

模拟与数字电路

Analog and Digital Circuits



课程主页 扫一扫

第 十八讲：单晶体管放大器

Lecture 18: **Single transistor amplifier**

主 讲：陈 迟 晓

Instructor: Chixiao Chen

提纲

- 复习
 - MOS晶体管的小信号模型是什么？
- 放大基础知识
- 单晶体管放大电路（MOS）
- 多晶体管放大电路



小信号的使用条件

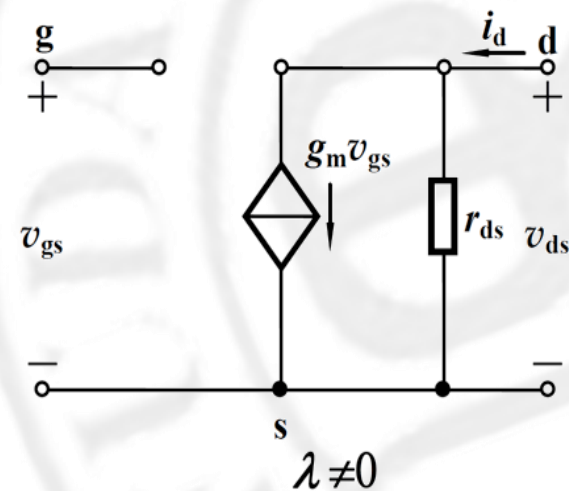
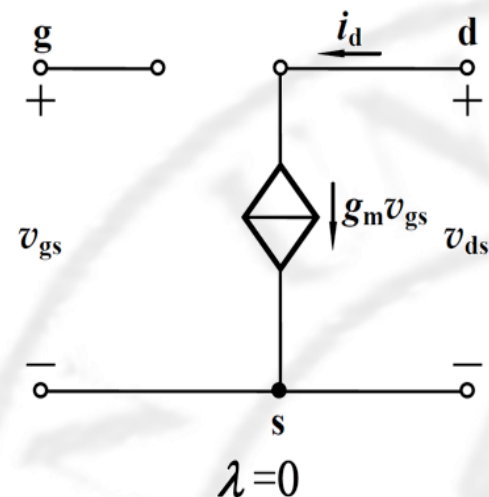
$$v_{gs} \ll 2(V_{GSQ} - V_{TN})$$

- 小信号

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

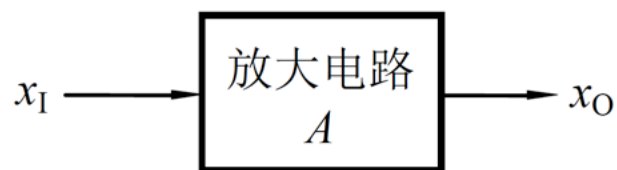
$$r_{ds} = \frac{1}{\lambda K_n(V_{GSQ} - V_{TN})^2}$$

