

# 模拟与数字电路

## Analog and Digital Circuits



课程主页 扫一扫

第 四 讲 : **Single Transistor Amplifier**

Lecture 4: **单晶体管放大器电路**

主 讲 : 陈 迟 晓

Instructor : Chixiao Chen

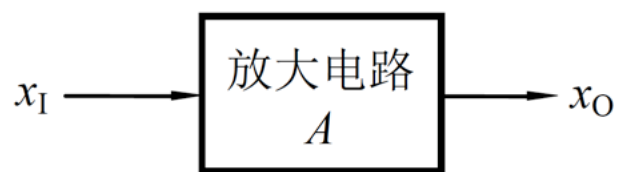
# 提纲

- 复习
  - MOSFET的小信号模型，及其物理意义
- 线性放大概念
- 放大电路模型
- 单管放大电路



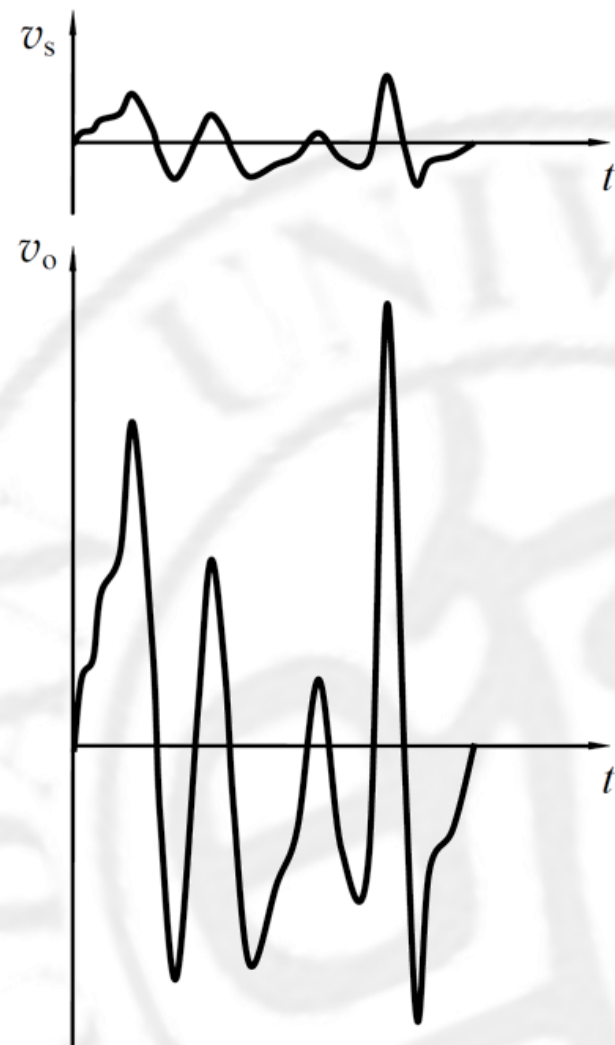
# 信号的线性放大

- 抽象层面的理解
- 线性放大的条件



当 $x_I = v_s$ ,  $x_O = v_o$ ,  $A > 1$ 时

线性放大的特点表现为任何一点的电压幅值被放大的程度完全相同，也反映了输入对输出的控制。



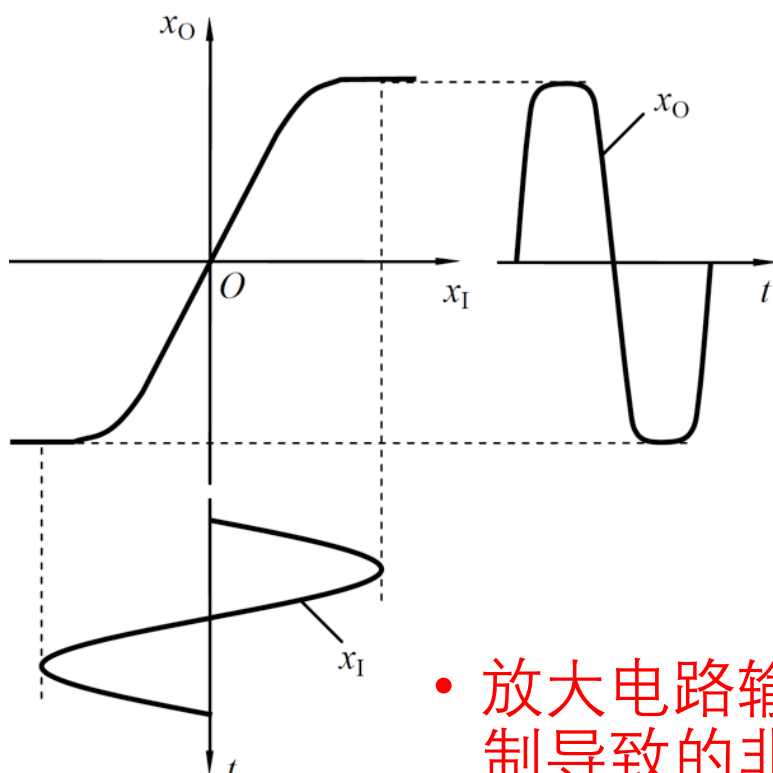
话筒电压信号的线性放大

