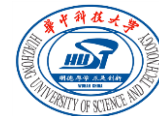
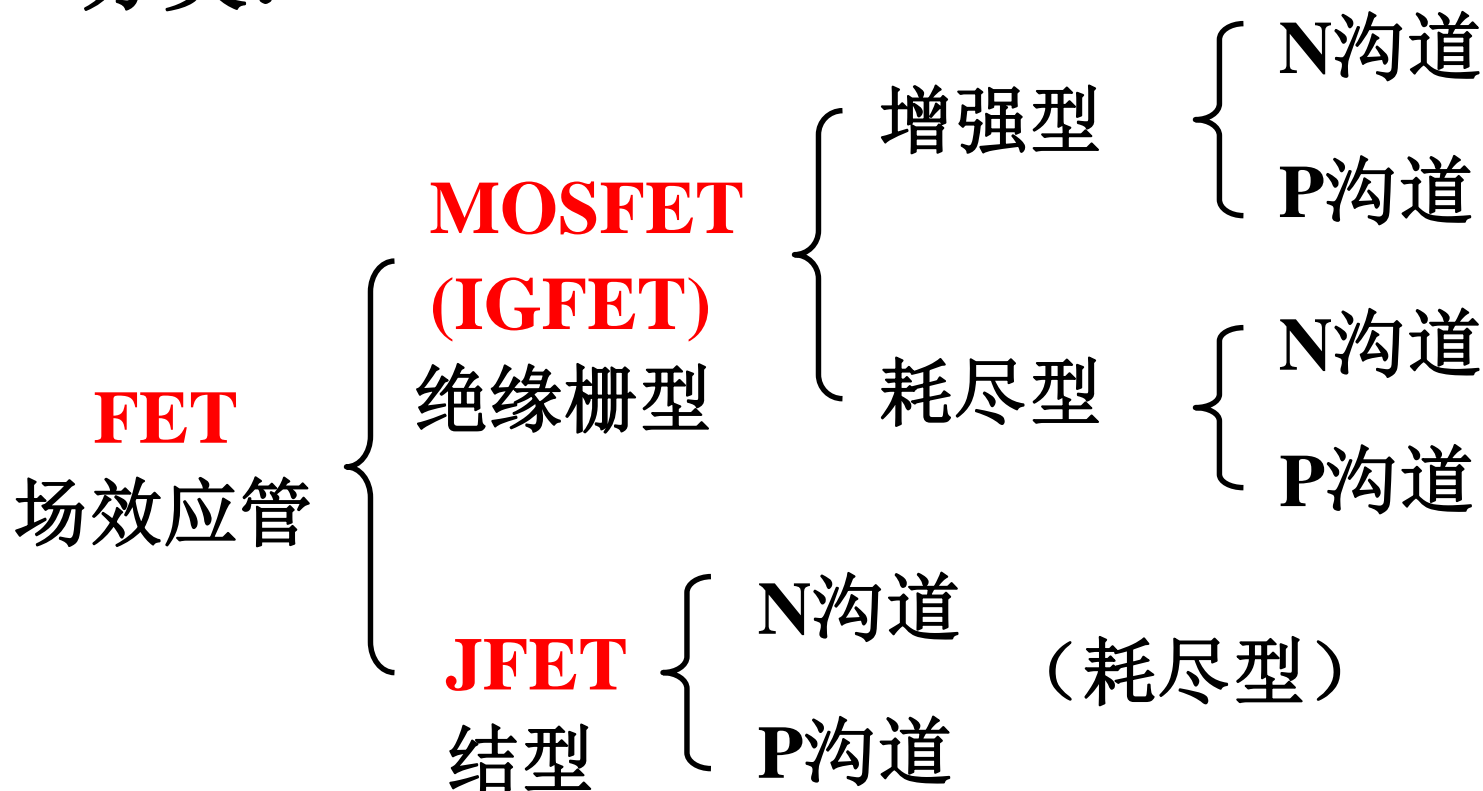


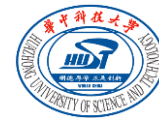
# 4 场效应三极管及其放大电路



分类:



# 4 场效应三极管及其放大电路



- 4.1 金属-氧化物-半导体 (MOS) 场效应三极管
- 4.2 MOSFET基本共源极放大电路
- 4.3 图解分析法
- 4.4 小信号模型分析法
- 4.5 共漏极和共栅极放大电路
- 4.7 组合放大电路
- 4.9 各种FET的特性及使用注意事项

# 4.1 金属-氧化物-半导体 (MOS) 场效应三极管

## 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

## 4.1.2 N沟道耗尽型MOSFET

## 4.1.3 P沟道MOSFET

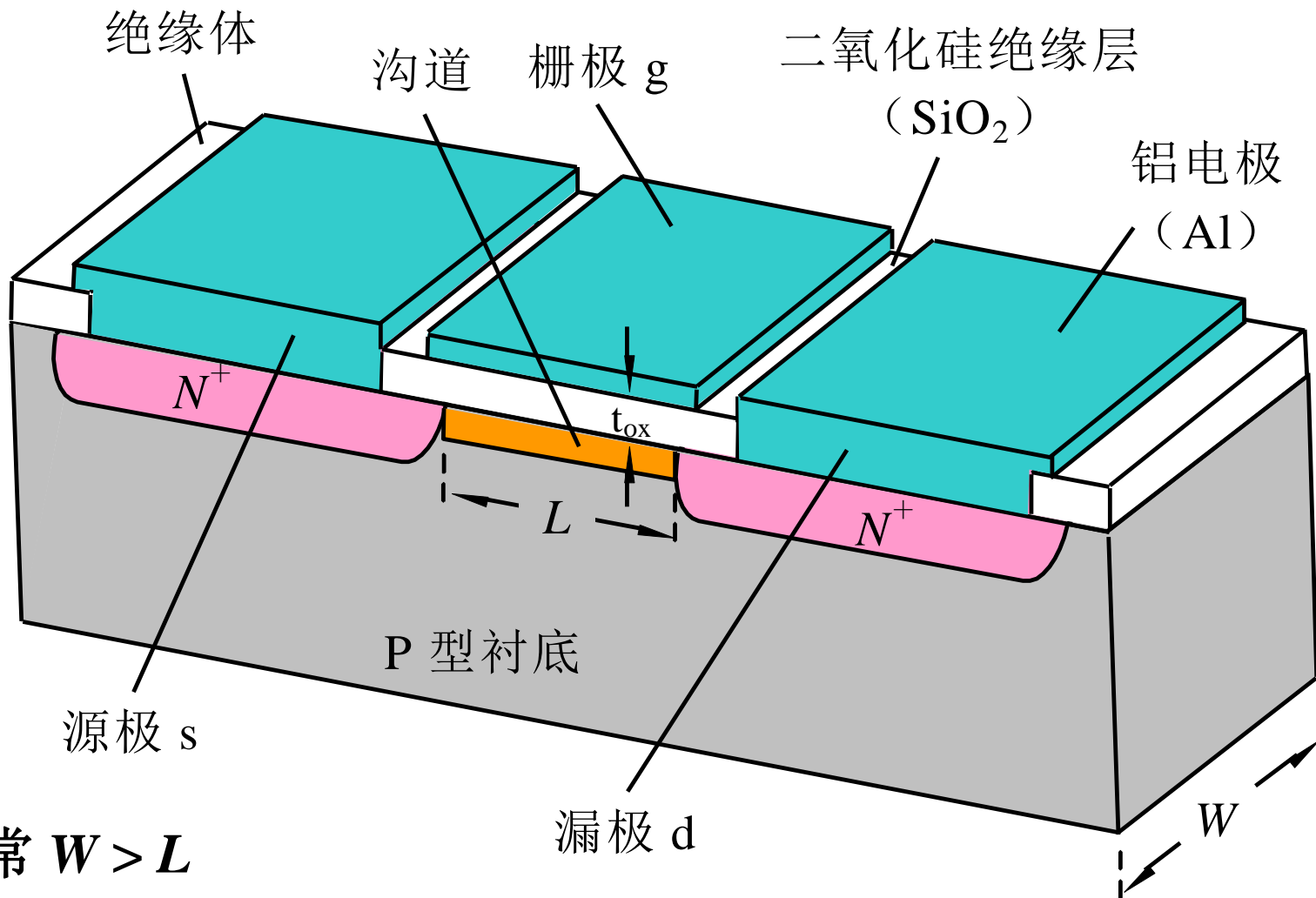
## 4.1.4 沟道长度调制等几种效应

## 4.1.5 MOSFET的主要参数

# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

## 1. 结构及电路符号

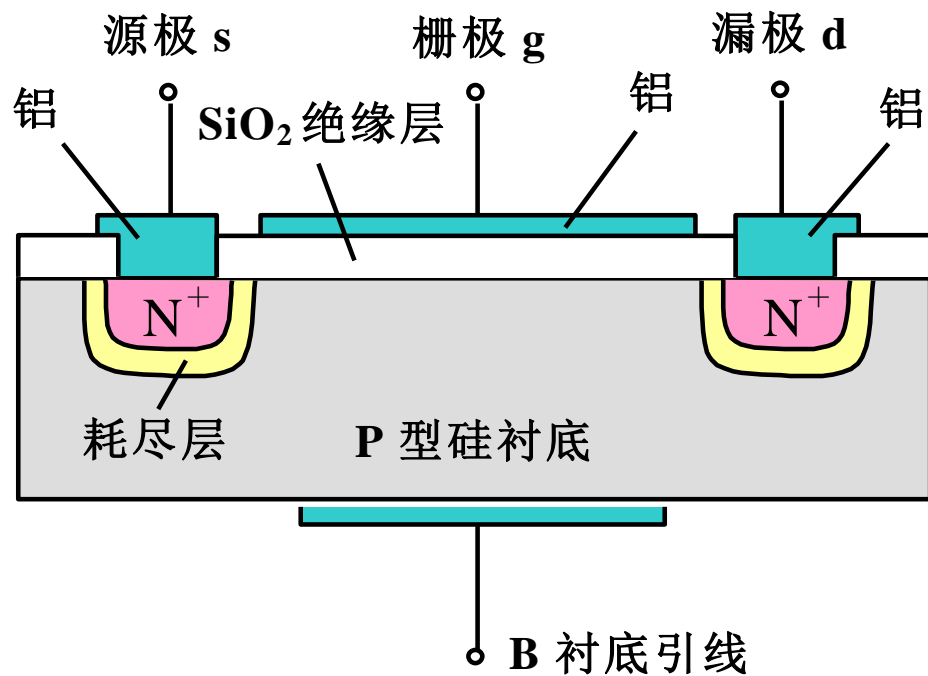
$L$ : 沟道长度     $W$ : 沟道宽度     $t_{ox}$ : 绝缘层厚度



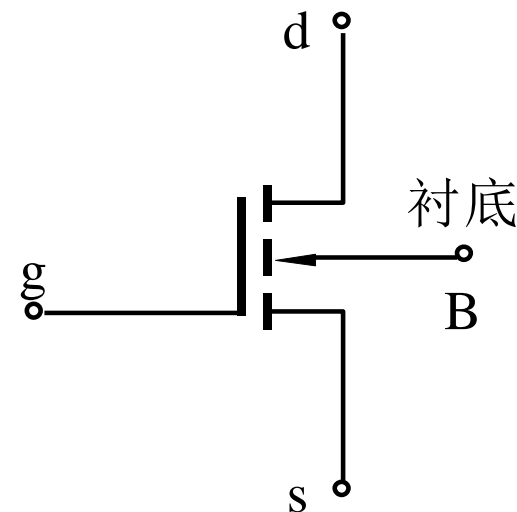
通常  $W > L$

# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

## 1. 结构及电路符号

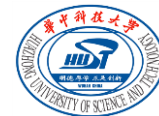


剖面图



符号

# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

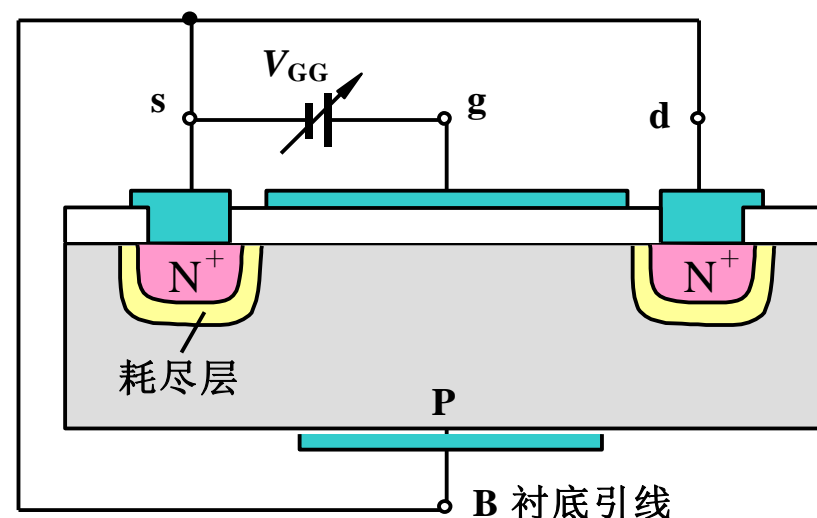


## 2. 工作原理

### (1) $V_{GS}$ 对沟道的控制作用

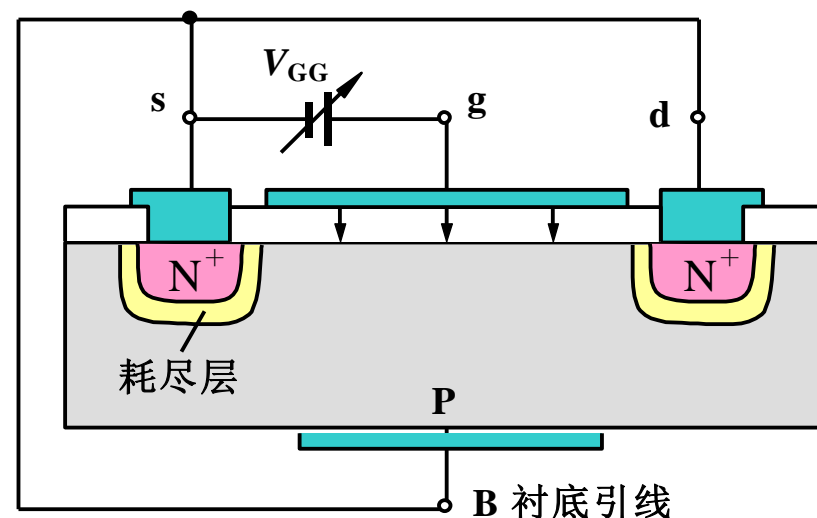
当  $V_{GS} \leq 0$  时

无导电沟道，d、s间加电压时，也无电流产生。



当  $0 < V_{GS} < V_{TN}$  时

产生电场，但未形成导电沟道（反型层），d、s间加电压后，没有电流产生。



# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET



## 2. 工作原理

### (1) $V_{GS}$ 对沟道的控制作用

当  $V_{GS} > V_{TN}$  时

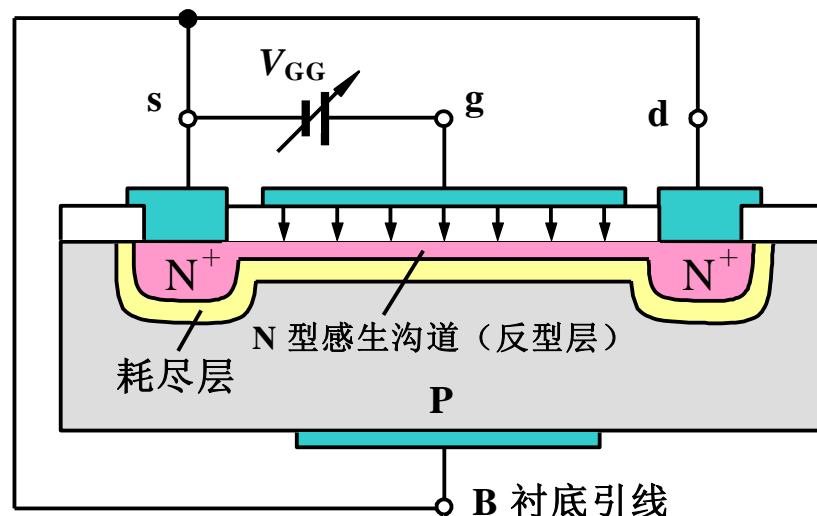
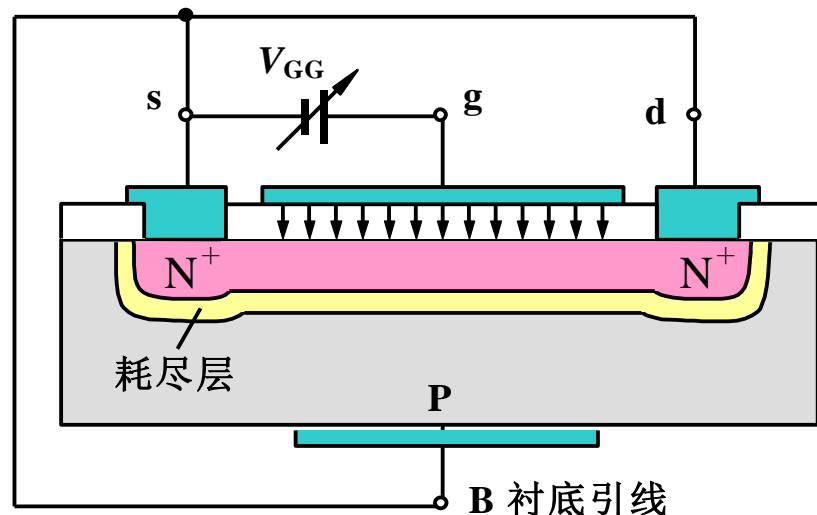
在电场作用下产生导电沟道，d、s间加电压后，将有电流产生。

$V_{GS}$ 越大，导电沟道越厚

$V_{TN}$  称为N沟道增强型

MOSFET开启电压

必须依靠栅极外加电压才能产生反型层的MOSFET称为增强型器件



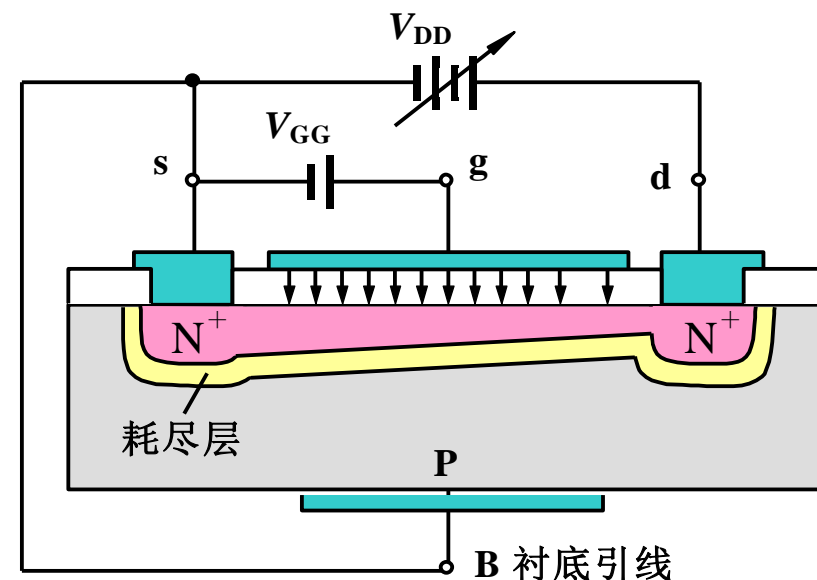
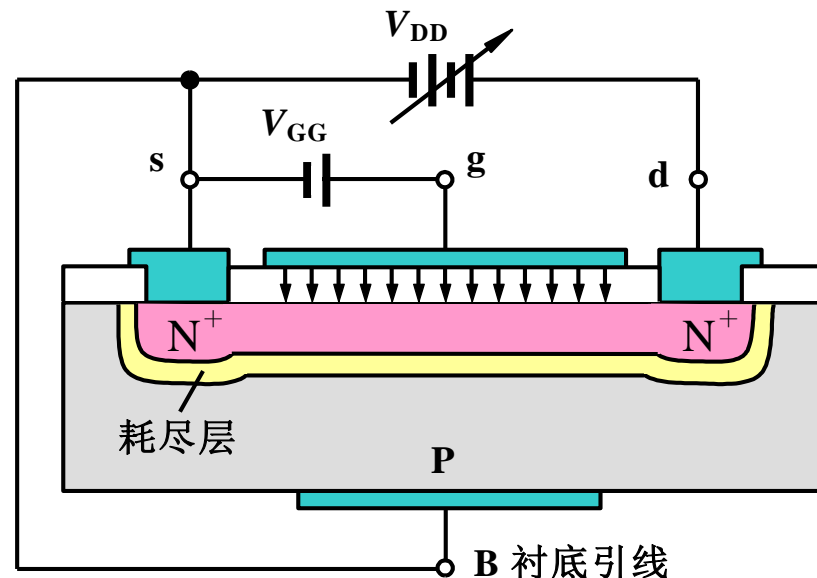
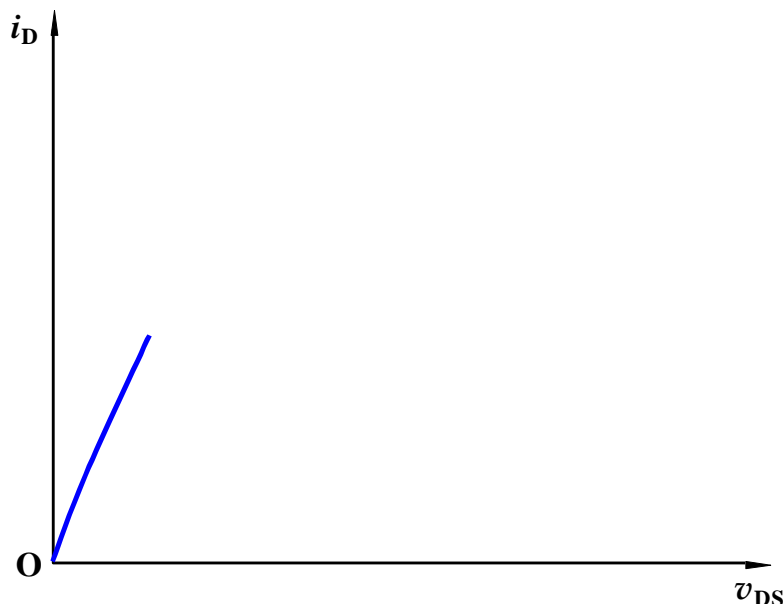
# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET



## 2. 工作原理

### (2) $V_{DS}$ 对沟道的控制作用

当  $V_{GS}$  一定 ( $V_{GS} > V_{TN}$ ) 时,  
 $V_{DS} \uparrow \rightarrow I_D \uparrow \rightarrow$  沟道电位梯度  $\uparrow$   
 $\rightarrow$  靠近漏极d处的电位升高  
 $\rightarrow$  电场强度减小  $\rightarrow$  沟道变薄



整个沟道呈楔形分布



# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET



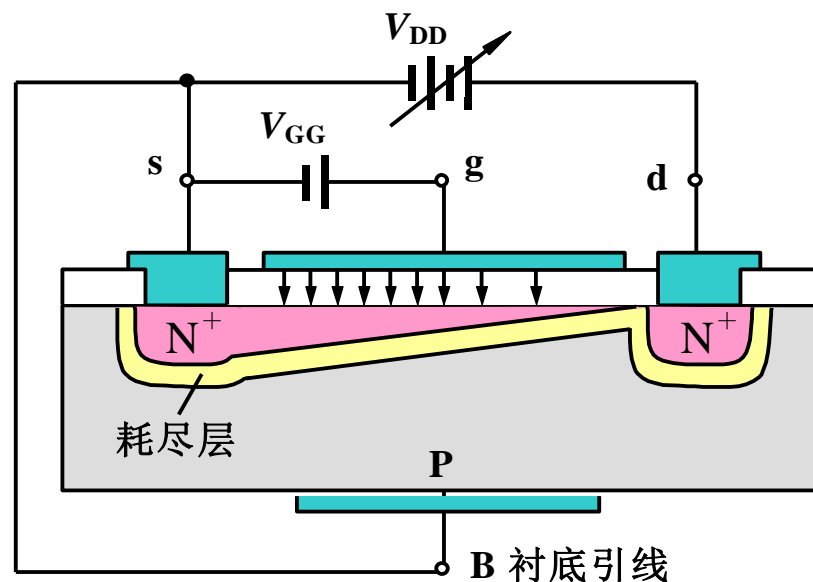
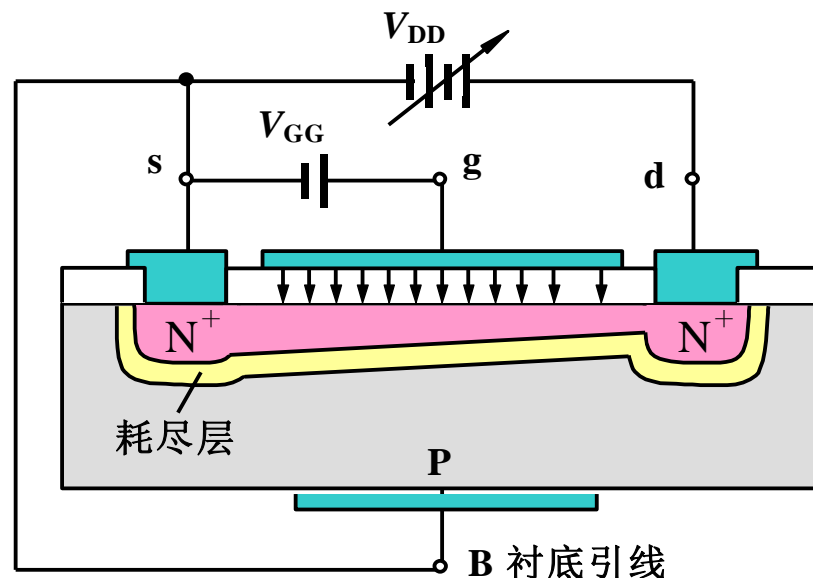
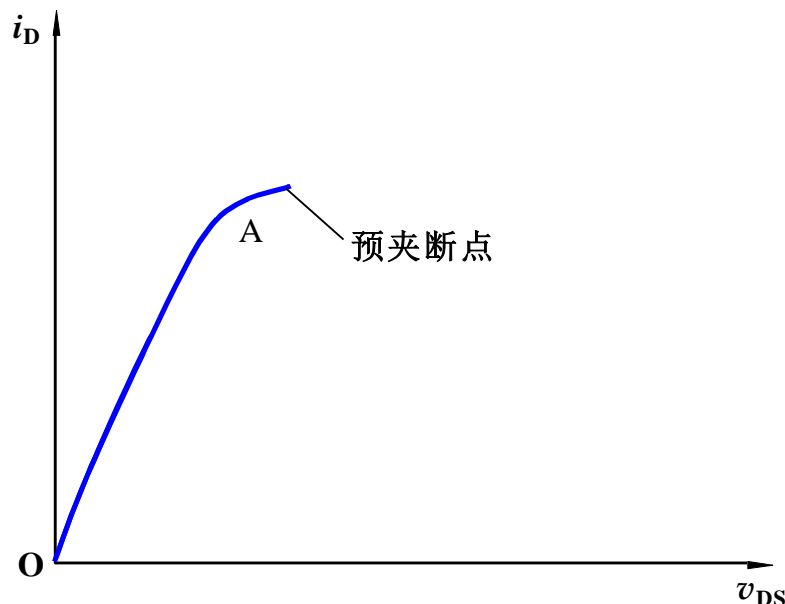
## 2. 工作原理

### (2) $V_{DS}$ 对沟道的控制作用

当 $V_{GS}$ 一定 ( $V_{GS} > V_{TN}$ ) 时,

$V_{DS} \uparrow \rightarrow I_D \uparrow \rightarrow$ 沟道电位梯度 $\uparrow$

当 $V_{DS}$ 增加到使 $V_{GD} = V_{TN}$  时,  
在紧靠漏极处出现预夹断。



在预夹断处:  $V_{GD} = V_{GS} - V_{DS} = V_{TN}$

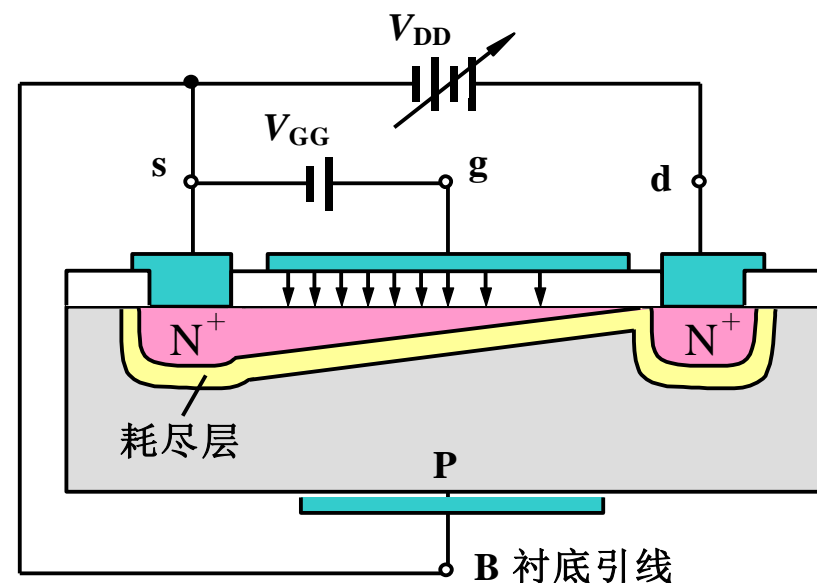
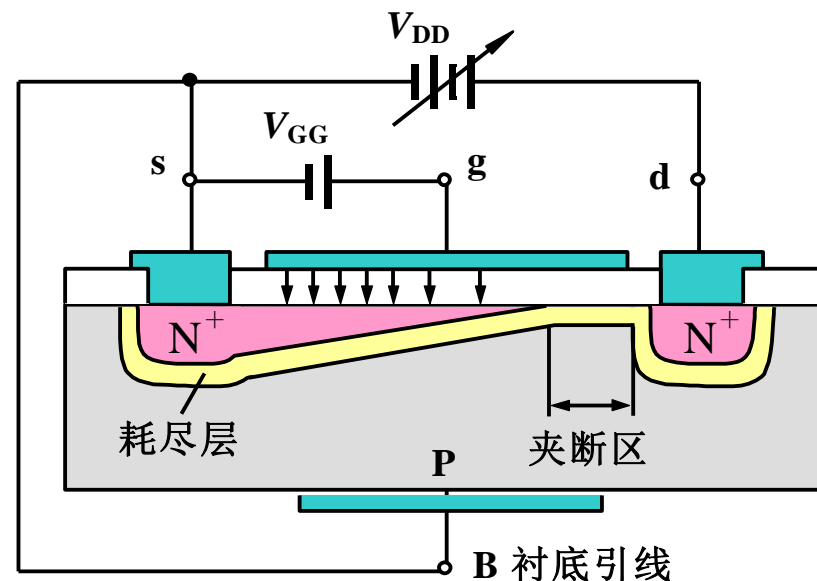
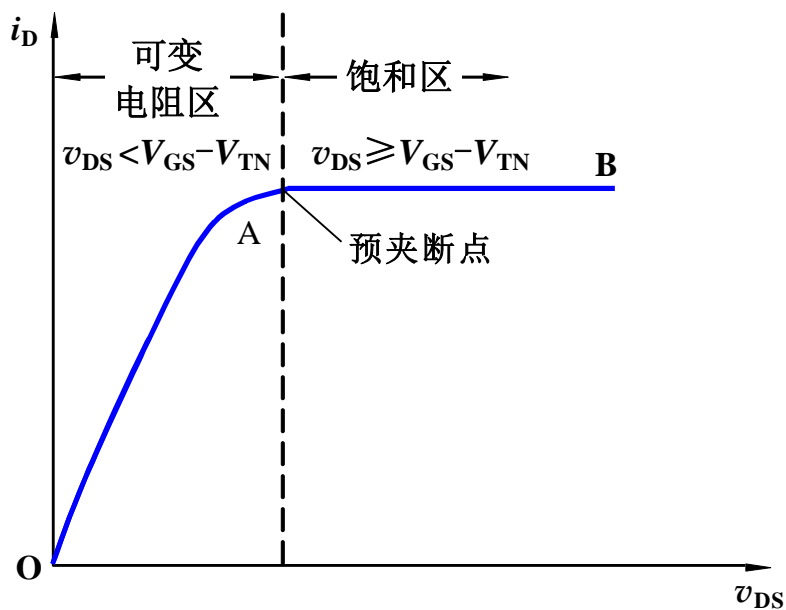
# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET



## 2. 工作原理

### (2) $V_{DS}$ 对沟道的控制作用

预夹断后,  $V_{DS} \uparrow \rightarrow$  夹断区延长  
 $\rightarrow$  沟道电阻  $\uparrow \rightarrow I_D$  基本不变



# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

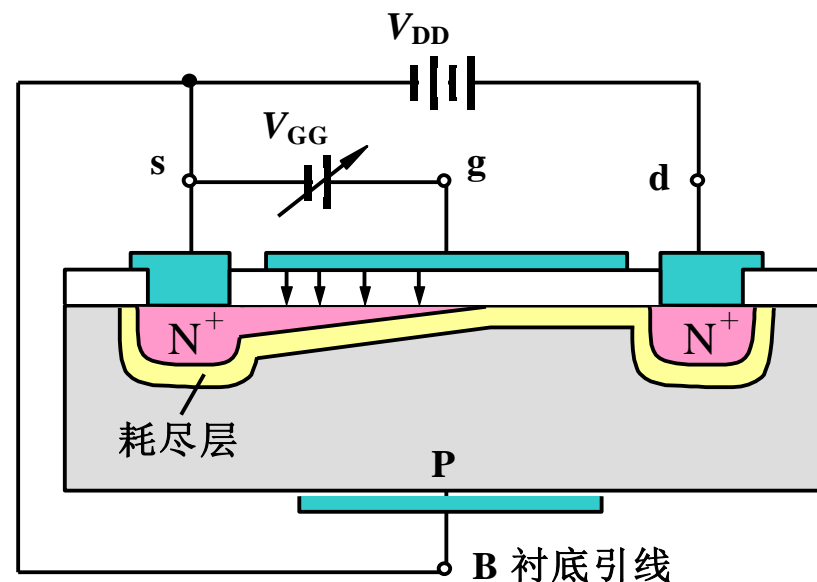
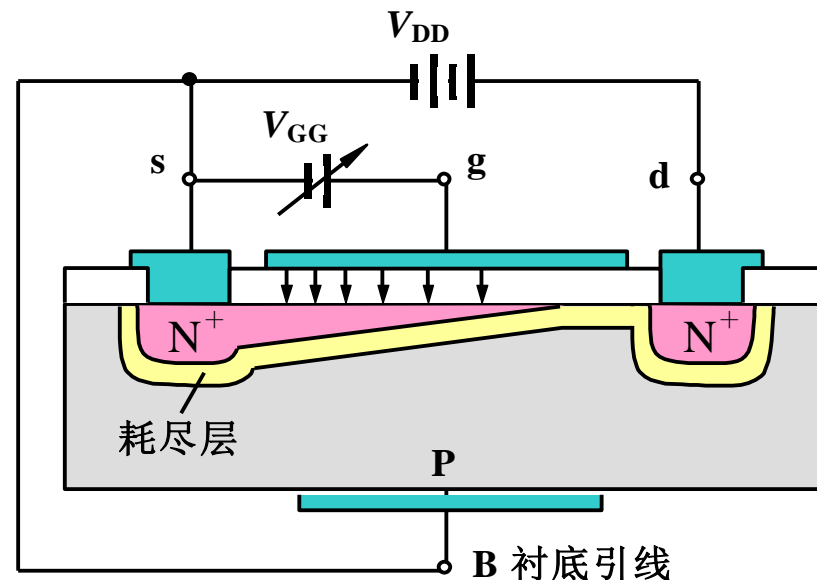
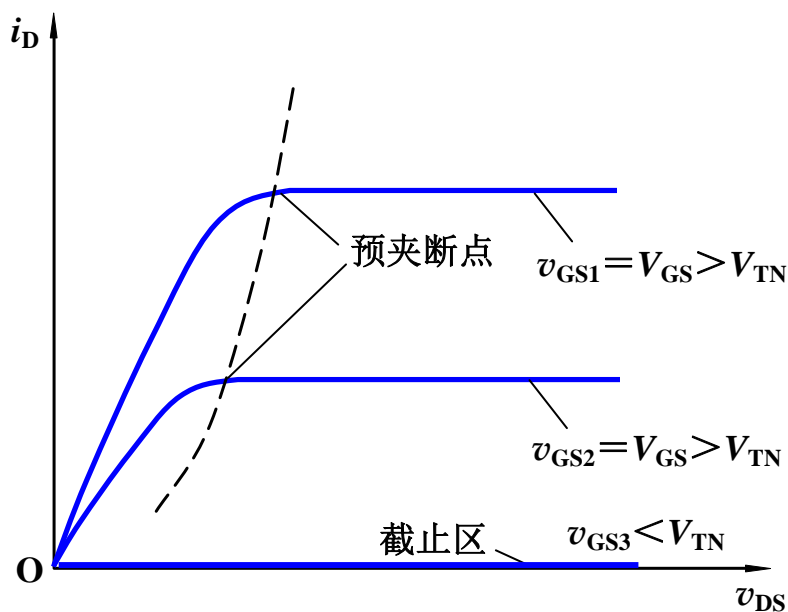


## 2. 工作原理

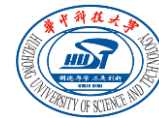
### (3) $V_{DS}$ 和 $V_{GS}$ 同时作用时

$V_{DS}$ 一定,  $V_{GS}$ 变化时

给定一个 $v_{GS}$ , 就有一条不同的  $i_D - v_{DS}$  曲线。

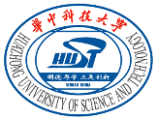


# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

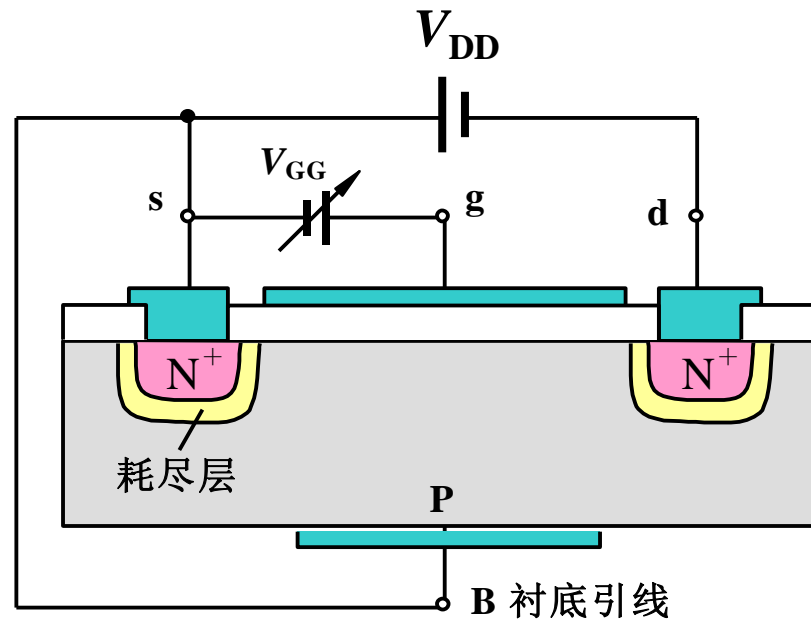


- 沟道中只有一种类型的载流子参与导电，所以场效应管也称为单极型三极管。
- MOSFET的栅极是绝缘的，所以 $i_G \approx 0$ ，输入电阻很高。
- MOSFET是电压控制电流器件（VCCS）， $i_D$ 受 $v_{GS}$ 控制。
- 只有当 $v_{GS} > V_{TN}$ 时，增强型MOSFET的d、s间才能导通。
- 预夹断前 $i_D$ 与 $v_{DS}$ 呈近似线性关系；预夹断后， $i_D$ 趋于饱和。

# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET



$V_{DS}$  极性接反会怎样?



# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

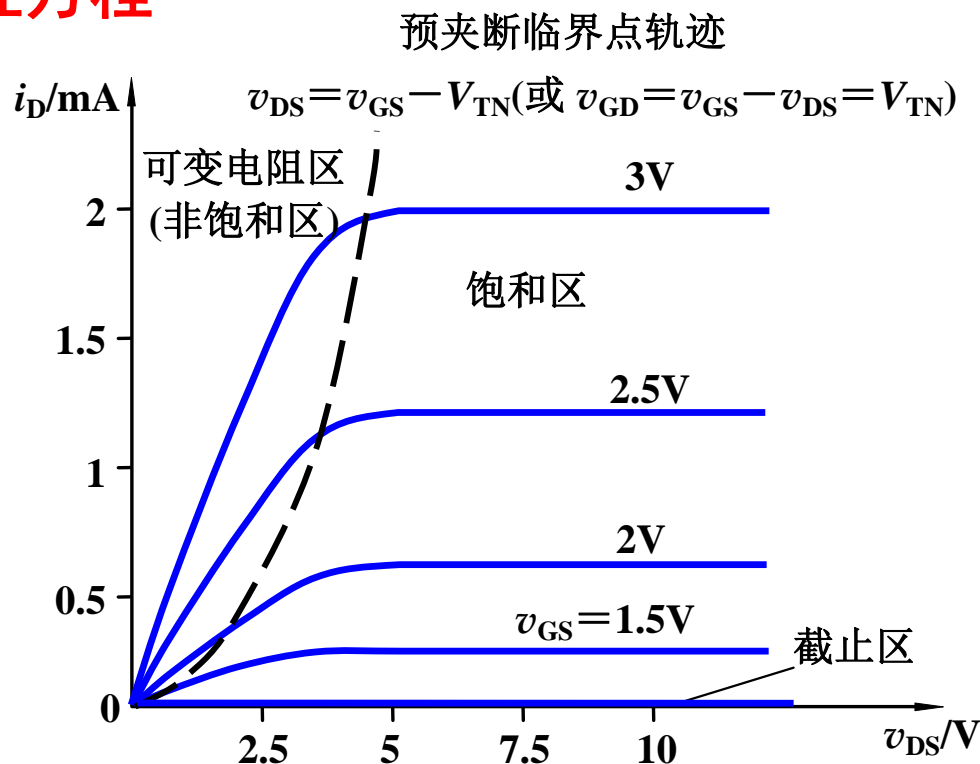
## 3. $I$ - $V$ 特性曲线及特性方程

### (1) 输出特性及大信号特性方程

$$i_D = f(v_{DS}) \Big|_{v_{GS} = \text{const.}}$$

#### ① 截止区

当  $v_{GS} < V_{TN}$  时，导电沟道尚未形成， $i_D = 0$ ，为截止工作状态。



# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

## 3. $I$ - $V$ 特性曲线及特性方程

### (1) 输出特性及大信号特性方程

$$i_D = f(v_{DS}) \Big|_{v_{GS} = \text{const.}}$$

#### ② 可变电阻区

$$v_{DS} < (v_{GS} - V_{TN})$$

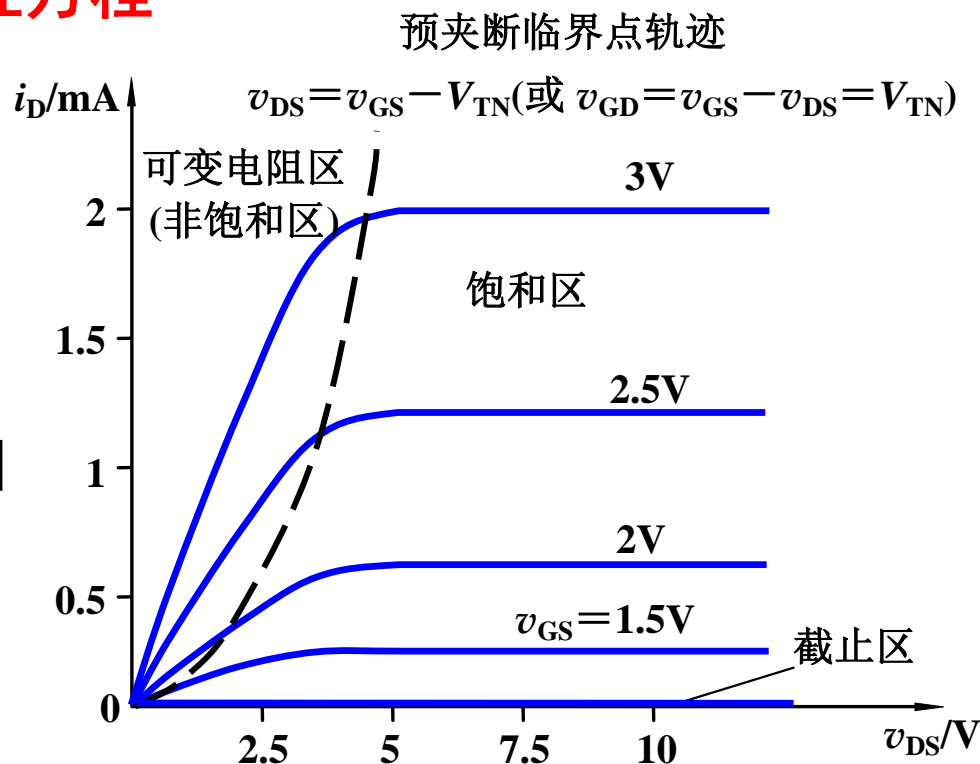
$$i_D = K_n [2(v_{GS} - V_{TN})v_{DS} - v_{DS}^2]$$

