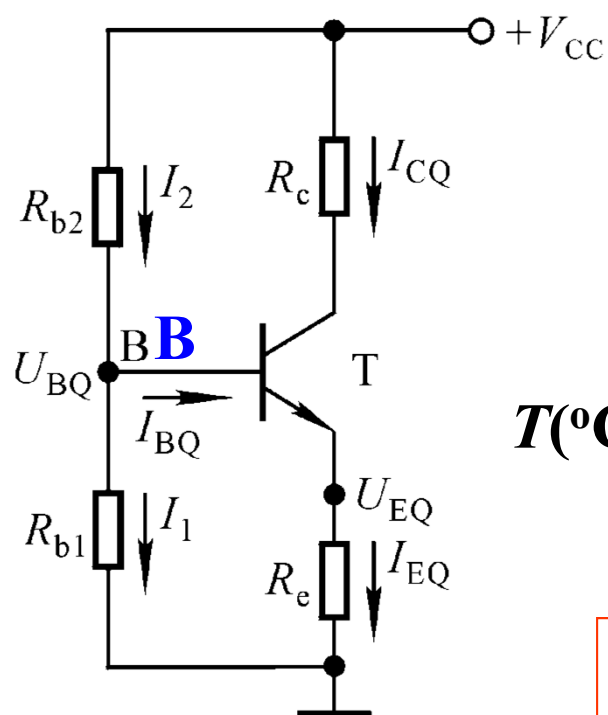


三、稳 Q 原理



一般选择 $I_1 \gg I_{BQ}$ 则 $I_2 \approx I_1$

$$U_{BQ} \approx \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

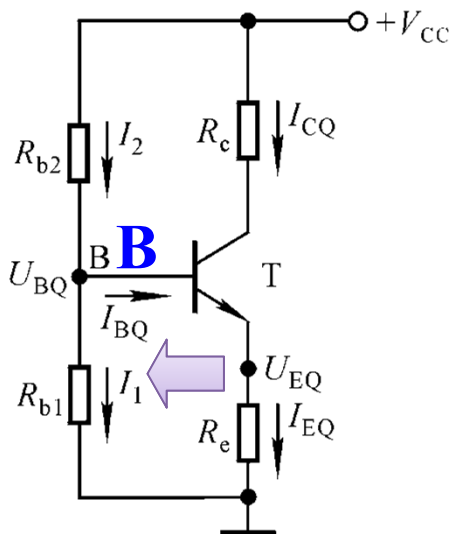
U_{BQ} 基本不
随温度变化

$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow U_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{BEQ} \downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$
(使 I_{CQ} 基本稳定)

R_e 的直流负反馈作用使 Q 点稳定

有差调节!

四、Q点分析



戴维南等效

$$V_{BB} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} \cdot V_{CC}$$

$$R_b = R_{b1} // R_{b2}$$

1. 估算

$$I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_e}$$

$$I_{BQ} = \frac{I_{EQ}}{1 + \beta} = \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{(1 + \beta)R_e}$$

$$U_{CEQ} \approx V_{CC} - I_{CQ}(R_c + R_e)$$

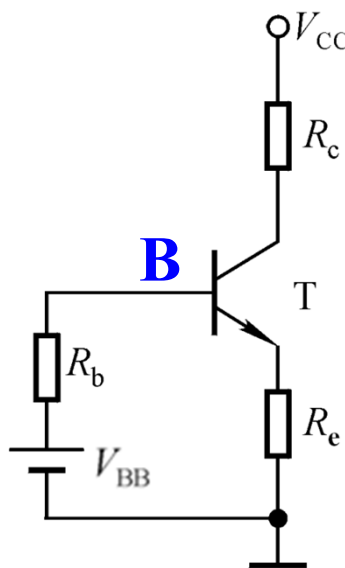
2. 误差分析

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - U_{BEQ}}{\textcircled{R_b} + (1 + \beta)R_e}$$

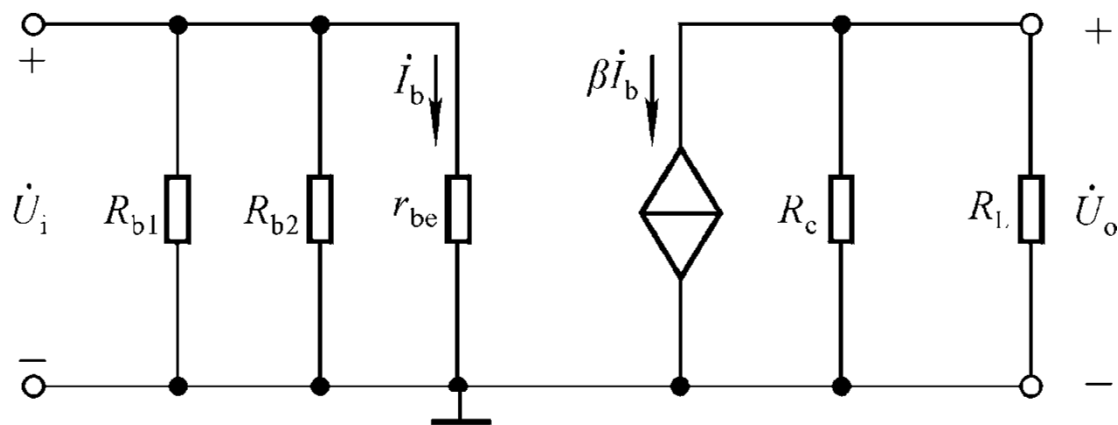
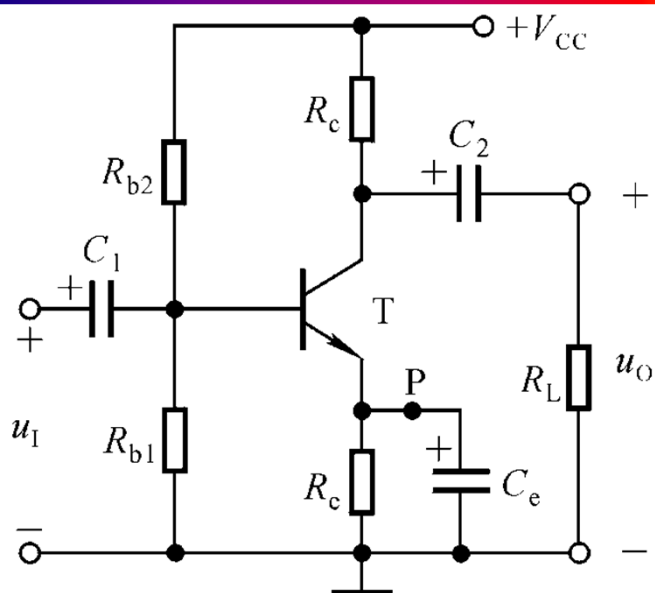
当 $R_b \ll (1 + \beta)R_e$ 时,
估算误差较小

估算的条件:

$$R_{b1} // R_{b2} \ll (1 + \beta)R_e$$



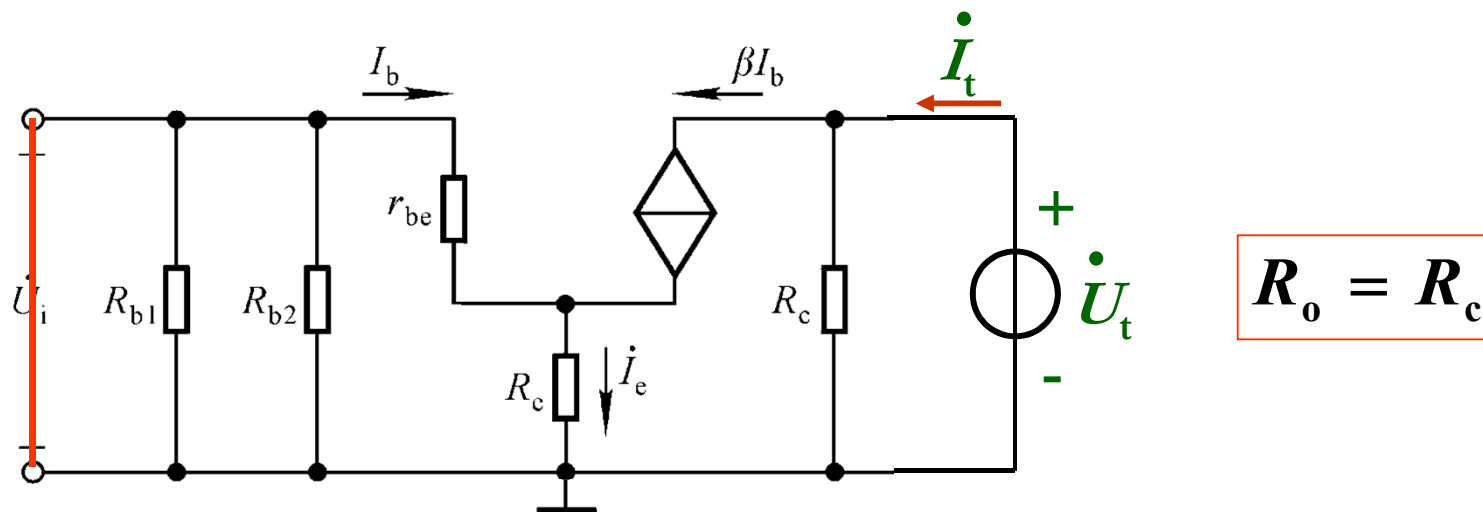
五、动态参数的估算



$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be}} = -\beta \frac{R_c // R_L}{r_{be}}$$

$$R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_{b1} // R_{b2} // r_{be} \quad R_o = R_c$$