- 参数都是小信号参数，即微变参数或交流参数。
- 与静态工作点有关。
- 只适合对交流信号（变化量）的分析。
- 未包含结电容的影响，不能用于分析高频情况。



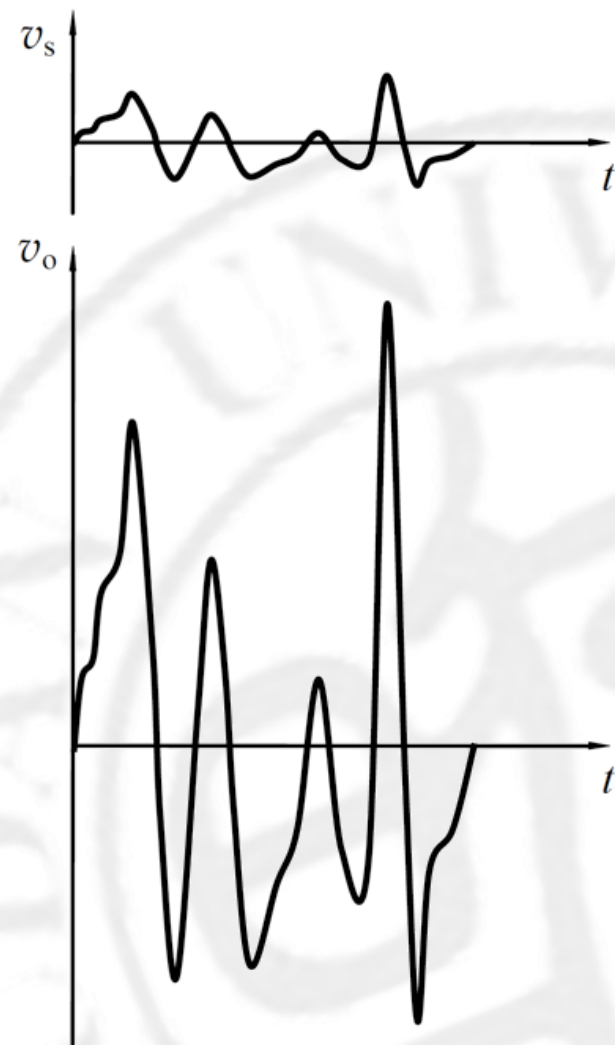
信号的线性放大

- 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。



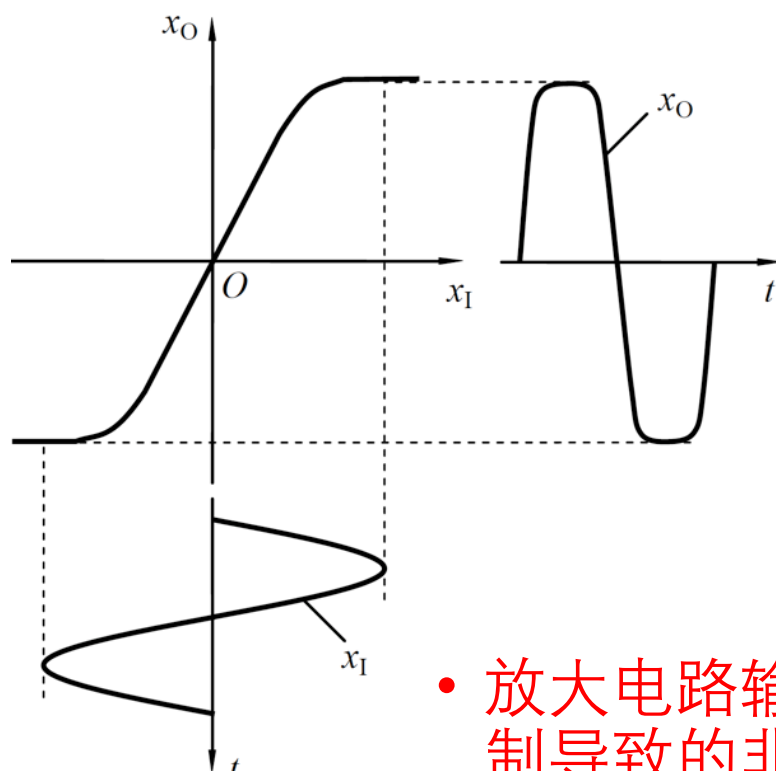
话筒电压信号的线性放大

放大电路需要能量供给

$|A| > 1$ ，且保持常数

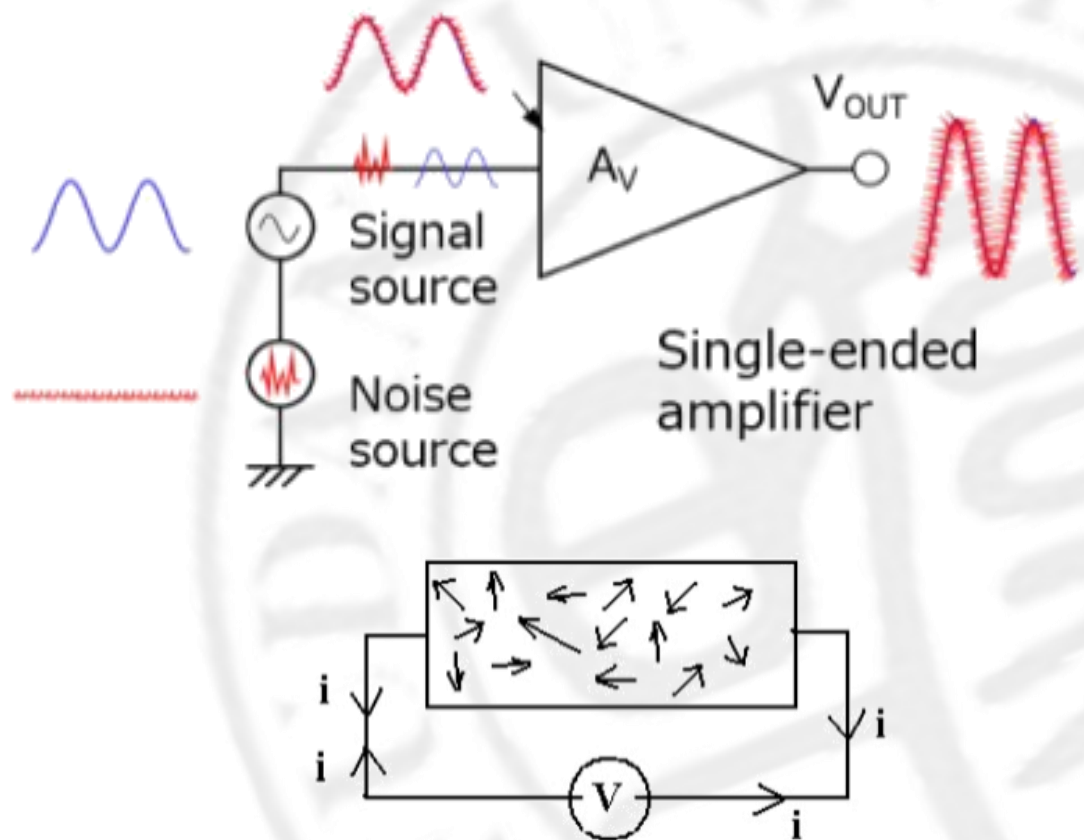
实际放大信号的非理想因素

- 放大器的非线性失真



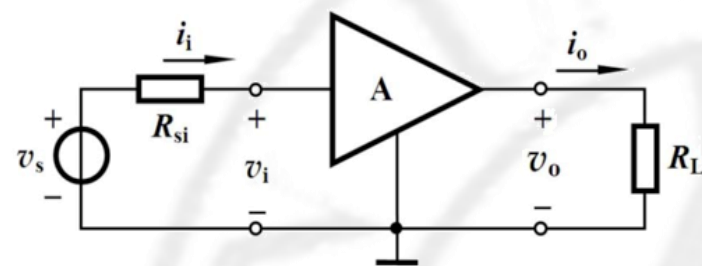
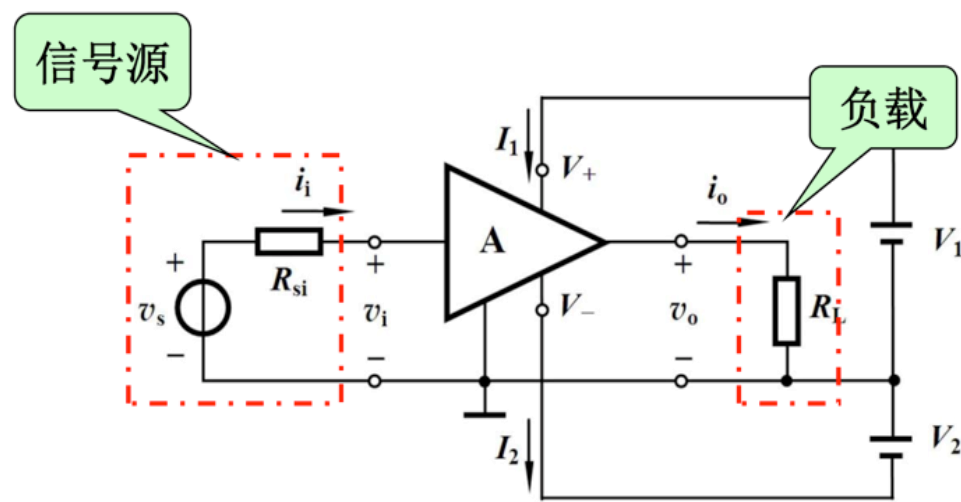
- 放大电路输出摆幅限制导致的非线性失真