由于 $v_{DS}$ 较小, 可近似为

$$i_D \approx 2K_n (v_{GS} - V_{TN}) v_{DS}$$

$$r_{ds0} = \left. \frac{dv_{DS}}{di_D} \right|_{v_{GS} = \text{常数}} = \frac{1}{2K_n (v_{GS} - V_{TN})}$$

$r_{ds0}$  是一个受 $v_{GS}$ 控制的可变电阻



# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

## 3. $I$ - $V$ 特性曲线及特性方程

### (1) 输出特性及大信号特性方程

#### ② 可变电阻区

$$i_D \approx 2K_n (v_{GS} - V_{TN}) v_{DS}$$

$$r_{dso} = \frac{1}{2K_n (v_{GS} - V_{TN})}$$

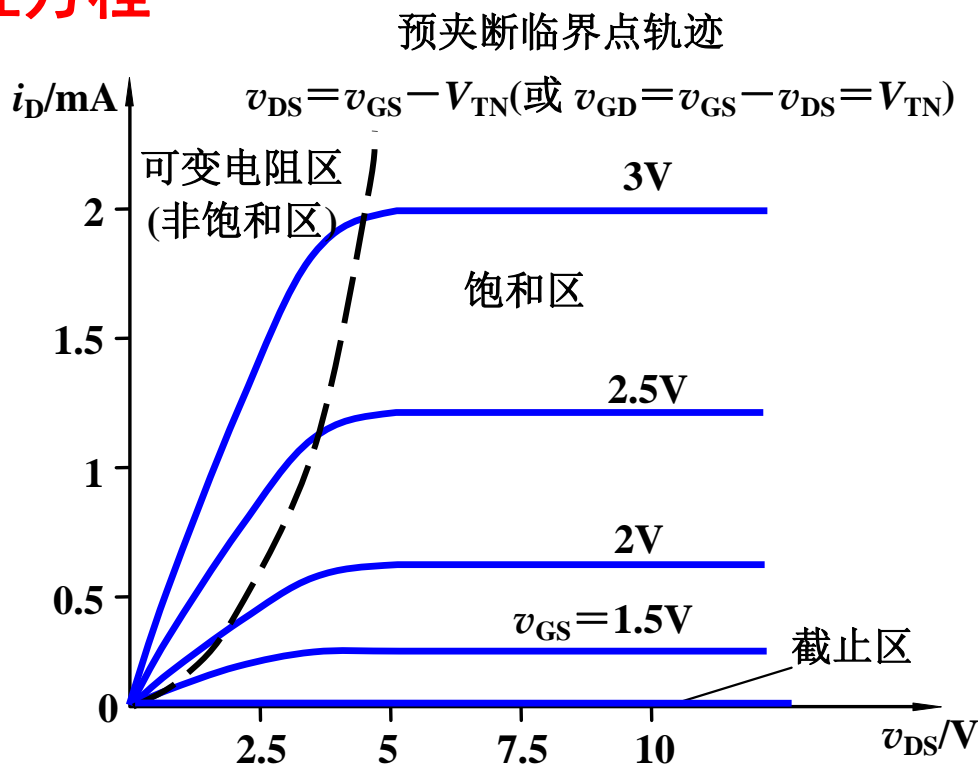
其中

$$K_n = \frac{K'_n}{2} \cdot \frac{W}{L} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \left( \frac{W}{L} \right)$$

$\mu_n$ : 反型层中电子迁移率

$C_{ox}$ : 栅极 (与衬底间)

氧化层单位面积电容



$K'_n = \mu_n C_{ox}$  本征电导因子

$K_n$  为电导常数, 单位:  $\text{mA/V}^2$



# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

## 3. $I$ - $V$ 特性曲线及特性方程

### (1) 输出特性及大信号特性方程

#### ③ 饱和区

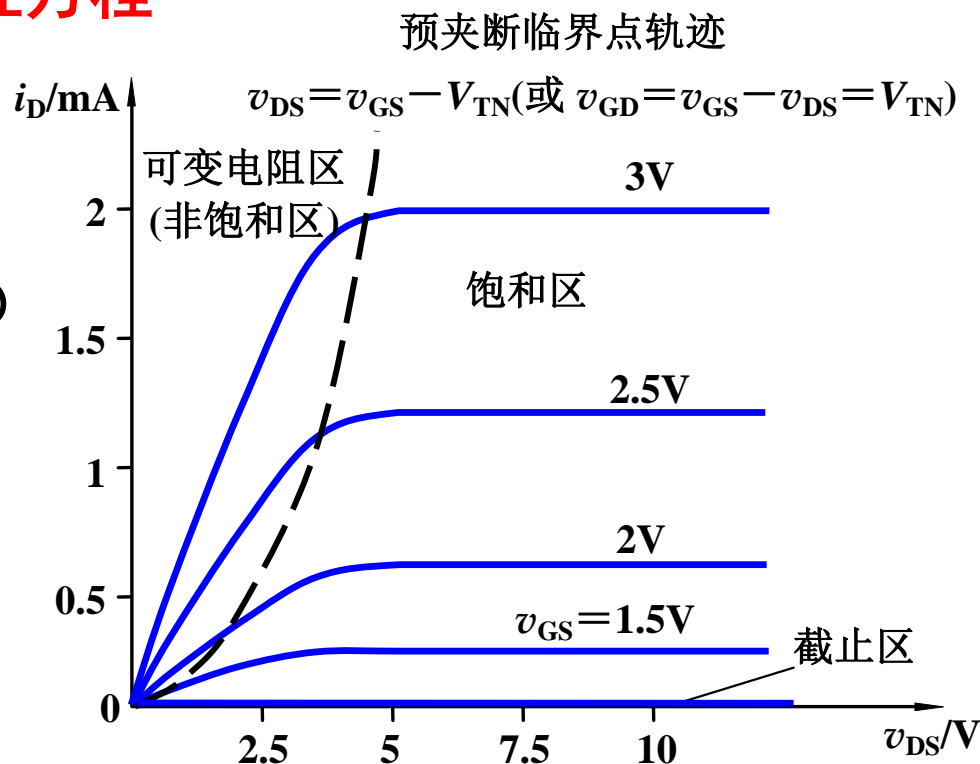
(又称恒流区或放大区)

$v_{GS} > V_{TN}$  , 且  $v_{DS} \geq (v_{GS} - V_{TN})$

$I$ - $V$  特性:

$$\begin{aligned} i_D &= K_n (v_{GS} - V_{TN})^2 \\ &= K_n V_{TN}^2 \left( \frac{v_{GS}}{V_{TN}} - 1 \right)^2 \\ &= I_{DO} \left( \frac{v_{GS}}{V_{TN}} - 1 \right)^2 \end{aligned}$$

$I_{DO} = K_n V_{TN}^2$  是  $v_{GS} = 2V_{TN}$  时的  $i_D$



必须让FET工作在饱和区  
(放大区) 才有放大作用。

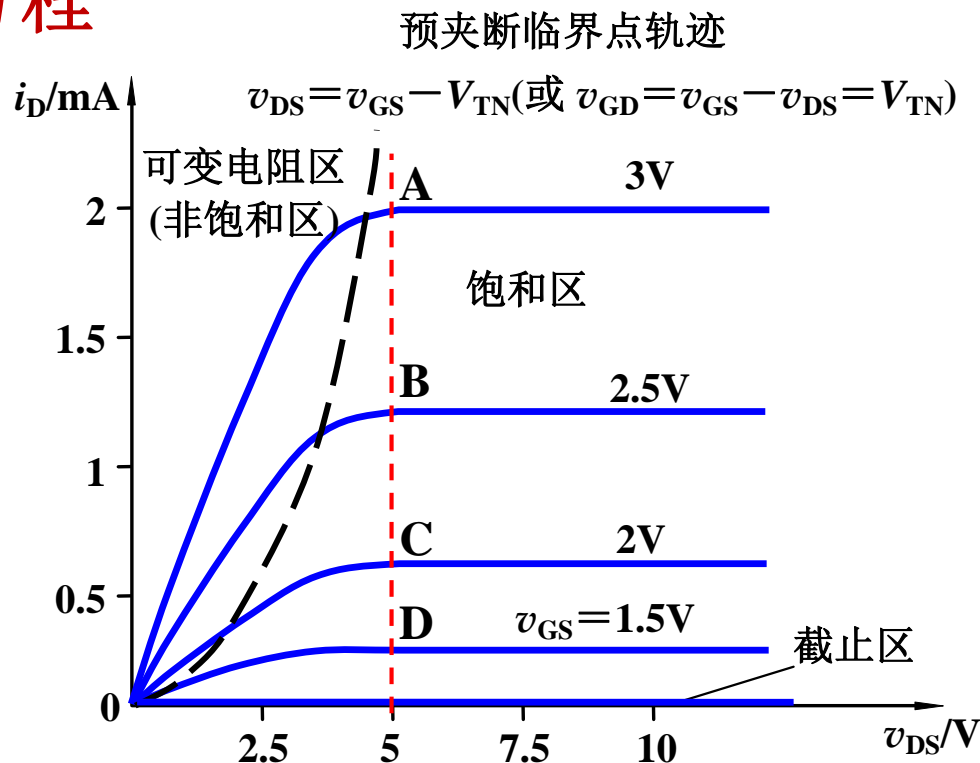
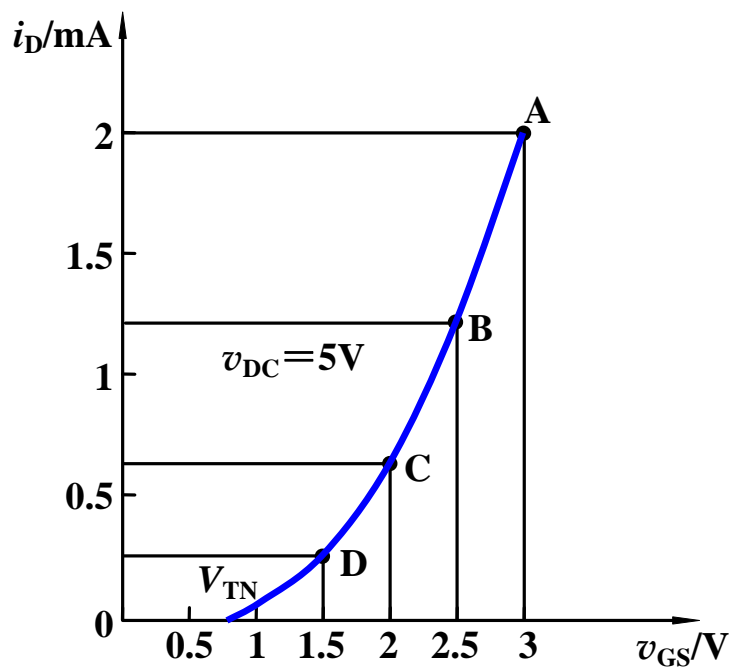
# 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

## 3. $I$ - $V$ 特性曲线及特性方程

### (2) 转移特性

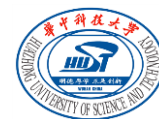
$$i_D = f(v_{GS}) \Big|_{v_{DS} = \text{const.}}$$

$$i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$$



在饱和区,  $i_D$  受  $v_{GS}$  控制

# 4.1 MOS场效应三极管



## 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

## 4.1.2 N沟道耗尽型MOSFET

## 4.1.3 P沟道MOSFET

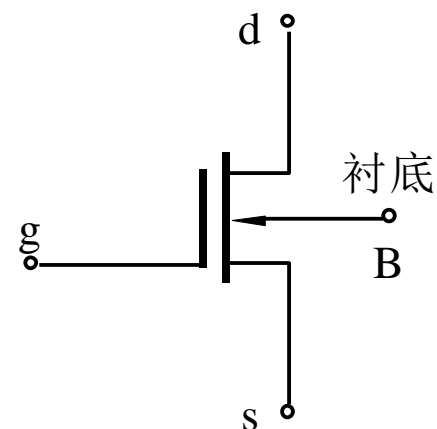
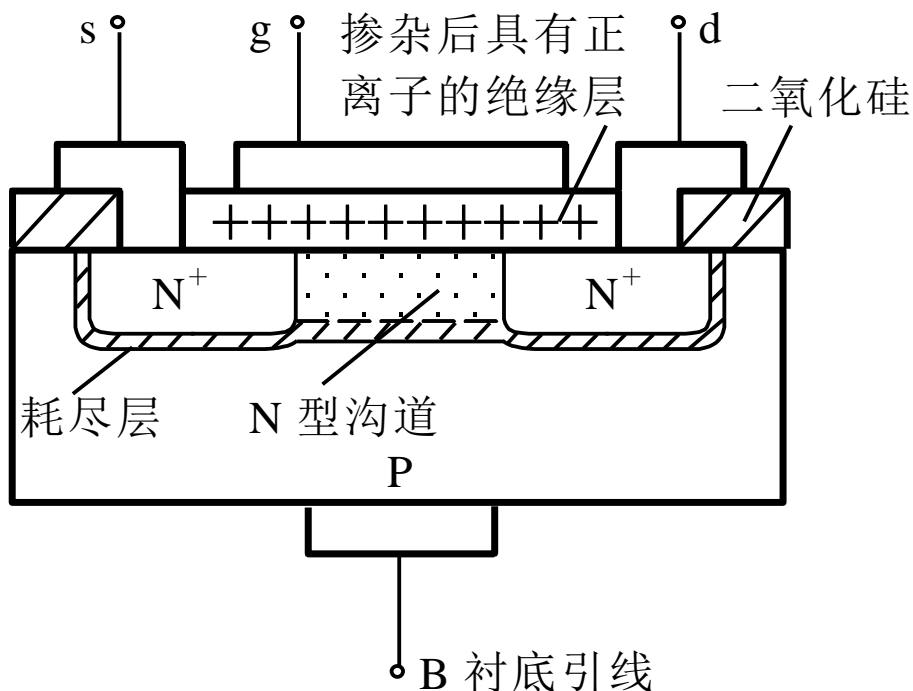
## 4.1.4 沟道长度调制等几种效应

## 4.1.5 MOSFET的主要参数

# 4.1.2 N沟道耗尽型MOSFET

## 1. 结构和工作原理简述

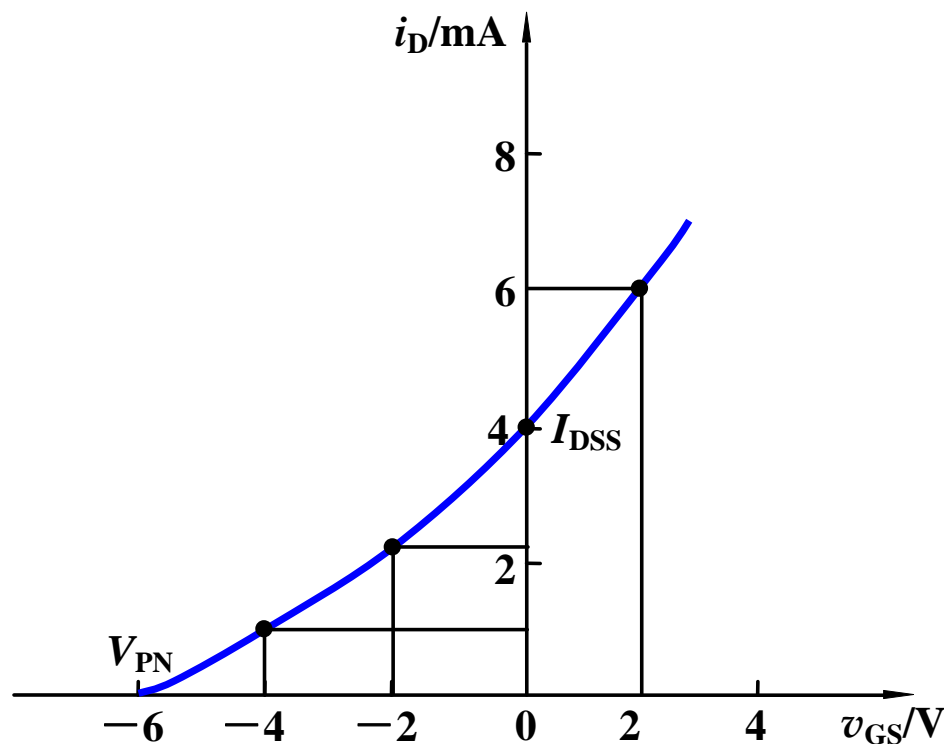
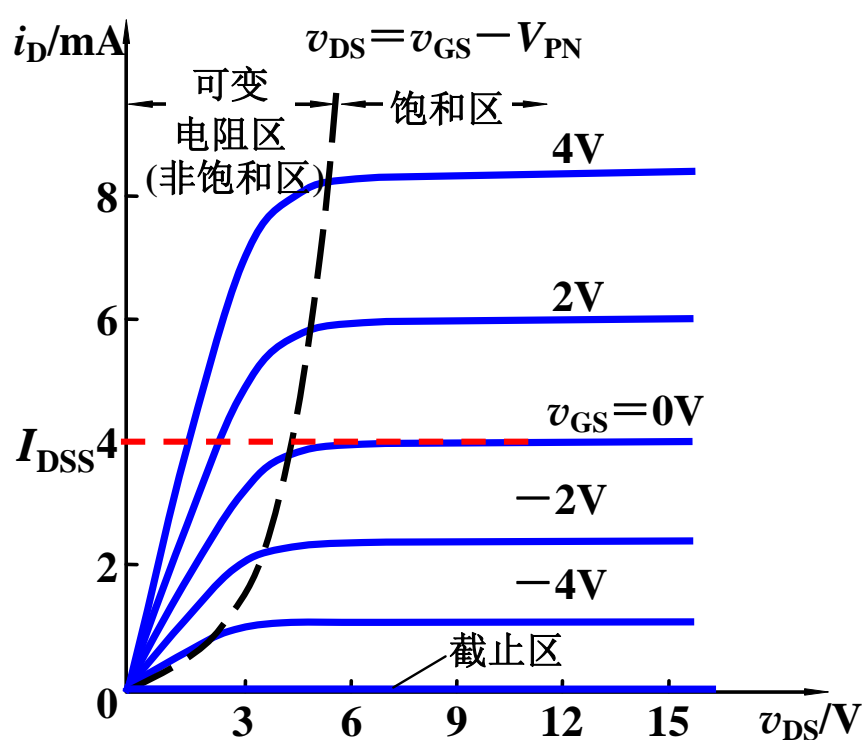
二氧化硅绝缘层中掺有大量的正离子，已存在导电沟道可以在正或负的栅源电压下工作，而且基本上无栅流



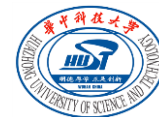
# 4.1.2 N沟道耗尽型MOSFET

## 2. $I$ - $V$ 特性曲线及大信号特性方程

$$i_D \approx I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_{PN}}\right)^2 \quad i_D = I_{DO} \left(\frac{v_{GS}}{V_{TN}} - 1\right)^2 \quad (\text{N沟道增强型})$$



# 4.1 MOS场效应三极管



## 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

## 4.1.2 N沟道耗尽型MOSFET

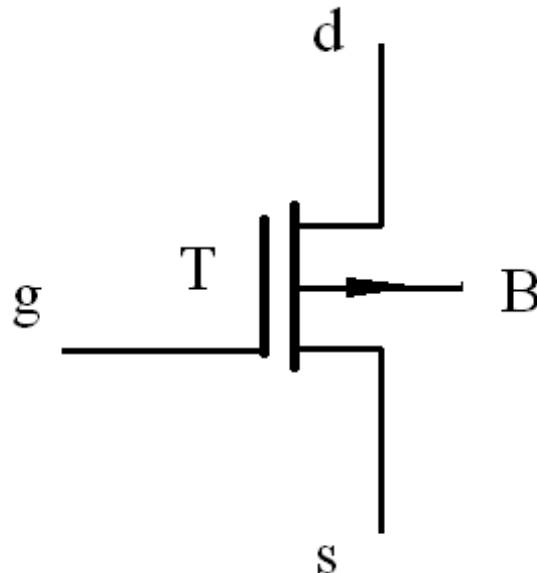
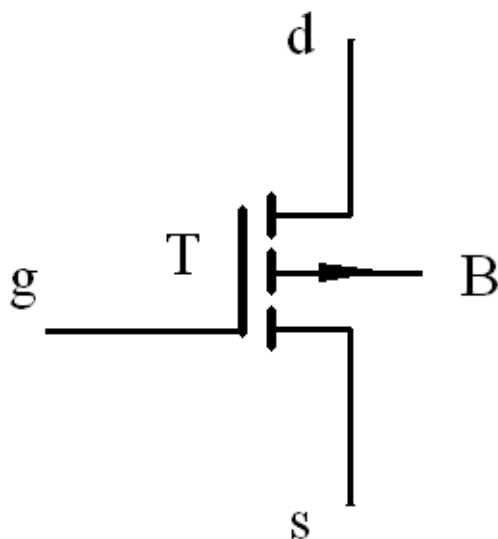
## 4.1.3 P沟道MOSFET