- 问题：**
- 1) $R_{b1} // R_{b2}$ 如何选择？
 - 2) 为何加旁路电容 C_e ？
 - 3) 若没有 C_e ，交流等效电路有何不同？



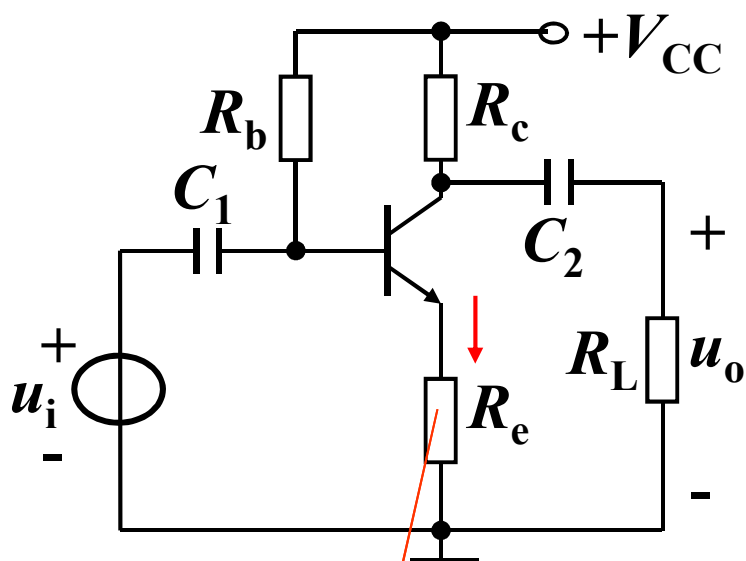
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\dot{I}_c (R_c // R_L)}{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e} = - \frac{\beta R'_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_e}$$

若 $(1 + \beta) R_e \gg r_{be}$, 则 $\dot{A}_u \approx - \frac{R'_L}{R_e}$ | A_u | 小而稳定

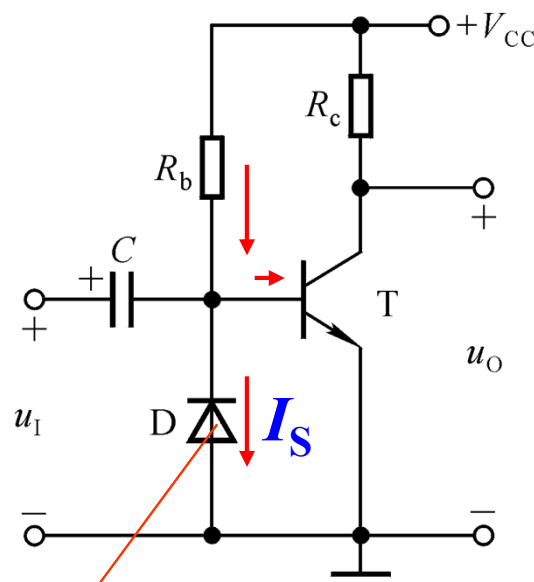
$$R_i = R_{b1} // R_{b2} // \left(\frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_b} \right) = R_{b1} // R_{b2} // \left(\frac{\dot{I}_b r_{be} + \dot{I}_e R_e}{\dot{I}_b} \right)$$

$$= R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_e] \quad R_i \uparrow$$

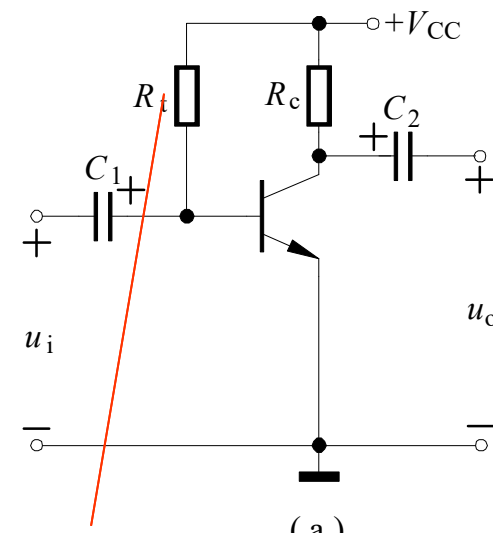
讨论5: 下图电路是否具有稳 Q 作用?
你还能提出哪些方法?



R_e 直流负反
馈稳定 Q 点



利用二极管反向特
性进行温度补偿
 $T \uparrow \rightarrow I_S \uparrow \rightarrow I_B \downarrow$



利用热敏电阻进
行温度补偿
 $T \uparrow \rightarrow R_t \uparrow \rightarrow I_B \downarrow$



2.6 场效应管及其放大电路

1960年Atalla发明MOS场效应管

场效应管(Field Effect Transistor)是利用输入**电压** (即**电场**) 来控制输出**电流**的半导体器件, 主要靠一种载流子导电, 又称为**单极型**晶体管。

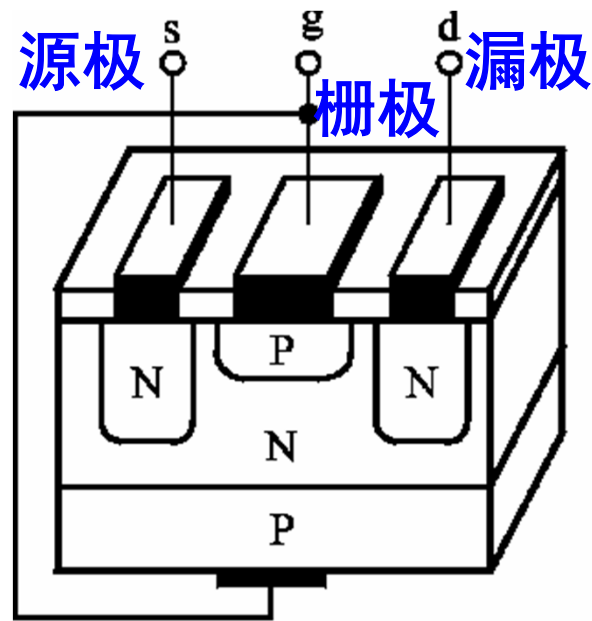
特点:

- 输入电阻大 ($10^{11}\Omega$ 以上) ;
- 功耗小, 工作电压范围宽;
- 噪声低, 温度稳定性好, 抗辐射能力强;
- 制作体积小, 集成工艺简单, 广泛应用于大规模和超大规模集成电路。

场效应管分为结型(JFET)、绝缘栅型(MOS)

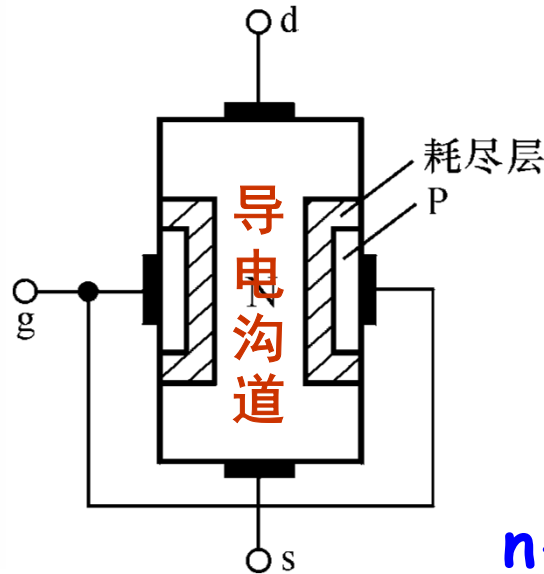
一、 结型场效应管 (JFET-Junction Field Effect Transistor)

1、 结构和符号(Structure and Symbol)