放大电路需要能量供给

$|A| > 1$ ，且保持常数

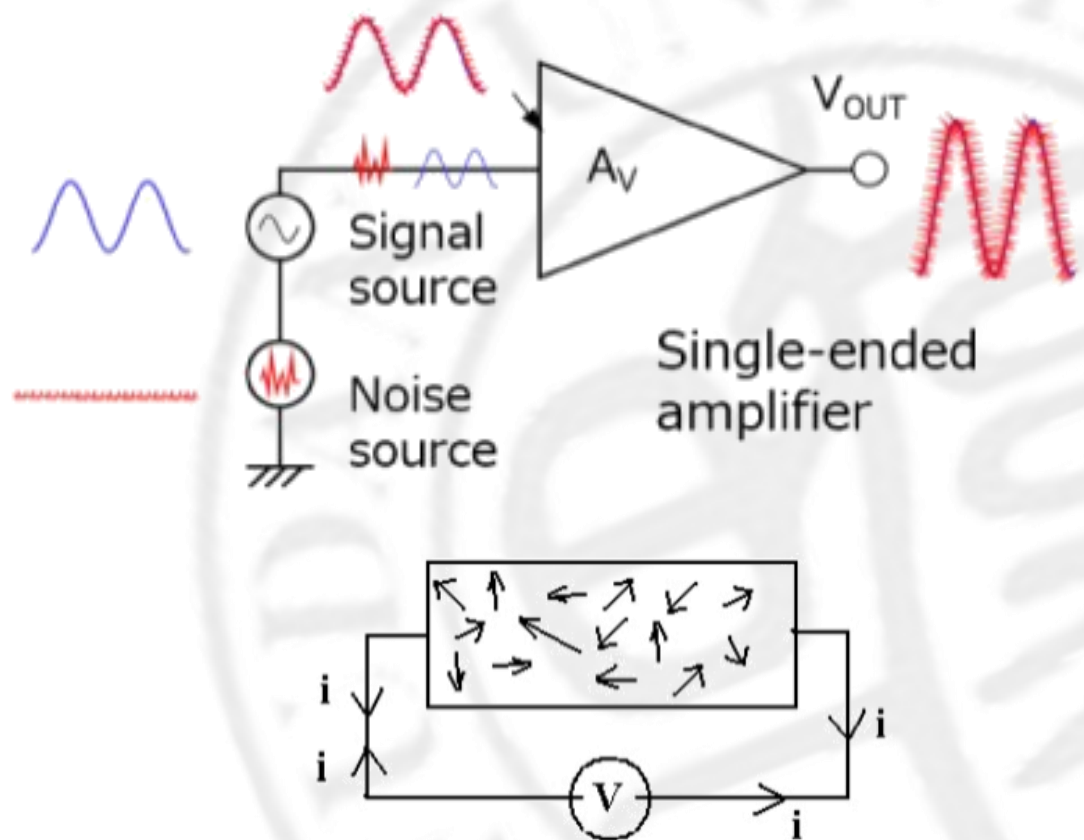
# 实际放大信号的非理想因素

- 放大器的非线性失真



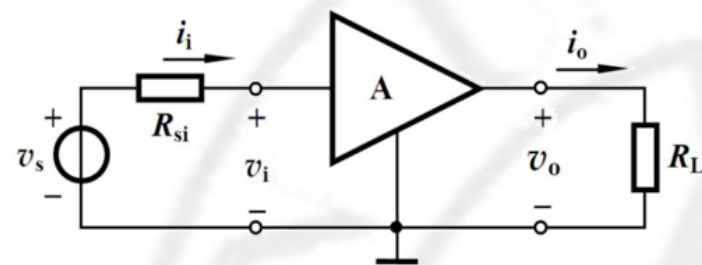
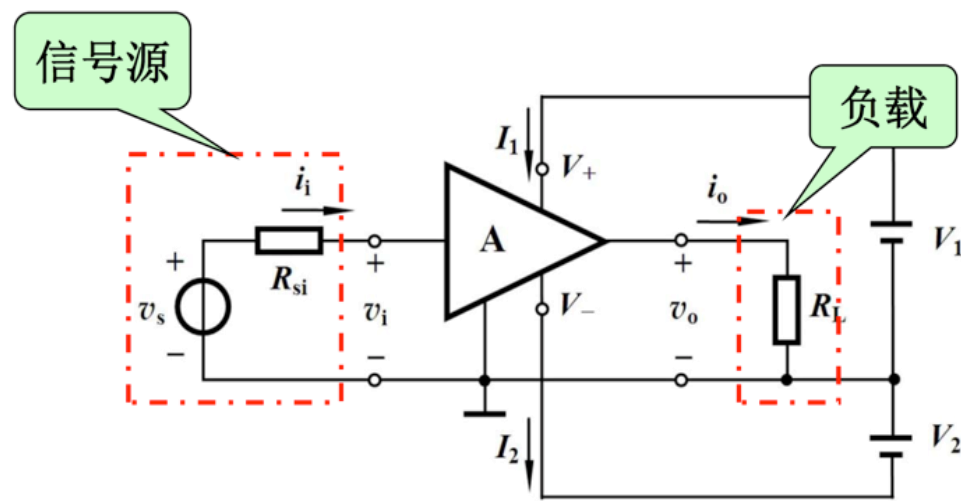
- 放大电路输出摆幅限制导致的非线性失真

- 放大器过程中的噪声耦合



# 放大电路模型

## 1. 信号放大时电路的一般构成



简化形式

需要供电电源；是双口网络。

➤ 接地符号“ $\perp$ ”的含义

电路中的电位参考基准点，定义为零电位。

也是输入、输出和电源的“共同端”。

# 放大电路的直流传递函数

## 2. 放大电路增益形式

电压增益（电压放大倍数）

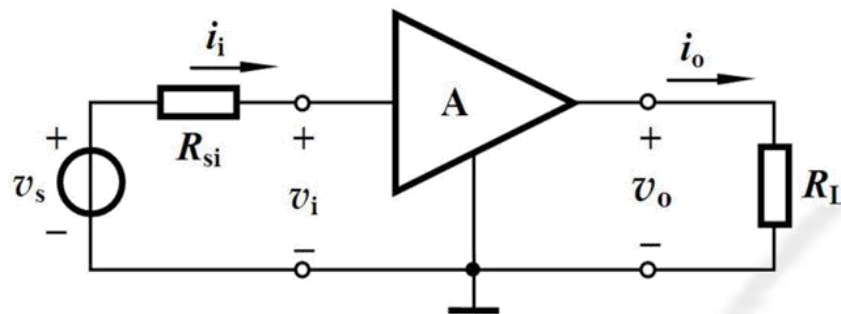
$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

