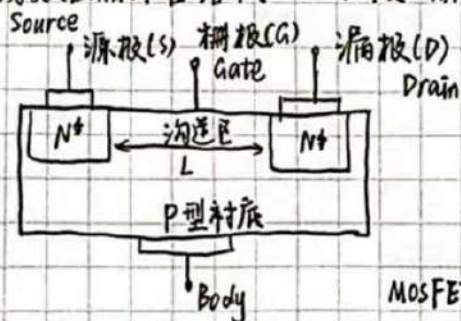


[第三章 场效应管]

4 分类图:



4 一. 场效应晶体管结构 旧称: 源极, 漏极, 栅极, 衬底, 常常将源极和衬底相接



U-MOS 结构:

N-MOS:



G 加电压, N^+ 电子形成电流

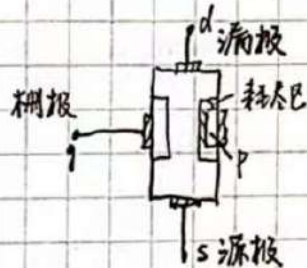
P-MOS:



G 加电压, P^+ 空穴形成电流

→ 可在同一半导体衬底上集成

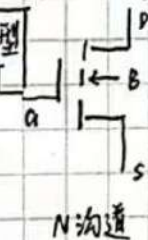
MOSFET.



J-FET N沟道结型.

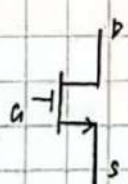
4 二. 场效应管符号:

增强型 MOSFET

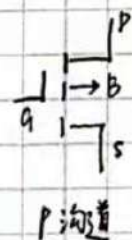


N沟道

⇒

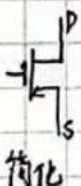


简化符号 (省略了衬底)



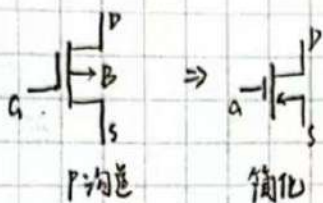
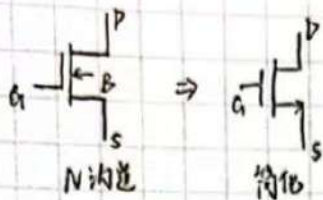
P沟道

⇒



简化

耗尽型 MOSFET

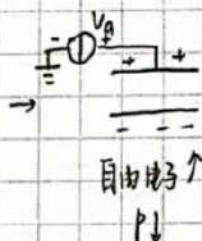
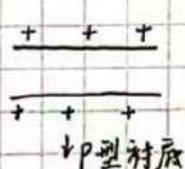


场效应管工作原理 (见课件)

栅极长度 L , 宽度 W

栅氧电容密度 $C_{ox} = \frac{\epsilon}{t_{ox}}$ (单位面积栅氧电容)

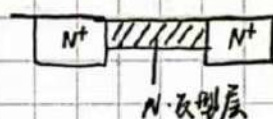
零偏



V_{as}, V_{Th} 都由材质决定

阈值电压: $V_{as} = V_{Th} = V_a$

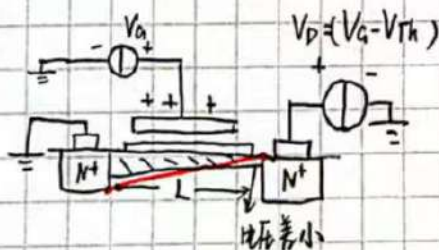
$V_{as} > V_{Th}$ 时, 形成反型层沟道.



$$Q_{tot} = WL C_{ox} (V_a - V_{Th})$$

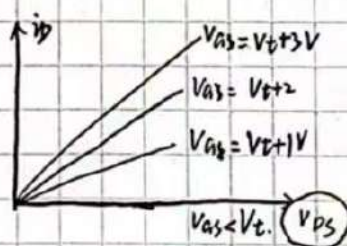
$V_a = V_{Th}$. 电中性, 多出来的电子.

