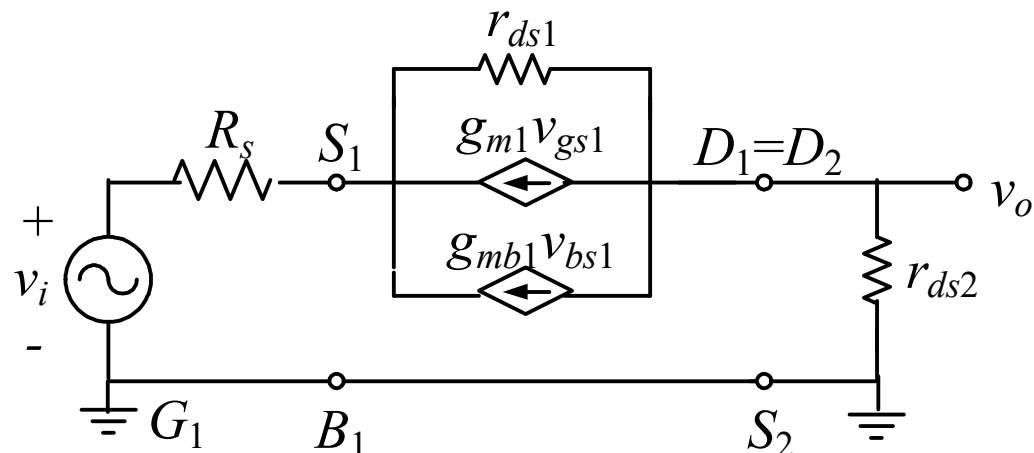


# 增益，输入电阻，输出电阻

$$v_{gs1} = -v_i \quad (\text{当 } R_s \text{ 很小可予略去时})$$

$$v_o = \left( -g_{m,eff} v_{gs1} + \frac{v_i - v_o}{r_{ds1}} \right) r_{ds2}$$

$$g_{m1,eff} = g_{m1} + g_{mb1}$$



$$G_o = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_{m,eff} + g_{ds1}}{g_{ds1} + g_{ds2}} \quad \text{式中 } g_{ds1} = 1/r_{ds1}, \quad g_{ds2} = 1/r_{ds2}$$

$$R_i = \frac{1}{g_{m1,eff}} \quad \text{当 } r_{ds1} \text{ 支路电流比流过受控源电流小得多时}$$

$$R_o = r_{ds1} \parallel r_{ds2} \quad \text{当 } (R_s \ll r_{ds1}) \text{ 时}$$

# 共漏放大电路

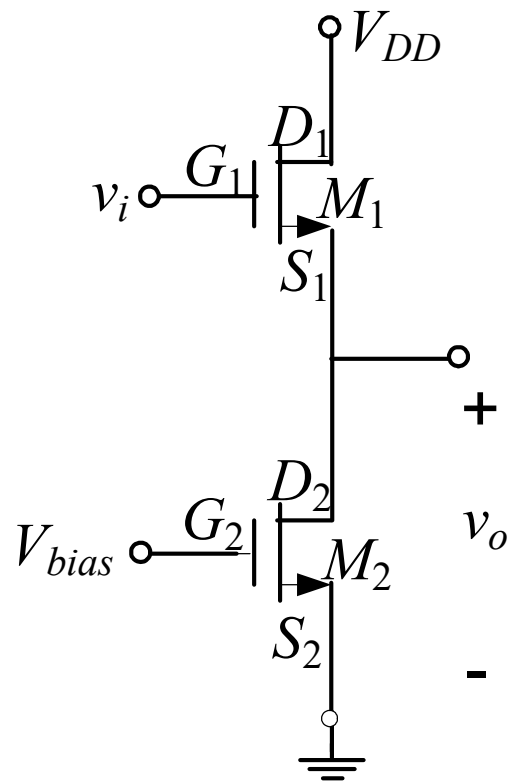
以电流阱负载为例

放大机理：

**M1**将信号电压转变为电流；

此电流流过作负载的电流源**M2**，将  
电流又转变为电压；

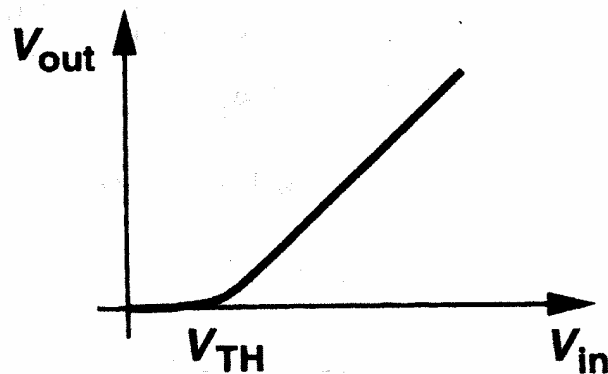
请注意共漏极放大器，输出电压小于  
输入电压，电压增益小于1，但电流  
远大于输入端，输出端功率大大提高了。