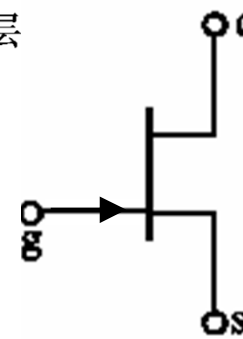


Source 源极
Gate 栅极
Drain 漏极

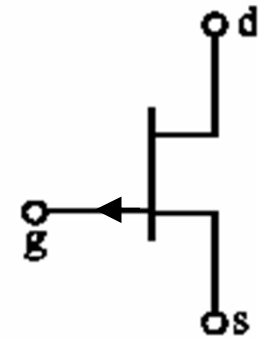
两个PN结



N沟道型



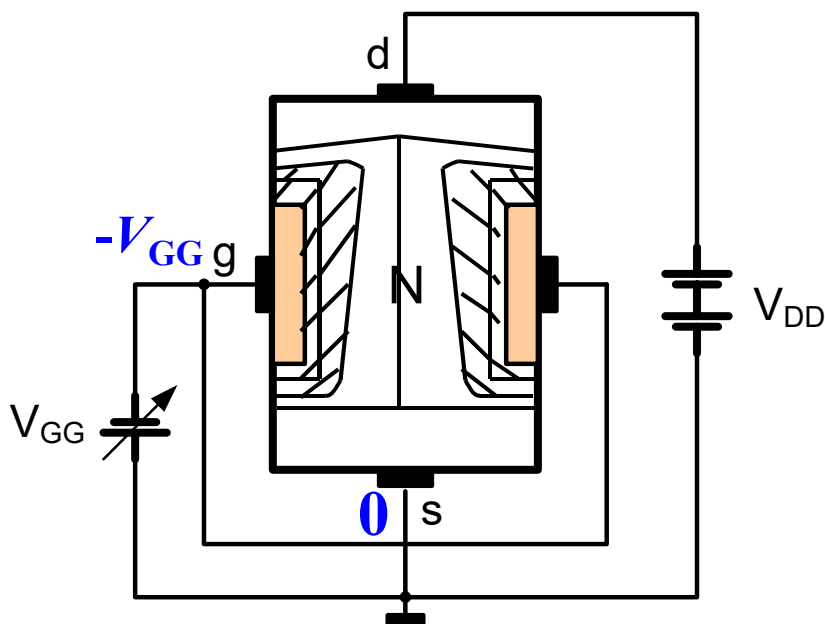
n-channel



p-channel

2、工作原理(Operation)

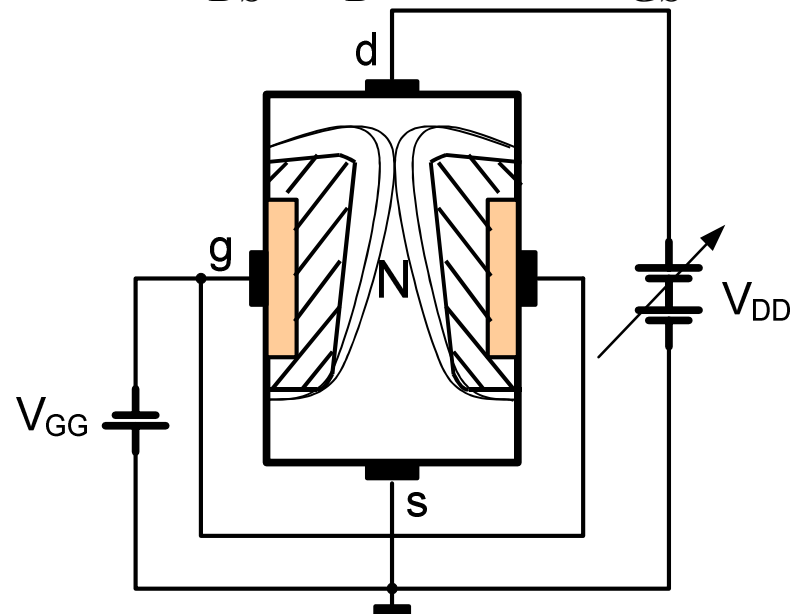
(1) u_{GS} 对 i_D 的影响(u_{DS} 不变)



- $V_{GG} \uparrow \rightarrow$ 沟道变窄, $r_{ds} \uparrow \rightarrow i_D \downarrow$
- 当 $u_{GS} = U_{GS(off)}$ 时, 导电沟道被夹断, $i_D \approx 0$

夹断电压
<0, N沟道

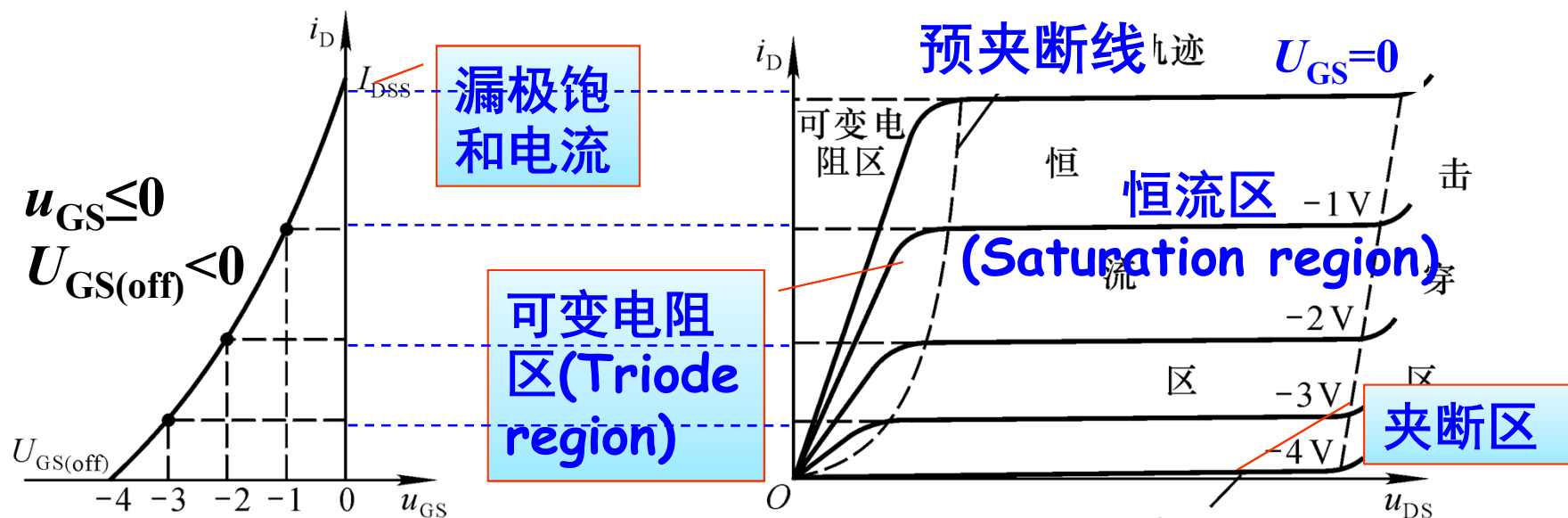
(2) u_{DS} 对 i_D 的影响(u_{GS} 不变)



- $V_{DD} \uparrow \rightarrow$ 沟道上端变窄, r_{ds} 基本不变 $\rightarrow i_D \uparrow$
- **预夹断点:** 导电沟道上端合拢
 $u_{DG} = -U_{GS(off)}$, $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(off)}$
- **恒流区:** $V_{DD} \uparrow \rightarrow r_{ds} \uparrow \rightarrow i_D$ 恒流

3、特性曲线

➤ 转移特性 $i_D = f(u_{GS})|_{U_{DS}=\text{常数}}$ ➤ 输出特性 $i_D = f(u_{DS})|_{U_{GS}=\text{常数}}$



Shockley's equation

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

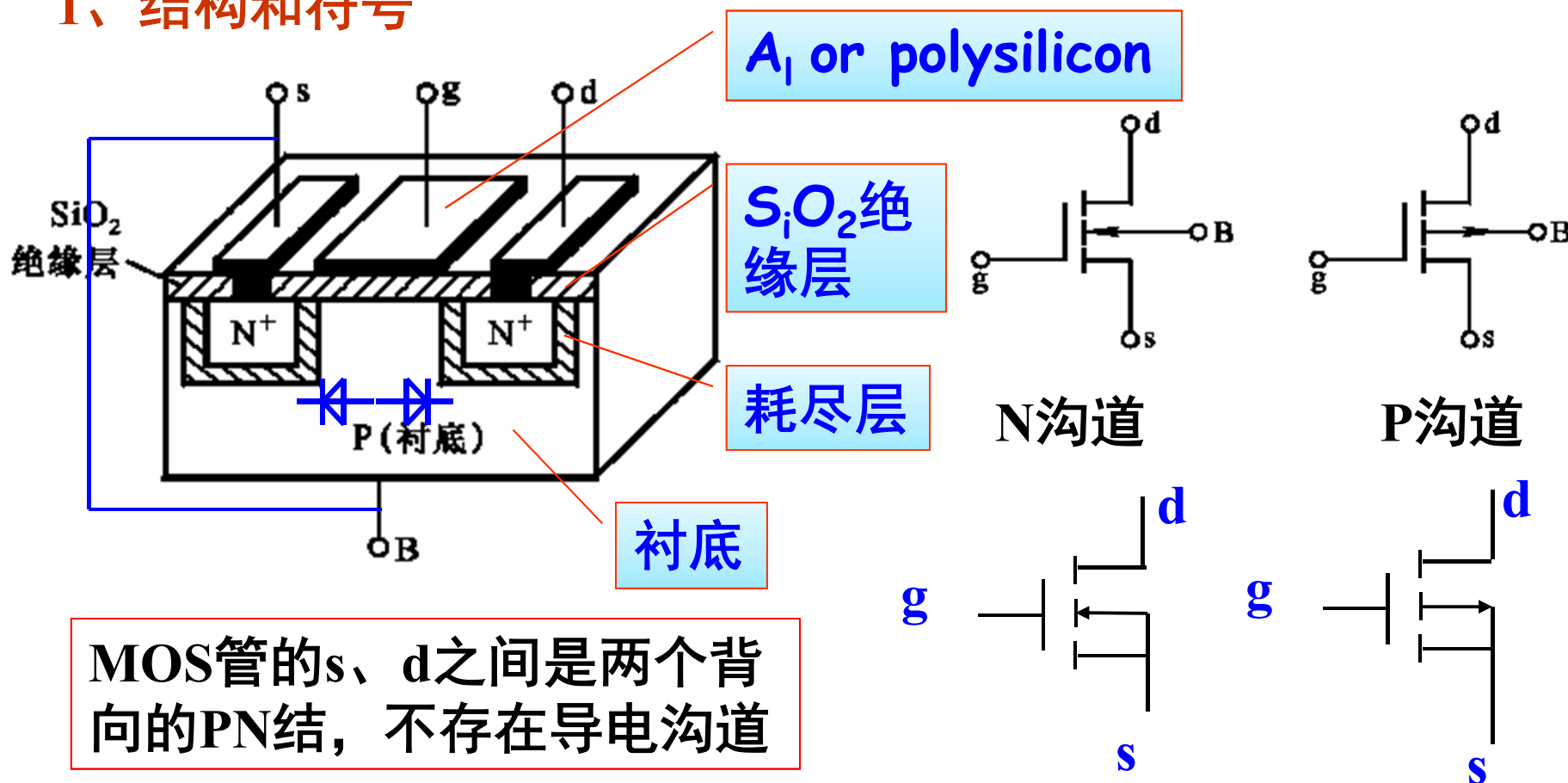
- 夹断区: $u_{GS} < U_{GS(off)}$, $i_D \approx 0$
- 恒流区: i_D 基本不变
 $u_{GS} > U_{GS(off)}$, $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(off)}$
- 可变电阻区 $r_d = \frac{r_o}{(1 - u_{GS} / U_{GS(off)})^2}$

