

器件的结构

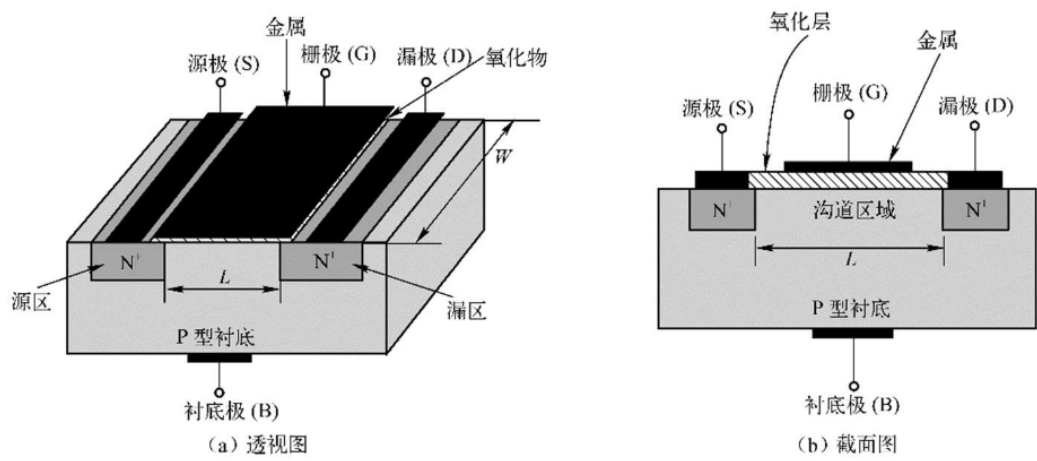
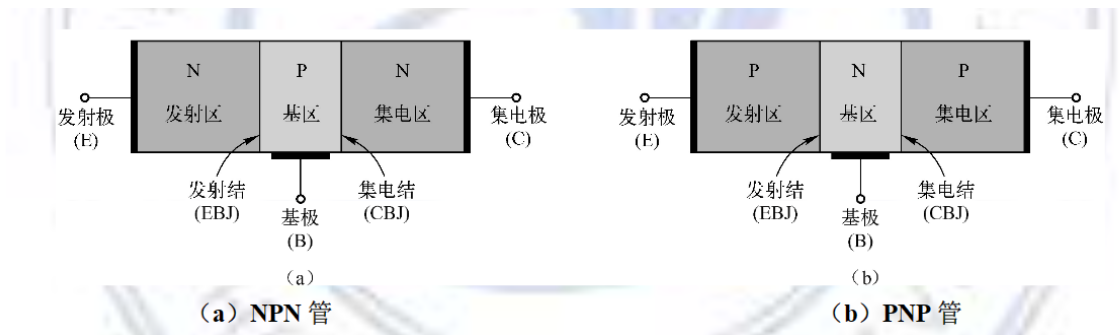


图 1 N 沟道 EMOS 的物理结构



不同的物理结构决定了器件在等效电路中的表现形式，*MOS* 管一般可以看作 *VCCS*，而 *BJT* 则是一般看作 *CCCS*。

可以发现，它们的控制量不同，但是受到影响的都是电流，而这个电流可以通过添加负载的形式转化为电压。

器件特性

这部分仅比较器件本身的参数特性异同。

MOS 的特性

MOS 是四端元器件，一般来说有三个工作状态：**截止区**、**变阻区**、**饱和区**。

且在 MOS 器件中，器件本身没有固定**源极**和**漏极**，当且仅当器件接入电路后根据电路工作的电势关系确定后才能确定其源极和漏极。

- 截止区：截止区的 MOS 器件的源极到漏极几乎没有电流，此时在源极和漏极之间没有形成沟道。
- 变阻区：变阻区的 MOS 器件的源极和漏极间出现反形层，在器件内部有漏极到源极的漂移电流：

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} [(v_{GS} - V_t)v_{DS} - \frac{1}{2}v_{DS}^2]$$

- 饱和区：饱和区的 MOS 器件的反形层在 v_{DS} 的作用下逐渐消失，此时的工作电流几乎与 v_{DS} 无关：

$$i_D = k'_n \frac{W}{2L} (v_{GS} - V_t)^2$$

若考虑沟道长度调制效应，则有 $i'_D = i_D(1 + \lambda v_{DS})$

- 沟道长度调制效应：等效出的理想受控源会并联上一个输出电阻：

$$\begin{aligned} r_o &\stackrel{def}{=} \left[\frac{\partial i_D}{\partial v_{DS}} \right]^{-1} \\ &= [\lambda k'_n \frac{W}{2L} (v_{GS} - v_t)^2]^{-1} \\ &= \frac{V_A}{I_D} = \frac{1}{\lambda I_D} \end{aligned}$$