# 直流大信号电压转移特性

输出摆幅

$$V_{o,max} - V_{o,min}$$



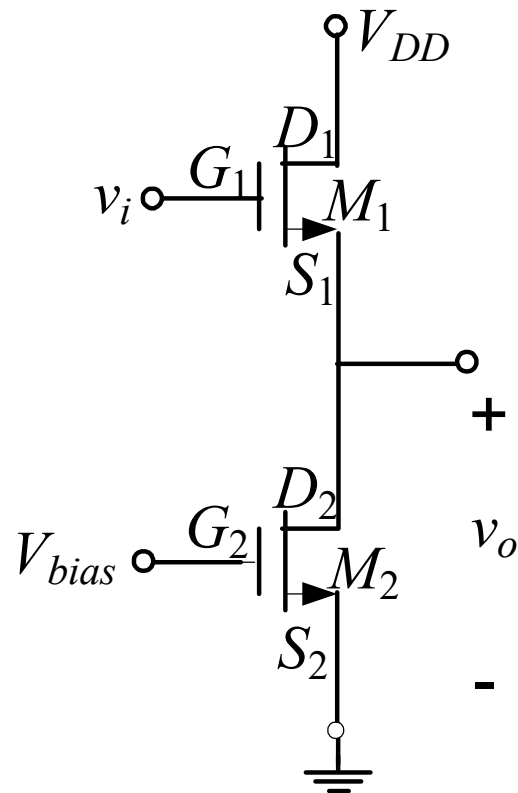
当  $V_i < V_{TN1}$  时,  $M_1$  处于截止状态, 输出电压  $V_o = 0$ , 此即输出电压最小值

$$V_{o,min} = 0$$

随着  $V_i$  增大并超过  $V_{TN1}$ ,  $M_1$  导通进入饱和区 ( $V_{DD}$  典型值时),  $I_{D1}$  流过有源负载。随  $V_i$  增大, 输出电压  $V_o$  也增大, 两者之差为  $V_{GS1}$ 。

输出电压最大值约为

$$V_{o,max} \approx V_{DD} - V_{TN1}$$



# 增益，输入电阻，输出电阻

$$R'_L = r_{ds1} \parallel r_{ds2}$$

$$V_{bs1} = -V_0$$

$$V_i = V_{gs1} + V_0$$

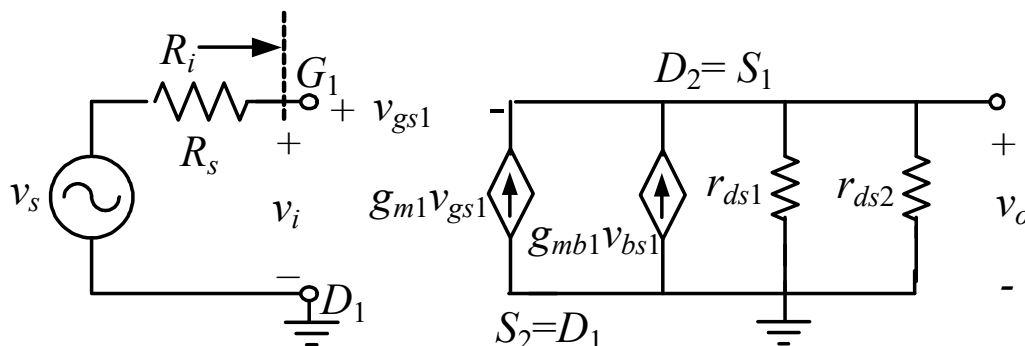
$$V_0 = (g_{m1}V_{gs1} + g_{mb1}V_{bs1})R'_L = (g_{m1}V_{bs1} - g_{mb1}V_0)R'_L \quad \left. \vphantom{V_0} \right\} \rightarrow$$

$$G_0 = \frac{V_o}{V_i} = \frac{g_{m1}R'_L}{1 + (g_{m1} + g_{mb1})R'_L} = \frac{g_{m1}}{g_{ds1} + g_{ds2} + g_{m1} + g_{mb1}}$$