问题: P沟道JFET特性曲线? r_o 是 $u_{GS}=0$ 时的可变电阻 r_d

二、绝缘栅型场效应管(MOSFET)

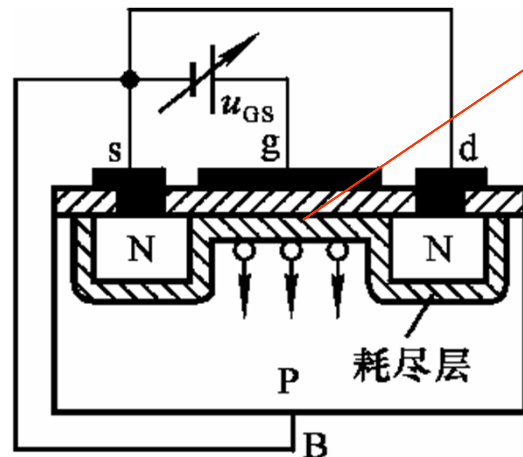
MOS管(MOSFET, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

1、结构和符号

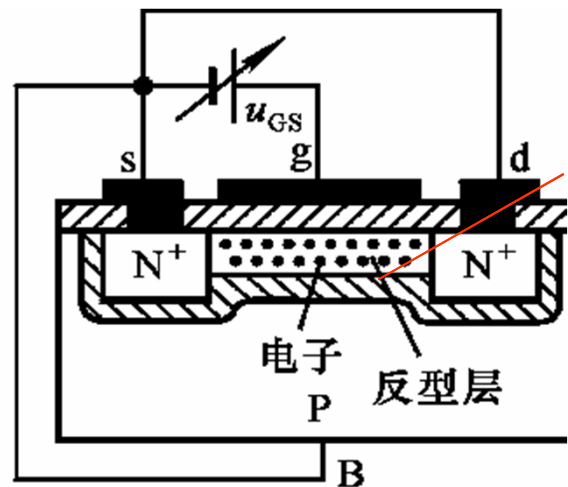


2、工作原理（以N沟道为例）

➤ 导电沟道的形成

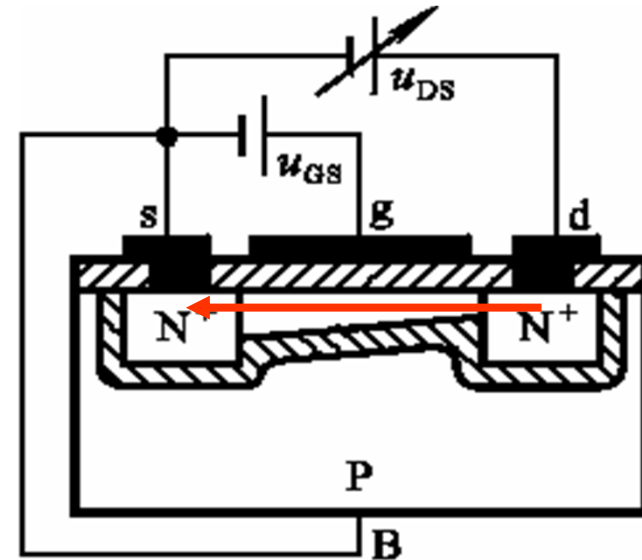


栅极排斥
空穴形成
耗尽层



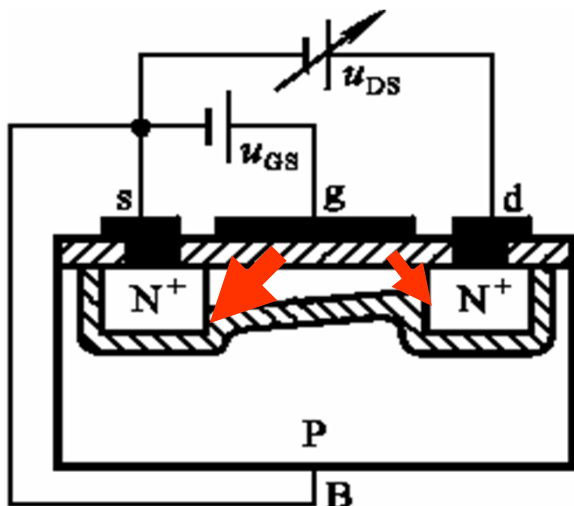
$u_{GS} > U_{GS(th)}$ (开启电压) 时, 栅极吸引电子形成反型层, 产生导电沟道

➤ u_{GS} 对 i_D 的影响

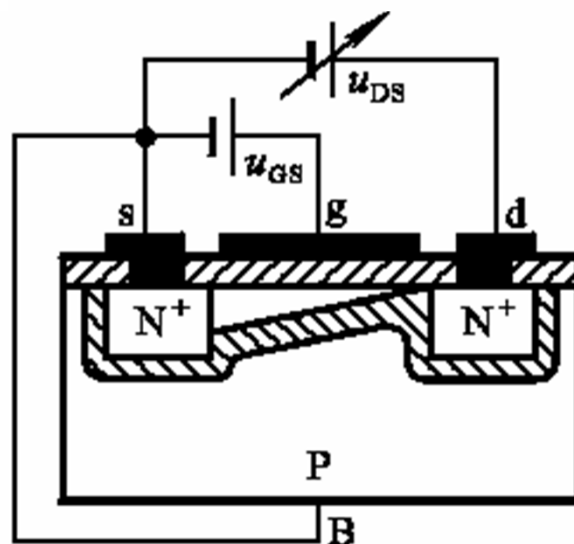


- 当 $u_{GS} > U_{GS(th)}$ 且 $u_{DS} > 0$ 时, 产生漏极电流 i_D ;
- $u_{GS} \uparrow \rightarrow$ 导电沟道变宽 $\rightarrow i_D \uparrow$

➤ u_{DS} 对 i_D 的影响



- 当 u_{GS} 一定时, $u_{DS} \uparrow$ 沟道右端变窄, r_{ds} 基本不变 $\rightarrow i_D \uparrow$



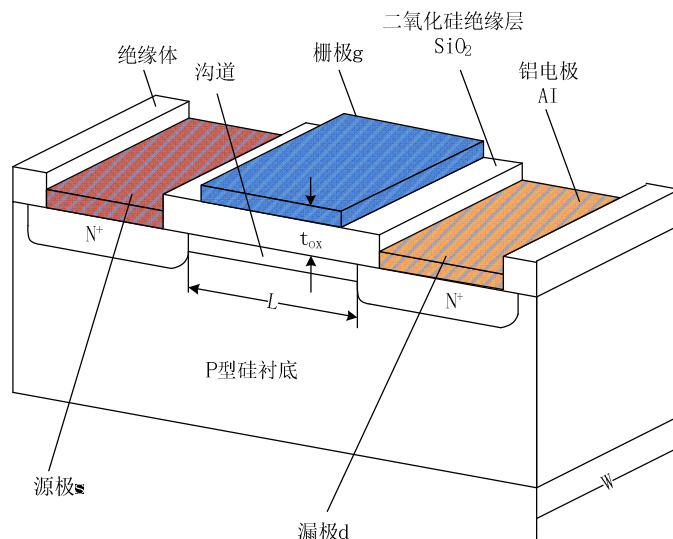
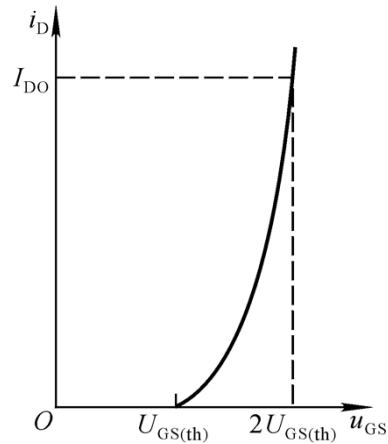
- 当 $u_{DS} \uparrow$ 使 $u_{GD} \leq U_{GS(th)}$ 时, 导电沟道在漏极一侧合拢, i_D 不再增加。

