

一、MOS 管作为三端口器件（考虑衬底时为四端口器件）可作为哪几类放大器？请做详细解释。分别画出 NMOS CS 放大器采用线性电阻负载、PMOS Diode 负载、PMOS 恒流源的负载特性曲线示意图，并说明高增益 CS 放大器采用何种负载及其主要原因。

答：MOS 管作为三端口器件，输入、输出仅用到两个端口，本应可以构成 $2^3=8$ 种放大器类型，但放大器的输出要使 V_{DS} 变化，因此栅端（G）不能作为输出端口，同时输入要使 V_{GS} 变化，因此漏端（D）不能作为输入端口，由此便只能构成共源放大器 CS（栅端 G 作为输入，漏端 D 作为输出）、共栅放大器 CG（源端 S 作为输入，漏端 D 作为输出）、共漏放大器 CD（栅端 G 作为输入，源端 S 作为输出）。

以线性电阻作为负载的共源放大器的电路原理图如图 3-1 所示，负载特性曲线如图 3-2 所示：

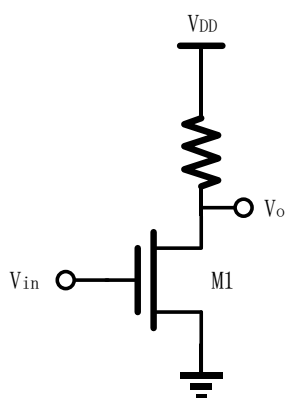


图3-1 线性电阻为负载的共源放大器电路原理图

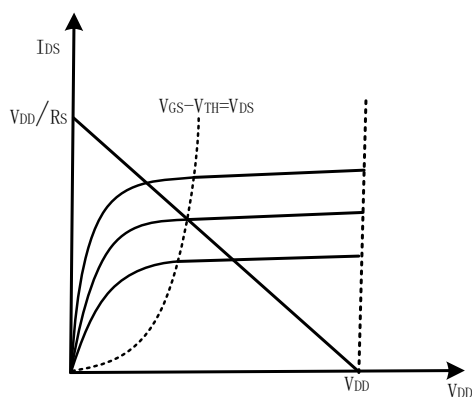


图3-2 线性电阻作负载共源放大器特性曲线图

以 MOS 二极管作为负载的共源放大器的电路原理图如图 3-3 所示，负载特性曲线如图 3-4 所示：

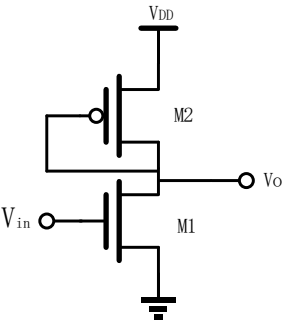


图3-3 MOS二极管作负载共源放大器电路原理图

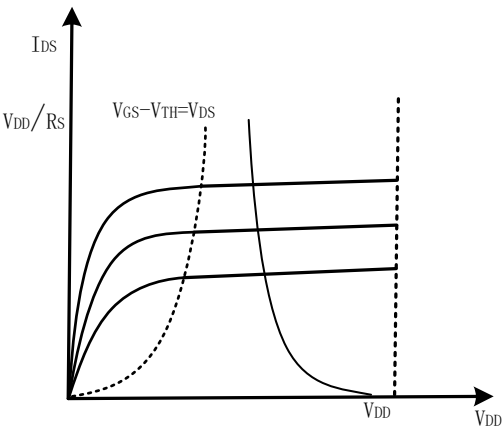


图3-4 MOS二极管作负载共源放大器特性曲线图

以恒流源作为负载的共源放大器的电路原理图如图 3-5 所示，负载特性曲线如图 3-6 所示：

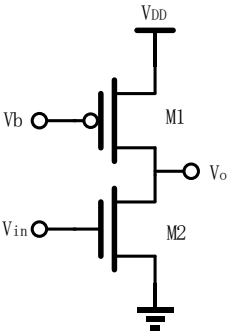


图3-5 恒流源作负载的共源放大器电路原理图

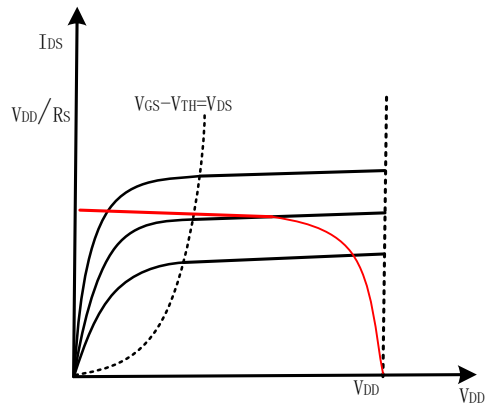
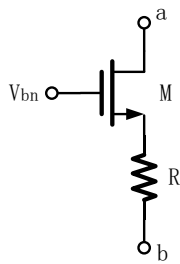