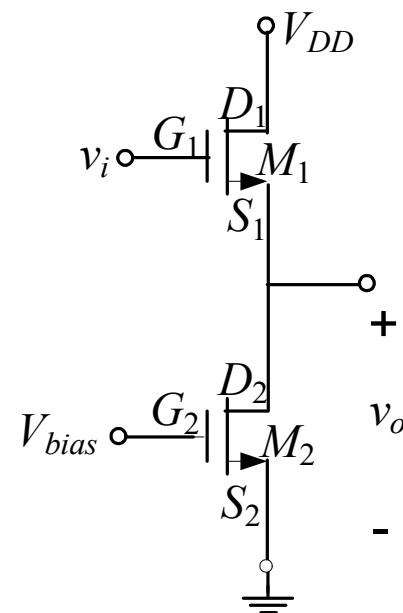
$$R_i = \infty$$

$$G_0 \approx \frac{g_{m1}}{g_{m1} + g_{mb1}} < 1$$

$$R_0 = r_{ds1} \parallel r_{ds2} \parallel \frac{1}{g_{m1}} \parallel \frac{1}{g_{mb1}} \approx \frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{mb1}}$$



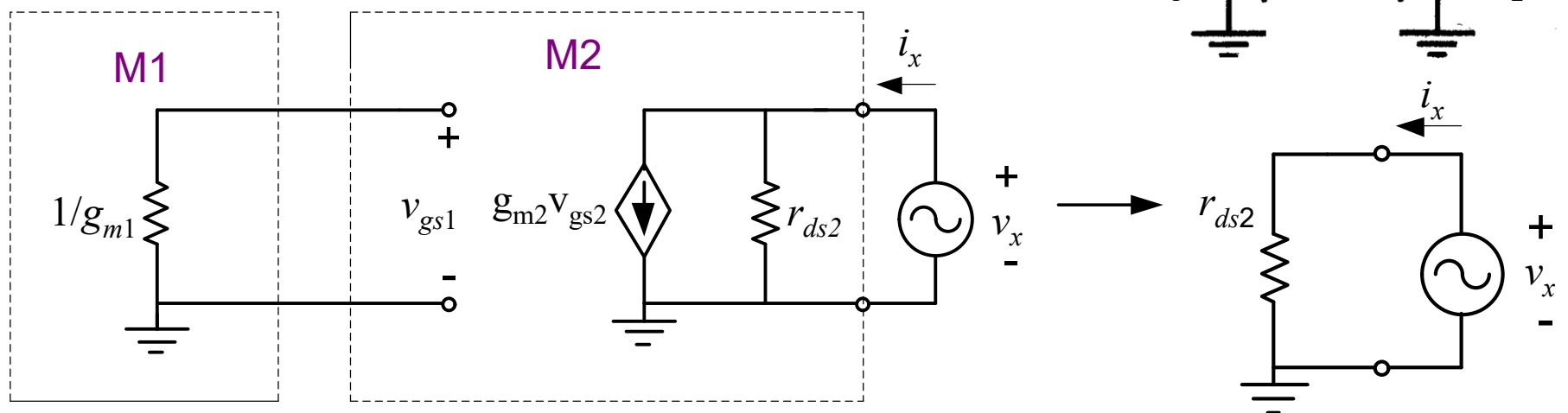
交流小信号等效电路



# 电流源输出电阻

为得出简单镜像电流源的输出电阻，第一步得出二极管连接的 $M_1$ 的等效电阻，第二步将 $M_1$ 用其等效电阻替代，得出整个电路的小信号等效电路，并由此计算其输出电阻 $r_{out}$