电流增益  $A_i = \frac{i_o}{i_i}$

互阻增益  $A_r = \frac{v_o}{i_i} \text{ (}\Omega\text{)}$

互导增益  $A_g = \frac{i_o}{v_i} \text{ (S)}$

功率增益  $A_p = \frac{P_o}{P_i}$



增益分贝数表示

电压增益 =  $20\lg|A_v| \text{ dB}$

电流增益 =  $20\lg|A_i| \text{ dB}$

功率增益 =  $10\lg A_p \text{ dB}$

“甲放大电路的增益为-20倍”和“乙放大电路的增益为-20dB”，问哪个电路的增益大？

# 放大电路输入、输出特性

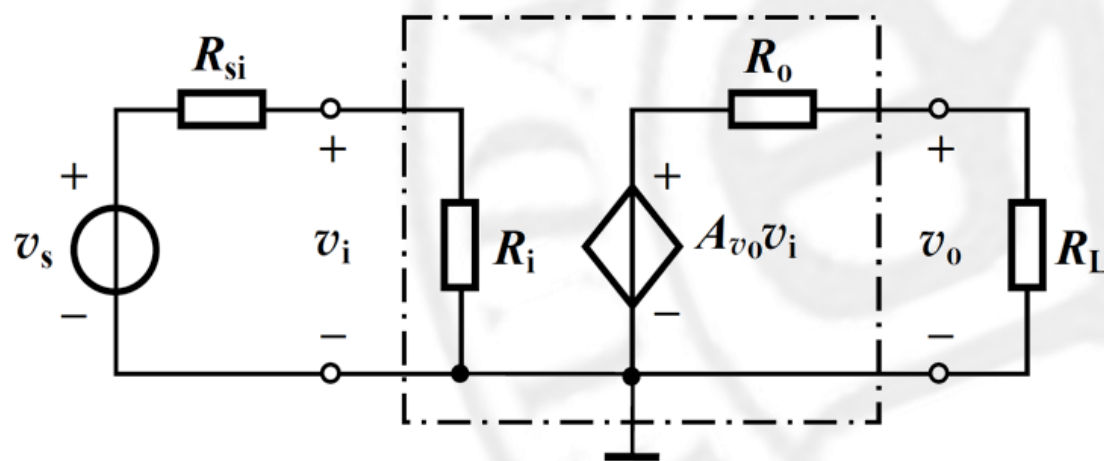
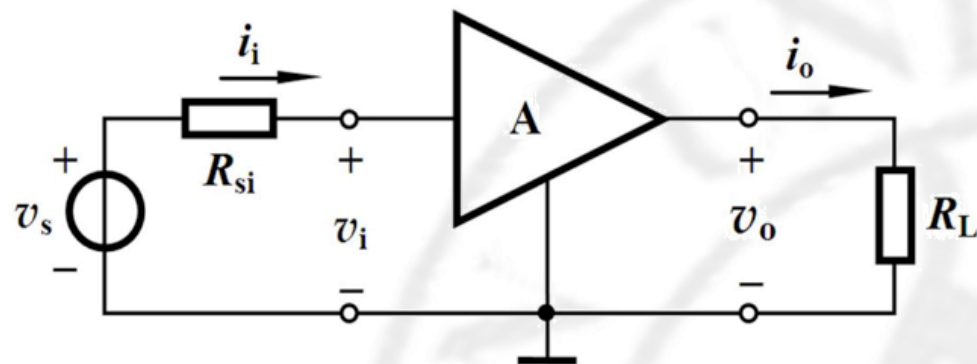
## 3. 放大电路模型

### 电压放大模型

$A_{v0}$  —— 负载开路时的  
电压增益

$R_i$  —— 放大电路的  
输入电阻

$R_o$  —— 放大电路的  
输出电阻





# 放大电路输入、输出特性

## 3. 放大电路模型

### 电压放大模型

由输出回路得

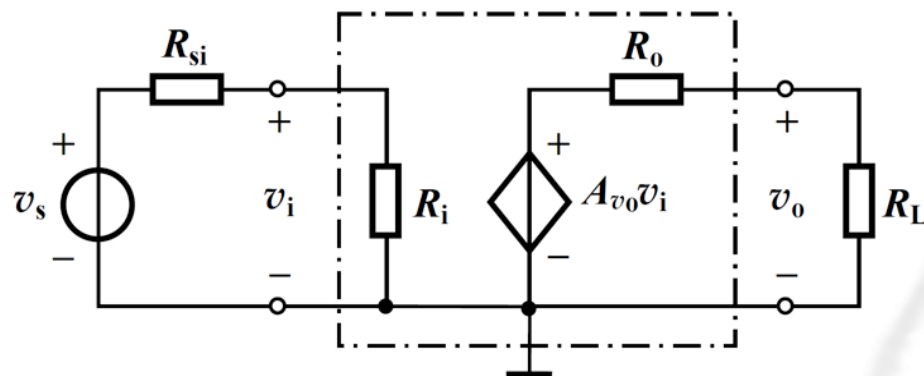
$$v_o = A_{vo} v_i \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