图3-6 恒流源作负载共源放大器特性曲线图

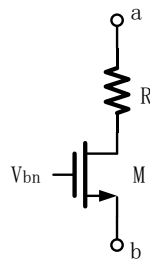
(2) 从以上图中可以读出：恒流源作为负载时 CS 放大器的增益最大，线性电阻作为负载时的增益次之，MOS 二极管作为负载时的增益最小。其中，MOS 二极管作为负载时，输出电压变化非常小，可以近似视为电压钳位，因此该结构在偏置电路中被广泛使用。高增益放大器通常采用 MOS 恒流源作为负载，其原因在于：MOS 恒流源的高输出阻抗使得电压增益很大；同时电路的工作点便于确定（实现交直流参数分离：较小的直流电阻可以用来确定合适的静态工作点，很大的交流电阻可以用来实现高增益）；采用线性电阻达到类似的增益，则电阻的阻值需要非常大，一方面会占用很大的芯片面积，另一方面电路的静态工作点会改变，此时静态电流会减小，输出电压的上下摆幅会不均匀，放大管也很容易偏离饱和区。

二、固定偏压 V_{bn} 将 MOS 管工作在饱和恒流区下，且 $r_d \gg R$ ， r_{ab} 为 a 看到 b（AC 接地）的交流阻抗， r_{ba} 为 b 看到 a（AC 接地）的交流阻抗，求：

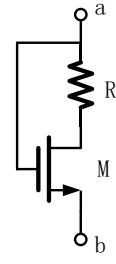
- (1) 写出图（1）的 r_{ab} 与 r_{ba} 阻抗表达式，判断两者关系；
- (2) 写出图（2）的 r_{ab} 与 r_{ba} 阻抗表达式，判断两者关系；
- (3) 判断图（3）的 r_{ab} 与 r_{ba} 阻抗关系，请直接写出其表达式；
- (4) 图（3）中 b 点接地，a 点注入电流，设注入电流从 0 逐渐增大，说明电阻两端点电位随电流上升而变化的特性，并分析 MOS 管能否进入线性电阻区。



图（1）



图（2）



图（3）

答：（1）①求从 a 看到 b 的交流阻抗 r_{ab} 的电路图如图 4-1 所示：

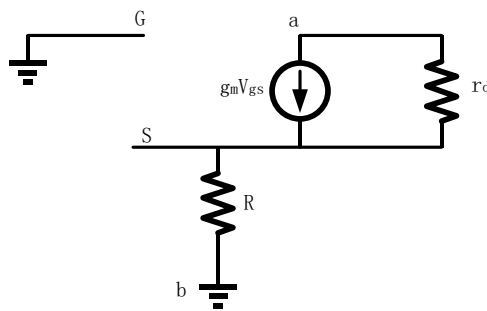


图4-1 从a看到b交流阻抗电路原理图

从图中可知 $v_{gs} = v_g - v_s = 0 - v_s = -v_s$,

由电流守恒 $-g_m v_s + \frac{v_a - v_s}{r_d} = \frac{v_s}{R}$

可得
$$\frac{v_a}{v_s} = 1 + g_m r_d + \frac{r_d}{R}$$

故有：

$$r_{ab} = \frac{v_a - 0}{i_{tot}} = \frac{v_a}{v_s / R} = R \frac{v_a}{v_s} = R \left(1 + g_m r_d + \frac{r_d}{R} \right) = R + g_m r_d R + r_d \approx g_m r_d R + r_d$$