二极管连接的 $M_1$ 的等效电阻近似为 $1/g_m$

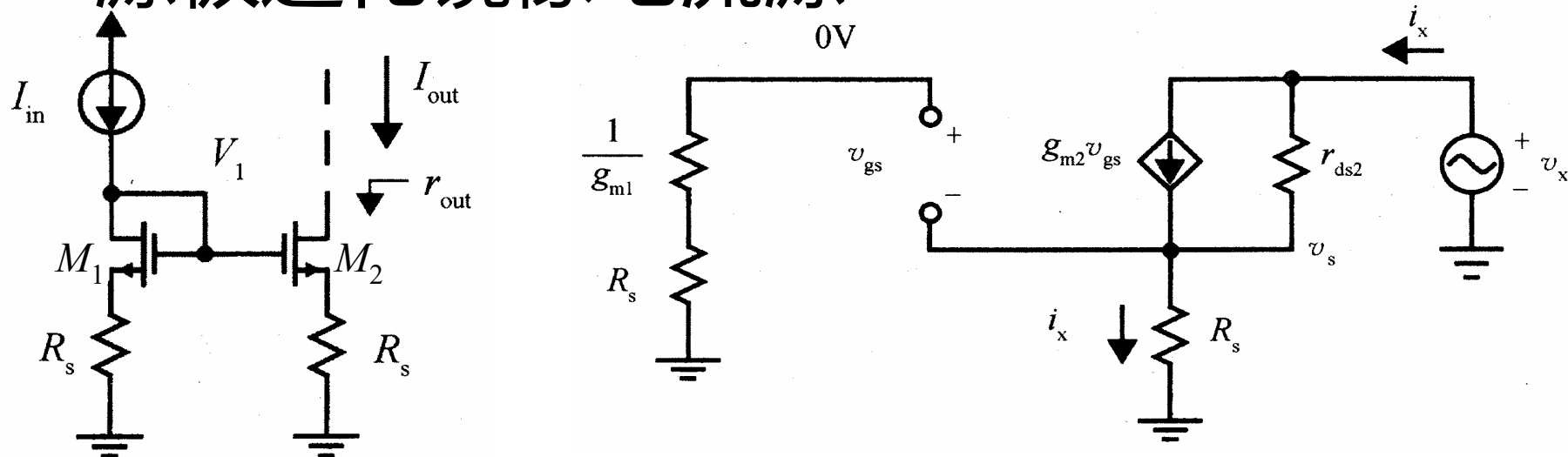


由于没有电流流过 $1/g_{m1}$ 电阻，无论施加于镜像电流源输出的电压 $v_x$ 为多少， $v_{gs2}$ 恒等于零。

因而图中受控源 $g_{m2}v_{gs2}=0$ ，故输出电阻为

$$r_{out} = \frac{v_x}{i_x} = r_{ds2}$$

# 源极退化镜像电流源



栅极接直流电压，交流相当于接地

$$i_x = g_{m2} v_{gs} + \frac{v_x - v_s}{r_{ds2}}$$

$$v_{gs} = -v_s$$

$$i_x = -i_x g_{m2} R_s + \frac{v_x - i_x R_s}{r_{ds2}}$$

$$r_{out} = \frac{v_x}{i_x} = r_{ds2} [1 + R_s (g_{m2} + g_{ds2})]$$

考虑背栅效应

$$r_{out} = \frac{v_x}{i_x} = r_{ds2} [1 + R_s (g_{m2} + g_{mb2} + g_{ds2})] \approx r_{ds2} (1 + R_s (g_{m2} + g_{mb2}))$$

源极退化镜像电流源比简单MOS镜像电流输出电阻增大了约 $(1+R_s g_{m2})$ 倍



# 共源共栅镜像电流源

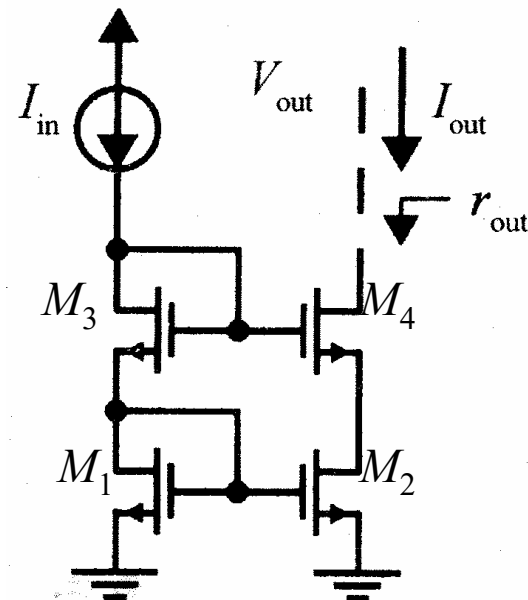
首先注意到从**M2**漏极看进去的输入电阻是 $r_{ds2}$ 。这样，将**M4**当作一个带 $r_{ds2}$ 的源极退化电阻的电流源，就可很快得出其输出电阻 $r_{out}$ 。

$$r_{out} = r_{ds4} [1 + R_s (g_{m4} + g_{mb4} + g_{ds4})]$$

式中 $R_s = r_{ds2}$ 。

$$\begin{aligned} r_{out} &= r_{ds4} [1 + r_{ds2} (g_{m4} + g_{mb4} + g_{ds4})] \\ &\approx r_{ds4} [1 + r_{ds2} (g_{m4} + g_{mb4})] \\ &\approx r_{ds2} (g_{m4} r_{ds4}) \end{aligned}$$