- 跨导：等效出的 VCCS 的系数：

$$g_m \equiv \frac{i_d}{v_{gs}} = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = \sqrt{2I_D k'_n \frac{W}{L}} = \frac{2I_D}{V_{OV}}$$

在推导这串等式中需要注意： $i_D = I_D + i_d$

$$\begin{aligned} i_D &= k'_n \frac{W}{2L} (V_{GS} + v_{gs} - V_t)^2 \\ &= k'_n \frac{W}{2L} [(V_{GS} - V_t)^2 + 2v_{gs}(V_{GS} - V_t) + v_{gs}^2] \end{aligned}$$

且有：

$$v_{gs} \ll 2(V_{GS} - V_t)$$

即：

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_t)^2 + 2(V_{GS} - V_t)v_{gs}]$$

$$\Rightarrow I_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$$

$$i_d = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)v_{gs}$$

BJT 的特性

BJT 是三端元器件，一般来说有四个工作区：**饱和区、放大区、截止区、击穿区**。

晶体三极管结构并不对称，从左到右的导体区分别为：**发射区、基区、集电区**，分别对应：**发射极 (E)、基极 (B)、集电极 (C)**，其中形成的两个 PN 结分别为：**发射结 (EBJ)、集电结 (CBJ)**。

其必须满足的**工艺条件**：

- 发射区为高掺杂，保证发射足够多的自由电子；
- 基区很薄，以减小基区中非平衡少子（自由电子）在向集电结扩散过程中复合，保证绝大部分的非平衡少子都能到达集电结边界处；
- 集电结的面积远远大于发射结的面积，保证扩散到集电结边界处的非平衡少子全部漂移到集电区，形成受控的集电极电流。
- 饱和区：两个 PN 结均正偏，这个区域内的 i_C 与 i_B 不满足电流传输方程，且近似认为集电极电压为 $0.3V$ ，即三极管饱和压降为 $V_{CE(sat)} = 0.3V$ 。
- 放大区：发射结正偏，集电结反偏截止，此时有 $V_{CE} > 0.3V$ $V_{BE} = 0.7V$ 。
- 截止区：发射区电流 $I_E = 0$ 以下的区域称为截止区，即发射结和集电结均反偏。当 $i_E = 0$ 时，有 $i_C = -i_B = I_{CBO}$ 。
- 击穿区：集电结上反偏电压过大，导致 i_C 剧增，形成击穿区。
- 基区宽度调制效应：等效出的理想受控源会并联上一个输出电阻：

$$r_o \equiv \left[\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right]^{-1} \quad i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left[1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right]$$

$$\Rightarrow r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

- 放大参数：

$$\bar{\alpha} \approx \frac{I_C}{I_E}$$

$$\bar{\beta} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

$$\alpha = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \right|_Q$$

$$\beta = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_Q$$

- 跨导：如果等效为 $VCCS$ ，则有

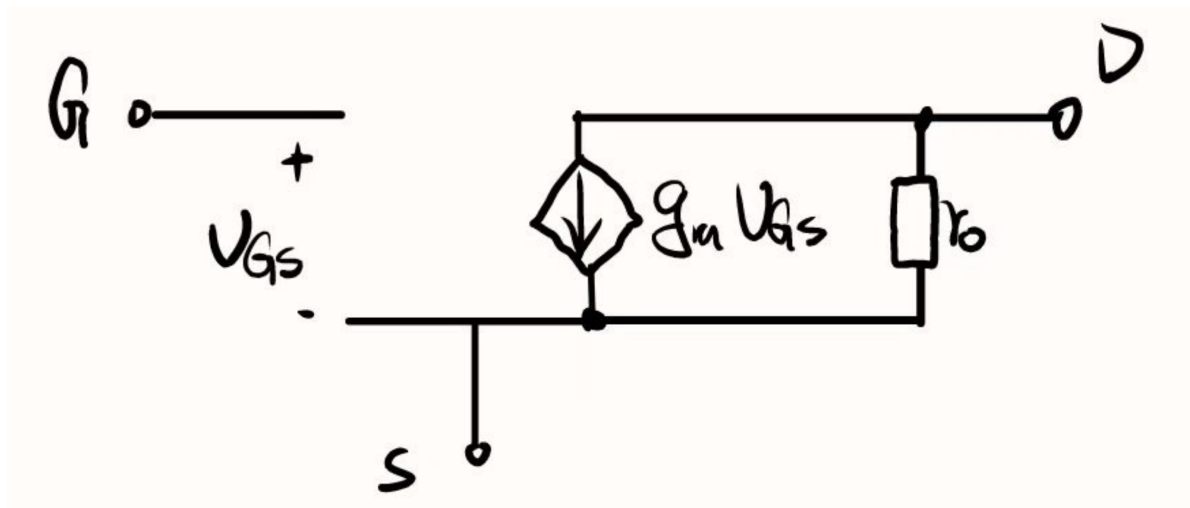
$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T} = \frac{\alpha I_{EQ}}{V_T} = \frac{\alpha}{r_e} = \frac{\beta}{(1 + \beta)r_e} = \frac{\beta}{r_\pi}$$