预夹断点 $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)}$

3、外特性

➤ 转移特性

$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{U_{DS}=\text{常数}}$$



$$i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2 \quad k_n = \frac{I_{DO}}{U_{GS(th)}^2}$$

$$i_D = k_n (u_{GS} - U_{GS(th)})^2$$

$U_{GS(th)}$: 开启电压, >0

I_{DO} : $u_{GS}=2 U_{GS(th)}$ 时的 i_D

k_n : **conduction parameter**, 导电参数(mA/V²), 与制造结构有关

$$k_n = \frac{1}{2} \left(\frac{W}{L} \right) k'_n \quad k'_n = \mu_n C_{ox}$$

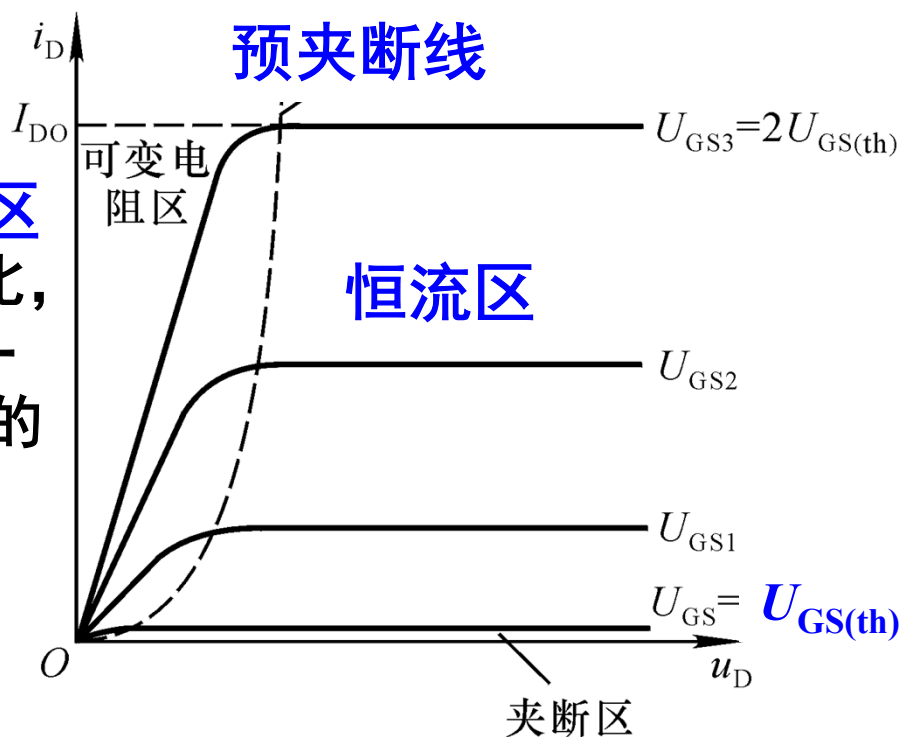
$\frac{W}{L}$ 沟道宽长比

μ_n 载流子迁移率

C_{ox} 二氧化硅绝缘层单位面积的电容

➤ 输出特性 $i_D = f(u_{DS})|_{U_{GS}=\text{常数}}$

• **可变电阻区**
 i_D 与 u_{DS} 成正比,
 沟道呈现为一个受 u_{GS} 控制的电阻



• **恒流区**

i_D 基本不变

$$u_{GS} > U_{GS(th)}$$

$$u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$$

低频跨导 g_m

$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}}$$

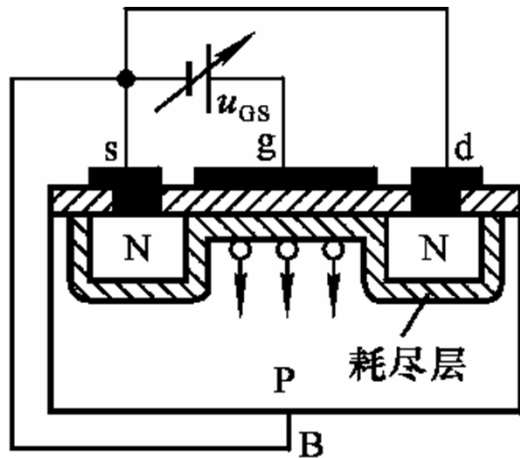
• **夹断区**

$$u_{GS} < U_{GS(th)}$$

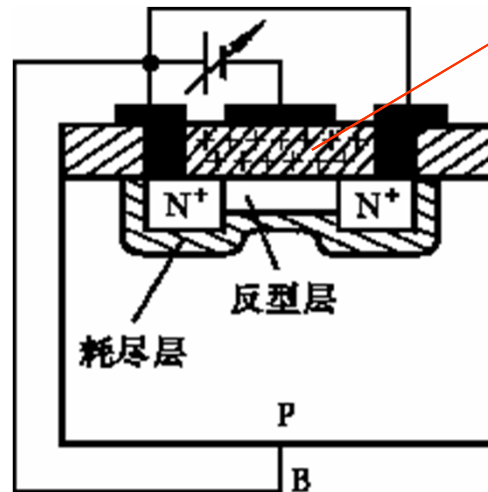
$$i_D \approx 0$$

问题： 已知输出特性，如何画转移特性？
 P沟道MOS管特性曲线在哪个象限？

4、增强型与耗尽型 (enhancement-mode MOSFET and depletion-mode MOSFET)