- 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）

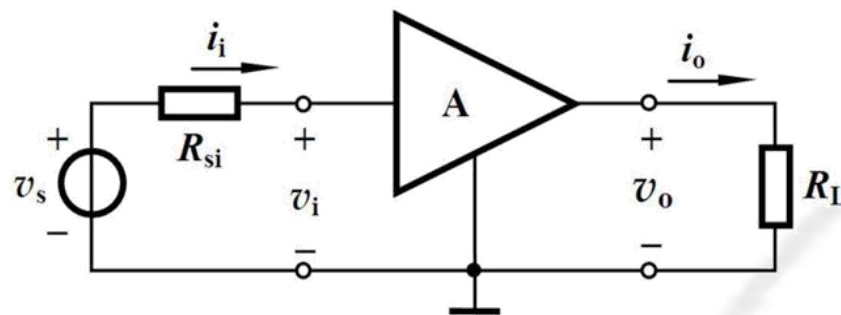
$$A_v = \frac{v_o}{v_i}$$

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

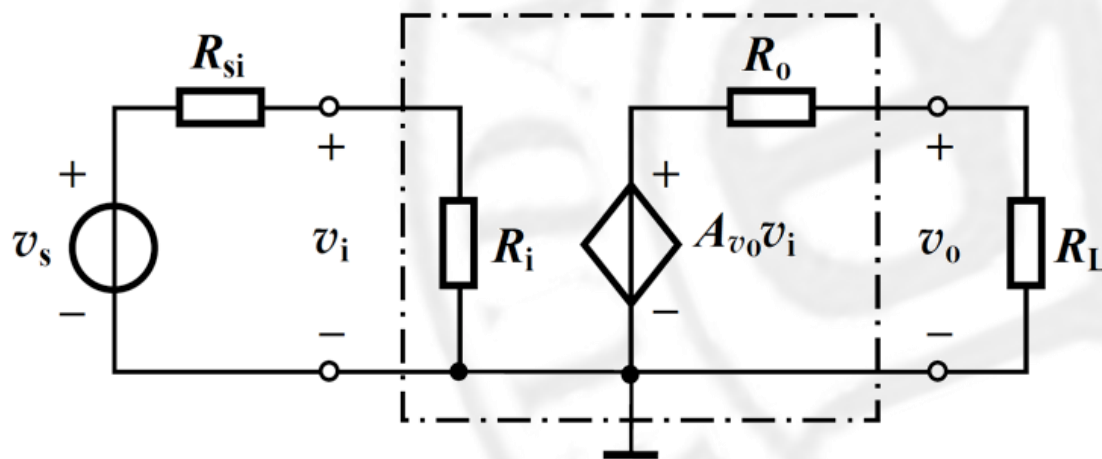
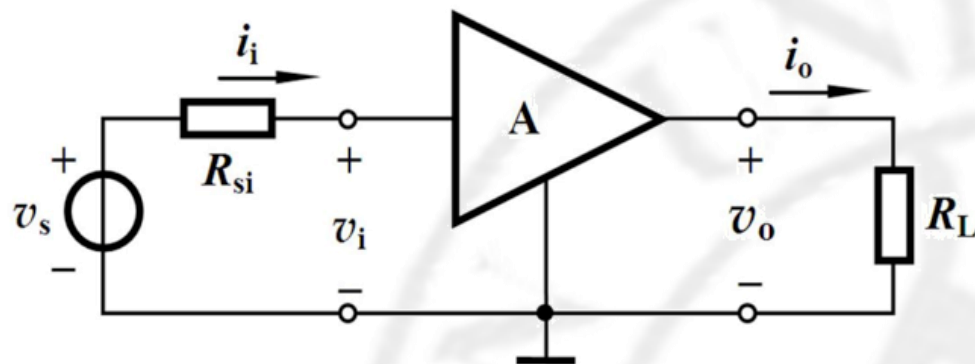
3. 放大电路模型

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

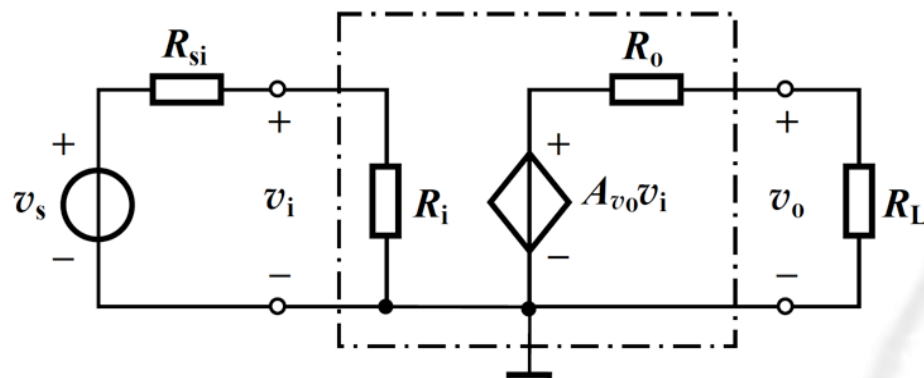
$$v_o = A_{vo} v_i \frac{R_L}{R_o + R_L}$$