器件建模

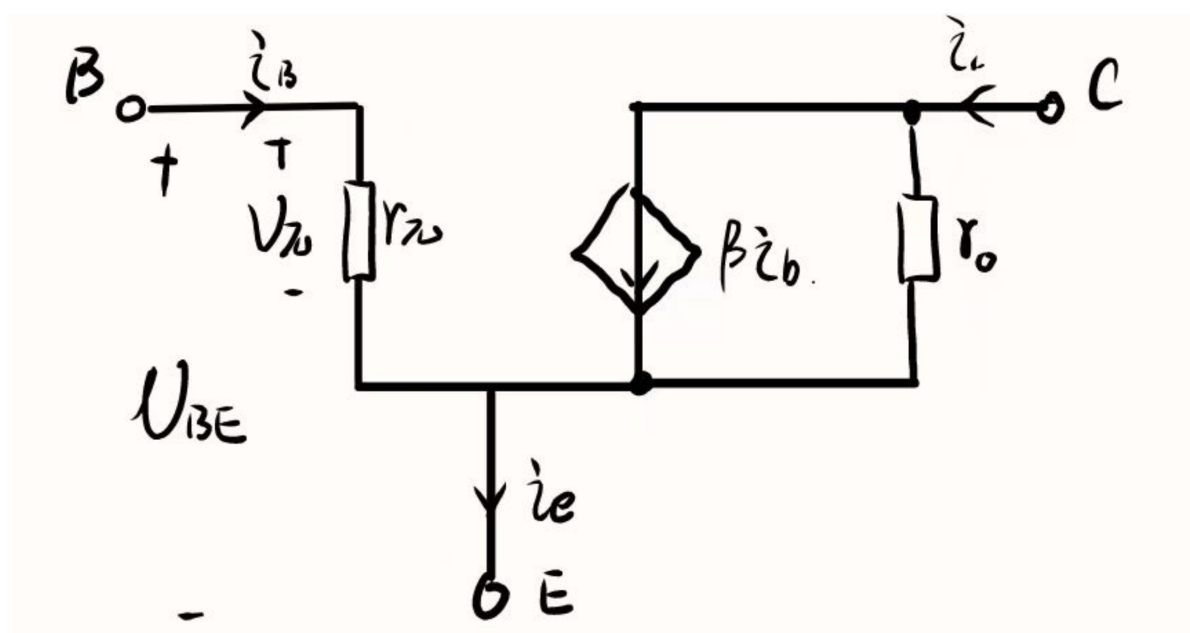
该部分只给出器件的等效模型

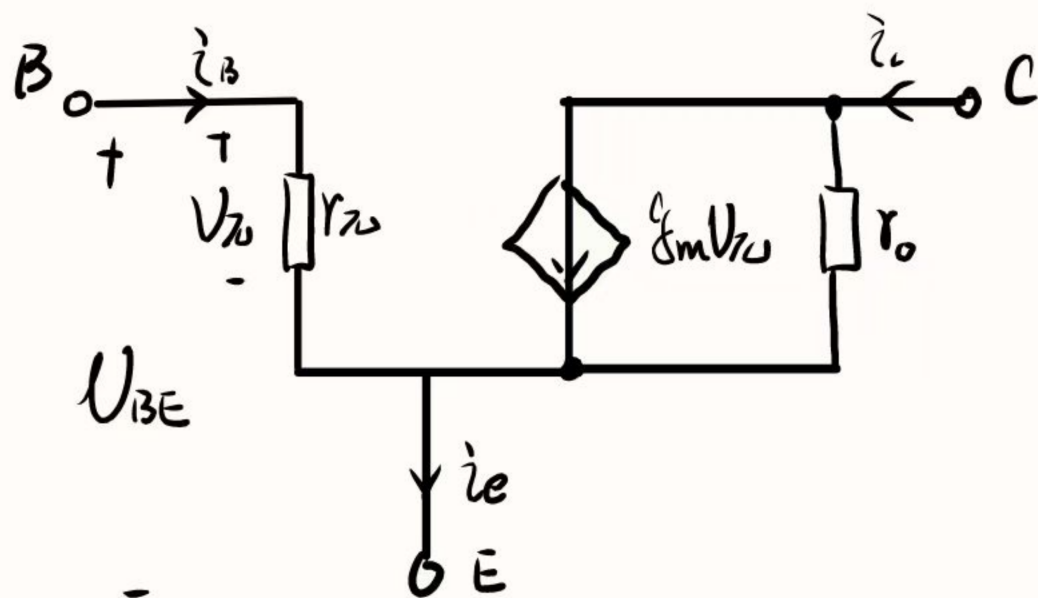
MOS 器件

考虑沟道长度调制效应， r_o 是一个极大的电阻，对粗略估算没有太大影响。



BJT 器件





放大器应用

根据器件接入的不同公共极，其作用可以大致分为：**放大**、**电流跟随**、**电压跟随**。

- 放大器：在 *MOS* 中，采用 *CS* 电路；在 *BJT* 中则采用 *CE* 电路。

- *MOS* 器件的参数特性：

- $$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G \quad R_o = \frac{v_t}{i_t} = r_o // R_D // R_L$$
$$A_V = -g_m(r_o // R_D // R_L)$$

- 一般 R_G 会采用大电阻以提高源电压增益；若加入源极电阻 R_S ，既可以选取合适的阻值来控制 v_{GS} ，以避免某些不必要的非线性失真。

- *BJT* 器件的参数特性：

- $$R_i = R_B // r_\pi \quad R_o = r_o // R_C$$
$$A_V = -g_m(r_o // R_D // R_L)$$

- 电流跟随器：在 *MOS* 中，采用 *CG* 电路；在 *BJT* 中则采用 *CB* 电路。

- *MOS* 器件的参数特性：

- $$R_i = \frac{v_i}{i_i} = \frac{-v_{GS}}{-g_m v_{GS}} = \frac{1}{g_m} \quad R_o = \frac{V_t}{i_t} = R_D$$
$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = g_m(R_D // R_L)$$