## 4.1.4 沟道长度调制等几种效应

## 4.1.5 MOSFET的主要参数

## 4.1.3 P沟道MOSFET

### 1. 电路符号



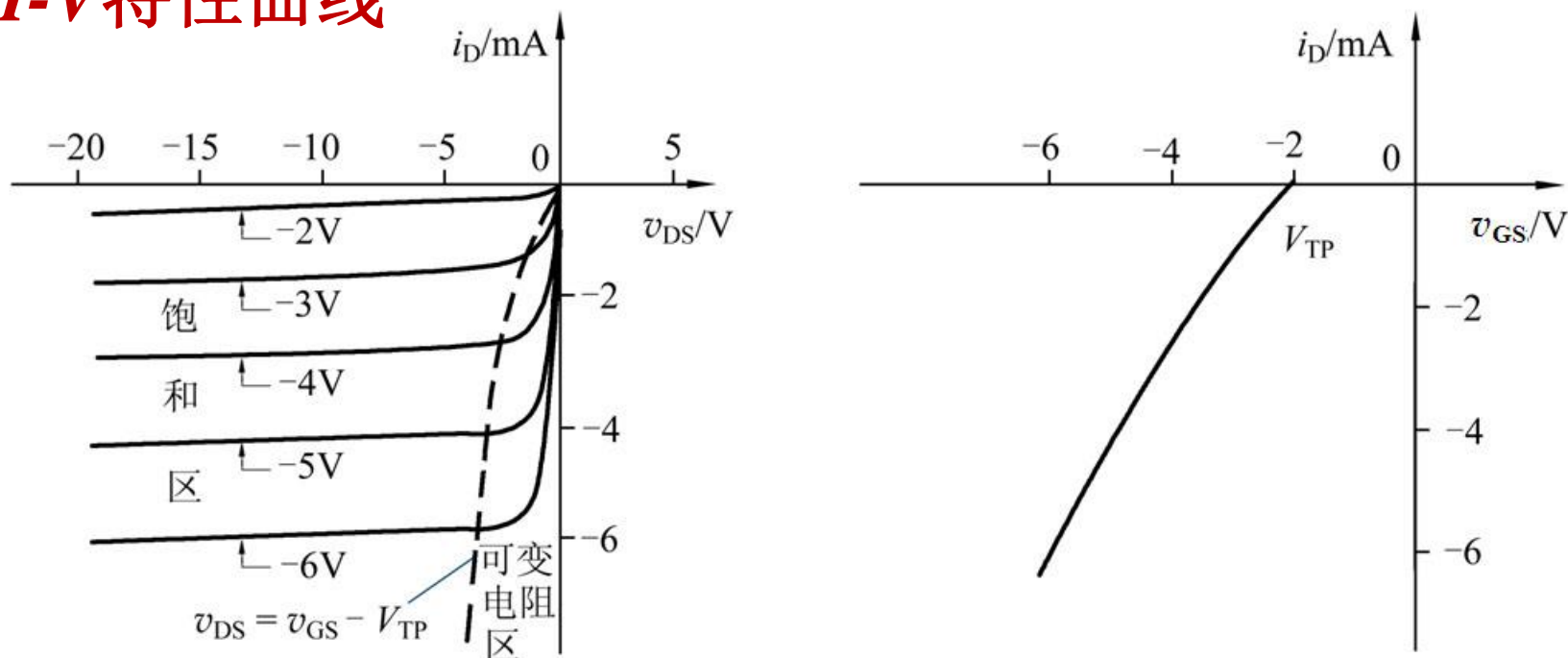
# 衬底是什么类型的半导体材料？

# 哪个符号是增强型的？

# 在增强型的P沟道MOSFET中， $v_{GS}$ 应加什么极性的电压才能工作在饱和区（线性放大区）？

# 4.1.3 P沟道MOSFET

## 2. $I$ - $V$ 特性曲线



**电流均以流入漏极的方向为正！**

# 是增强型还是耗尽型特性曲线？

# 耗尽型特性曲线是怎样的？ $v_{GS}$ 加什么极性的电压能使管子工作在饱和区（线性放大区）？



# 4.1.3 P沟道MOSFET

## 3. 特性方程

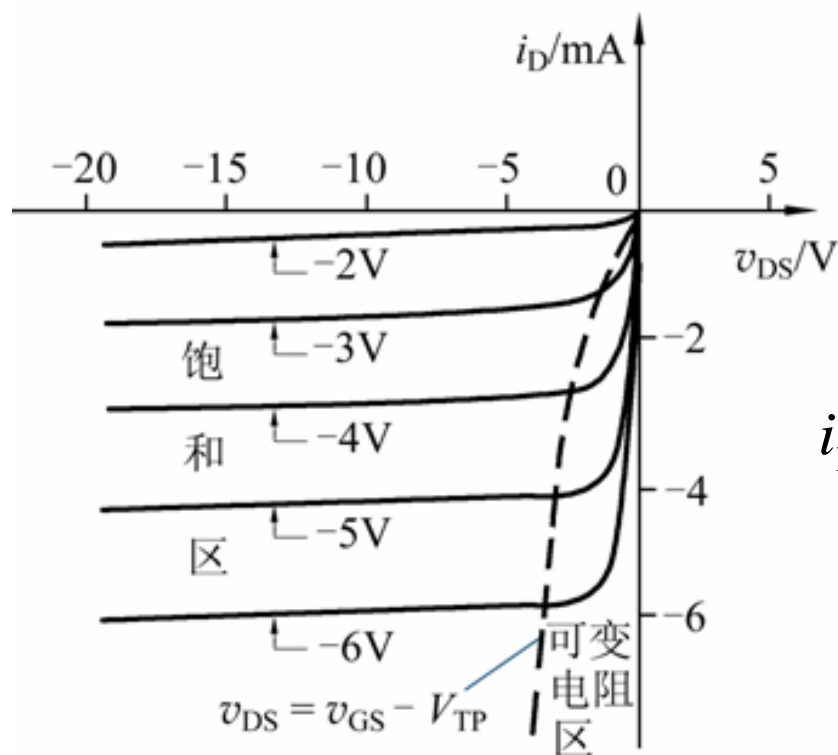
可变电阻区

$$i_D = -K_p [2(v_{GS} - V_{TP})v_{DS} - v_{DS}^2]$$

饱和区

$$i_D = -K_p (v_{GS} - V_{TP})^2 = -I_{DO} \left( \frac{v_{GS}}{V_{TP}} - 1 \right)^2$$

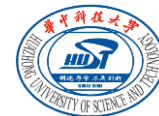
$$K_p = \frac{W\mu_p C_{ox}}{2L}$$



## MOSFET电流-电压特性小结

|      | NMOS   | PMOS  |
|------|--|---|
| 临界点  | $v_{DS} = v_{GS} - V_{TN}$   | $v_{DS} = v_{GS} - V_{TP}$  |
| 非饱和区 | $v_{DS} < v_{GS} - V_{TN}$<br>$i_D = K_n [2(v_{GS} - V_{TN}) v_{DS} - v_{DS}^2]$ | $v_{DS} > v_{GS} - V_{TP}$<br>$i_D = -K_p [2(v_{GS} - V_{TP}) v_{DS} - v_{DS}^2]$ |
| 饱和区  | $v_{DS} > v_{GS} - V_{TN}$<br>$i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$                    | $v_{DS} < v_{GS} - V_{TP}$<br>$i_D = -K_p (v_{GS} - V_{TP})^2$                    |
| 增强型  | 开启电压 $V_{TN} > 0$  | 开启电压 $V_{TP} < 0$   |
| 耗尽型  | 夹断电压 $V_{PN} < 0$  | 夹断电压 $V_{PP} > 0$   |

# 4.1 MOS场效应三极管



## 4.1.1 N沟道增强型MOSFET

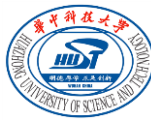
## 4.1.2 N沟道耗尽型MOSFET

## 4.1.3 P沟道MOSFET

## 4.1.4 沟道长度调制等几种效应

## 4.1.5 MOSFET的主要参数

# 4.1.4 沟道长度调制等几种效应



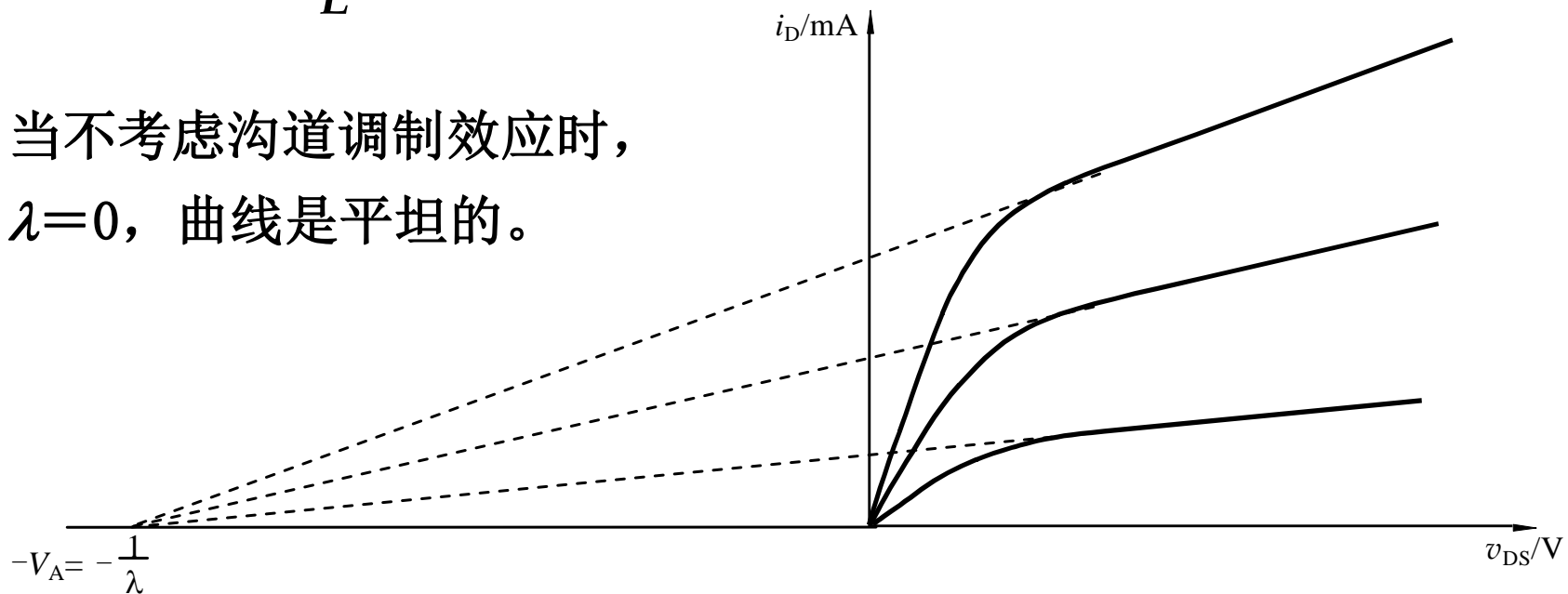
## 1. 沟道长度调制效应

实际上饱和区的曲线并不是平坦的（N沟道为例）

$$\text{修正后 } i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2 (1 + \lambda v_{DS}) = I_{DO} \left( \frac{v_{GS}}{V_{TN}} - 1 \right)^2 (1 + \lambda v_{DS})$$

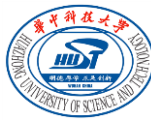
$$\lambda \approx \frac{0.1}{L} \text{ V}^{-1} \quad L \text{ 的单位为 } \mu\text{m} \quad V_A \text{ 称为厄利 (Early) 电压}$$

当不考虑沟道调制效应时，  
 $\lambda=0$ ，曲线是平坦的。



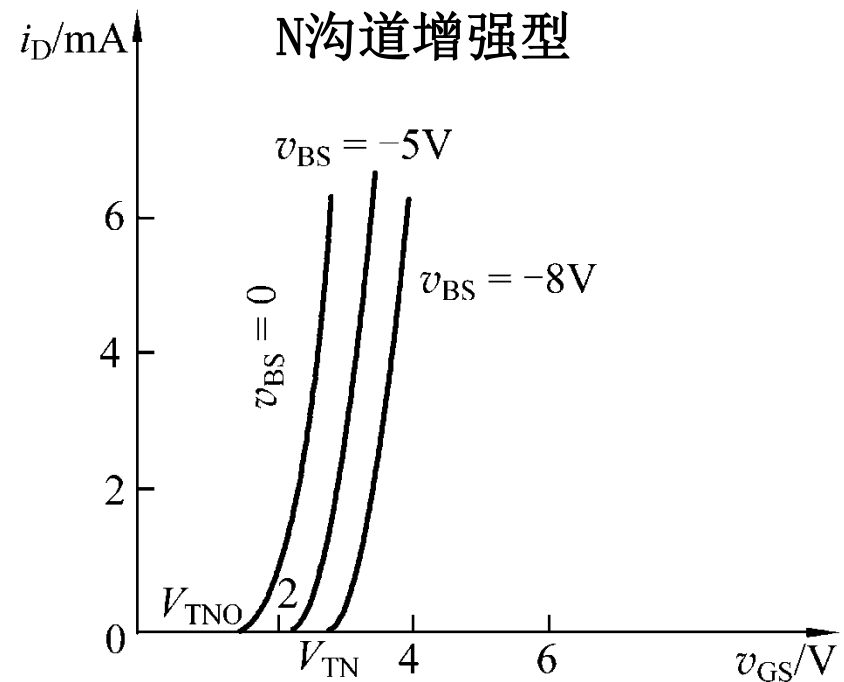
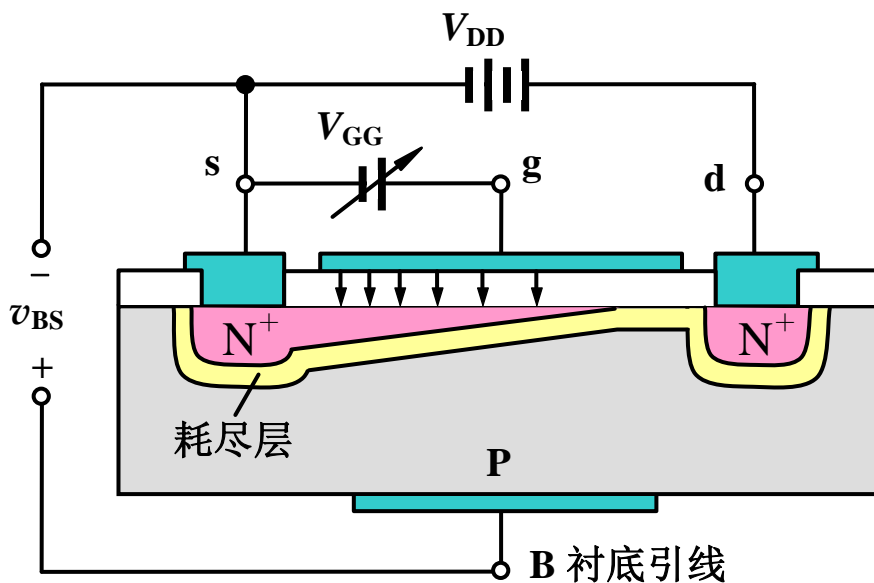
当  $v_{GS}$  固定、 $v_{DS}$  增加时，沟道长度  $L$  变短， $i_D$  会有所增加

## 4.1.4 沟道长度调制等几种效应



### 2. 衬底调制效应（体效应）及衬底的正确连接

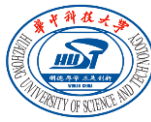
衬底未与源极并接时，衬底与源极间的偏压 $v_{BS}$ 将影响实际的开启（夹断）电压和转移特性。



对耗尽型器件的夹断电压有类似的影响

$V_{TNO}$  表示  $v_{BS} = 0$  时的开启电压

## 4.1.4 沟道长度调制等几种效应

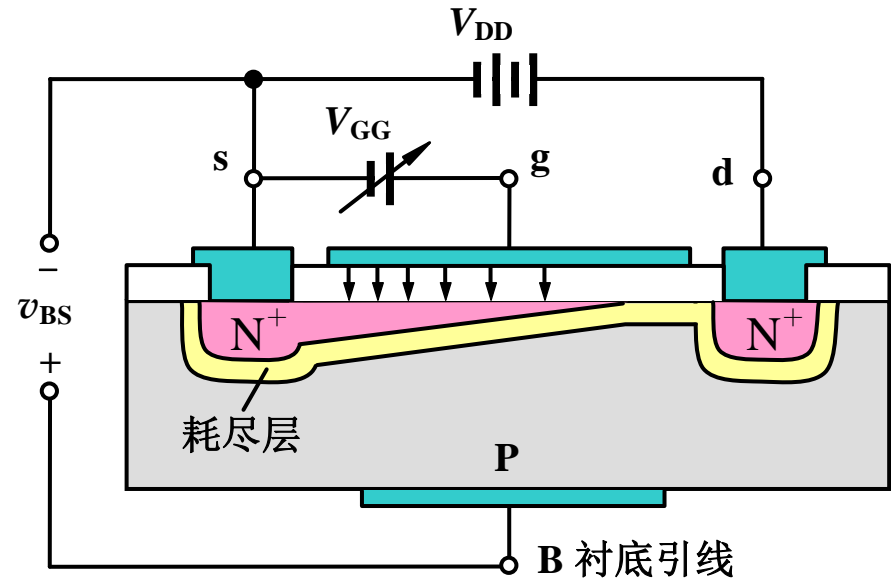


### 2. 衬底调制效应（体效应）及衬底的正确连接

为保证导电沟道与衬底之间的PN结反偏，要求：

N沟道：  $v_{BS} \leq 0$

P沟道：  $v_{BS} \geq 0$



集成电路中，N沟道器件的衬底接电路的最低电位，P沟道器件的衬底接电路的最高电位，衬底B与源极S之间就存在衬底偏压  $v_{BS}$ 。

在分立元件电路中，场效应管的衬底通常与源极相连，即  $v_{BS} = 0$ 。

### 3. 温度效应

$V_{TN}$ 和电导常数 $K_n$ 随温度升高而下降，且 $K_n$ 受温度的影响大于 $V_{TN}$ 受温度的影响。

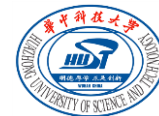
可变电阻区 
$$i_D = K_n [2(v_{GS} - V_{TN}) v_{DS} - v_{DS}^2]$$