V_{as} 变大, 电子浓度变大, 导电能力越强

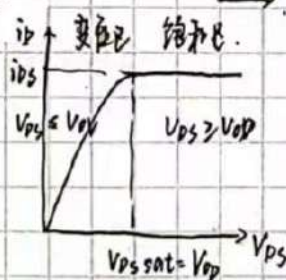


临界条件: $V_{op} = V_{as} - V_{Th}$ (红线)

增强型 NMOS 在小 V_{DS} 下伏安特性:



$V_{DS} \uparrow$, 右侧 $V \downarrow$, $\Delta V \uparrow$, 变



id 计算

$$i_D = k_n' \cdot \frac{W}{L} \left[(V_{as} - V_t) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2 \right]$$

理解: W 越大, 越不易形成电流
 L 越长, 越易形成电流

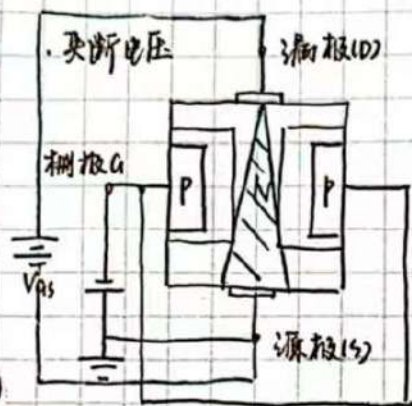
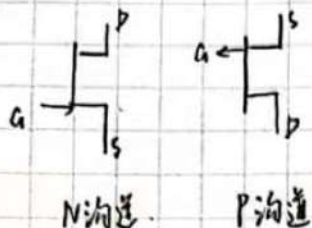
$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} (V_{as} - V_t)^2$$

(临界条件推导)

$$V_{DS} \geq V_{op} = V_{as} - V_t$$

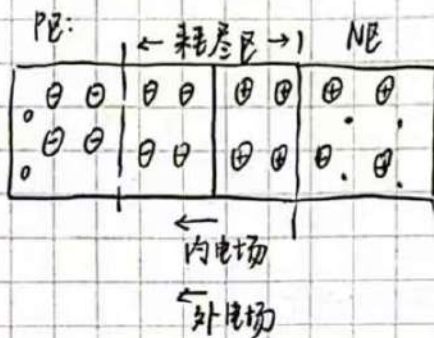
$k_n' = \mu_n C_{ox}$ 描述的是载流子导电能力 (迁移率)

三. 结型场效应管工作原理



两个PN结都反接:

* PN结知识: 反偏的PN结:



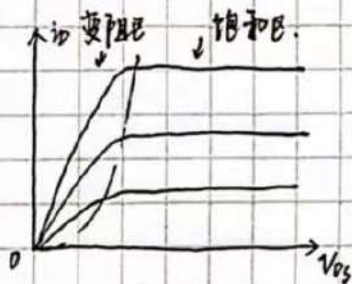
漂移: 外电场作用

扩散: 浓度梯度作用.

与内电场同向.
漂移 > 扩散.
耗尽变宽.

若在 V_{gs} 上加电压, 会让沟道发生变化

* 默认 $V_{gs}=0$ 是敞开, 外加电场是为了关闭沟道

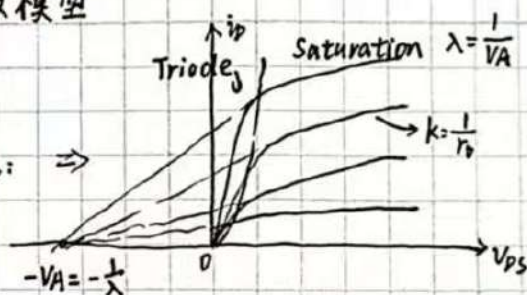


场效应晶体管特性及等效模型

一般: 如右.