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

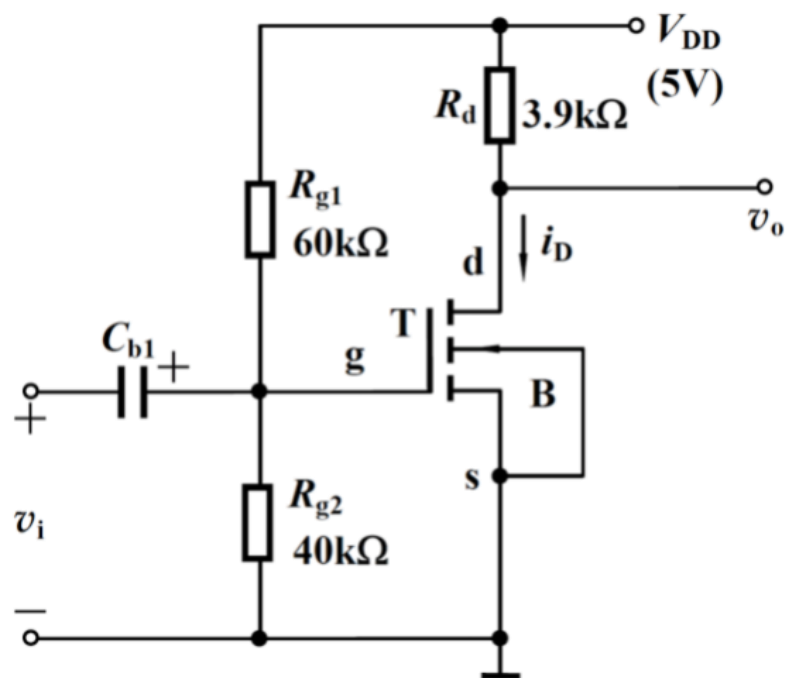
要想减小负载的影响，则希望

$$R_o \ll R_L$$

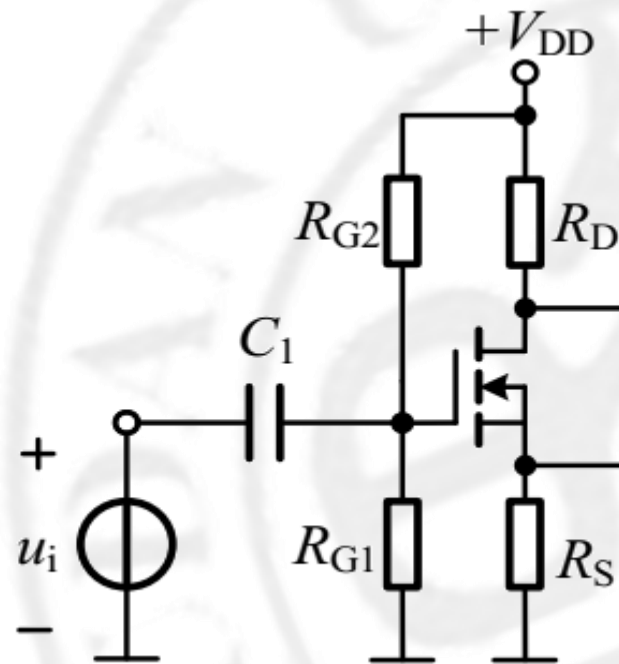
理想情况 $R_o = 0$

共源（射）放大器

- 简单共源放大电路

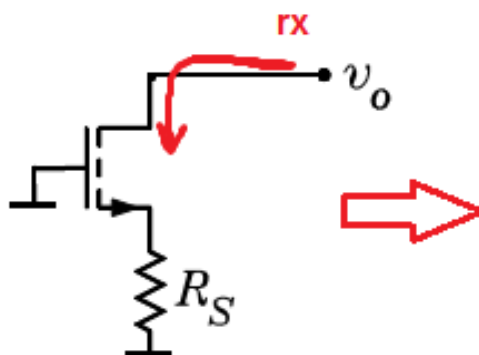
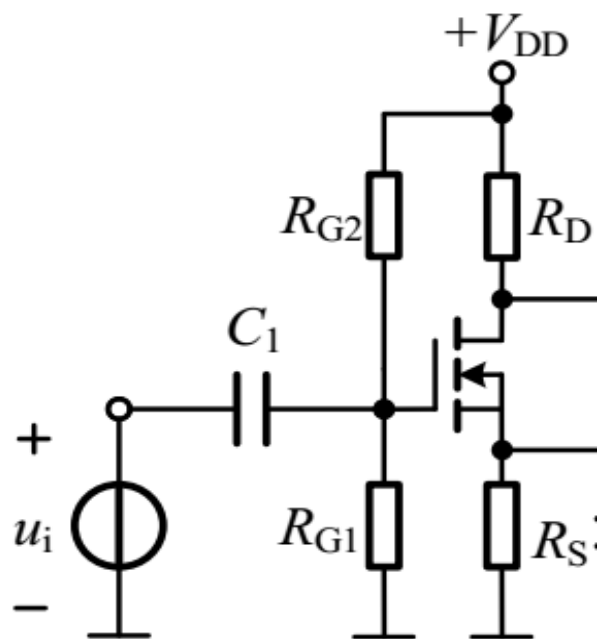


- 具有源级电阻的共源放大电路



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



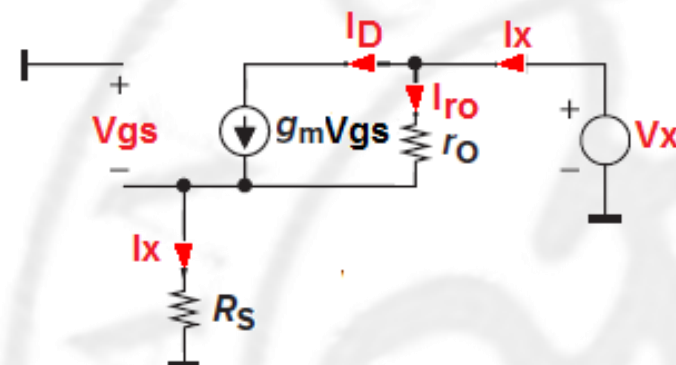
增益:

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

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

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

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



输出电阻:

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

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

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

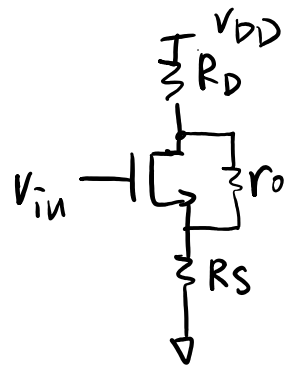
And solve for I_X

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

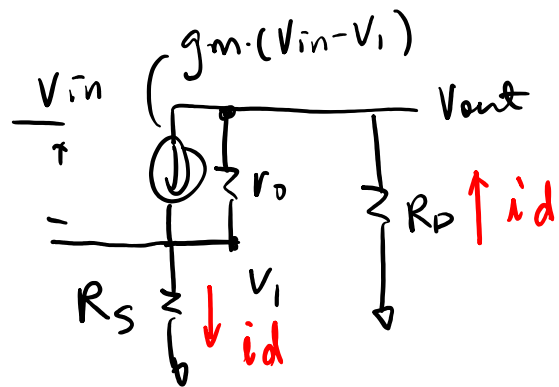
And finally we have

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

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



\Rightarrow



$$\begin{cases} \dot{i}_D = -\frac{V_{out}}{R_d} \quad (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{i}_D = g_m \cdot (V_{in} - V_1) + \frac{V_{out} - V_1}{r_o} \quad (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{i}_D = \frac{V_1}{R_s} \quad (3) \end{cases}$$

解 ① ②

$$-\frac{V_{out}}{R_d} = \frac{V_1}{R_s} \quad V_{out} = -\frac{R_d}{R_s} V_1 \quad (4)$$

解 ② ④ ③

$$\frac{V_1}{R_s} = g_m \cdot (V_{in} - V_1) + \frac{-R_d/R_s - 1 \cdot V_1}{r_o} \rightarrow g_m \cdot V_{in} = \frac{1}{R_s} + g_m + \frac{R_d/R_s + 1}{r_o} V_1$$

$A_v \Rightarrow$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-R_d/R_s V_1}{\frac{1}{R_s} + g_m + \frac{R_d/R_s + 1}{r_o}} \cdot g_m$$

$$= -\frac{g_m R_d}{1 + g_m R_s + \frac{1}{r_o}(R_d + R_s)}$$

if $\frac{1}{r_o} \rightarrow 0$ $A_v = -\frac{g_m R_d}{1 + g_m R_s}$

if $g_m R_s \gg 1$ $A_v \approx -\frac{R_d}{R_s}$

共栅（基）放大电路

1. 静态分析

根据直流通路有

$$I_{DQ} = I$$

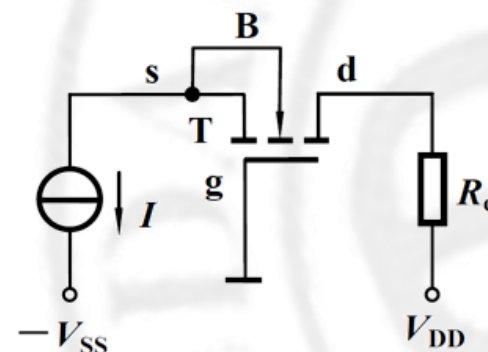
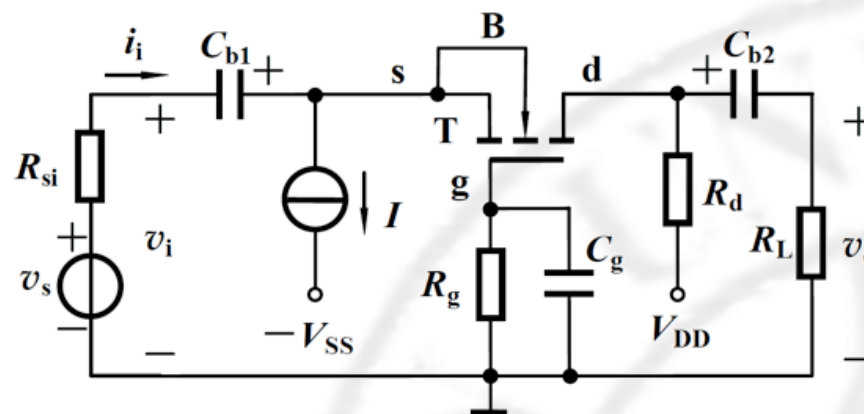
$$\text{由 } I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2$$

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

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

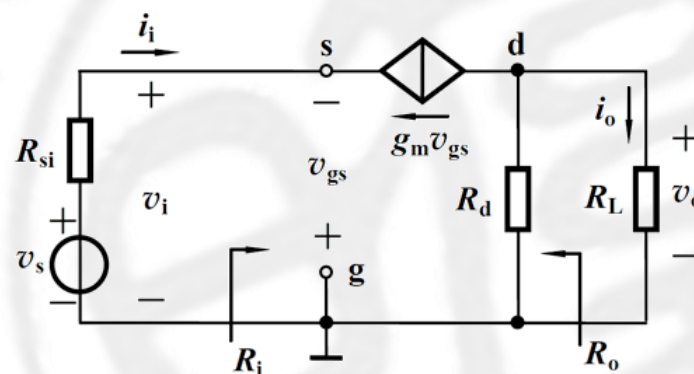
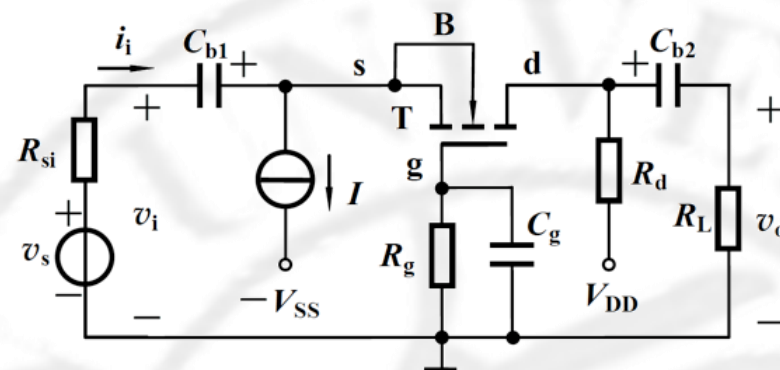
输入电阻远小于其它两种组态