因此输出电阻比简单**CMOS**镜像电流源输出电阻增大了 $(g_{m4} r_{ds2})$ 倍

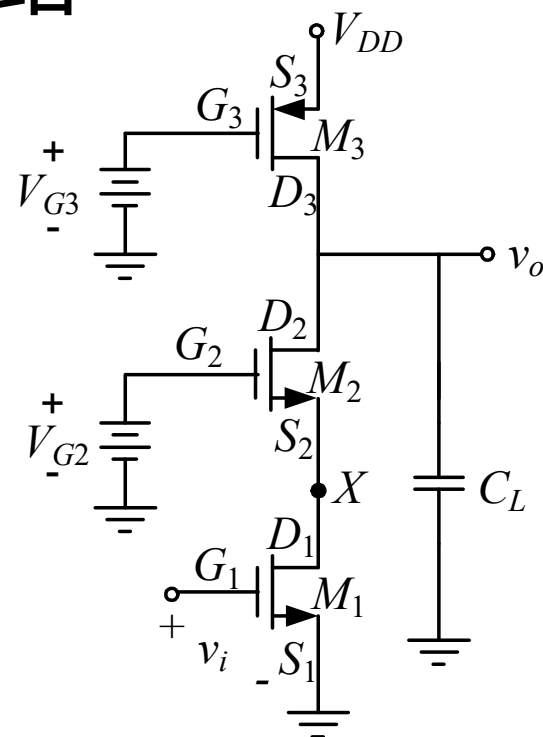


# 共源共栅(cascode)放大电路

以PMOS电流源负载为例

在共源极放大器上层叠了M2，带来两个优点：

米勒电容效应减小了，提高了工作  
上限频率，从而增加带宽；  
输出电阻提高了，从而提高增益。



# 直流大信号电压转移特性

电压转移特性定性说明：

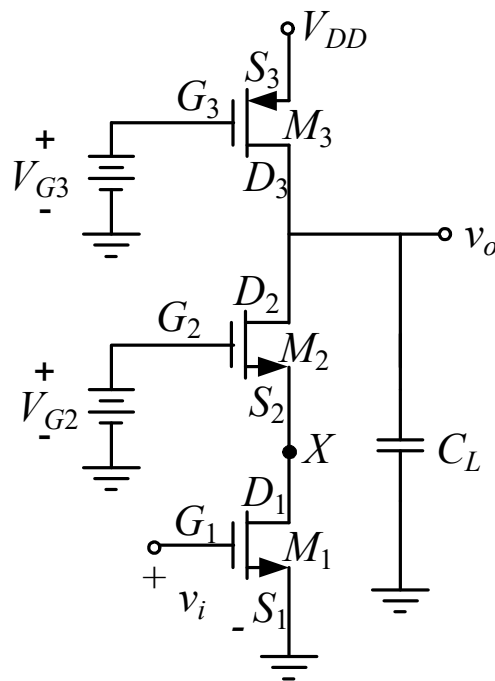
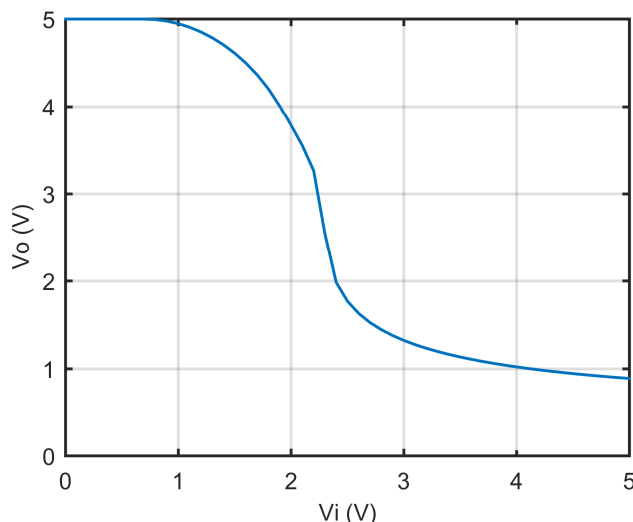
当输入信号电压 $V_i$ 小于 $M_1$ 的阈值电压 $V_{TN1}$ ，即 $V_i < V_{TN1}$ ， $M_1$ 截止，而 $M_2$ 、 $M_3$ 导通，故输出电压 $V_o$ 等于电源电压 $V_{DD}$ ，即 $V_{o,max} = V_{DD}$ 。