②求从 b 看到 a 的交流阻抗 r_{ba} 的电路图如图 4-2 所示：

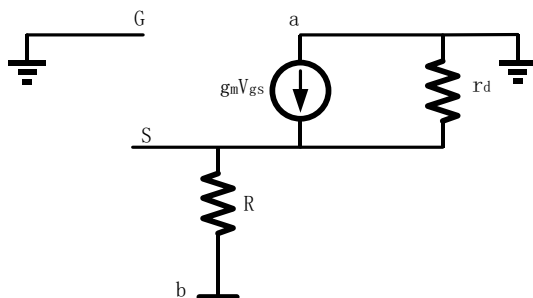


图4-2 从b看到a交流阻抗电路原理图

从图中可知
$$v_{gs} = v_g - v_s = 0 - v_s = -v_s$$

则由电流守恒：

$$\frac{v_b - v_s}{R} = -g_m v_{gs} + \frac{v_s - v_a}{r_d} = g_m v_s + \frac{v_s}{r_d}$$

可得
$$\frac{v_b}{v_s} = 1 + g_m R + \frac{R}{r_d}$$

则有
$$r_{ba} = \frac{v_b - v_a}{i_{tot}} = \frac{v_b}{(v_b - v_s) / R} = \frac{1}{g_m + \frac{1}{r_d}} \frac{v_b}{v_s} = \frac{1 + g_m R + \frac{R}{r_d}}{g_m + \frac{1}{r_d}} = \frac{r_d + g_m r_d R}{1 + g_m r_d}$$

通过比较 $r_{ab} = g_m r_d R + r_d$ 和 $r_{ba} = \frac{r_d + g_m r_d R}{1 + g_m r_d}$

可以看出
$$r_{ab} = (1 + g_m r_d) r_{ba}$$

(2) ①求从 a 看到 b 的交流阻抗 r_{ab} 的电路图如图 4-3 所示：

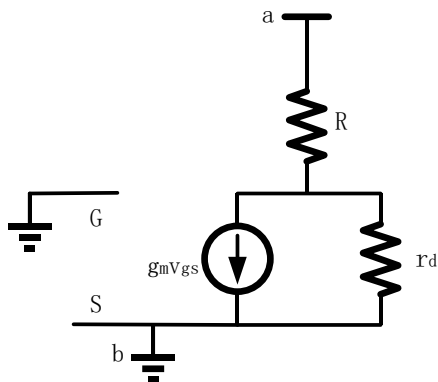


图4-3 从a看到b交流阻抗电路原理图

由图可知 $v_{gs} = v_g - v_s = 0 - 0 = 0$

则 $r_{ab} = R + r_d$

②求从b看到a的交流阻抗 r_{ba} 的电路图如图4-4所示：

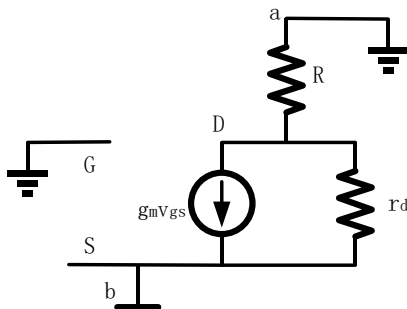


图4-4 从b看到a交流阻抗电路原理图

由图可知： $v_{gs} = v_g - v_s = 0 - v_b = -v_b$

由电流守恒： $-g_m v_{gs} + \frac{v_b - v_d}{r_d} = \frac{v_d - v_a}{R}$

可得： $\frac{v_b}{v_d} = \frac{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_d}}{g_m + \frac{1}{r_d}} = \frac{R + r_d}{R + r_d g_m R}$

则可得：

$$r_{ba} = \frac{v_b - v_a}{i_{tot}} = \frac{v_b - v_a}{(v_d - v_a) / R} = R \frac{v_b}{v_d} = R \frac{r_d + R}{r_d g_m R + R} = \frac{r_d + R}{r_d g_m + 1}$$

通过比较 $r_{ab} = R + r_d$ 和 $r_{ba} = \frac{r_d + R}{r_d g_m + 1}$

可知: $r_{ab} = (1 + g_m r_d) r_{ba}$

(3) ①求从 a 看到 b 的交流阻抗 r_{ab} 的电路图如图 4-5 所示:

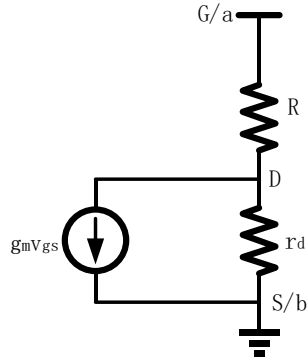


图4-5 从a看到b交流阻抗电路原理图

由图可知 $v_{gs} = v_g - v_s = v_g$

根据电流守恒有 $\frac{v_g - v_d}{R} = \frac{v_d - v_s}{r_d} + g_m v_{gs}$

可得 $\frac{v_d}{v_a} = \frac{r_d - g_m r_d R}{r_d + R}$

则有 $r_{ab} = \frac{v_a - v_b}{(v_a - v_d) / R} = R \frac{1}{1 - v_d / v_a} = \frac{r_d + R}{1 + g_m r_d}$

②求从 b 看到 a 的交流阻抗 r_{ba} 的电路图如图 4-6 所示:

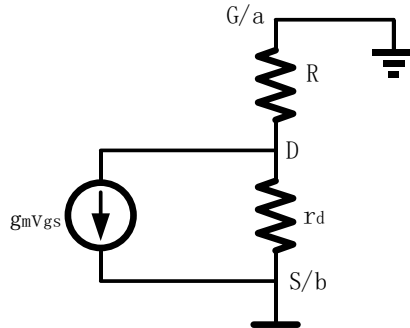


图4-6 从b看到a交流阻抗电路原理图

由图可知 $v_{gs} = v_g - v_s = -v_s = -v_b$

根据电流守恒有
$$\frac{v_g - v_d}{R} = g_m v_{gs} + \frac{v_d - v_s}{r_d}$$

可得
$$\frac{v_b}{v_d} = \frac{r_d + R}{g_m r_d R + R}$$

则有
$$r_{ba} = \frac{v_b - v_a}{i_{tot}} = \frac{v_b - v_a}{(v_d - v_a) / R} = R \frac{v_b}{v_d} = \frac{r_d + R}{1 + g_m r_d}$$

综上可知，此电路结构下， $r_{ab} = r_{ba}$ 。

(4) 当一开始有电流后，电阻的两端点电位均随着电流的增加上升。当 M 管进入强反型饱和区后，随着电流增加，上端点电位缓慢上升，下断点电位再随着电流的增加而先上升后下降。当 M 管随着电阻两端电压增大而进入线性区后，电阻上端点位迅速上升，下端点电位随着电流的增加而缓慢上升。当电阻两端的电压差大于 V_{th} 后，MOS 管即可以进入线性区。

三、电流镜的性质、结构与作用。

答：电流镜负责传输电流，描述多个相关 MOS 管之间的电流传输关系，包含传输直流静态电流和交流小信号电流。根据电流传输得性质，有线性电流镜和非线性电流镜两类。

电流镜的传输性质由电流镜中两 MOS 管的状态和 V_{GS} 匹配特性决定。若两管 V_{GS} 相同，且状态相同（同为饱和区和恒流区或同为线性电阻区），则构成线性电流镜，电流镜传输系统近似为常数，近似由两管 W/L 之比决定；若两管 V_{GS} 相同，但状态不同（输入管为饱和恒流区、输出为线性电阻区，电流传输系数降低；或输入管为线性电阻区、输出为饱和恒流区，电流传输系数则增大），或只要两管 V_{GS} 不同（则无论两管状态是否相同），两管均构成非线性电流镜。

线性电流镜性能评价体现在两个方面，一是输入电流的稳定性，二是电流传输的线性度。输入电流的稳定性来自偏置电流的稳定性，提高稳定性理论上的方法一是降低低阻 Diode 的输出阻抗，即提高 Diode 管的跨导 g_m ，二是提高高阻

恒流源的输出阻抗，相比较而言，提高输出阻抗更为简便，资源消耗少，且改善效果好。提高电流的线性传输比，也有两种方法，一是 $\lambda_1=\lambda_2=0$ ，即提高 MOS 管电流的恒流特性，使 MOS 管电流不随 V_{DS} 变化；另一种是 $\lambda_1=\lambda_2 \neq 0$ ，且 $V_{DS1}=V_{DS2}$ ，漏电压匹配，则输入输出电流匹配，电流传输的线性性质得到改善。

四、当 CD 做输出级时，其只能使得输出结点不是低频极点，但不能给大电容负载提供大电流，摆率提不上去。但是差分 class AB 做输出级，可以提高效率，但是那样不会输出低阻。这样的话是怎么判断输出级用谁的？就是输出级的作用具体是什么？class ab 做输出级并不能带小电阻负载。运放后面一般或者可能要接什么电路？为啥会有小电阻和大电容负载这些情况？