饱和区 
$$i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$$

当温度升高时，对于给定的 $V_{GS}$ ，总的效果是漏极电流减小。

这种作用给功率MOS管提供了一种反馈条件，自然限制了沟道电流，保证了功率MOS管的稳定运行。

# 4.1.4 沟道长度调制等几种效应



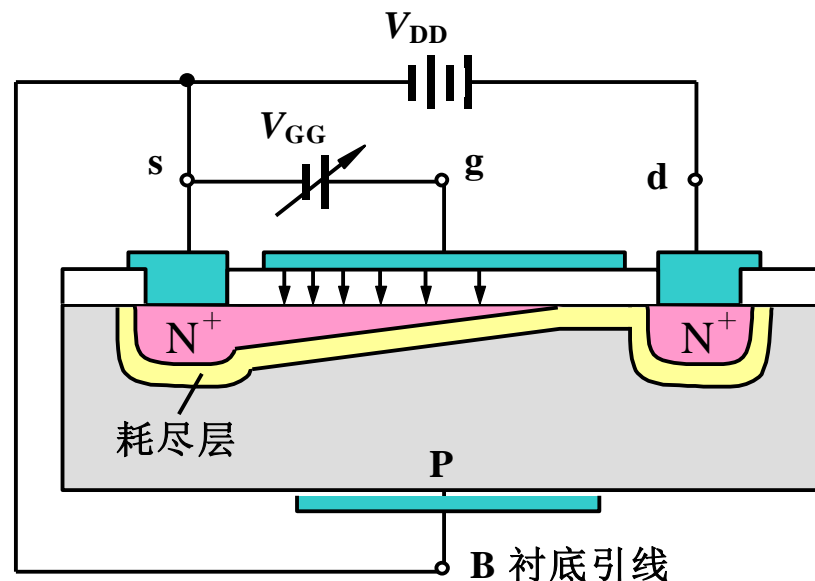
## 4. 击穿效应

### (1) 漏衬击穿

外加的漏源电压过高，将导致漏极到衬底的PN结击穿。

### (2) 栅极击穿

若绝缘层厚度 $t_{ox}=50$  纳米时，只要约30V的栅极电压就可将绝缘层击穿，若取安全系数为3，则最大栅极安全电压只有10V。



通常在MOS管的栅源间接入双向稳压管，限制栅极电压以保护器件。



# 4.1 MOS场效应三极管



4.1.1 N沟道增强型MOSFET

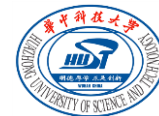
4.1.2 N沟道耗尽型MOSFET

4.1.3 P沟道MOSFET

4.1.4 沟道长度调制等几种效应

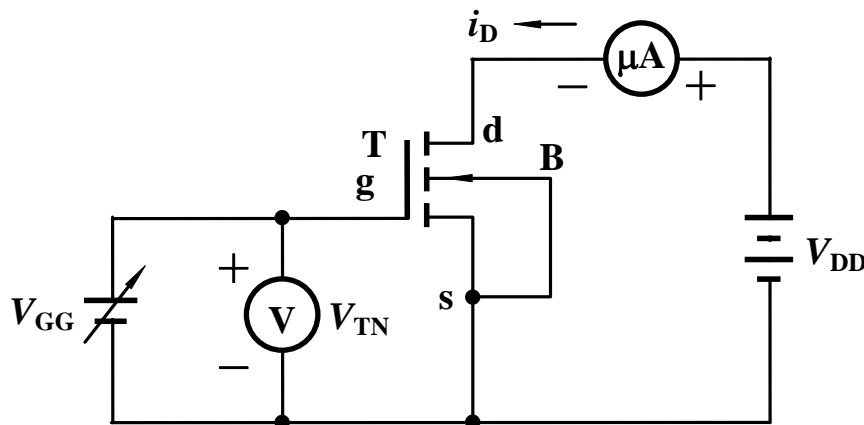
4.1.5 MOSFET的主要参数

# 4.1.5 MOSFET的主要参数



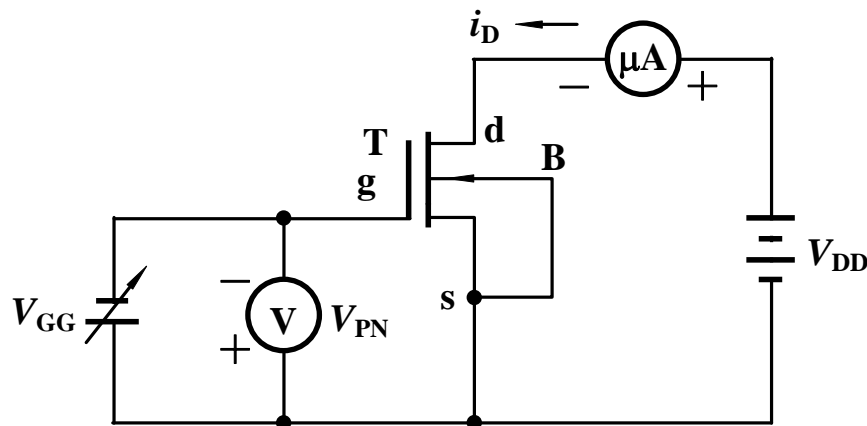
## 一、直流参数

### 1. 开启电压 $V_T$ (增强型参数)

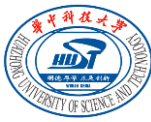


当  $v_{DS}$  为某一固定值（例如10V）使  $i_D$  等于一微小电流（例如  $50\mu A$ ）时，栅源间的电压为  $V_{TN}$ 。

### 2. 夹断电压 $V_P$ (耗尽型参数)

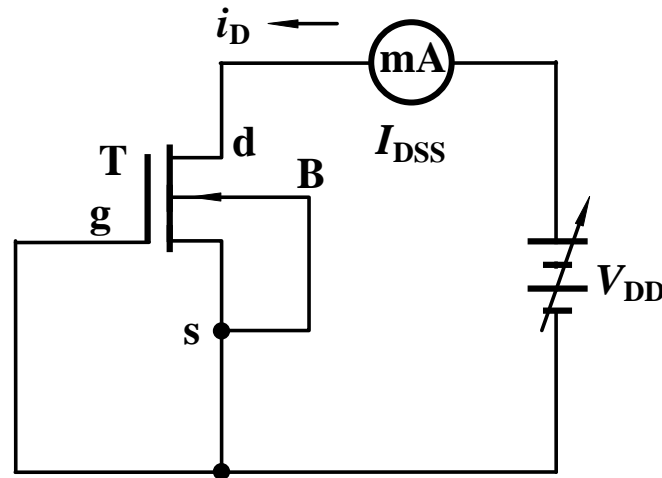


# 4.1.5 MOSFET的主要参数



## 一、直流参数

### 3. 饱和漏电流 $I_{DSS}$ （耗尽型参数）



### 4. 直流输入电阻 $R_{GS}$ ( $10^9\Omega \sim 10^{15}\Omega$ )

## 4.1.5 MOSFET的主要参数

### 二、交流参数（饱和区）

1. 输出电阻 $r_{ds}$

$$r_{ds} = \left. \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D} \right|_{V_{GS}}$$

对于增强型NMOS管  $i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2 (1 + \lambda v_{DS})$

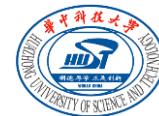
有 
$$v_{DS} = \frac{i_D}{\lambda K_n (v_{GS} - V_{TN})^2} - \frac{1}{\lambda}$$

所以 
$$r_{ds} = [\lambda K_n (v_{GS} - V_{TN})^2]^{-1} \approx \frac{1}{\lambda i_D} = \frac{V_A}{i_D}$$

当不考虑沟道调制效应时,  $\lambda=0$ ,  $r_{ds} \rightarrow \infty$

实际中,  $r_{ds}$ 一般在几十千欧到几百千欧之间。

# 4.1.5 MOSFET的主要参数



## 二、交流参数

2. 低频互导  $g_m$  
$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{V_{DS}}$$

NMOS增强型  $i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$

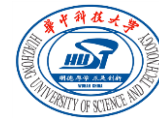
则 
$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{V_{DS}} = \left. \frac{\partial [K_n (v_{GS} - V_{TN})^2]}{\partial v_{GS}} \right|_{V_{DS}} = 2K_n (v_{GS} - V_{TN})$$

又因为  $i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2 \Rightarrow (v_{GS} - V_{TN}) = \sqrt{\frac{i_D}{K_n}}$

所以 
$$g_m = 2K_n (v_{GS} - V_{TN}) = 2\sqrt{K_n i_D}$$

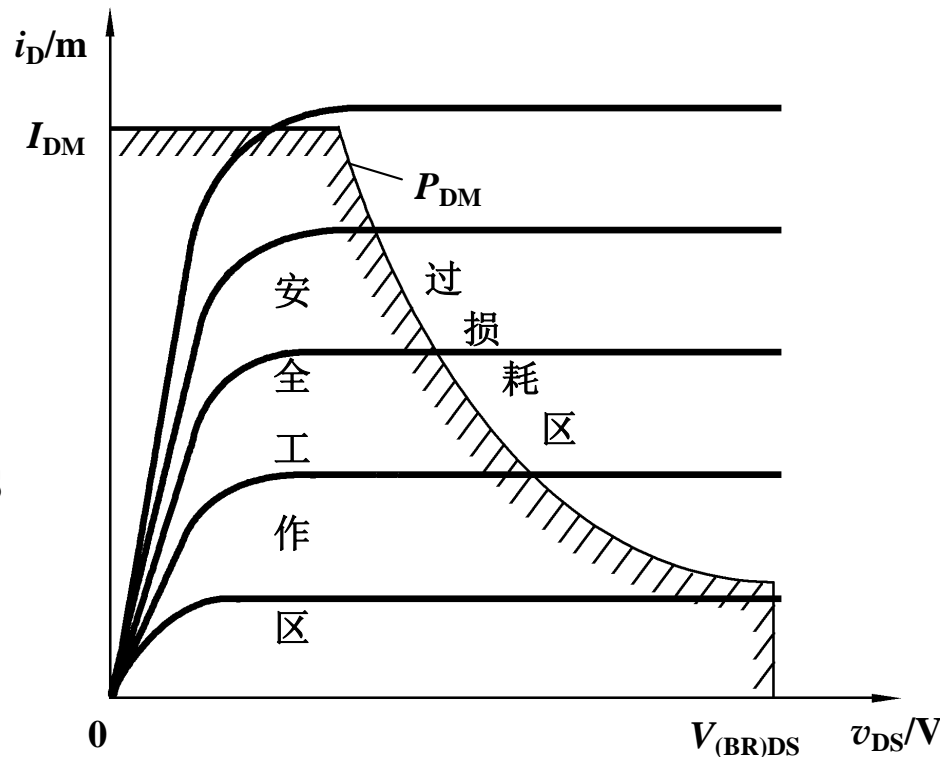
其中 
$$K_n = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L}$$

# 4.1.5 MOSFET的主要参数

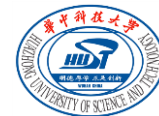


## 三、极限参数

1. 最大漏极电流  $I_{DM}$
2. 最大耗散功率  $P_{DM}$
3. 最大漏源电压  $V_{(BR)DS}$
4. 最大栅源电压  $V_{(BR)GS}$



# 4 场效应三极管及其放大电路



- 4.1 金属-氧化物-半导体（MOS）场效应三极管
- 4.2 MOSFET基本共源极放大电路**
- 4.3 图解分析法
- 4.4 小信号模型分析法
- 4.5 共漏极和共栅极放大电路
- 4.7 组合放大电路
- 4.9 各种FET的特性及使用注意事项

## 4.2 MOSFET基本共源极放大电路

### 4.2.1 基本共源极放大电路的组成

### 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理

### 4.2.3 放大电路的习惯画法

### 4.2.4 其它共源放大电路



## 4.2.1 基本共源极放大电路的组成

### 1. 如何让MOS管工作在饱和区？

元件作用

$V_{GG}$ :

提供栅源电压使  $v_{GS} > V_{TN}$

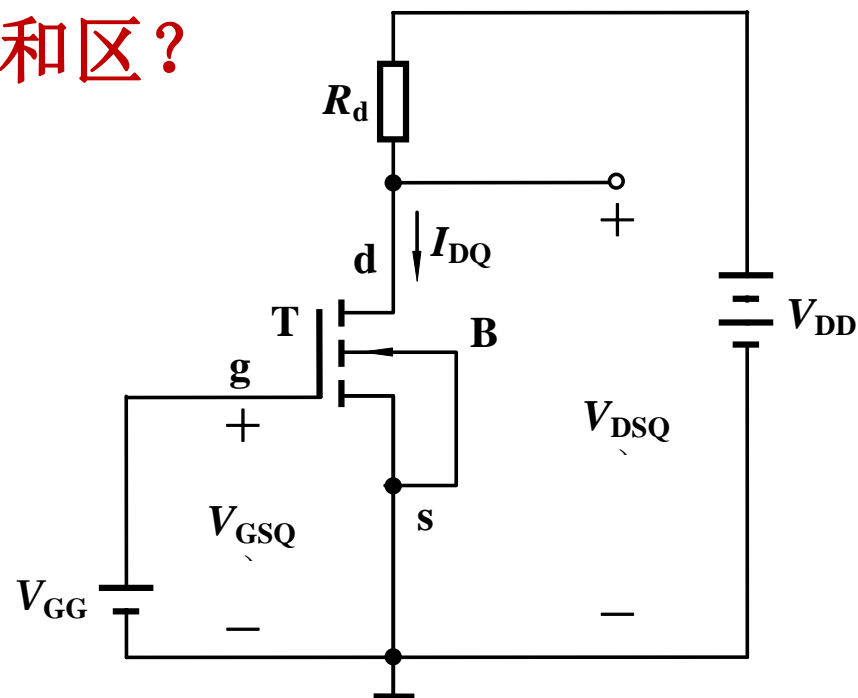
$V_{DD}$ 和 $R_d$ :

提供合适的漏源电压，使

$$v_{DS} > v_{GS} - V_{TN}$$

$R_d$  还兼有将电流转换成电压的作用

通常称 $V_{GG}$ 和 $V_{DD}$ 为三极管的工作电源， $v_i$ 为信号。



## 4.2.1 基本共源极放大电路的组成

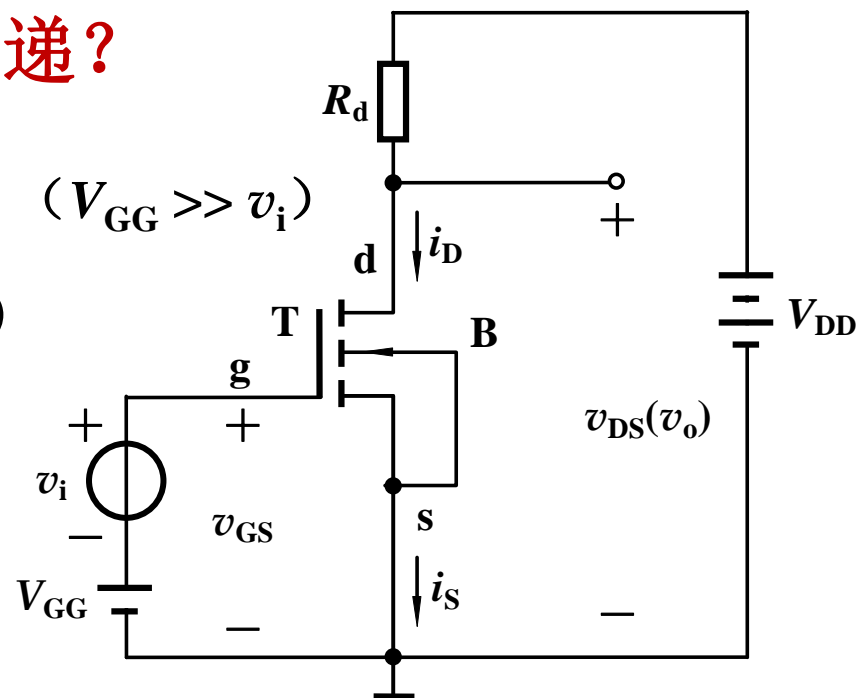
### 2. 信号如何通过MOS管传递？

饱和区  $i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2$

$$v_i \rightarrow \Delta v_{GS} \rightarrow \Delta i_D \rightarrow \Delta v_{DS} (= v_o)$$

$$\text{由 } \frac{v_o}{v_i} = \frac{\Delta v_{DS}}{\Delta v_{GS}}$$

可获得信号电压增益



信号由栅源回路输入、漏源回路输出，即源极是公共端，所以称此电路为**共源电路**。

也可看作信号由栅极输入、漏极输出。

## 4.2 MOSFET基本共源极放大电路

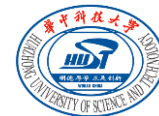
### 4.2.1 基本共源极放大电路的组成

### 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理

### 4.2.3 放大电路的习惯画法

### 4.2.4 其它共源放大电路

## 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理



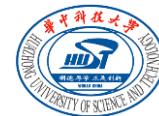
### 1. 放大电路的静态和动态

**静态：**输入信号为零（ $v_i=0$  或  $i_i=0$ ）时，放大电路的工作状态，也称**直流工作状态**。

此时，FET的直流量 $I_D$ 、 $V_{GS}$ 、 $V_{DS}$ ，在输出特性曲线上表示为一个确定的点，习惯上称该点为静态工作点 $Q$ 。常将上述三个电量写成 $I_{DQ}$ 、 $V_{GSQ}$ 和 $V_{DSQ}$ 。

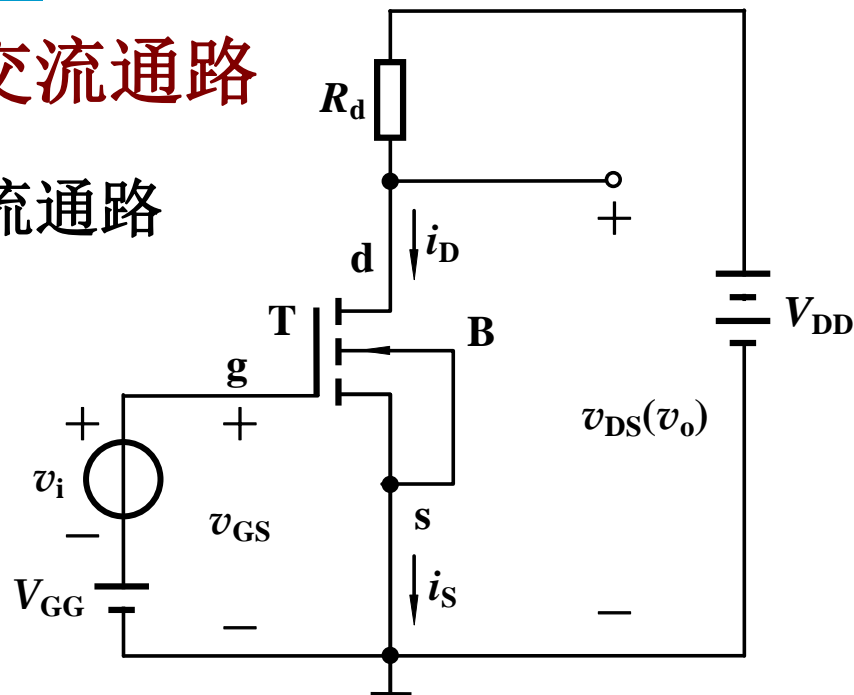
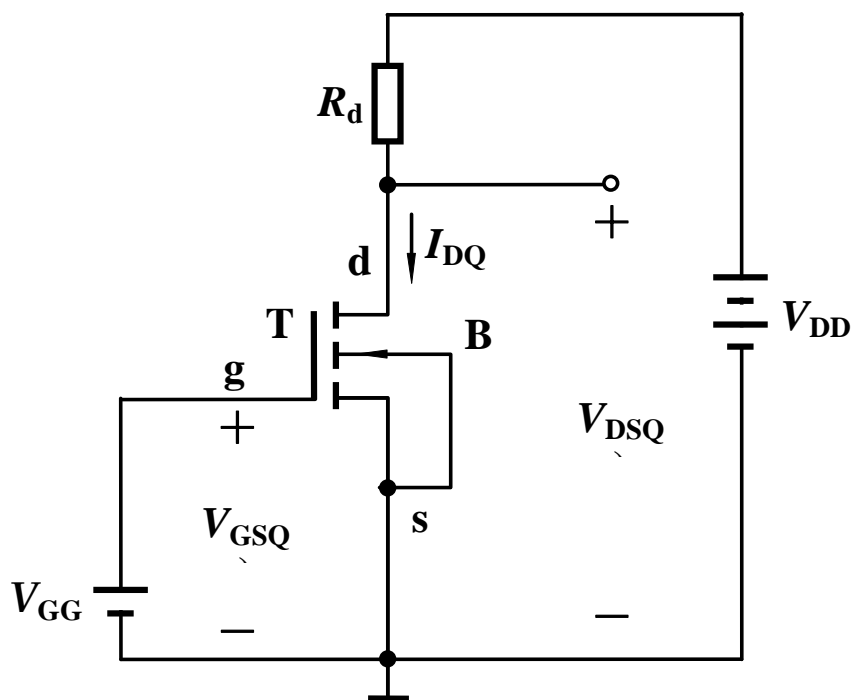
**动态：**输入信号不为零时，放大电路的工作状态，也称**交流工作状态**。