N沟道增强型



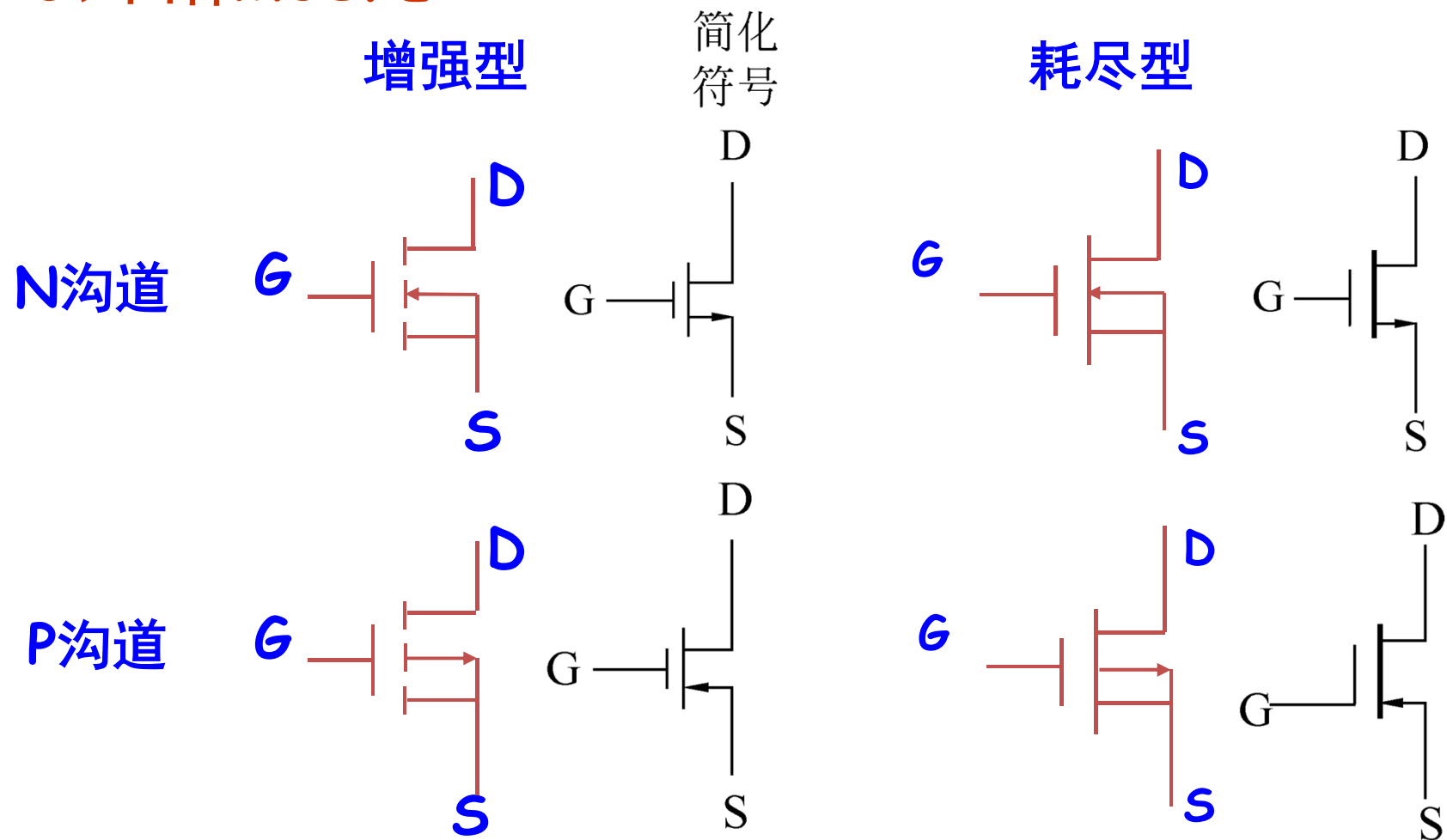
N沟道耗尽型

在 SiO_2 中掺入大量正离子, $U_{\text{GS}}=0$ 时就有导电沟道

增强型: $U_{\text{GS}} > U_{\text{GS(th)}}$ 后形成导电沟道

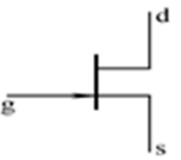
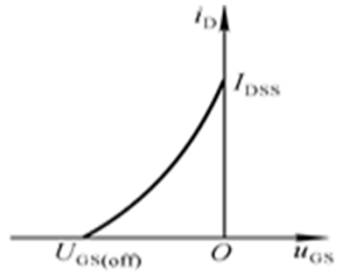
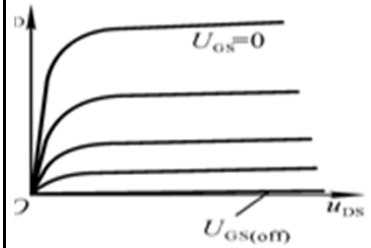
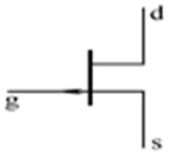
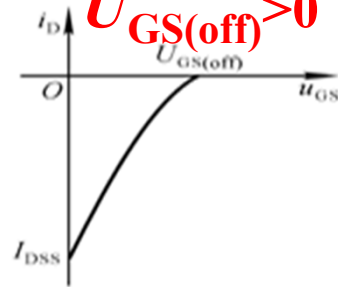
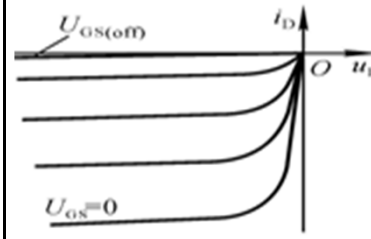
耗尽型: $U_{\text{GS}}=0$ 时就存在导电沟道, 存在夹断电压 $U_{\text{GS(off)}}$

5、四种MOSFET



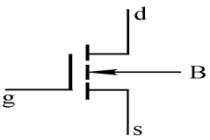
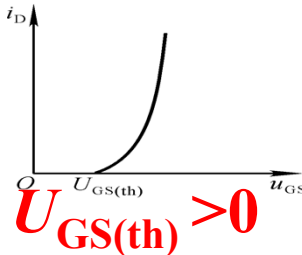
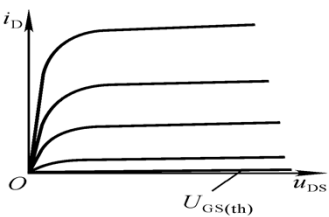
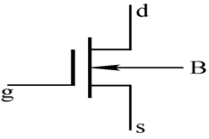
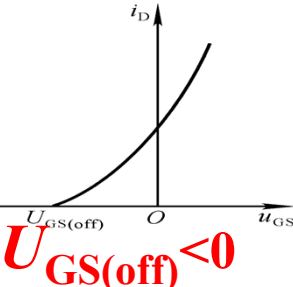
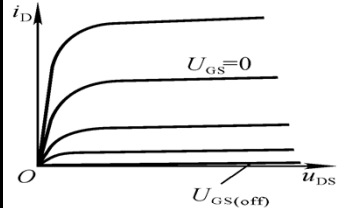
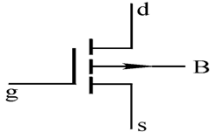
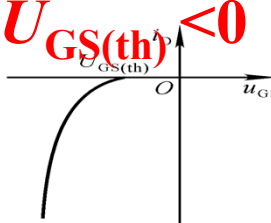
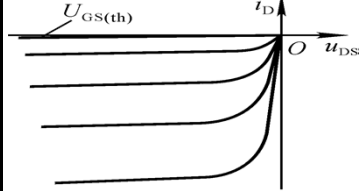
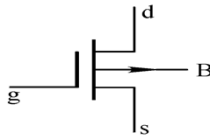
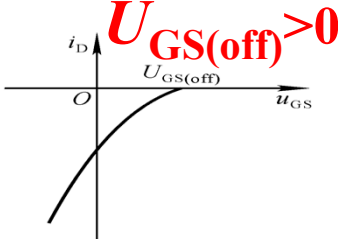
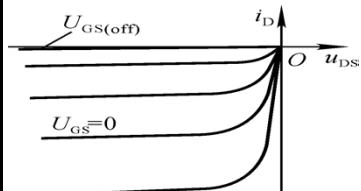
P沟道与N沟道对偶, u_{GS} 、 u_{DS} 、 i_D 极性与N沟道的相反

JFET的符号及特性总结

	符号	恒流区 条件、电流方程	转移特性	输出特性
N沟道 JFET		$u_{GS} < 0 \quad u_{GS(off)} < u_{GS} < 0$ $u_{DS} > 0 \quad u_{DS} > u_{GS} - u_{GS(off)}$ $i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$	 $U_{GS(off)} < 0$	
P沟道 JFET		$u_{GS} > 0 \quad u_{GS(off)} > u_{GS} > 0$ $u_{DS} < 0 \quad u_{DS} < u_{GS} - u_{GS(off)}$ $i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$	 $U_{GS(off)} > 0$	

MOSFET的符号及特性总结

JFET和耗尽型MOS管增加了设计的灵活性！

N沟道增强型		$u_{GS} > 0 \quad u_{GS} > u_{GS(th)} > 0$ $u_{DS} > 0 \quad u_{DS} > u_{GS} - u_{GS(th)}$ $i_D = k_n (u_{GS} - U_{GS(th)})^2$	 $U_{GS(th)} > 0$	
N沟道耗尽型		u_{GS} 设置范围宽 $u_{GS} > u_{GS(off)}$ $u_{DS} > u_{GS} - u_{GS(off)}$ $u_{DS} > 0$ $i_D = k_n (u_{GS} - U_{GS(off)})^2$	 $U_{GS(off)} < 0$	
P沟道增强型		$u_{GS} < 0 \quad u_{GS} < u_{GS(th)} < 0$ $u_{DS} < 0 \quad u_{DS} < u_{GS} - u_{GS(th)}$ $i_D = k_p (-u_{GS} + U_{GS(th)})^2$	 $U_{GS(th)} < 0$	
P沟道耗尽型		u_{GS} 设置范围宽 $u_{GS} < u_{GS(off)}$ $u_{DS} < u_{GS} - u_{GS(off)}$ $u_{DS} < 0$ $i_D = k_p (-u_{GS} + U_{GS(off)})^2$	 $U_{GS(off)} > 0$	

三、场效应管的主要参数（自学P50-51）

1、直流参数

开启电压 $U_{GS(th)}$

夹断电压 $U_{GS(off)}$

饱和漏极电流 I_{DSS}

直流输入电阻 $R_{GS(DC)}$ JFET大于 $10^{11}\Omega$, MOSFET大于 $10^{12}\Omega$

2、交流参数

低频跨导 g_m

极间电容: C_{gs} , C_{ds} , C_{gd}

3、极限参数

最大漏极电流 I_{DM}

击穿电压 $U_{(BR)DS}$

最大耗散功率 P_{DM}

讨论6:

分析放大电路时需要考虑管子是否处于放大状态:

- N沟道JFET工作在放大状态的条件?
- N沟道增强型MOS管工作在放大状态的条件?

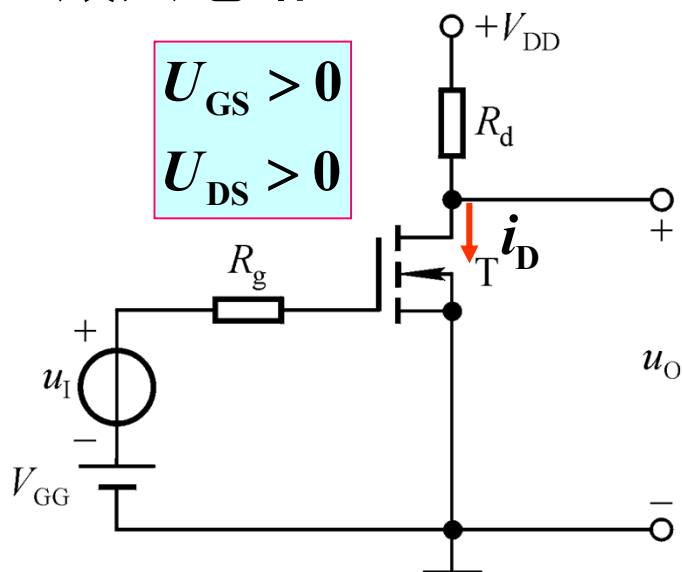
设计放大电路时需要考虑在某种条件下哪些管子能工作在放大状态:

- $U_{GS} > 0$ 时能工作在恒流区的场效应管有哪些?
- $U_{GS} < 0$ 时能工作在恒流区的场效应管有哪些?
- $U_{GS} = 0$ 时能工作在恒流区的场效应管有哪些?