答：OP（多级放大器）常采用的结构有 P-DP+N-CS+V-Buffer 和 N-DP+P-CS+V-Buffer，示意图如图 3-1 所示：

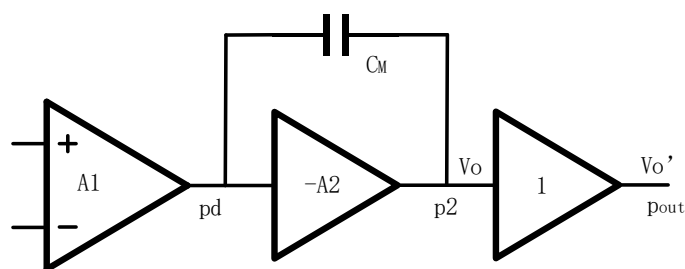


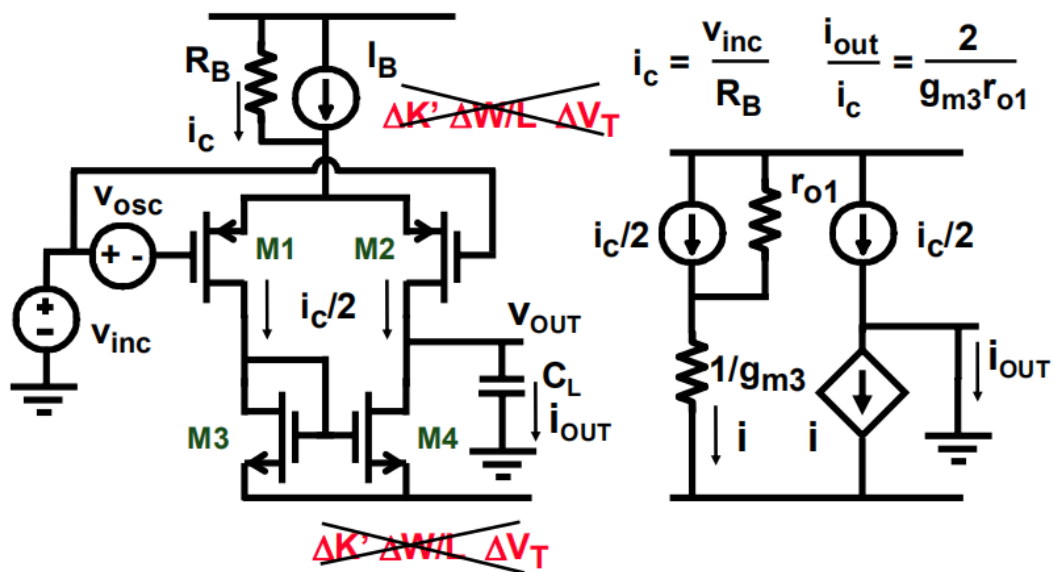
图3-1 OP结构示意图

第一级常采用 DP 结构，因为 DP 结构适应宽范围的共模信号的变化，可以用来解决共模信号问题，扩大 CM 允许范围，使电路工作点状态性质不变，抑制输入共模变化对输出变化的影响，提高共模抑制比，对输入信号的要求很弱。

第二级采用共源放大器 CS 结构，由于前级的差分对是一个单级放大器，其增益有限，达不到一个运放的开环增益，CS 作为中间放大级，对信号进行再次放大，以达到需要的开环增益，其中 Miller 电容 CM 压缩主极点，拓展次极点，保证相位裕度 PM 的需要。

第三级采用 V-Buffer，视电路情况而定，若运放输出需要驱动一个低的负载电阻时，需加一个 buffer，可用共漏放大器 CD 或者 push-pull 结构，起到提高多级放大器驱动能力以及隔离的作用，否则并联的低电阻会使得增益减小；若输出端只有电容，则可不用添加 buffer 电路。

Systematic CMRR in differential Pair - 1



当工作在中频时，可以认为负载和地是短接的。流过负载的电流是差分输出电流 i_{OUT} ，结果只包括了 r_{o1} 。电流镜可以用大小为 $1/g_{m3}$ 的电阻取代，流过它的电流镜像到输出端。