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（集）放大电路

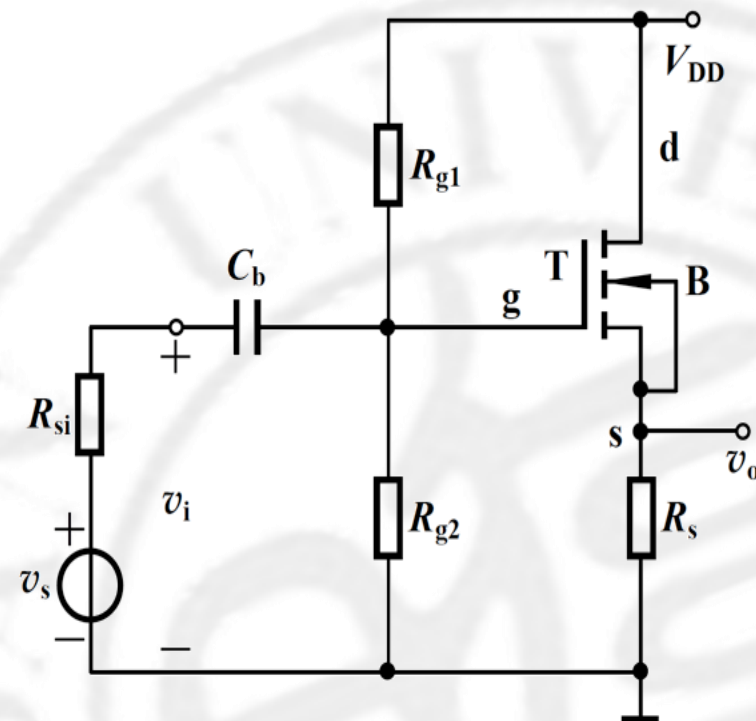
- 又称为源极跟随器

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

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

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

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

输出与输入同相，且增益小于等于1

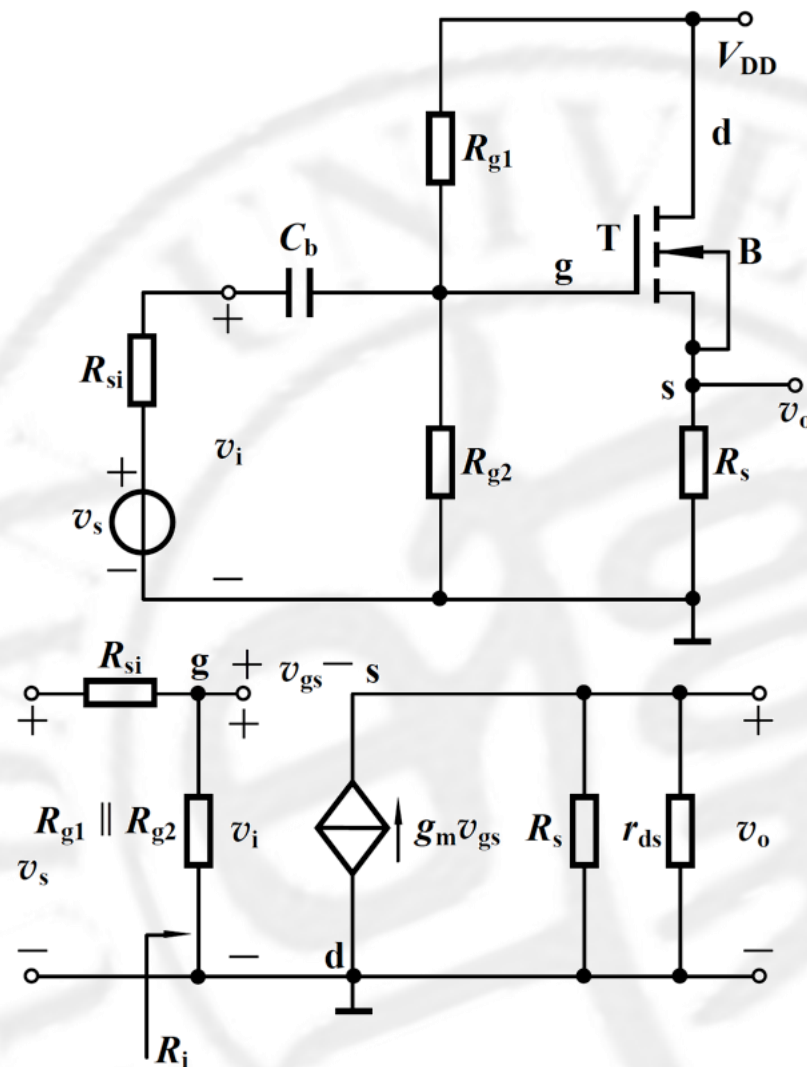
源电压增益

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

输入电阻

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