## 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理

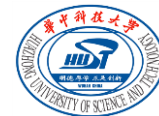


### 2. 放大电路的直流通路和交流通路

仅有直流电流流经的通路为直流通路

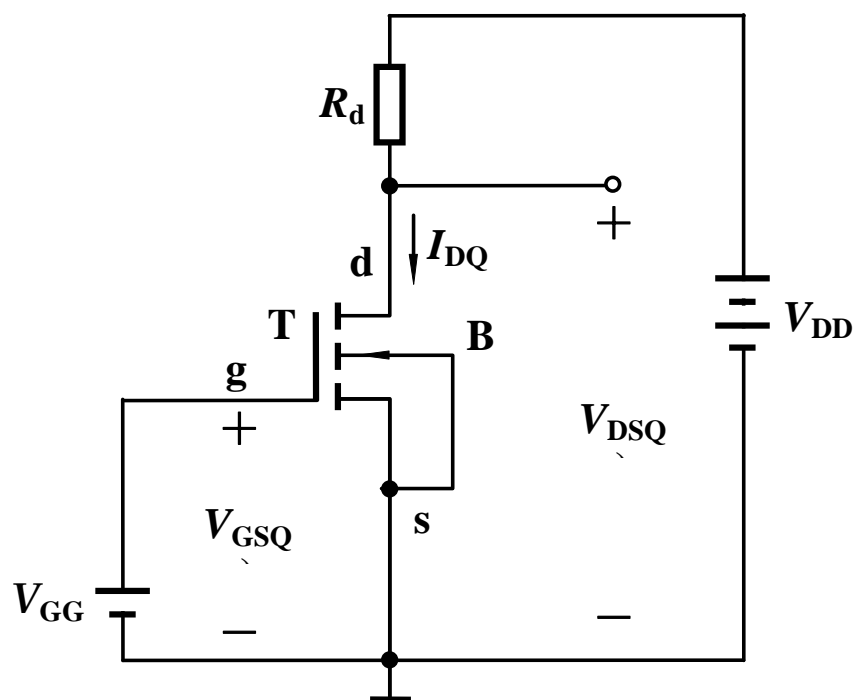


## 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理



### 2. 放大电路的直流通路和交流通路

仅有交流电流流经的通路为交流通路

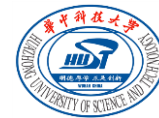


直流电压源内阻为零，交流电流流经直流电压源时不产生任何交流压降。

故：

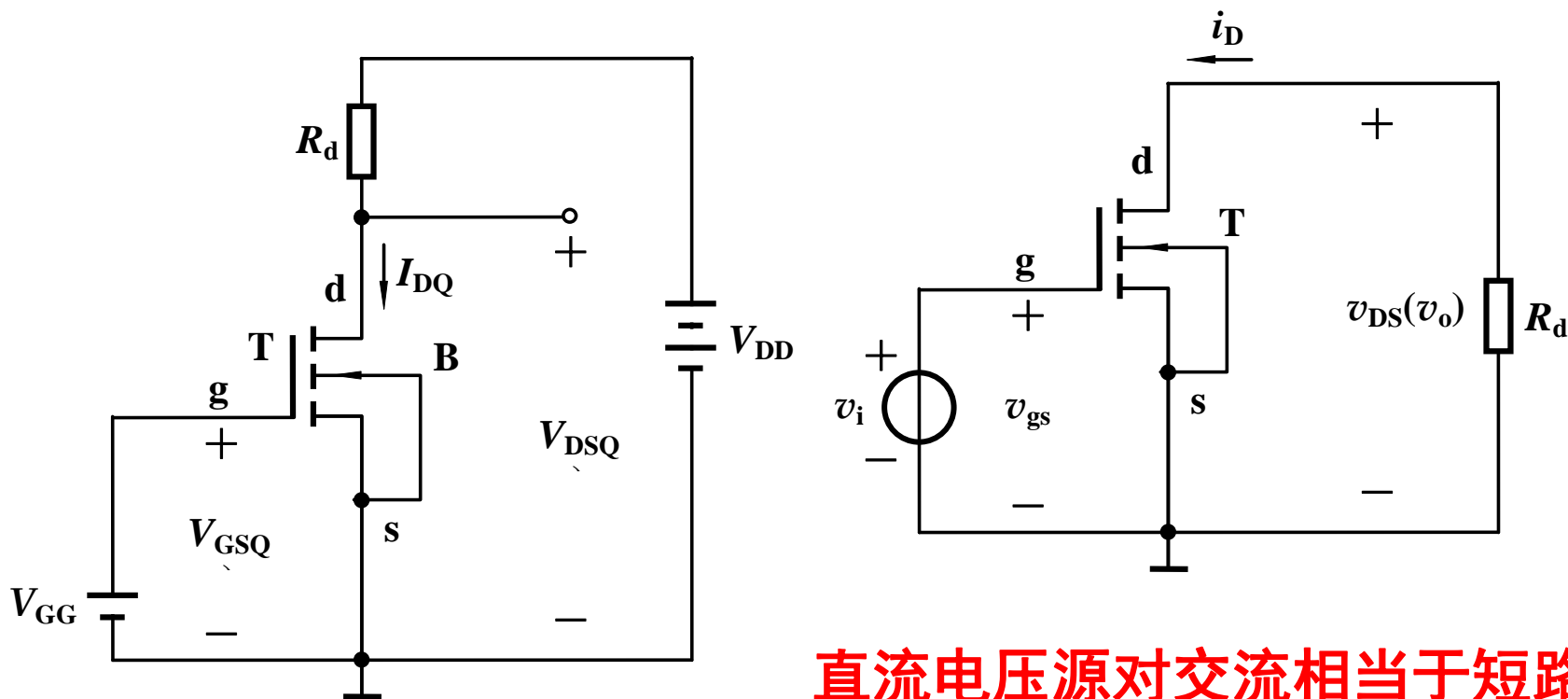
**直流电压源对交流相当于短路**

## 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理

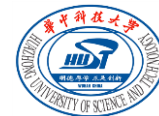


### 2. 放大电路的直流通路和交流通路

仅有交流电流流经的通路为交流通路



## 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理

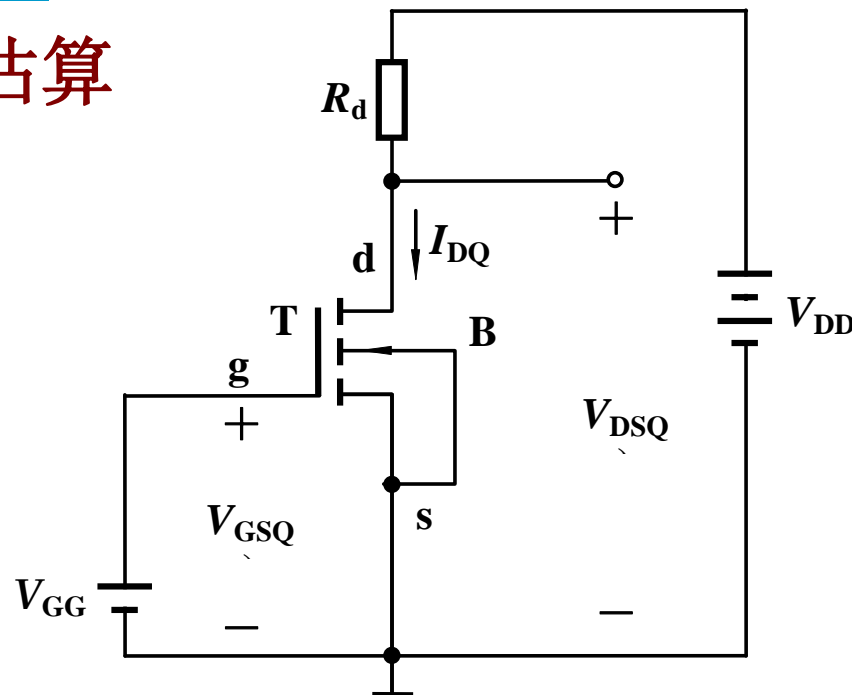


### 3. 放大电路的静态工作点估算

直流通路

假设NMOS管工作于饱和区，则

$$\begin{cases} V_{GSQ} = V_{GG} \\ I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2 \\ V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d \end{cases}$$



当已知 $V_{GG}$ 、 $V_{DD}$ 、 $V_{TN}$ 、 $K_n$ 和 $R_d$ 时，便可求得 $Q$ 点（ $V_{GSQ}$ 、 $I_{DQ}$ 、 $V_{DSQ}$ ）。必须检验是否满足饱和区工作条件： $V_{DSQ} > V_{GSQ} - V_{TN} > 0$ 。

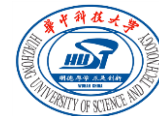
若不满足，则说明工作在可变电阻区，此时漏极电流为

$$i_D = K_n 2(v_{GS} - V_{TN}) v_{DS}$$

**注意：电路结构不同，除FET特性方程外，其它电路方程将有差别**



## 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理



### 例4.2.1

已知 $V_{GG}=2V$ ,  $V_{DD}=5V$ ,  $V_{TN}=1V$ ,  
 $K_n=0.2mA/V^2$ ,  $R_d=12k\Omega$ , 求 $Q$ 点。

解：假设NMOS管工作于饱和区，根据

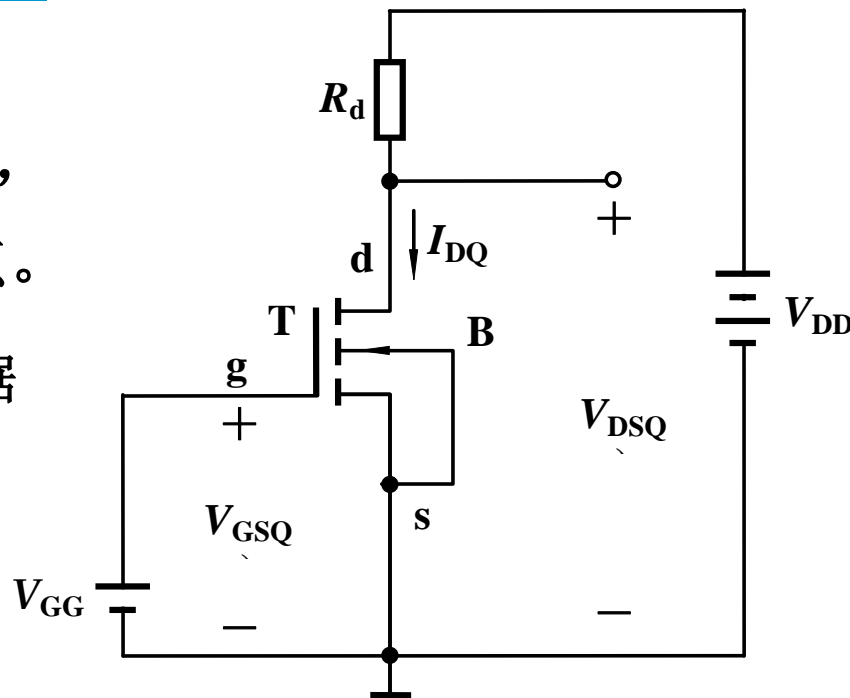
$$\begin{cases} V_{GSQ} = V_{GG} \\ I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2 \\ V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_d \end{cases}$$

求得：

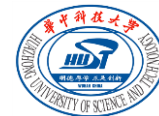
$$V_{GSQ}=2V, I_{DQ}=0.2mA, V_{DSQ}=2.6V$$

满足饱和区工作条件：

$$V_{DSQ} > V_{GSQ} - V_{TN} > 0, \text{ 结果即为所求。}$$



## 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理



### 3. 放大电路的静态工作点估算

#### 增强型NMOS管

饱和区的条件:  $V_{GSQ} > V_{TN}$ ,

$$I_{DQ} > 0, \quad V_{DSQ} > V_{GSQ} - V_{TN}$$

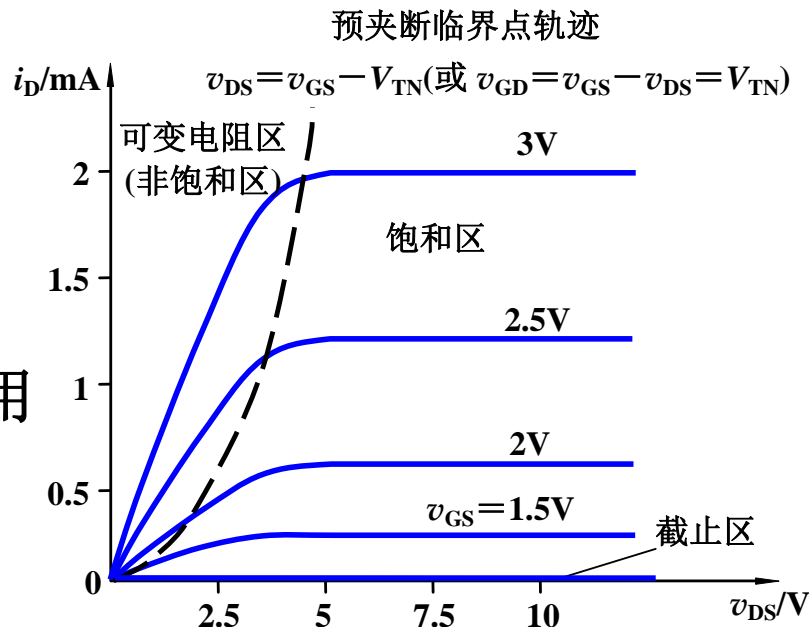
假设NMOS管工作于饱和区, 利用

$$I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2 \text{ 计算 } Q \text{ 点。}$$

若:  $V_{GSQ} < V_{TN}$ , NMOS管截止。

若:  $V_{DSQ} < V_{GSQ} - V_{TN}$ , NMOS管可能工作在可变电阻区。

如果初始假设是错误的, 则必须作出新的假设, 同时重新分析电路。



# 请归纳其它管型静态工作点的计算方法

## 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理

### 4. 放大电路的动态工作情况

在静态基础上加入小信号 $v_i$

此时电路中的总电压和电流为

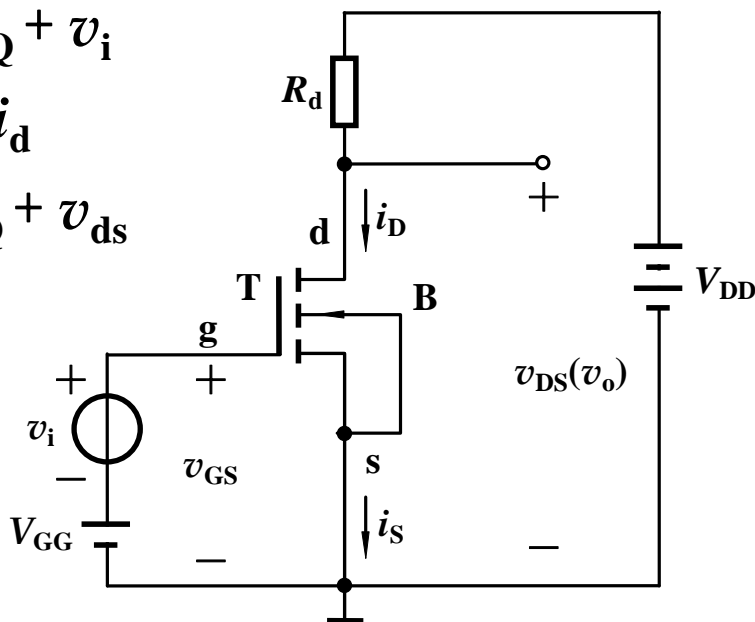
$$v_{GS} = V_{GSQ} + v_i$$

$$i_D = I_{DQ} + i_d$$

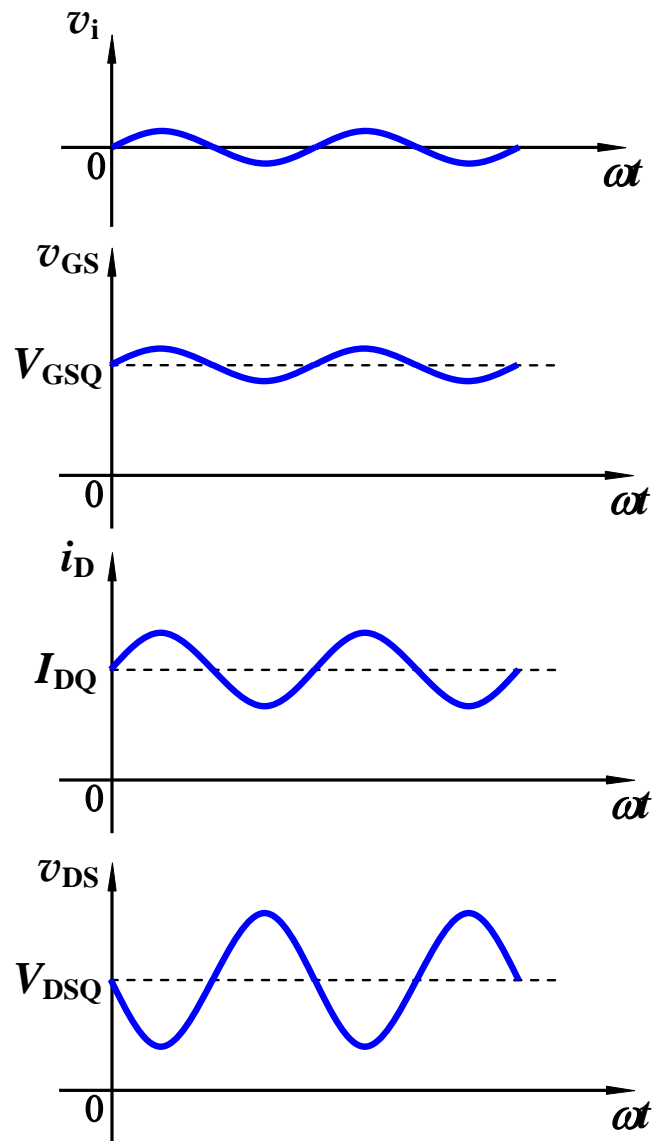
$$v_{DS} = v_{DSQ} + v_{ds}$$

其中

$i_d$ 和 $v_{ds}$ 为  
交流量



$$i_D = K_n (v_{GS} - V_{TN})^2 \quad v_{DS} = V_{DD} - i_D R_d$$



## 4.2 MOSFET基本共源极放大电路

### 4.2.1 基本共源极放大电路的组成

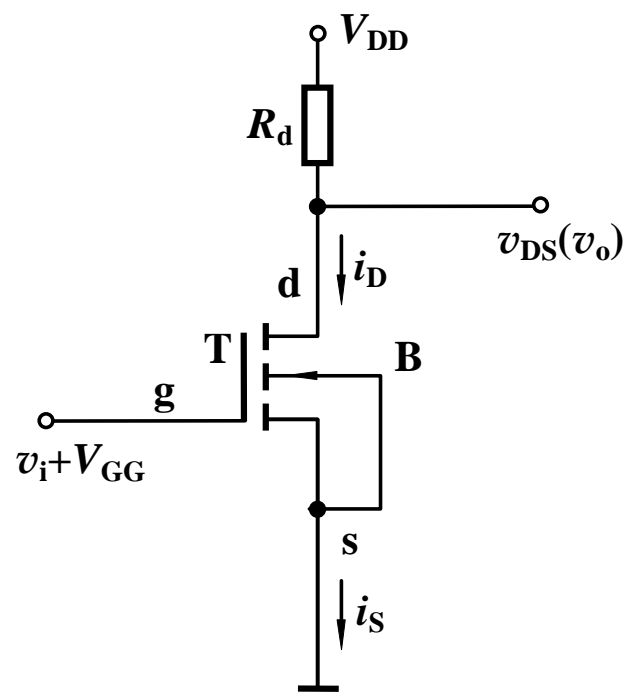
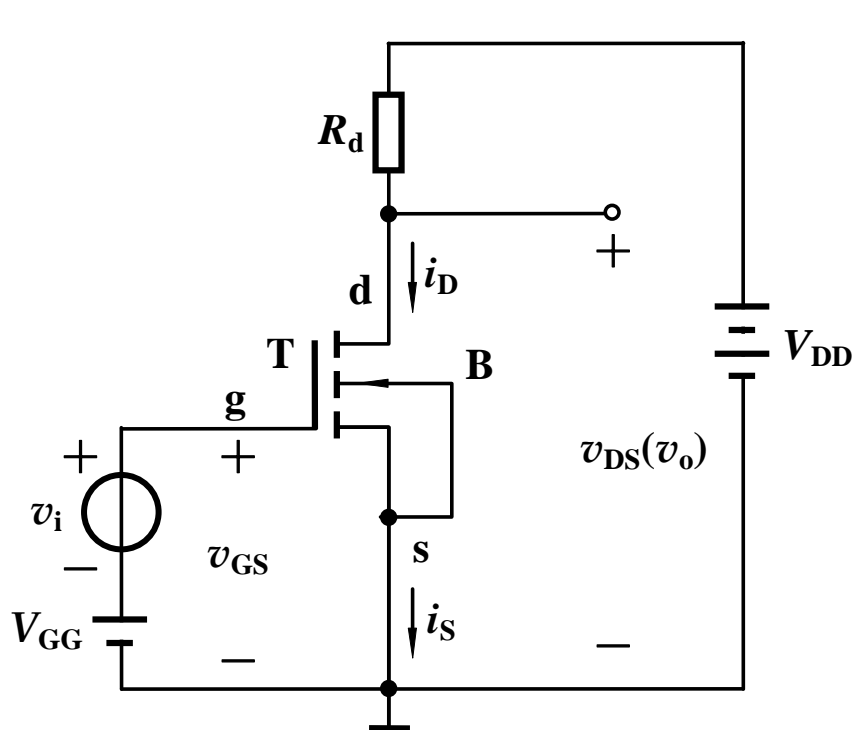
### 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理

### 4.2.3 放大电路的习惯画法

### 4.2.4 其它共源放大电路

## 4.2.3 放大电路的习惯画法

省略工作电源的直流电压符号，仅保留电压源非接“地”端子，并标注电压源名称。



习惯画法

## 4.2 MOSFET基本共源极放大电路

### 4.2.1 基本共源极放大电路的组成

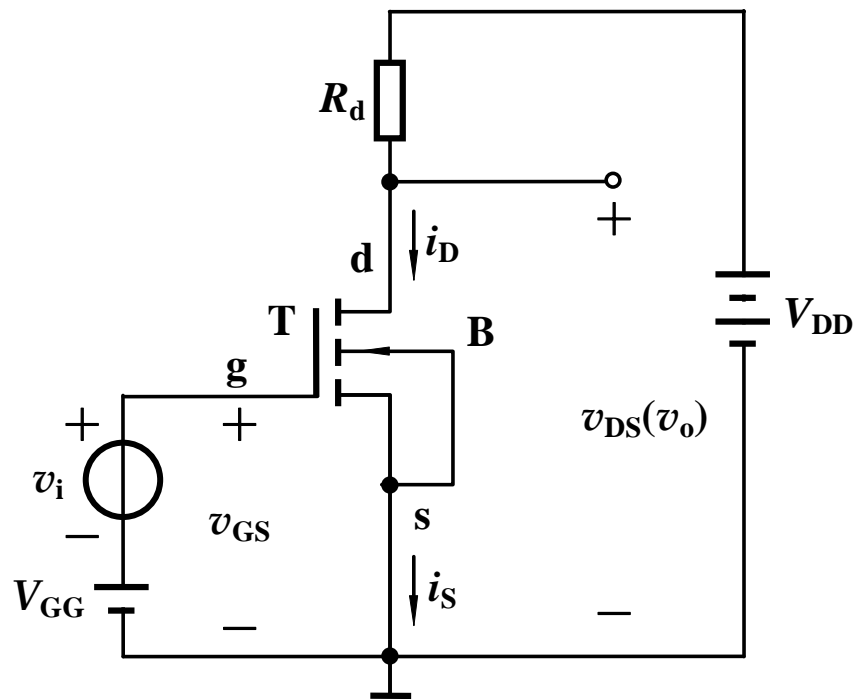
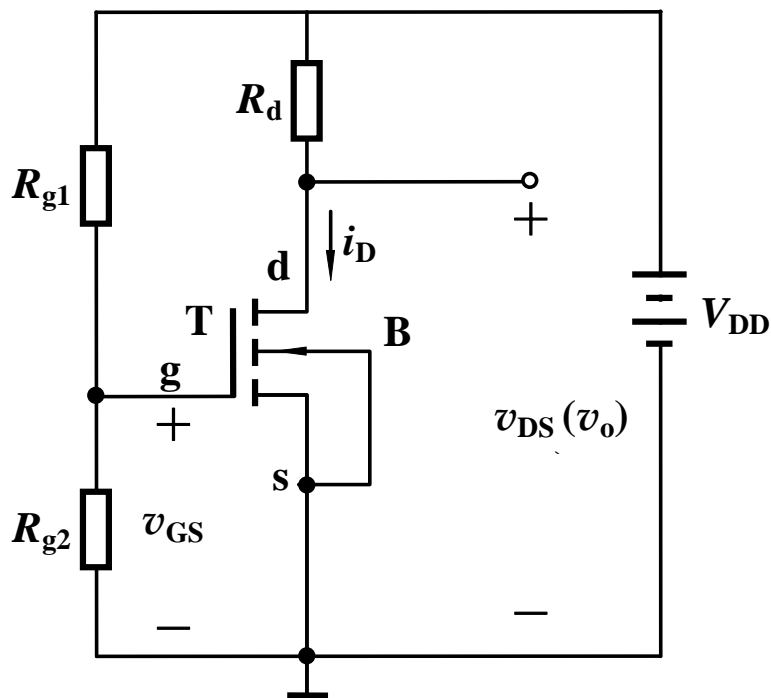
### 4.2.2 基本共源极放大电路的工作原理