若考虑沟道长度调制效应:

对应三极管厄利效应



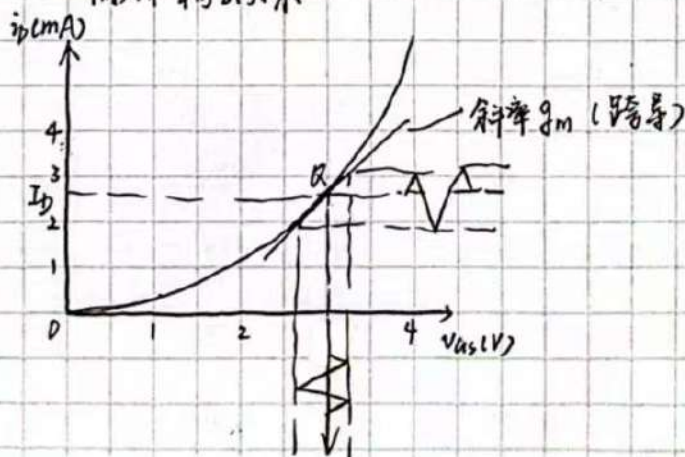
$$r_0 = \frac{V_A}{I_D}$$

$$\Rightarrow i_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds})$$

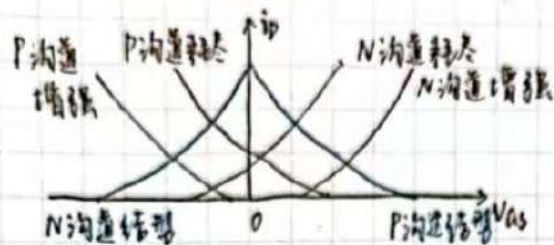
可推出: $V_A \rightarrow \infty$, i_D 对应曲线与横轴近似平行

转移特性曲线

输入和输出关系



b 种场效应管转移曲线



① 若 $V_{GS} = 0$ 时 $i_D \neq 0$ → 具有导电能力 → 耗尽型
 $i_D = 0 \rightarrow$ 增强型

② N型PMOS: V_{GS} 增加, 电子/空穴沟道形成 → 正相关

双向加 V_{GS} 沟道才能夹断

场效应管 (FET) 参数

直流: $V_{GS(off)}$: 夹断电压 (耗尽型)

$V_{GS(th)}$: 开启电压 (增强型)

I_{DSS} : 饱和漏极电流 (?)

R_{AS} : 直流输入电阻, $V_{DS} = 0, \frac{V_{GS}}{I_G}$

$V_{DS(DD)}$: 漏源击穿

$V_{DS(DS)}$: 栅源击穿

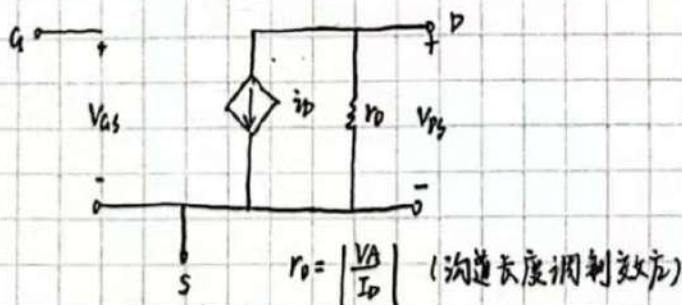
交流: $g_m, r_o, C_{as}, C_{ad}, C_{ds}$

中频等效电路

△ 大信号模型, 此时处于饱和区

$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2, \text{ 也可写为 } i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_t}\right)^2, \text{ 其中 } I_{DSS} = \frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} \cdot V_t^2$$

等效电路:



△ 小信号模型

$$V_{GS} = V_{GS} + v_{gs}$$

$$i_D = \frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} + v_{gs} - V_t)^2 = \frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 + k_n' \cdot \frac{W}{L} \cdot v_{gs} \cdot (V_{GS} - V_t) + \frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} v_{gs}^2$$

$$\frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} v_{gs}^2 \ll k_n' \cdot \frac{W}{L} \cdot v_{gs} \cdot (V_{GS} - V_t), \text{ 可忽略}$$

$$\therefore i_D \approx \frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t)^2 + k_n' \cdot \frac{W}{L} \cdot (V_{GS} - V_t) v_{gs} \therefore i_D \begin{cases} I_D = \frac{1}{2} k_n' \cdot \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2 \\ i_d = k_n' \cdot \frac{W}{L} \cdot v_{gs} (V_{GS} - V_t) \end{cases}$$

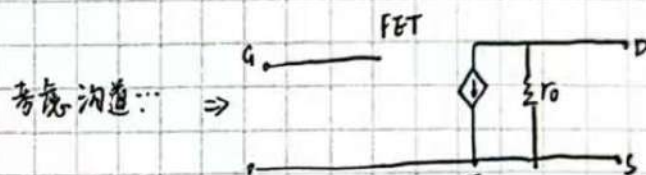
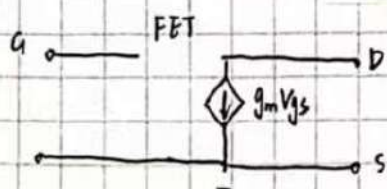
一、N型等效电路:

$$i_d = k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) V_{GS}$$

而跨导 $g_m = \frac{i_d}{V_{GS}} = k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) = k_n \cdot V_{OV}$ (令 $k_n = k_n' \frac{W}{L}$, $V_{OV} = V_{GS} - V_t$)

代入 $I_D = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t)^2$

或 有 $g_m = \frac{I_D}{\frac{1}{2}(V_{GS} - V_t)}$ $I_D \leftarrow$ 恒流源给一个偏置电流

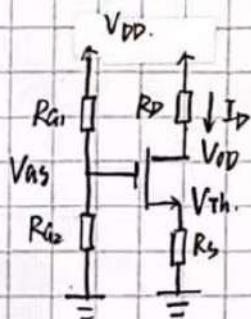


二、T型等效电路 (极少用)

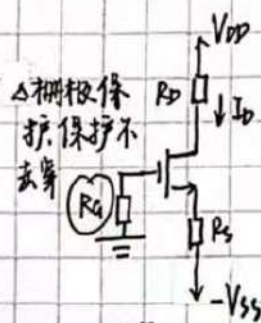
4. 场效应管放大电路及构成分析

4.1 直流偏置

一、自给偏置电路



单电源

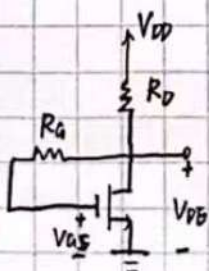


双电源

$V_{GS} > V_{Th}$

$V_{DS} > V_{GS} - V_{Th} = V_{OV}$ 沟道形成

二、栅源间接反馈电阻

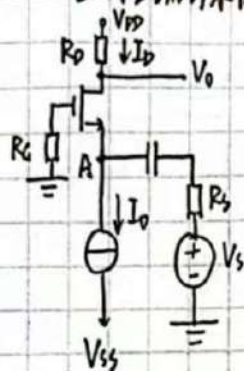


$V_{GS} = V_{DS}$

$V_{GS} > V_{Th}$

$V_{GS} = V_{DS} > V_{GS} - V_{Th} = V_{OV}$

三. 恒流源偏置电路

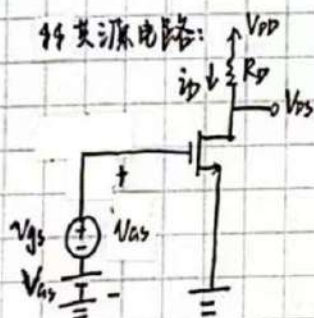


$$g_m = \frac{I_D}{\frac{1}{2}(V_{GS} - V_t)}$$

A点电压 $< -V_t$. 这样 $V_{GS} - V_t > 0$, 才能有正的偏置

三种接法分析计算

共源电路:



① 判断MOS工作状态: 饱和区, 选择合适公式

②

1. 图解法

2. 小信号:

a. 确定 g_m :

$$g_m = \frac{i_d}{v_{gs}} = k'_n \frac{W}{L} (V_{GS} - V_t) \quad (\text{已知工艺参数})$$

$$g_m = \frac{I_D}{(V_{GS} - V_t)/2} \quad (\text{已知偏置电流})$$

b. 电压增益:

$$v_{DS} = V_{DD} - i_D \cdot R_D = V_{DD} - R_D(I_D + i_d)$$

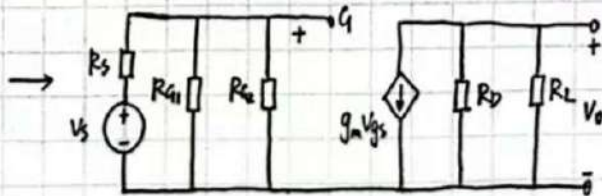
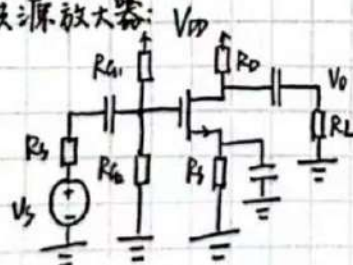
$$= V_{DD} - R_D I_D - R_D i_d$$

$$\text{又: } V_{DS} = V_{DD} - R_D I_D$$

$$\therefore v_{DS} = -R_D i_d = -R_D v_{gs} \cdot g_m$$

$$\therefore A_v = \frac{v_{DS}}{v_{gs}} = -R_D g_m \quad \text{反相放大器}$$

△ 共源放大器:



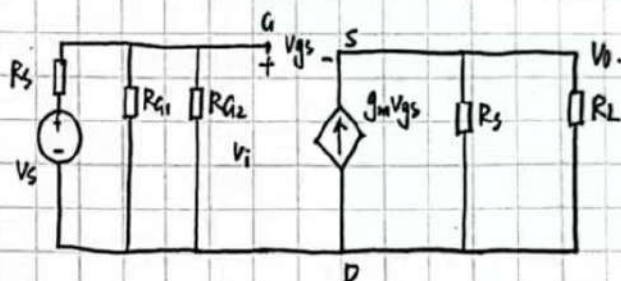
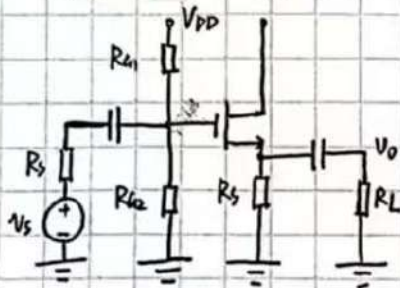
$$\therefore A_v = \frac{V_o}{V_i} = -g_m R_D // R_L$$

$$R_i = R_G$$

$$R_o = R_D$$

△ 共漏放大器：源极跟随器

• 输入：栅极；输出：源极；共：漏极



$$V_i: \text{使用大回路 KVL: } V_i = V_{gs} + g_m V_{gs} R_s // R_L = V_{gs} (1 + g_m R_s // R_L)$$

$$\therefore A_v = \frac{g_m R_s // R_L \cdot V_{gs}}{(1 + g_m R_s // R_L) \cdot V_{gs}} \quad \text{不具有电压放大功能, 正}$$

$$R_i = R_G = R_{G1} // R_{G2}$$

R_o : 不考虑 R_L .

$$V_i = 0; i = \frac{V_{gs}}{R_s} + \frac{V_{gs}}{g_m V_{gs}}$$

$$\therefore R_o = R_s // \frac{1}{g_m}$$