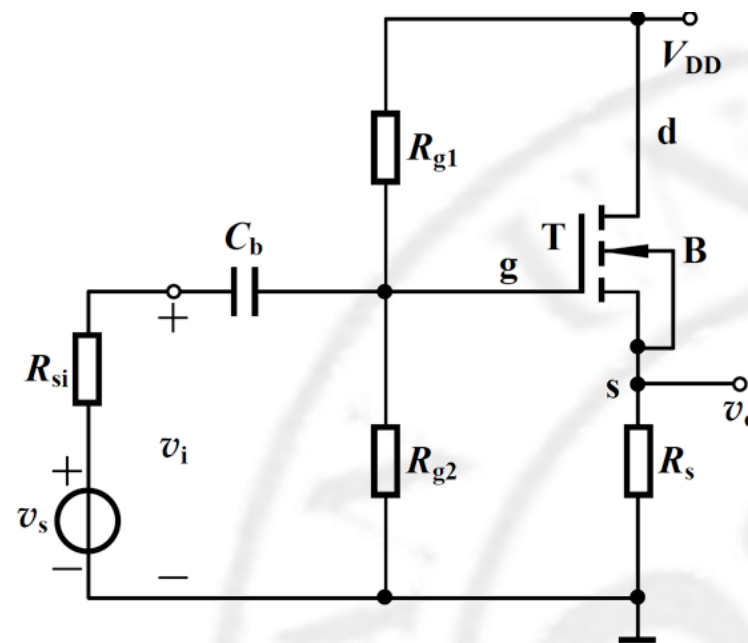
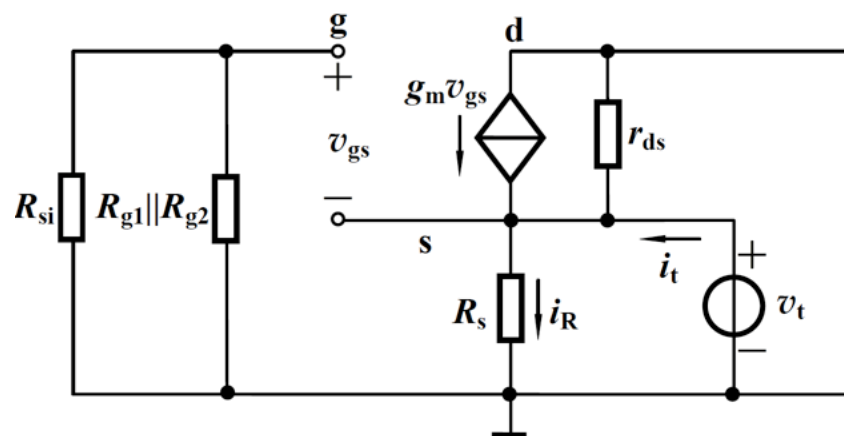
受静态偏置电路的影响，
栅极绝缘的特性并未充分表现出来



共漏放大电路

2. 动态分析

输出电阻

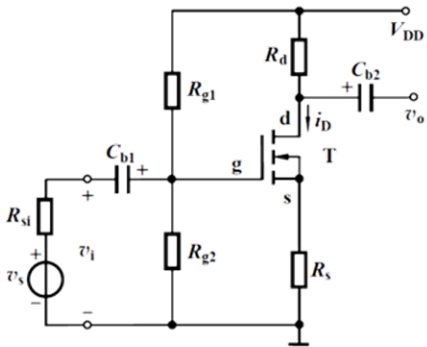
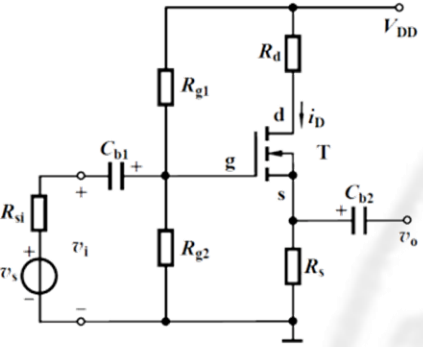
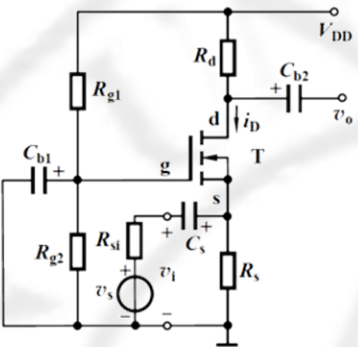


$$\begin{cases} i_T = \frac{v_T}{R_s} + \frac{v_T}{r_{ds}} - g_m v_{gs} \\ v_{gs} = -v_T \end{cases}$$

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

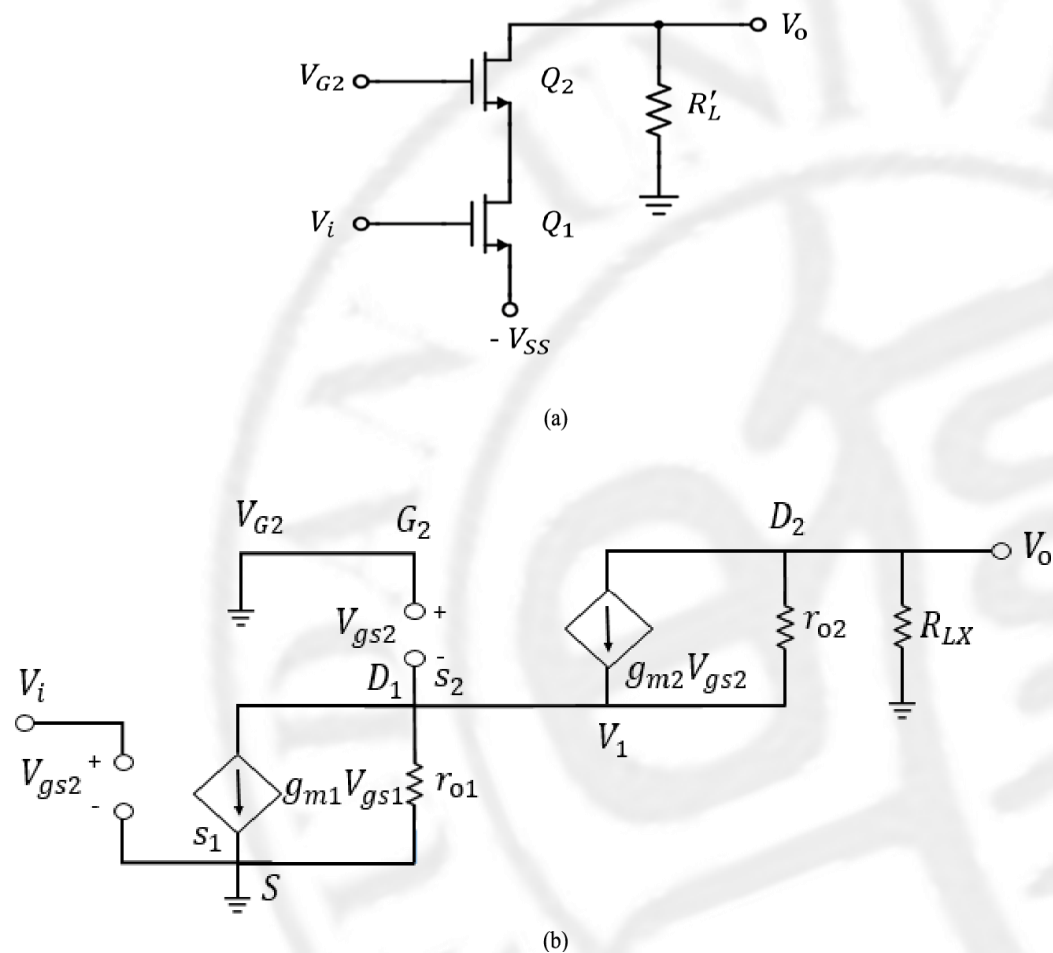
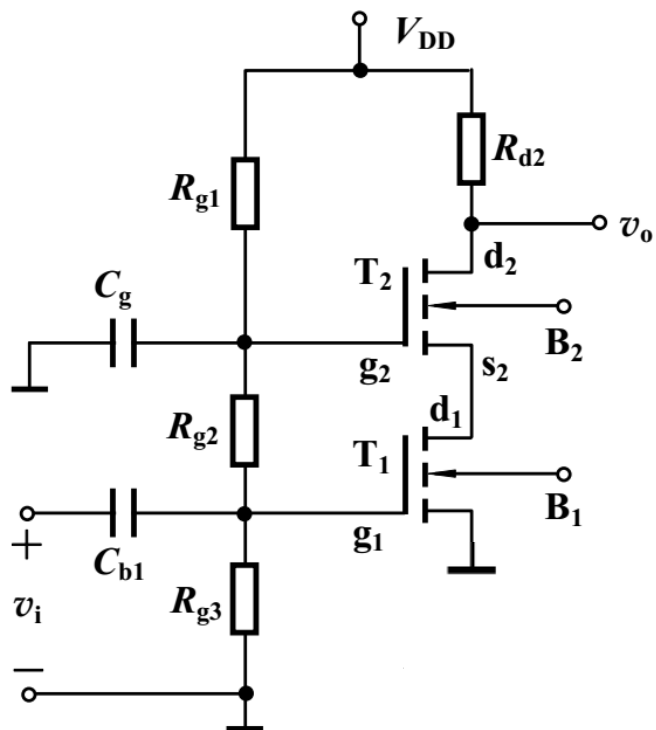
输出电阻较小