则电压增益为

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

由此可见

$$R_L \downarrow \longrightarrow A_v \downarrow$$



在输入回路

$$\text{有 } v_i = \frac{R_i}{R_{si} + R_i} v_s$$

即信号源内阻会导致输入信号衰减

要想减小衰减，则希望

$$R_i \gg R_s$$

理想情况  $R_i = \infty$

即负载的大小会影响增益的大小

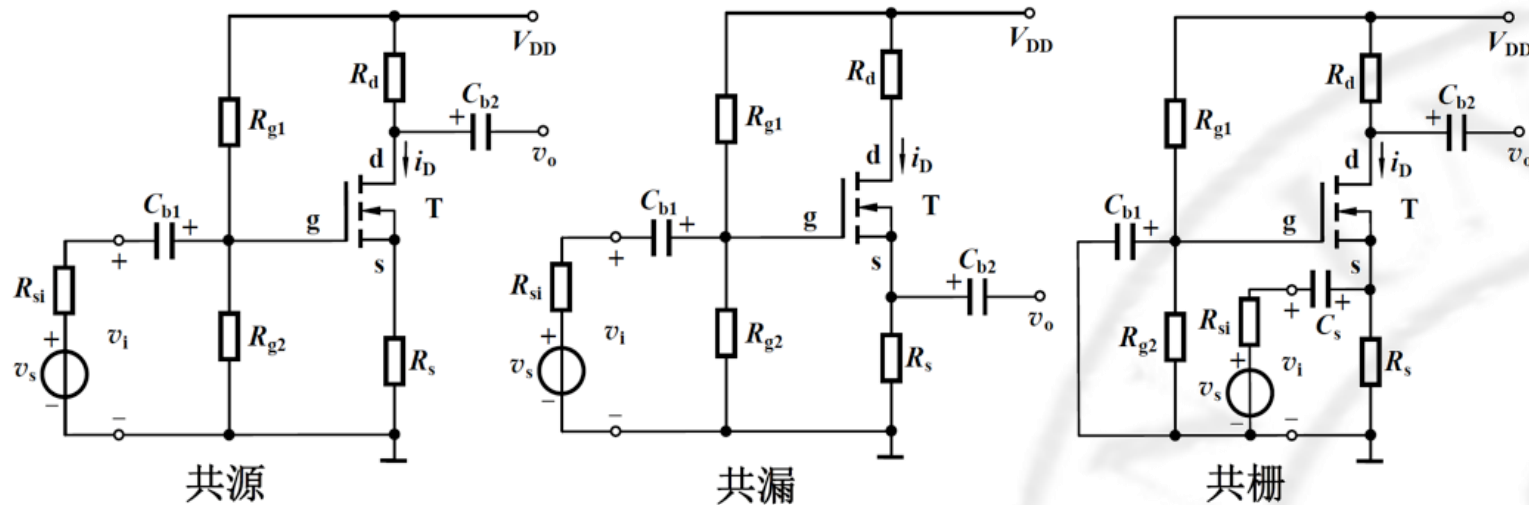
要想减小负载的影响，则希望

$$R_o \ll R_L$$

理想情况  $R_o = 0$



# 单晶体管放大器的拓扑结构



较好的方法并不是试图寻找接地的电极，而是寻找信号的输入电极和输出电极。

即观察输入信号加在哪个电极，输出信号从哪个电极取出，剩下的那个电极便是共同电极。如

共源极放大电路，信号由栅极输入，漏极输出；

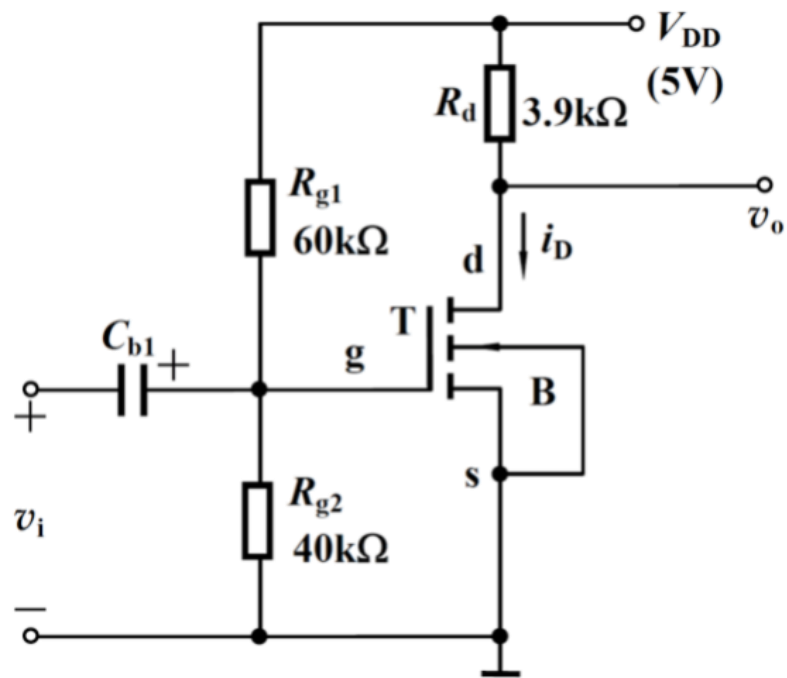
共漏极放大电路，信号由栅极输入，源极输出；

共栅极放大电路，信号由源极输入，漏极输出。

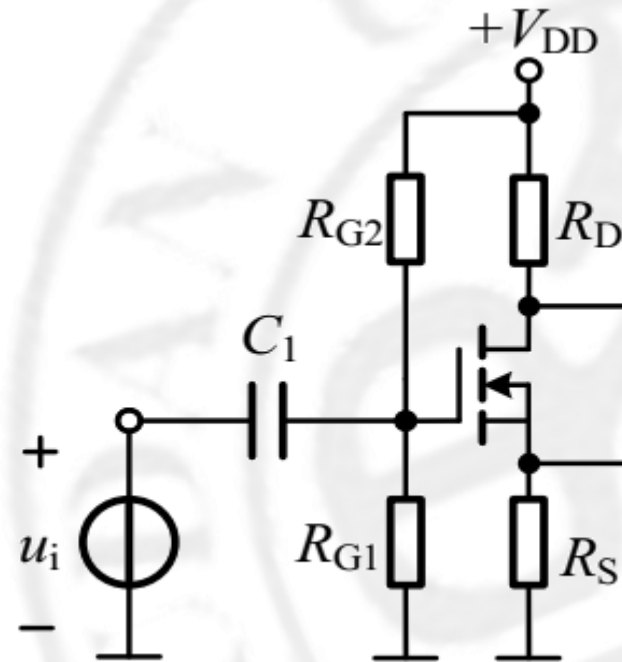
**栅极始终不能做  
输出电极，漏极  
不能做输入极**

# 共源放大器

- 简单共源放大电路

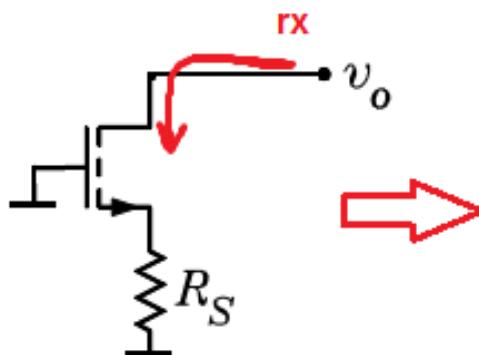
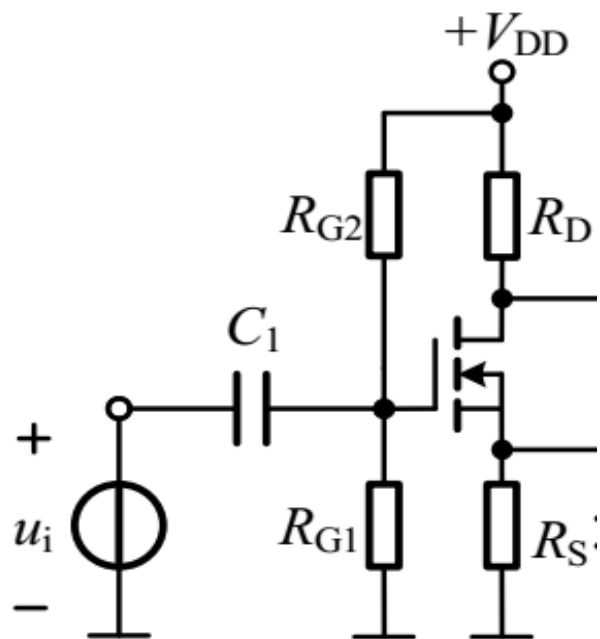