- 该输入电阻的数量级为欧姆，但是在考虑源电压增益时会丢失大量信号，但是考虑电流增益会发现 $A_i = \frac{R_D}{R_D + R_L}$ ，对于足够大的输出电阻则有 $A_i \approx 1$ 。

- *BJT* 器件的参数特性：

- $$R_i = \frac{V_i}{i_i} = \frac{r_\pi}{1 + \beta} = r_e \quad R_o = R_C$$
$$A_v = g_m(R_C // R_L) \quad A_i = \alpha \frac{R_C}{R_C + R_L}$$

- 电压跟随器：在 *MOS* 中，采用 *CD* 电路；在 *BJT* 中则采用 *CC* 电路。

- *MOS* 器件的参数特性：

- $$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_G \quad R'_o = \frac{V_t}{i'_t} = \frac{1}{g_m} \quad R_o = r_o // \frac{1}{g_m} \approx \frac{1}{g_m}$$
$$A_V = \frac{v_o}{v_i} = \frac{r_o // R_L}{r_o // R_L + \frac{1}{g_m}}$$

- 该输入电阻非常大，可作为多级放大器的输出极使用。

- *BJT* 器件的参数特性：

- $$R_i = R_B // R_{ib} \quad R_{ib} = (1 + \beta)[r_e + (r_o // R_L)]$$
$$R_o = r_o // R'_o \quad R'_o = \frac{r_\pi + R_{sig} // R_B}{1 + \beta}$$
$$A_V = \frac{(1 + \beta)(r_o // R_L)}{r_\pi + (1 + \beta)(r_o // R_L)} \approx 1$$