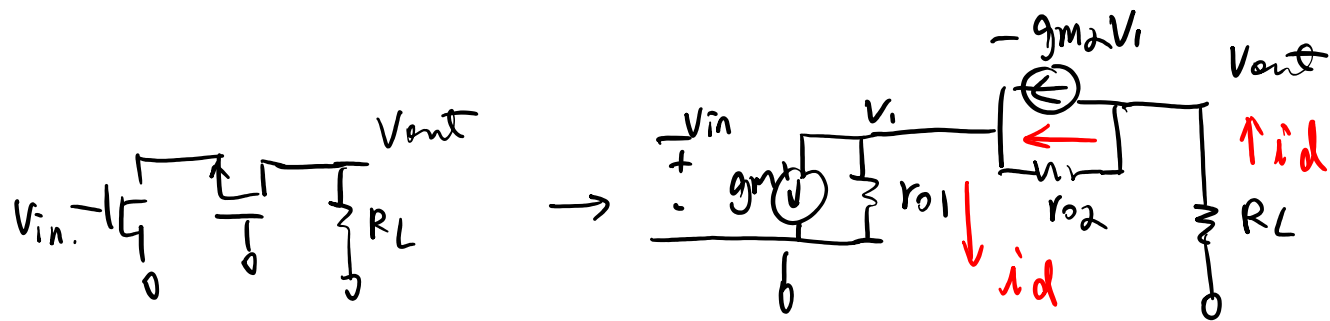
三种组态总结比较

	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





$$i_d = -\frac{V_{out}}{R_L} \quad (1)$$

$$i_d = g_{m2} \cdot (-V_1) - \frac{V_1 - V_{out}}{r_{o2}} \quad (2)$$

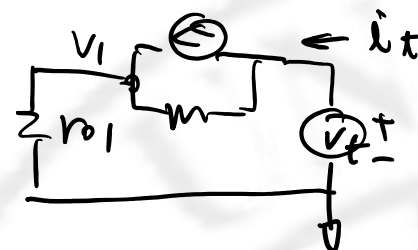
$$i_d = g_m \cdot V_{in} + \frac{V_1}{r_{o2}} \quad (3) = \frac{1}{\frac{1}{g_m} \parallel r_{o2}}$$

$$\text{联立 (1) + (2)} \quad V_{out} = V_1 \cdot (g_m + \frac{1}{r_{o2}}) \cdot R_L \parallel r_{o2} \quad (4)$$

$$\text{联立 (1), (2), (4)} \quad V_{out} \left(\frac{1}{r_{o1}} \cdot \frac{r_{o2} \parallel \frac{1}{g_{m2}}}{R_L \parallel r_{o2}} + \frac{1}{R_L} \right) = g_m V_{in}$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = g_{m1} \left(R_L \parallel r_{o1} \cdot \frac{R_L \parallel r_{o2}}{r_{o2} \parallel \frac{1}{g_{m2}}} \right) \doteq \begin{cases} g_{m1} R_L & r_{o1} \text{ 或 } r_{o2} \gg R_L \\ g_{m1} g_{m2} r_{o1} r_{o2} R_L & R_L \gg r_{o1} \text{ 或 } r_{o2} \end{cases}$$

求输出电阻:



$$R_{out} = \frac{V_t}{i_t} = \frac{V_1 + (g_m + \frac{1}{r_{o2}}) \cdot r_{o2} \cdot V_1}{V_1 / r_{o1}}$$

$$= g_{m2} r_{o1} r_{o2} + r_{o1} + r_{o2}$$

$$\doteq g_{m2} r_{o1} r_{o2}$$