- 具有源级电阻的共源放大电路



# 具有源级电阻的共源放大电路

- 小信号模型分析  
Common Source Amplifier with source degeneration



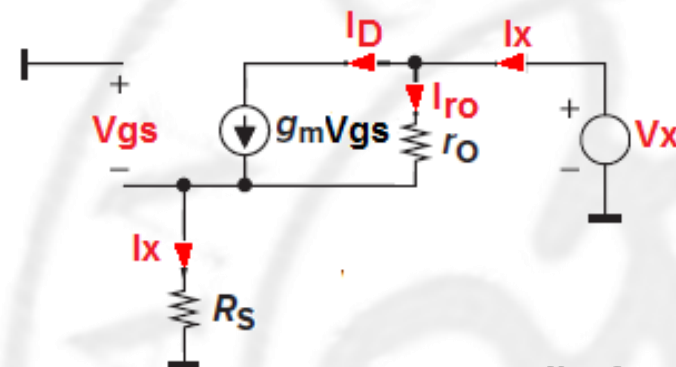
增益:

$$V_1 = V_{in} - I_D R_S = V_{in} - g_m V_1 R_S$$

$$\Rightarrow V_1 = \frac{V_{in}}{1 + g_m R_S} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{out} = -g_m V_1 R_D$$

$$A_v \approx \frac{-g_m R_D}{1 + g_m R_S}$$



输出电阻:

$$V_X = I_{ro} * r_o + I_X * R_S$$

$$I_{ro} = I_X - g_m * V_{GS}$$

$$V_X = (I_X - (g_m (-I_X) R_S)) r_o + I_X R_S$$

And solve for  $I_X$

$$I_X = \frac{V_X}{R_S + r_o + g_m * R_S * r_o}$$

And finally we have

$$r_x = R_S + r_o + g_m * R_S * r_o = r_o (1 + g_m R_S + \frac{R_S}{r_o})$$

$$r_x = r_o * (1 + g_m R_S) + R_S$$

# 共栅放大电路

## 1. 静态分析

根据直流通路有

$$I_{DQ} = I$$

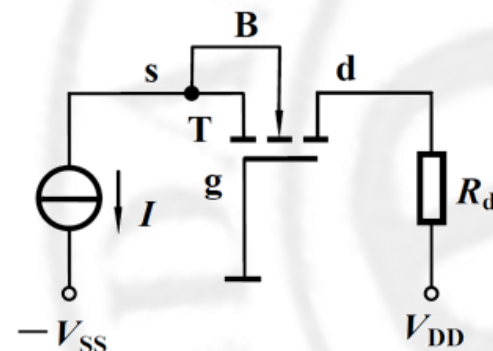
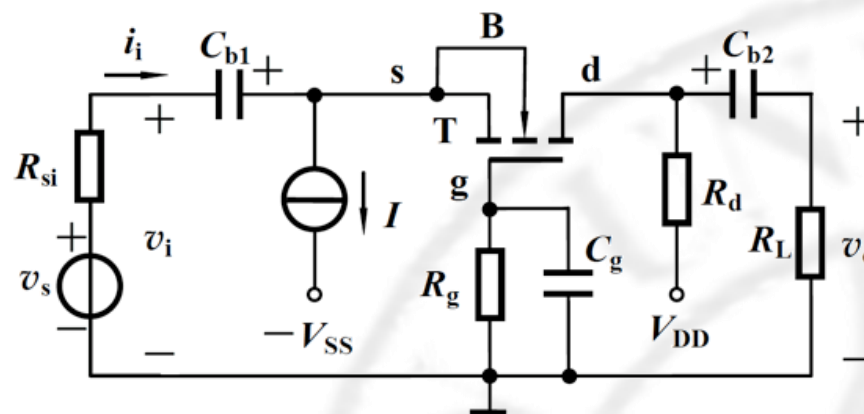
$$\text{由 } I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2$$

可得  $V_{GSQ}$

$$\text{又 } V_S = -V_{GSQ} \quad V_D = V_{DD} - I_{DQ} R_d$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } V_{DSQ} &= V_D - V_S \\ &= V_{DD} - I_{DQ} R_d + V_{GSQ} \end{aligned}$$

需验证是否工作在饱和区



# 共栅放大电路

## 2. 动态分析

设 $\lambda=0$

电压增益

$$v_i = -v_{gs}$$

$$v_o = -g_m v_{gs} (R_d \parallel R_L)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = g_m (R_d \parallel R_L)$$

源电压增益

$$v_s = v_i + i_i R_{si} = -v_{gs} - g_m v_{gs} R_{si}$$

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{g_m (R_d \parallel R_L)}{1 + g_m R_{si}}$$

输出与输入同相

输入电阻

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{-v_{gs}}{-g_m v_{gs}} = \frac{1}{g_m}$$

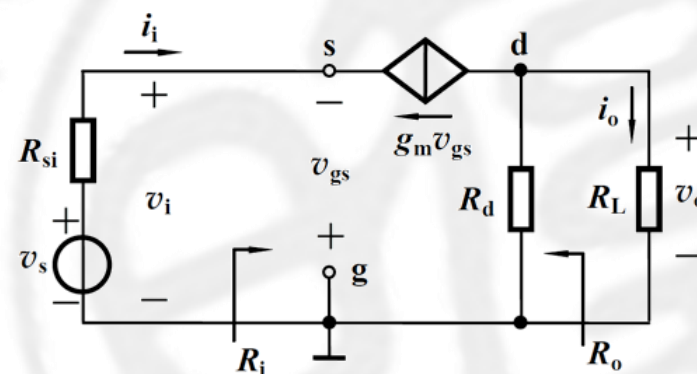
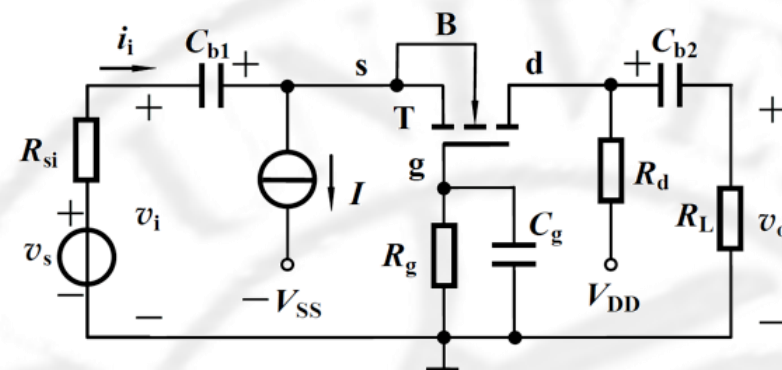
输入电阻远小于其它两种组态