### 4.2.3 放大电路的习惯画法

### 4.2.4 其它共源放大电路

## 4.2.4 其它共源放大电路

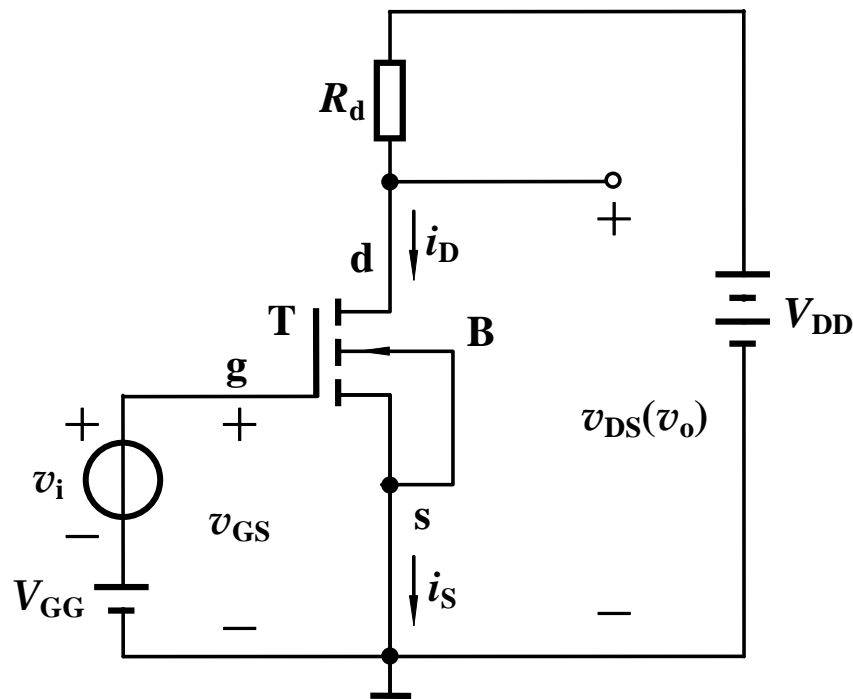
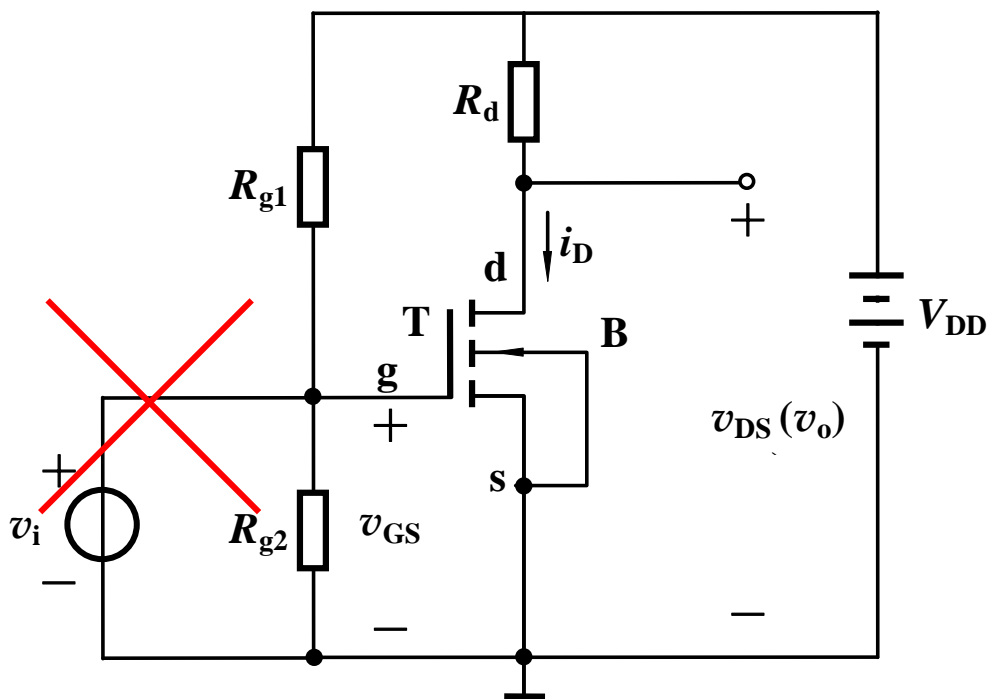
### 1. 能否省掉一个工作电源？



可以提供合适的  $V_{GSQ}$

## 4.2.4 其它共源放大电路

### 2. 信号如何输入？

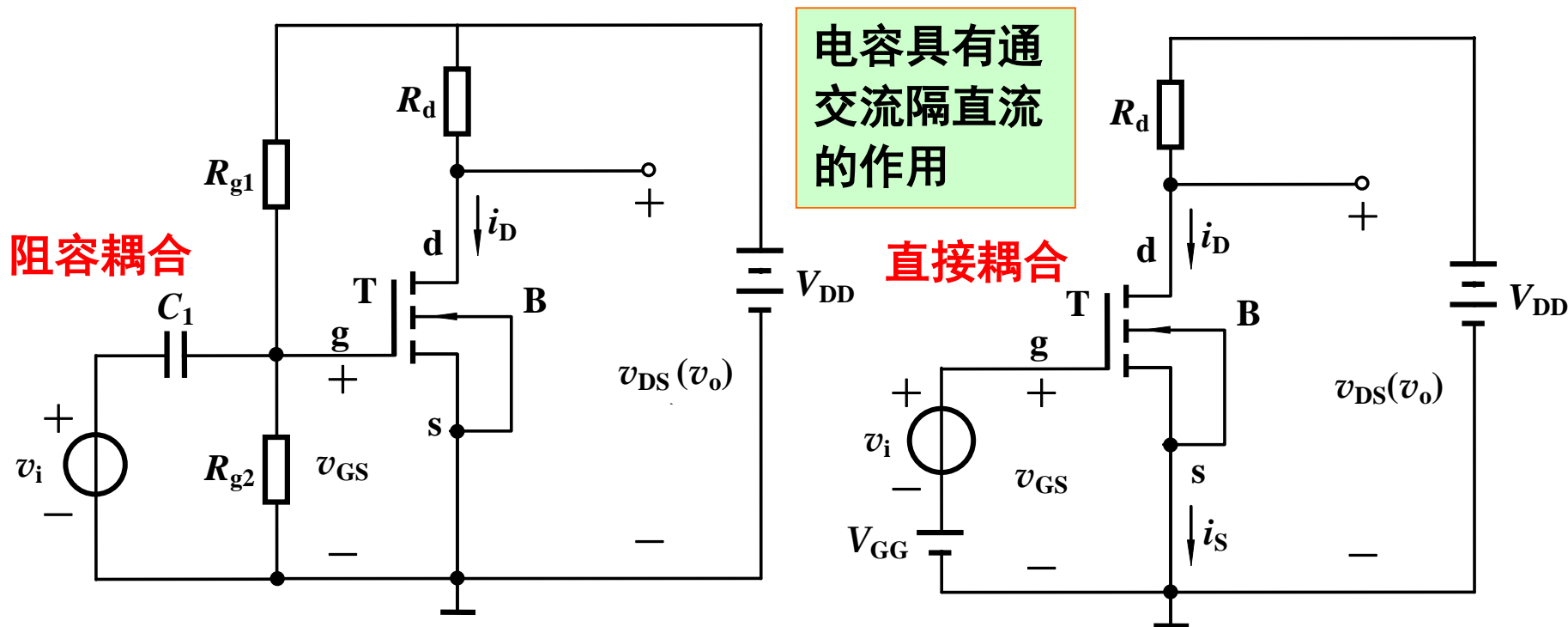


$v_i$ 的内阻很小且其直流量为零，即 $V_i = 0$ ，导致 $V_{GSQ} \approx 0$ ，NMOS管受 $v_i$ 影响不能工作在饱和区。



## 4.2.4 其它共源放大电路

### 3. 如何解决信号源对静态工作点的影响？



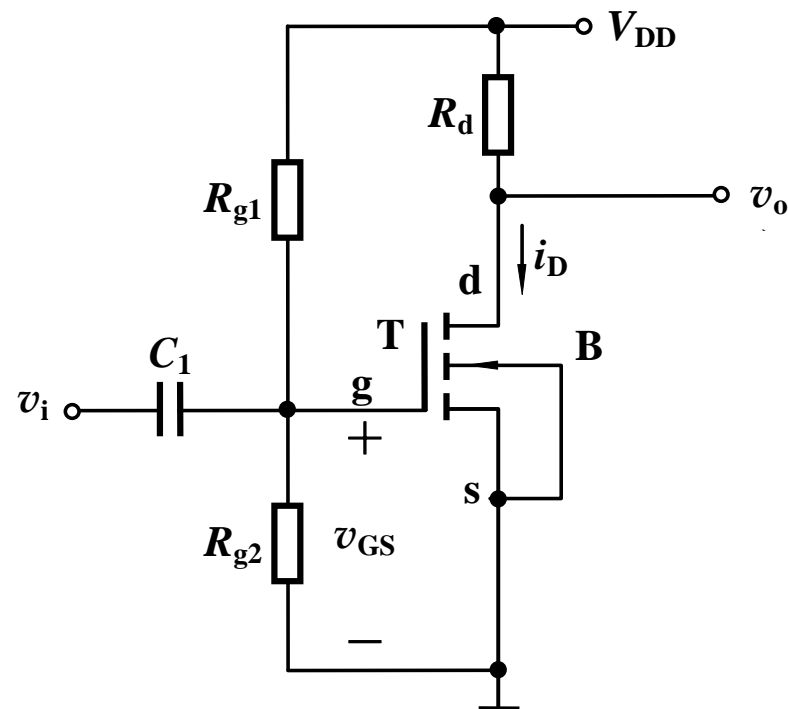
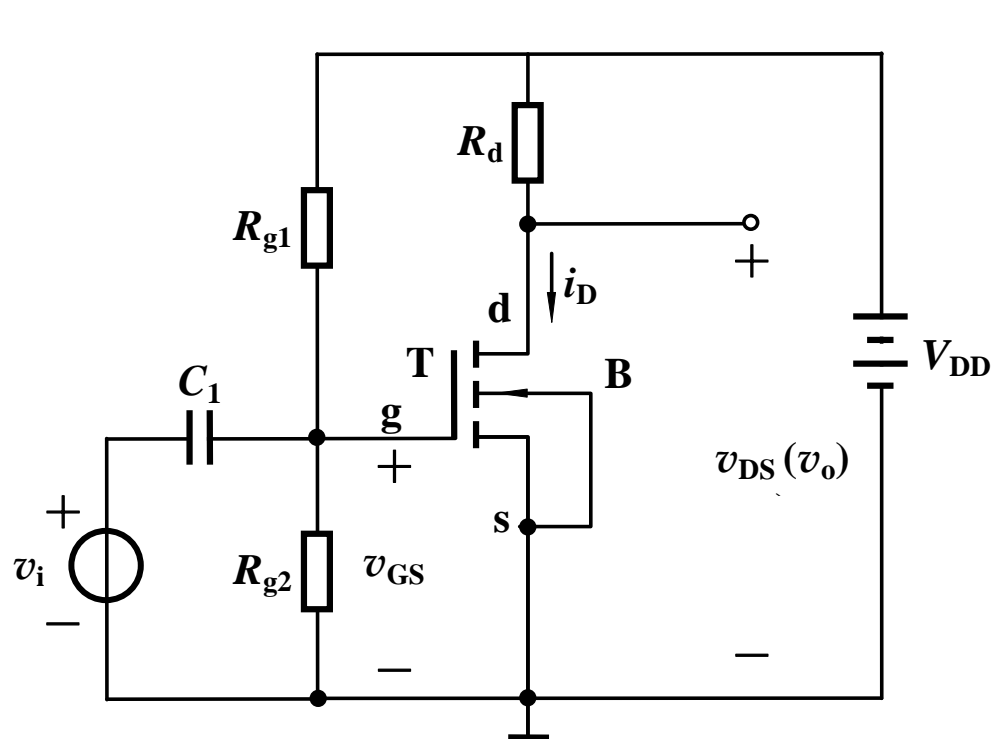
电容对信号频率呈现的阻抗，与放大电路的输入电阻相比可以忽略不计（短路）。信号可以正常通过，但避免了栅极的直流电压受信号源的影响

设  $C_1 = 10\mu\text{F}$ ,  $f = 1\text{kHz}$ .

$$|Z_{C_1}| = \left| \frac{1}{j\omega C_1} \right| = \frac{1}{2\pi f C_1} = \frac{1}{2\pi \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}} \approx 16\Omega$$

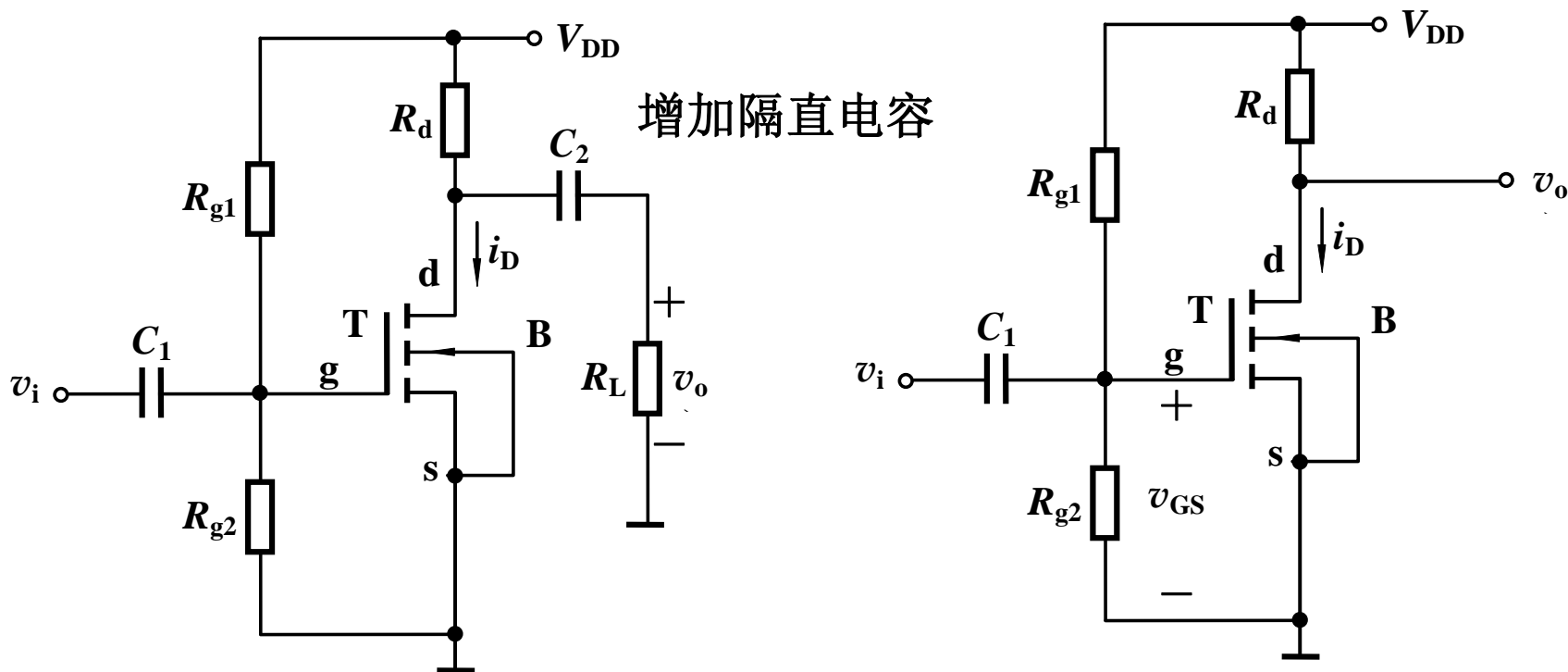
## 4.2.4 其它共源放大电路

### 4. 习惯画法



## 4.2.4 其它共源放大电路

### 5. 接负载后是否对静态工作点造成影响？



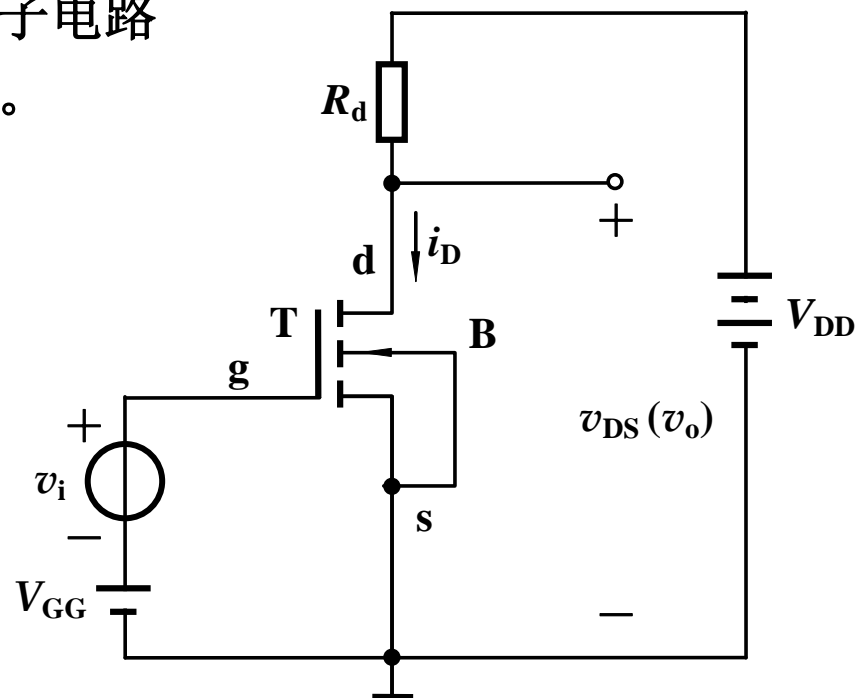
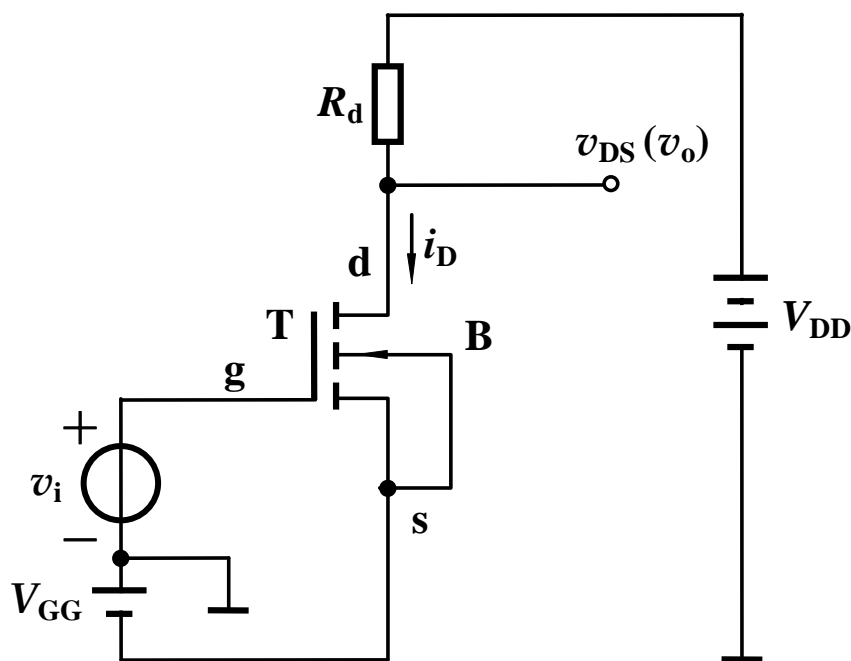
- 信号源和负载对管子的静态工作点无影响
- 信号源和工作电源共地