当输入信号电压 $V_i$ 大于 $M_1$ 的阈值电压 $V_{TN1}$ ，晶体管 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 均导通，输出电压 $V_o$ 等于 $M_2$ 、 $M_1$ 管压降之和( $V_{DS2} + V_{DS1}$ )，或 $V_{DD}$ 减去 $M_3$ 的管压降( $V_{DD} - V_{DS3}$ )。

输出最小电压 $V_{o,min}$ 与 $M_2$ 、 $M_3$ 的偏置电压有关，可根据流经 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 的电流相等这一约束条件，通过求解直流非线性微分方程得出。

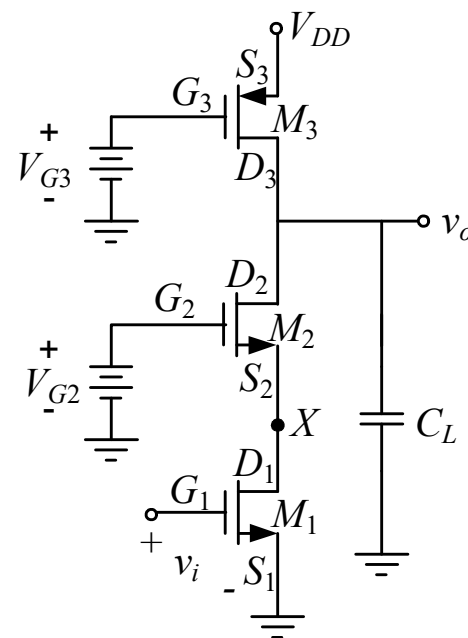
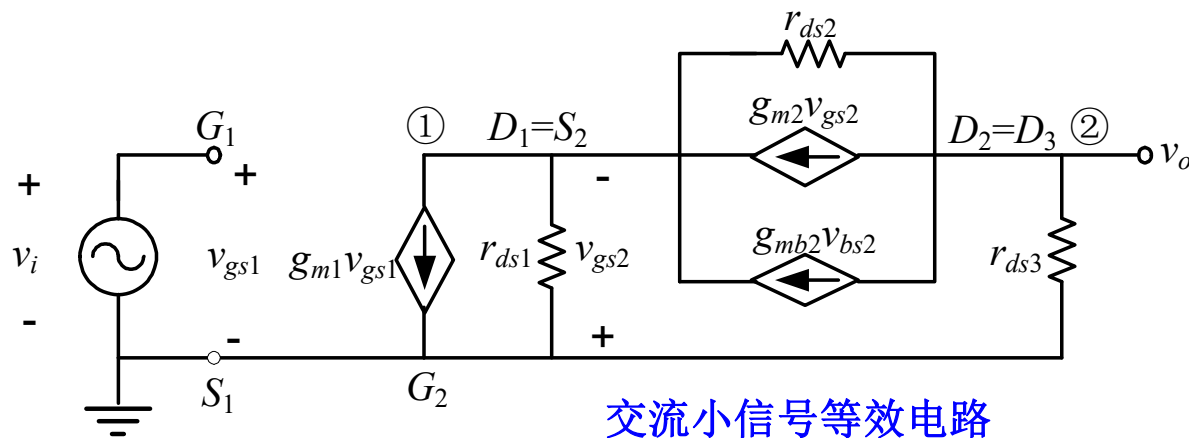
工程上一般通过仿真得出

仿真得到的电压转移特性



$V_{DD} = 5V$ ,  $V_{G2} = 3.3V$ ,  
 $V_{G3} = 2.2V$ ,  
 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$ 尺寸相同，栅长 $L = 1\mu m$ ，栅宽 $W = 2\mu m$ ，基于 $0.8\mu m$ 工艺，