输出电阻

当 $r_{ds} \gg R_d$  和  $r_{ds} \gg R_{si}$ 时

$$R_o \approx R_d$$

与共源电路同相



# 共漏放大电路

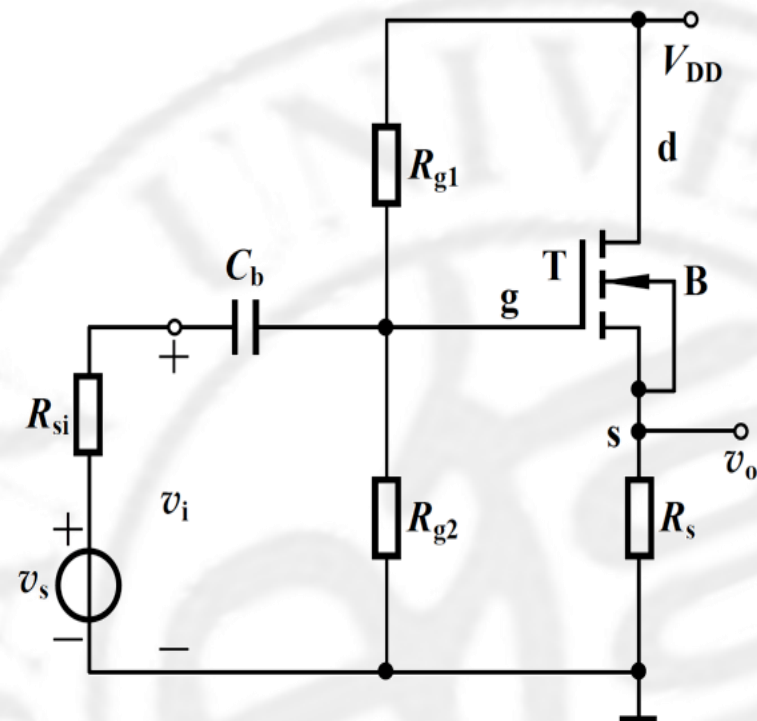
- 又称为源极跟随器

## 1. 静态分析

设MOS管工作于饱和区

$$\begin{cases} I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2 \\ V_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD} - I_{DQ} R_s \\ V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_s \end{cases}$$

需验证是否工作在饱和区



# 共漏放大电路

## 2. 动态分析

小信号等效电路

根据静态工作点可求得  $g_m$

$$g_m = 2K_n(V_{GSQ} - V_{TN})$$

电压增益

$$\begin{aligned} v_i &= v_{gs} + v_o = v_{gs} + g_m v_{gs} (R_s \parallel r_{ds}) \\ &= v_{gs} [1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})] \end{aligned}$$

$$v_o = g_m v_{gs} (R_s \parallel r_{ds})$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m v_{gs} (R_s \parallel r_{ds})}{v_{gs} [1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})]}$$

$$= \frac{g_m (R_s \parallel r_{ds})}{1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})} \approx 1$$

输出与输入同相，且增益小于等于1

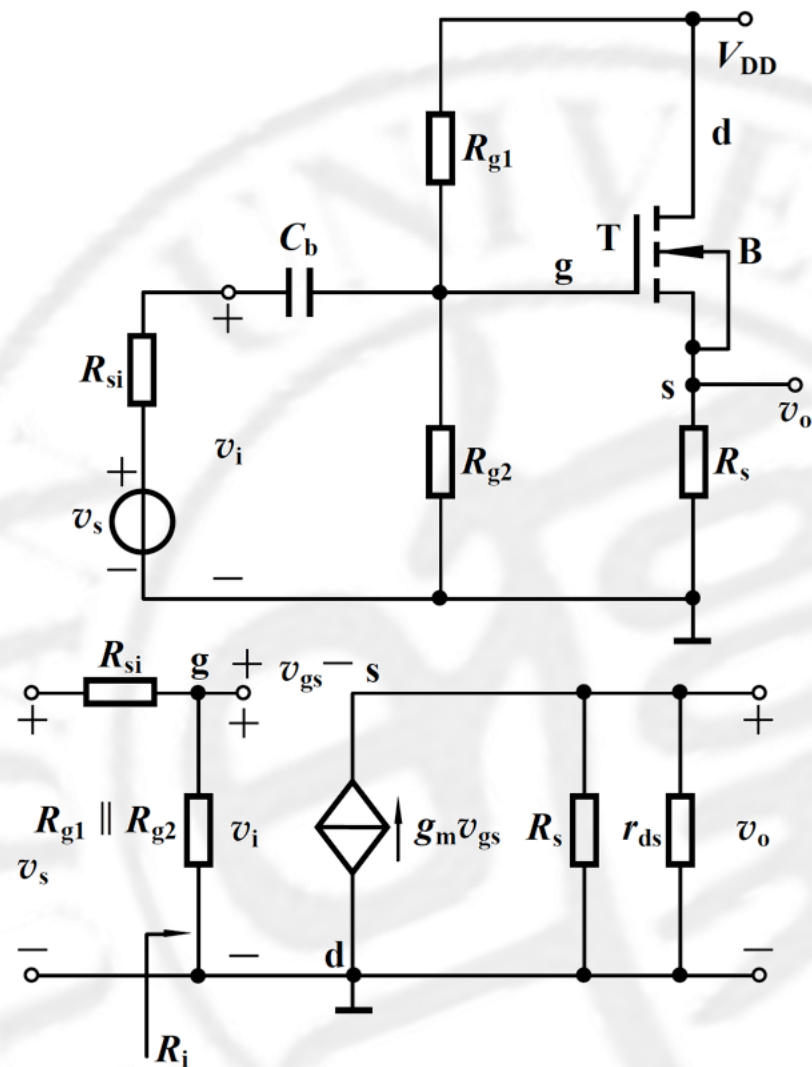
源电压增益

$$\begin{aligned} A_{vs} &= \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} \\ &= \frac{g_m (R_d \parallel r_{ds})}{1 + g_m (R_d \parallel r_{ds})} \cdot \left( \frac{R_i}{R_i + R_{si}} \right) \end{aligned}$$