四、场效应管放大电路

1. 静态工作点的设置

➤ 基本共源(Common-source)放大电路



$$\begin{aligned} U_{GS} &> 0 \\ U_{DS} &> 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{GG} &> U_{GS(th)} > 0 \\ U_{DSQ} &> U_{GSQ} - U_{GS(th)} \end{aligned}$$

分析要点:

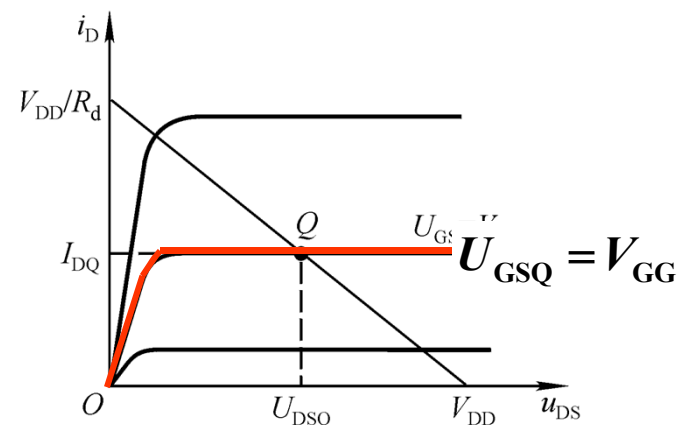
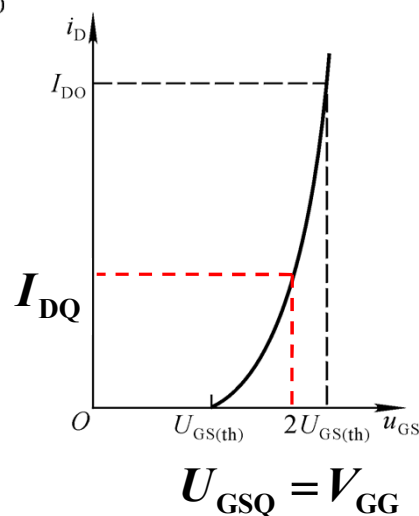
- 场效应管能否工作在恒流区;
- 栅极不取电流;
- 利用电流方程或者特性曲线。

利用电流方程求解

$$U_{GSQ} = V_{GG} \quad I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d$$

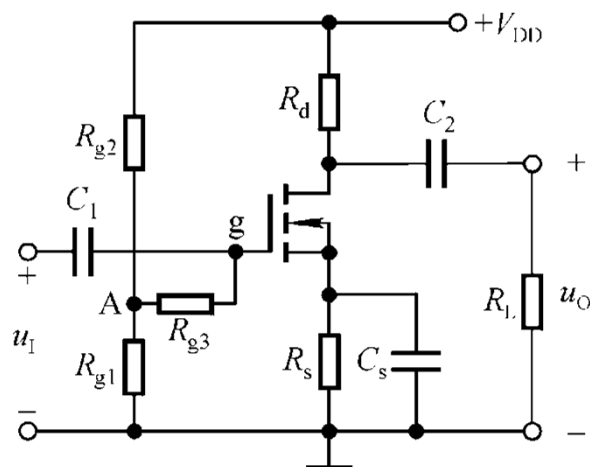
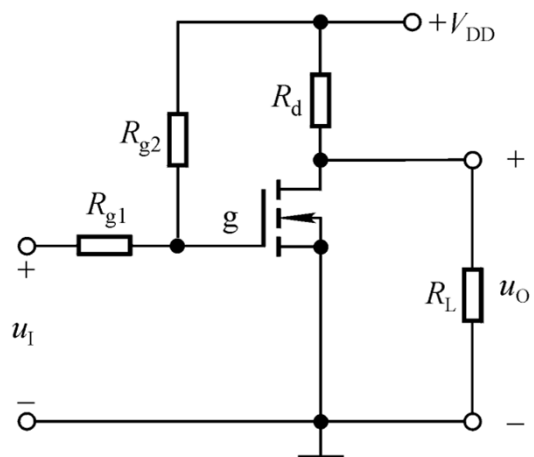
图解法求解



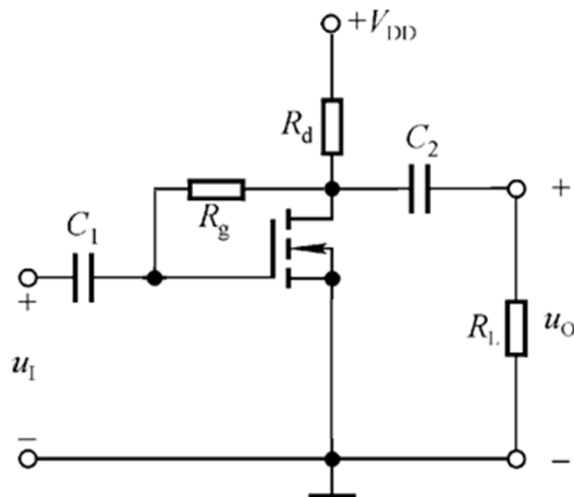
三、场效应管放大电路

1. 静态工作点的设置

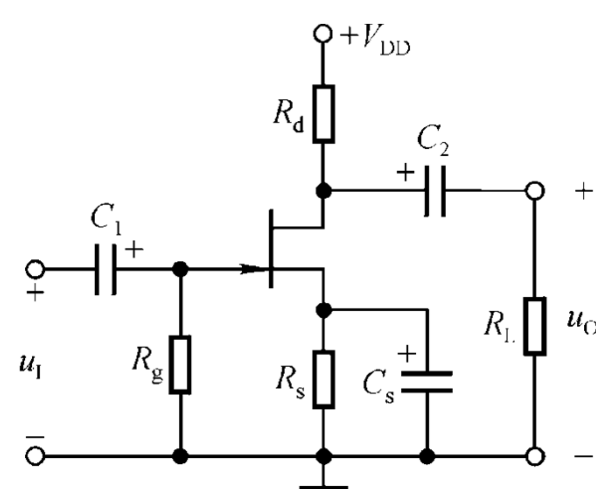
➤ 分压式偏置电路



➤ 反馈式偏置电路



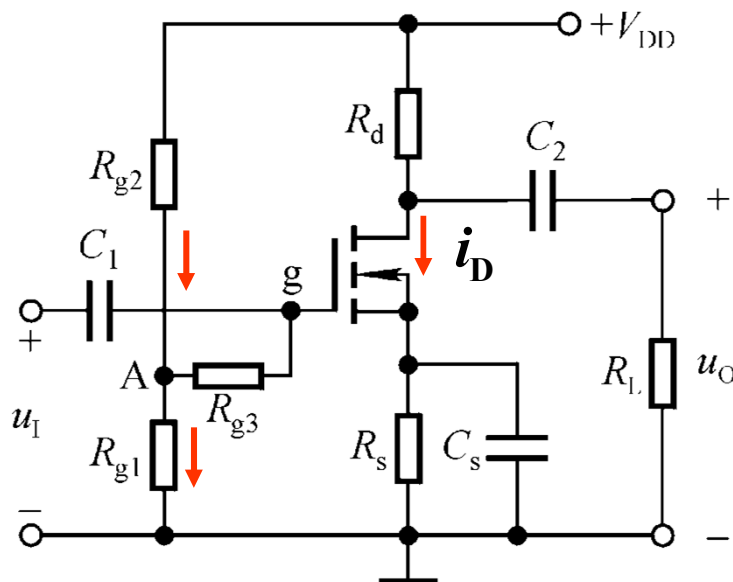
➤ 自给偏压电路



问题：

- 场效应管能否工作在恒流区？
- 分析 Q 点；
- 如何调节电路使场效应管有合适的 Q 点？

➤ 分压式偏置电路



要点： 栅极不取电流

问题： R_{g3} 必须有吗？

$$U_{GQ} = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD}$$

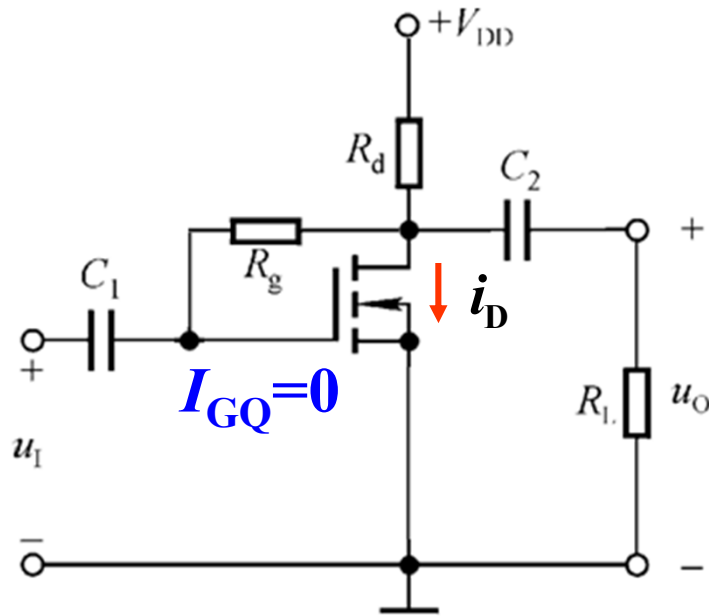
$$U_{GSQ} = U_{GQ} - I_{DQ} R_s$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