# 增益, 输入电阻, 输出电阻



$$\left. \begin{aligned} g_{m1}V_i + g_{ds1}V_1 + g_{m2eff}V_1 + g_{ds2}(V_1 - V_2) &= 0 \\ g_{ds3}V_2 - g_{m2eff}V_1 + g_{ds2}(V_2 - V_1) &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$G_0 = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_2}{V_i} = - \frac{g_{m1}(g_{ds2} + g_{m2eff})}{g_{ds1}g_{ds2} + g_{ds3}(g_{ds1} + g_{ds2} + g_{m2eff})}$$

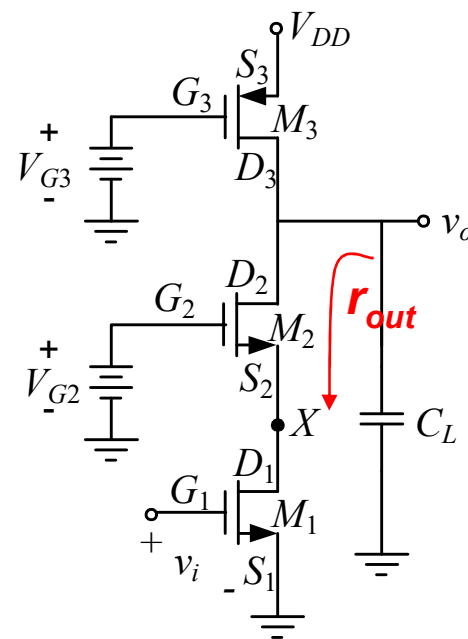
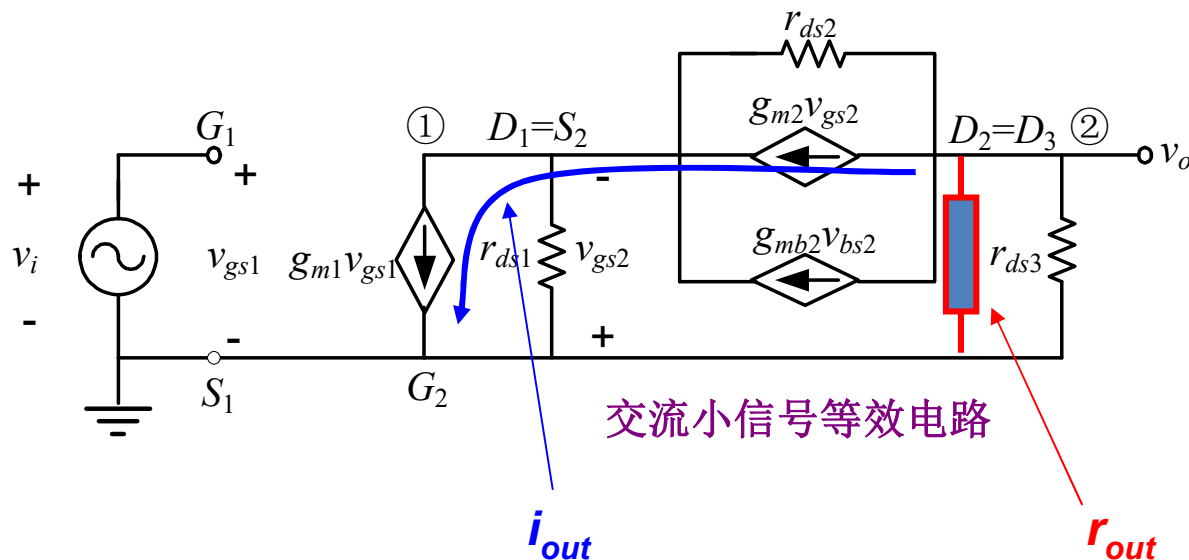
$$R_i = \infty$$

当 $g_{ds}$ 比 $g_m$ 小得多时  $G_0 \approx -\frac{g_{m1}}{g_{ds3}}$

$$\text{输出电阻 } R_o = \left( r_{ds1} + r_{ds2} + g_{m2eff} r_{ds1} r_{ds2} \right) \parallel r_{ds3}$$