输入电阻

$$R_i = R_{g1} \parallel R_{g2}$$

受静态偏置电路的影响，  
栅极绝缘的特性并未充分表现出来

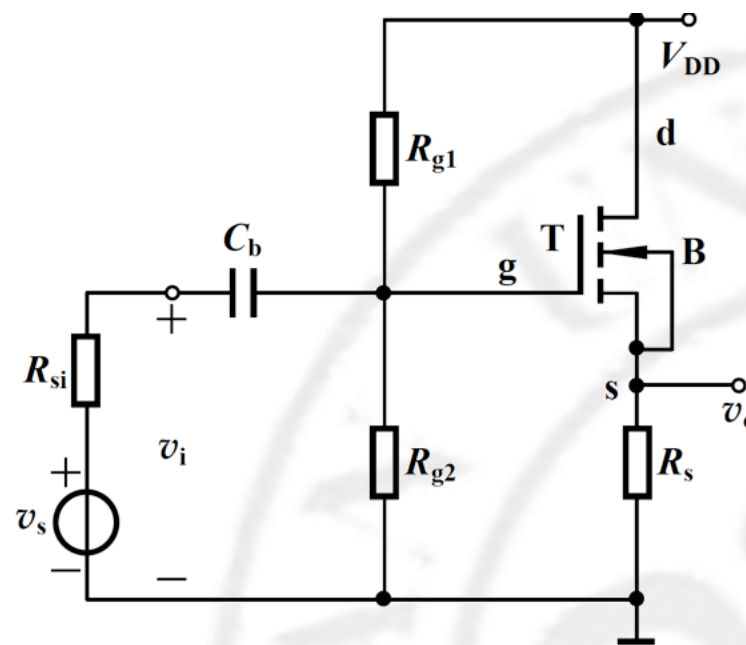
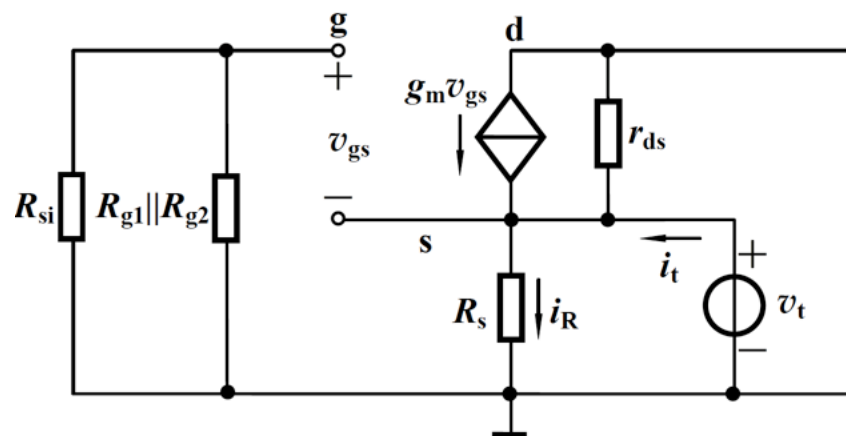




# 共漏放大电路

## 2. 动态分析

输出电阻

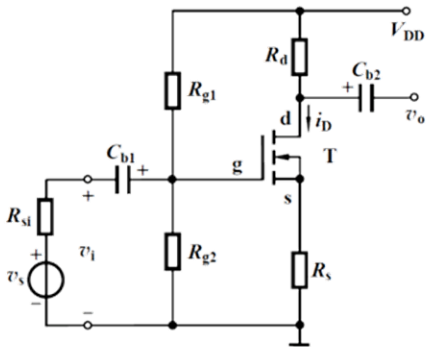
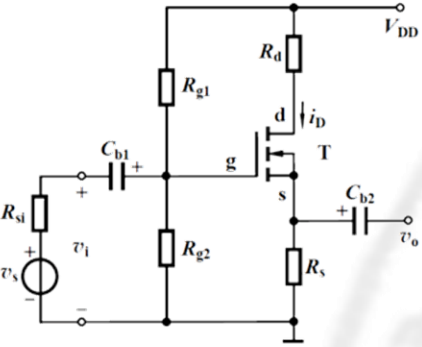
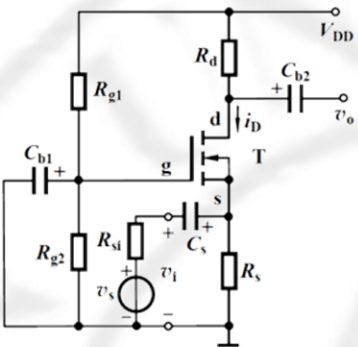


$$\begin{cases} i_T = \frac{v_T}{R_s} + \frac{v_T}{r_{ds}} - g_m v_{gs} \\ v_{gs} = -v_T \end{cases}$$

$$R_o = \frac{v_T}{i_T} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{r_{ds}} + g_m} = R_s \parallel r_{ds} \parallel \frac{1}{g_m}$$

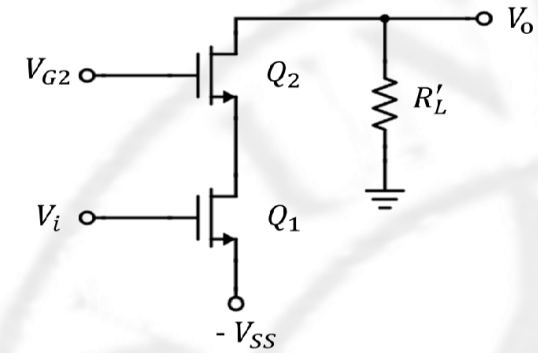
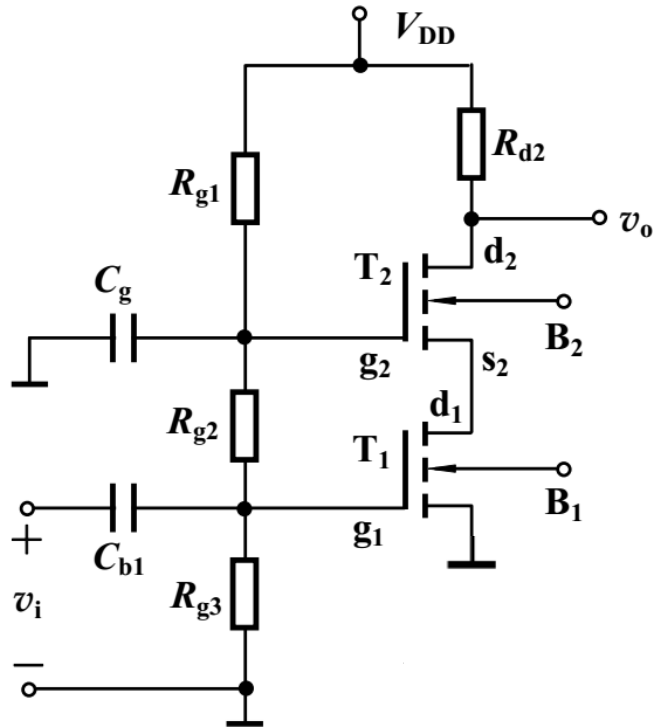
输出电阻较小