- 调节 U_G 和 R_s 保证 $U_{GS} > U_{GS(th)} > 0$
- 调节 R_d 保证 $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS(th)}$

➤ 反馈式偏置电路



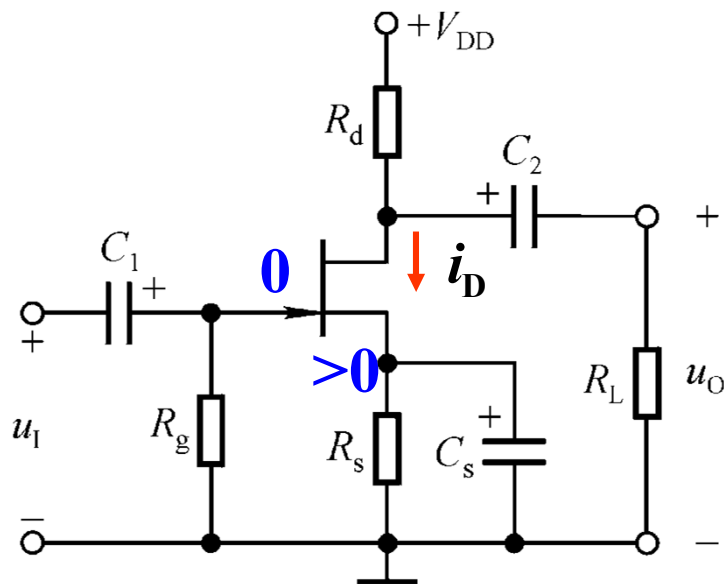
$$U_{GSQ} = U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d$$

$$I_{DQ} = I_{DO} \left(\frac{U_{GSQ}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$U_{GD} = 0 < U_{GS(th)}$$

调节 R_d 保证 $U_{GS} > U_{GS(th)} > 0$

➤ 自给偏压共源放大电路 适合JFET或者耗尽型MOS管



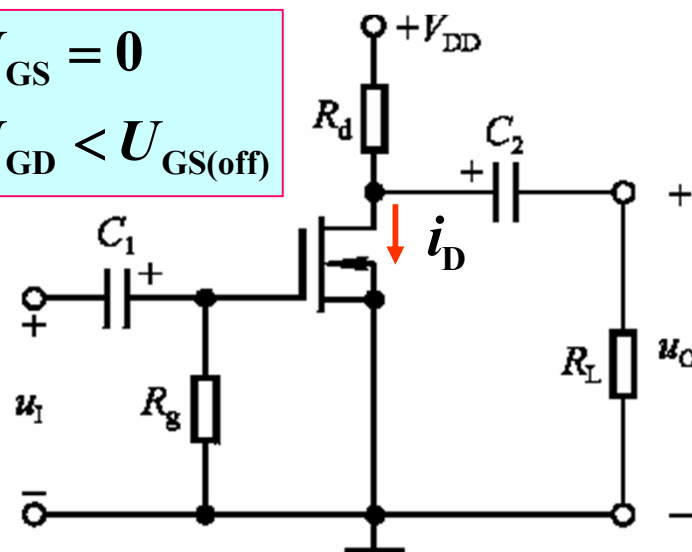
$$U_{GSQ} = -I_{DQ}R_s$$

$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ}(R_d + R_s)$$

$$U_{GS} = 0$$

$$U_{GD} < U_{GS(off)}$$

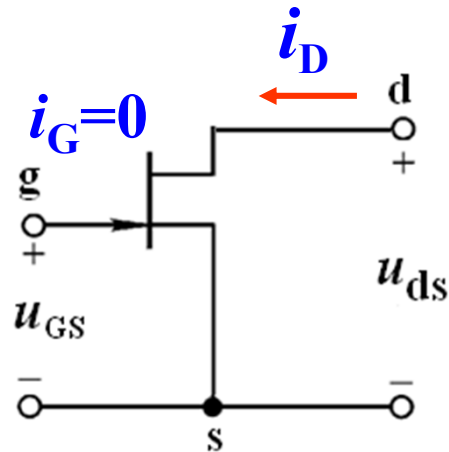


- 调节 R_s 保证 $U_{GS(off)} < U_{GS} < 0$

- 调节 R_d 保证 $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS(off)}$

2. 场效应管放大电路的动态分析

➤ JFET中、低频小信号等效模型



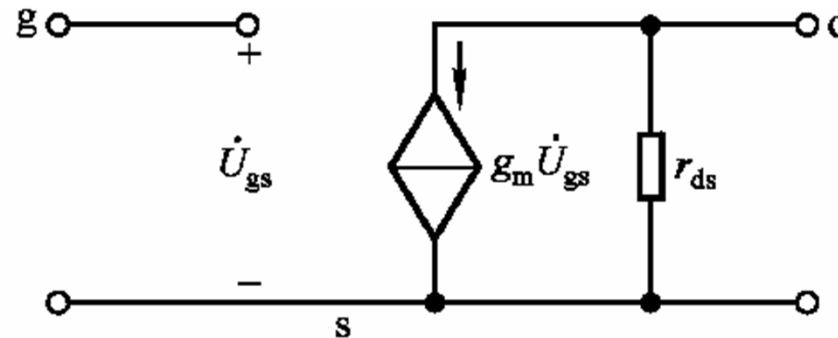
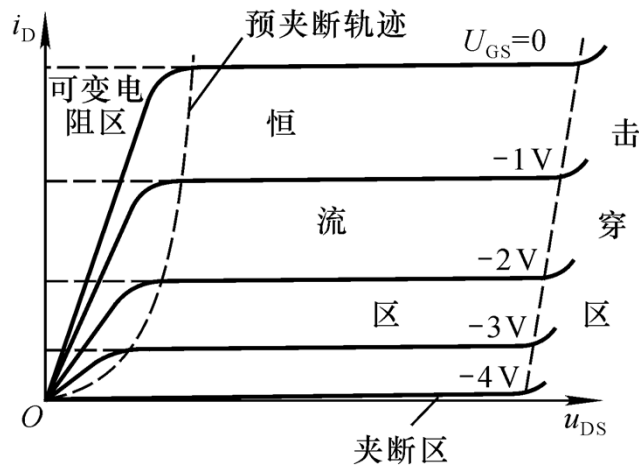
$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS})$$

低频跨
导 g_m

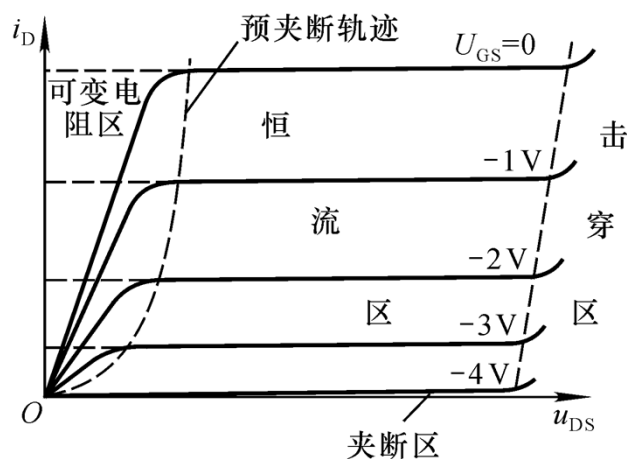
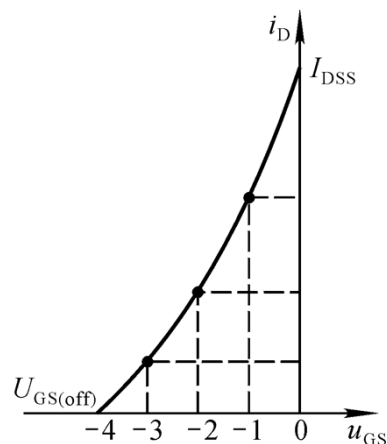
漏源电
导 $1/r_{ds}$

$$di_D = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}} \times du_{GS} + \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{u_{GS}} \times du_{DS}$$

$$\dot{i}_d = g_m \dot{U}_{gs} + \frac{1}{r_{ds}} \dot{U}_{ds}$$



➤ 参数 g_m 和 r_{ds} 的推导



$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

输出电阻

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} \right|_{u_{DS}} = \frac{2}{-U_{GS(off)}} \sqrt{I_{DSS} I_{DQ}}$$

$$r_{ds} = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_{u_{GS}} \approx \frac{|V_A|}{I_{DQ}} = \frac{1}{\lambda I_{DQ}}$$

问题：MOSFET模型？

$$i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$$

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{DO} I_{DQ}}$$