共源共栅级的输出电阻与M3漏极看入电阻并联

# 增益公式的直观解释



$$v_o = -i_{out} (r_{out} \parallel r_{ds3})$$

$$= -g_{m1}v_i (r_{out} \parallel r_{ds3})$$

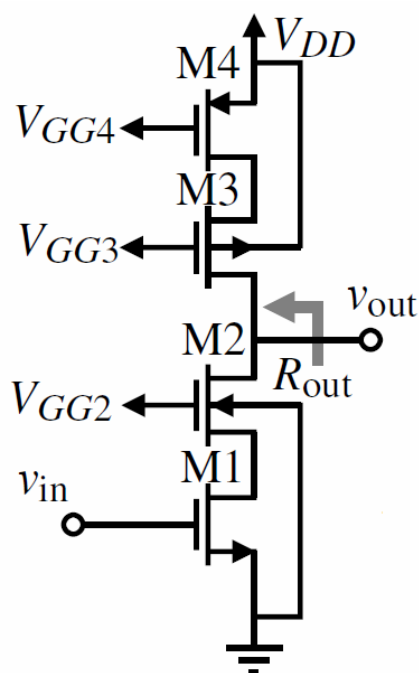
$$G_0 = -g_{m1} (r_{out} \parallel r_{ds3}) = -\frac{g_{m1}(g_{ds2} + g_{ds1} + g_{m2eff})}{g_{ds1}g_{ds2} + g_{ds3}(g_{ds1} + g_{ds2} + g_{m2eff})} \approx -g_{m1}r_{ds3}$$

与前一页公式差异

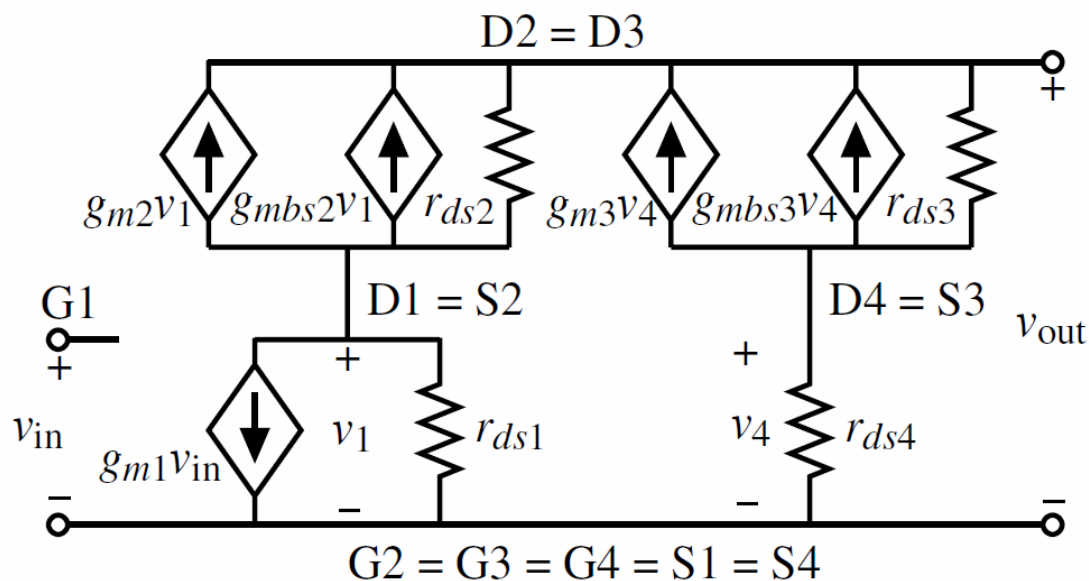
$$r_{out} = r_{ds1} + r_{ds2} + g_{m2eff}r_{ds1}r_{ds2} \approx r_{ds1}g_{m2}r_{ds2} \quad (\text{忽略背栅效应})$$

# 共源共栅放大电路

◆ 输出电阻大



◆ 增益高



交流小信号等效电路

$$R_{out} \approx (r_{ds1} g_{m2} r_{ds2}) \parallel (r_{ds4} g_{m3} r_{ds3})$$

$$A_v = -g_{m1} R_{out}$$

# 共源极、共栅极、共漏极放大器的特点

**(1)**一般情况下，共源极放大器电压增益远大于1，

源极跟随器电压增益略小于1，共栅极电路的电压增益远大于1。

**(2)**输入信号频率较低时，共源极电路的输入电阻很大，共漏极放大器输入电阻更大。

而共栅极放大器的输入电阻基本上在几百欧姆以内。

**(3)**源极跟随器的输出电阻在几百欧姆或更小，

共源极电路和共栅极放大器输出电阻大，共漏极放大电路输出电阻最大。