# 三种组态总结比较

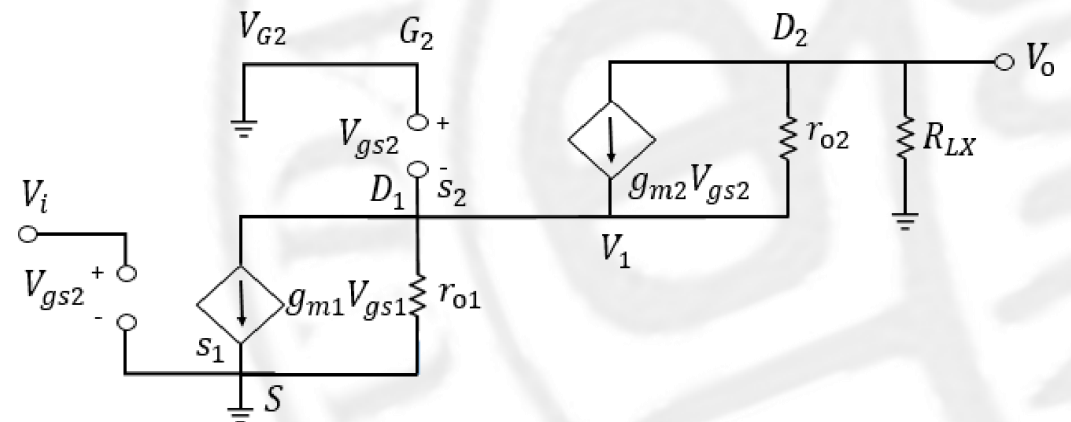
	共源	共漏	共栅
电压增益	 $A_v = -g_m (r_{ds} \parallel R_d)$	 $A_v = \frac{g_m (R_s \parallel r_{ds})}{1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})} \approx 1$	 $A_v = g_m (R_d \parallel R_L)$
输入电阻	很高	很高	$R_i \approx \frac{1}{g_m}$
输出电阻	$R_o \approx R_d$	$R_o = R_s \parallel r_{ds} \parallel \frac{1}{g_m}$	$R_o \approx R_d$

# 思考题：共源共栅放大电路

- Cascode Amplifier



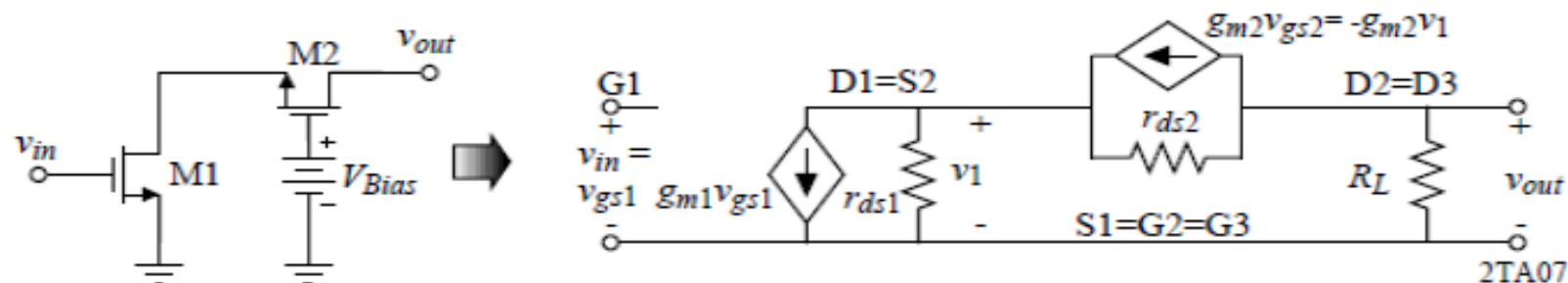
(a)



(b)

## MOS Cascode Amplifier

Circuit and small-signal model:



Small-signal performance (assuming a load resistance in the drain of  $R_L$ ):

$$R_{in} = \infty$$

Using nodal analysis, we can write,

$$[g_{ds1} + g_{ds2} + g_{m2}]v_1 - g_{ds2}v_{out} = -g_{m1}v_{in}$$

$$-[g_{ds2} + g_{m2}]v_1 + (g_{ds2} + G_L)v_{out} = 0$$

Solving for  $v_{out}/v_{in}$  yields,

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{-g_{m1}(g_{ds2} + g_{m2})}{g_{ds1}g_{ds2} + g_{ds1}G_L + g_{ds2}G_L + G_Lg_{m2}} \cong \frac{-g_{m1}}{G_L} = -g_{m1}R_L$$

Note that unlike the BJT cascode, the voltage gain,  $v_1/v_{in}$  is greater than -1.

$$\frac{v_1}{v_{in}} = -g_{m2} \left[ r_{ds2} \parallel \left( \frac{r_{ds2} + R_L}{1 + g_{m2}r_{ds2}} \right) \right] \approx -\frac{r_{ds2} + R_L}{r_{ds2}} = -\left( 1 + \frac{R_L}{r_{ds2}} \right) \quad (R_L \text{ must be less than } r_{ds2} \text{ for the gain to be } -1)$$

The small-signal output resistance is,

$$r_{out} = [r_{ds1} + r_{ds2} + g_{m2}r_{ds1}r_{ds2}] \parallel R_L \cong R_L$$