若信号频率很低，甚至近似直流时，则不能用电容隔直，只能用直接耦合方式。

## 4.2.4 其它共源放大电路

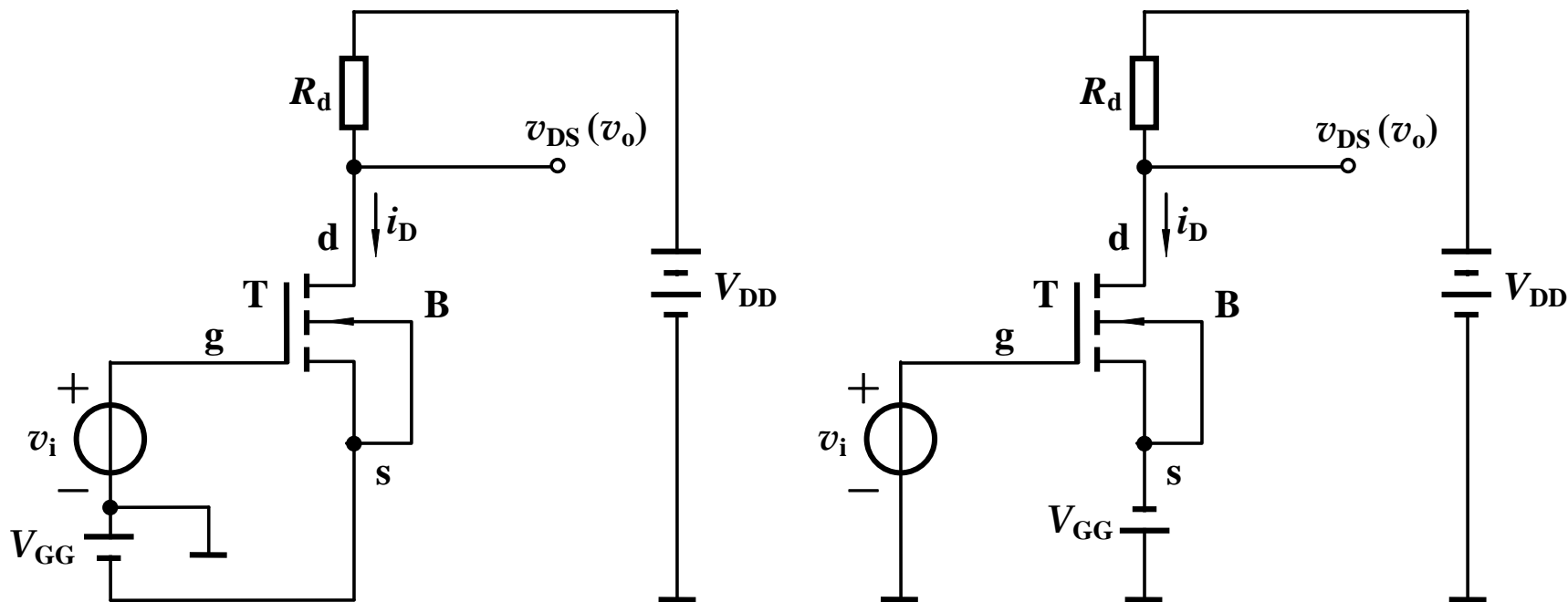
### 6. 直接耦合放大电路中电源、信号源如何“共地”？

为避免和减少干扰，通常要求电子电路中的电源和信号源采用“共地”接法。



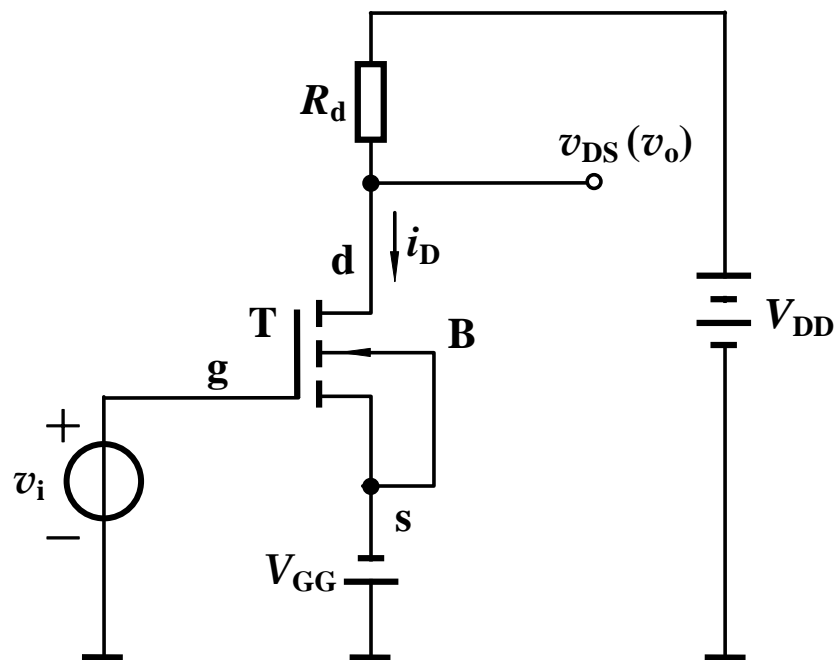
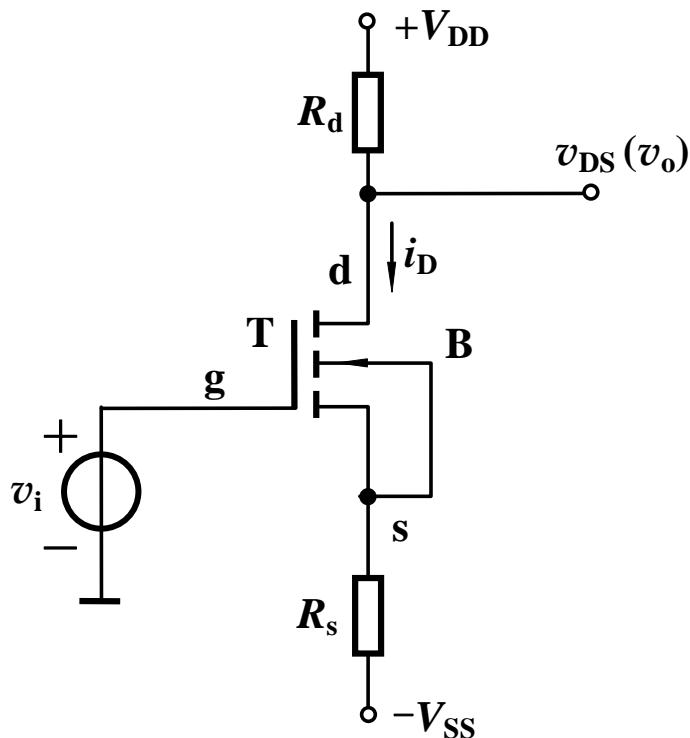
## 4.2.4 其它共源放大电路

### 6. 直接耦合放大电路中电源、信号源如何“共地”？



## 4.2.4 其它共源放大电路

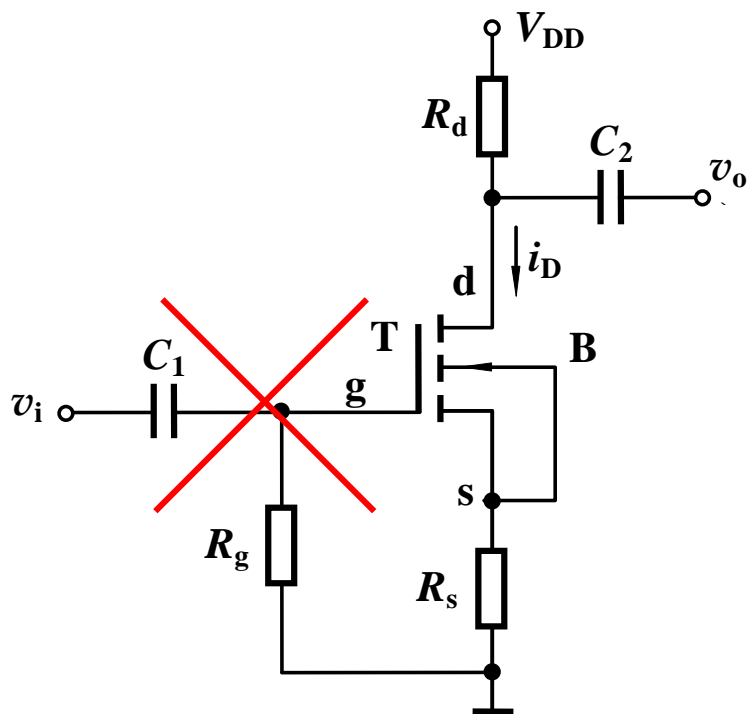
### 6. 直接耦合放大电路中电源、信号源如何“共地”？



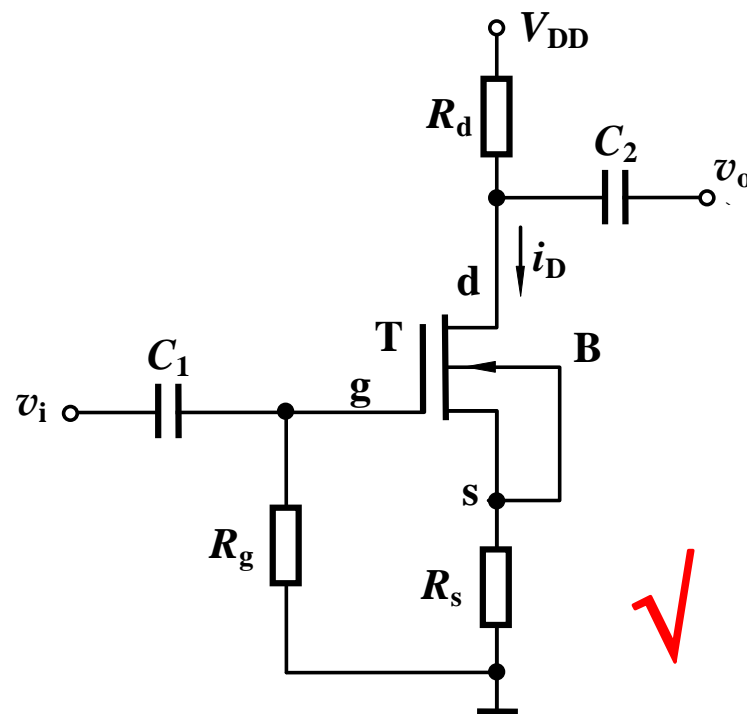
- 信号源和工作电源共地
- 信号源对管子的静态工作点无影响
- 双电源供电

## 4.2.4 其它共源放大电路

### 7. 自偏压共源放大电路



增强型NMOS



耗尽型NMOS

## 4.2.4 其它共源放大电路

### 7. 自偏压共源放大电路

导电沟道已经存在,  $V_{PN} < 0$ , 栅极绝缘。

静态:

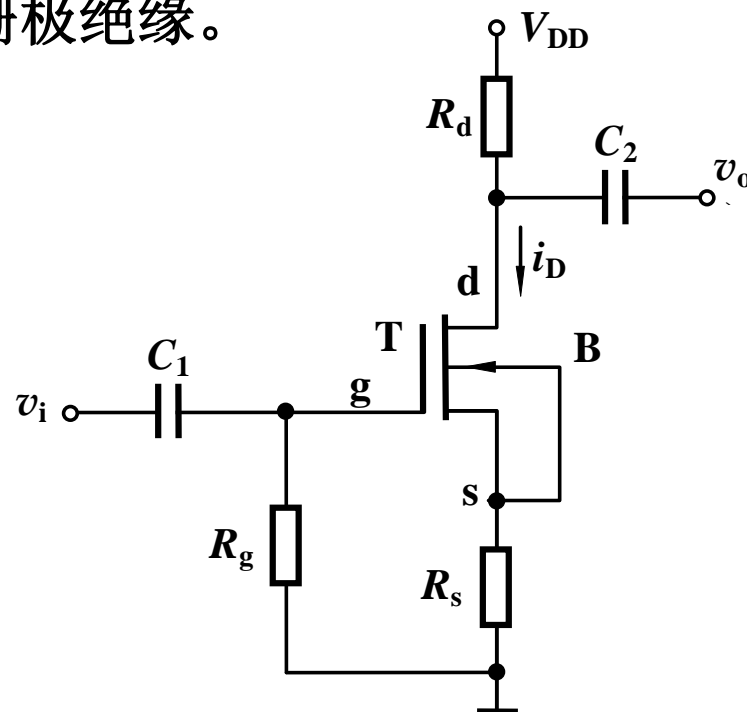
$$V_G = 0 \quad V_S = R_s I_{DQ}$$

$$\begin{cases} V_{GSQ} = V_G - V_S = -R_s I_{DQ} \\ I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{PN})^2 \end{cases}$$

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

已知  $V_{DD}$ 、 $V_{PN}$ 、 $K_n$ 、 $R_d$  和  $R_s$

可求得  $Q$  点:  $V_{GSQ}$ 、 $I_{DQ}$ 、 $V_{DSQ}$



耗尽型NOMS

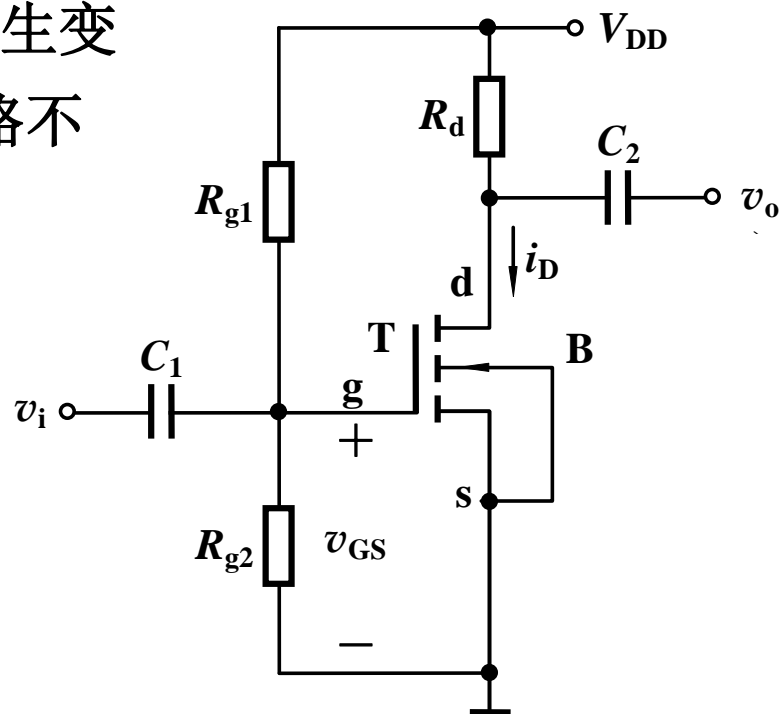
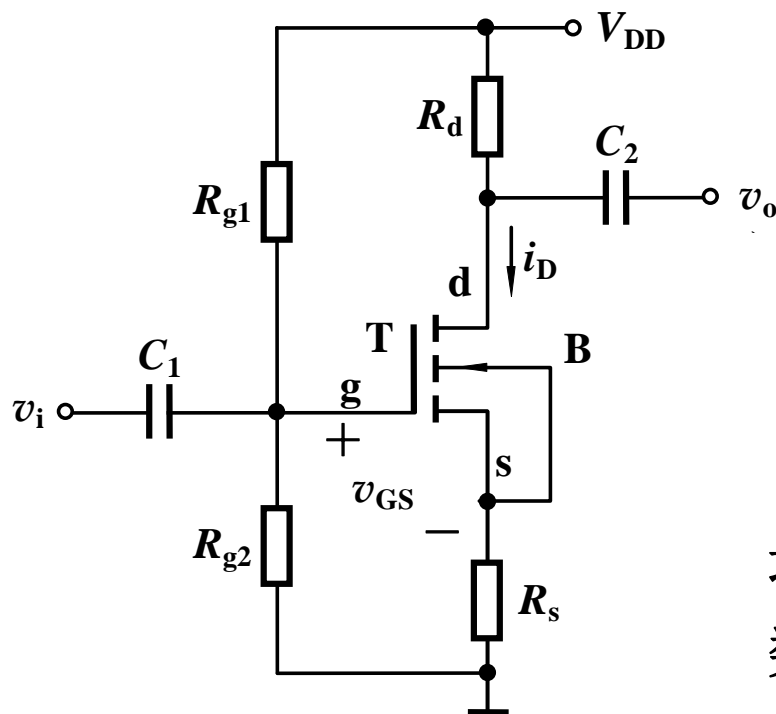
必须检验是否满足饱和区工作条件:  $V_{DSQ} > V_{GSQ} - V_{PN} > 0$ 。



## 4.2.4 其它共源放大电路

### 8. 具有稳定静态工作点作用的放大电路

当FET参数受环境温度影响发生变化时, 将导致 $I_{DQ}$ 变化, 可能使电路不能正常放大信号。



增加源极电阻, 其它电阻参数需做相应调整

## 4.2.4 其它共源放大电路

### 8. 具有稳定静态工作点作用的放大电路

稳定原理

$$V_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD} - I_{DQ} R_s$$

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

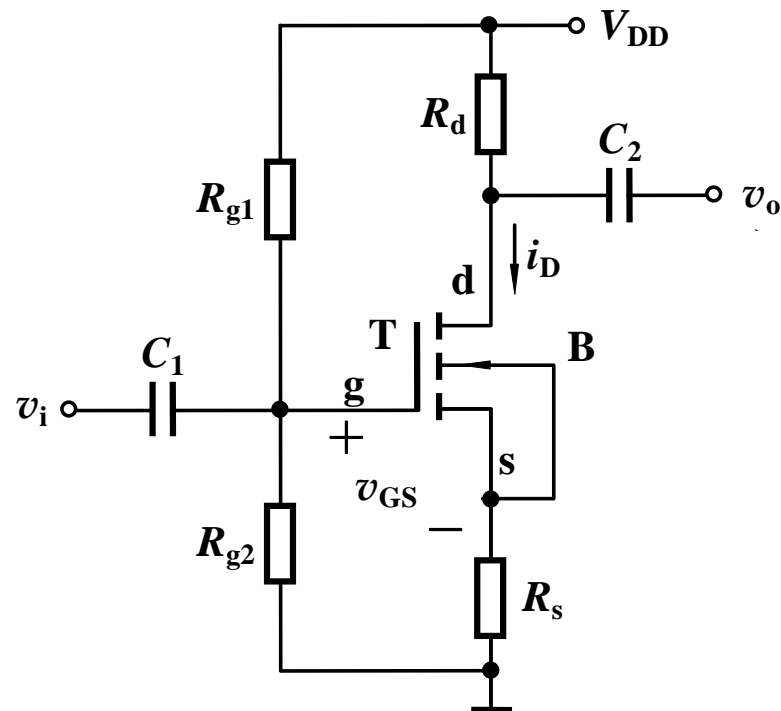
假设温度变化导致  $I_{DQ}$  减小,

电路通过如下过程可以稳定  $I_{DQ}$

$$I_{DQ} \downarrow \rightarrow V_s \downarrow \rightarrow V_{GSQ} \uparrow$$

$$I_{DQ} \uparrow$$

(反馈控制)



## 4 场效应三极管及放大电路

- 4.1 金属-氧化物-半导体（MOS）场效应三极管
- 4.2 MOSFET基本共源极放大电路
- 4.3 图解分析法
- 4.4 小信号模型分析法
- 4.5 共漏极和共栅极放大电路
- 4.7 组合放大电路
- 4.9 各种FET的特性及使用注意事项

## 4.3 图解分析法

### 4.3.1 用图解方法确定静态工作点 $Q$

### 4.3.2 动态工作情况的图解分析

### 4.3.3 图解分析法的适用范围

## 4.3.1 用图解方法确定静态工作点 $Q$

采用图解法分析静态工作点，必须已知FET的输出特性曲线。

静态：  $v_i = 0$

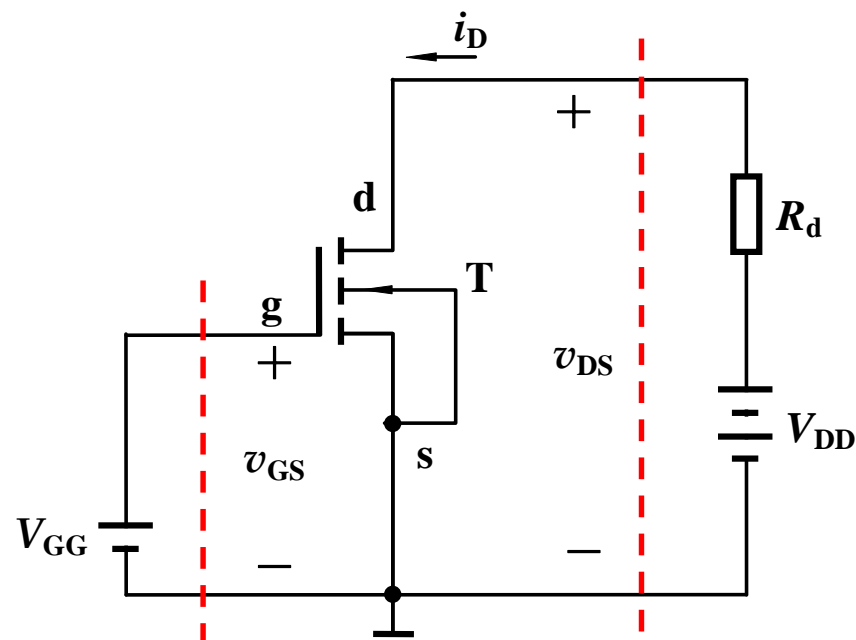
- 输入回路

$$v_{GS} = V_{GG} = V_{GSQ}$$

- 输出回路

$$v_{DS} = V_{DD} - i_D R_d$$

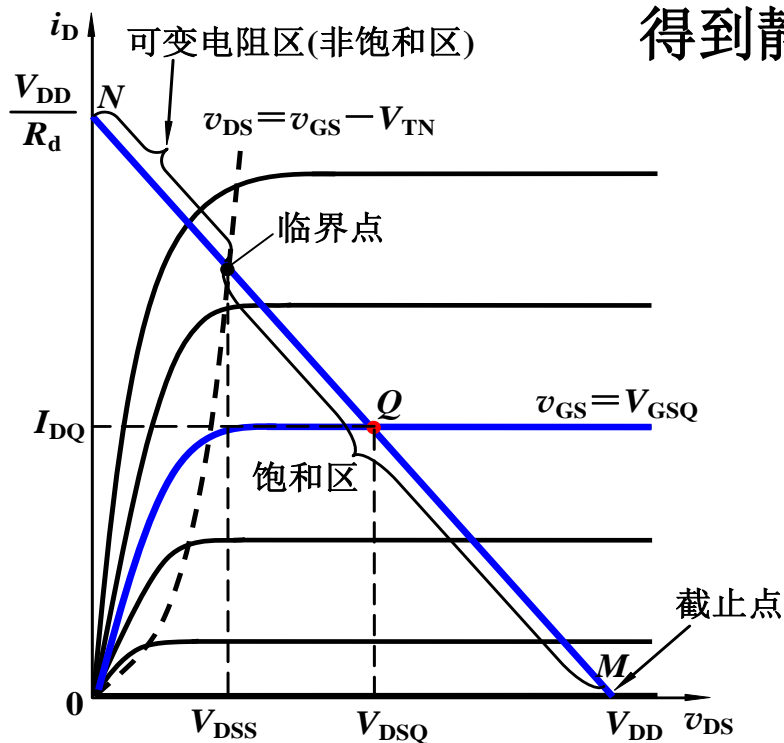
(直流负载线)



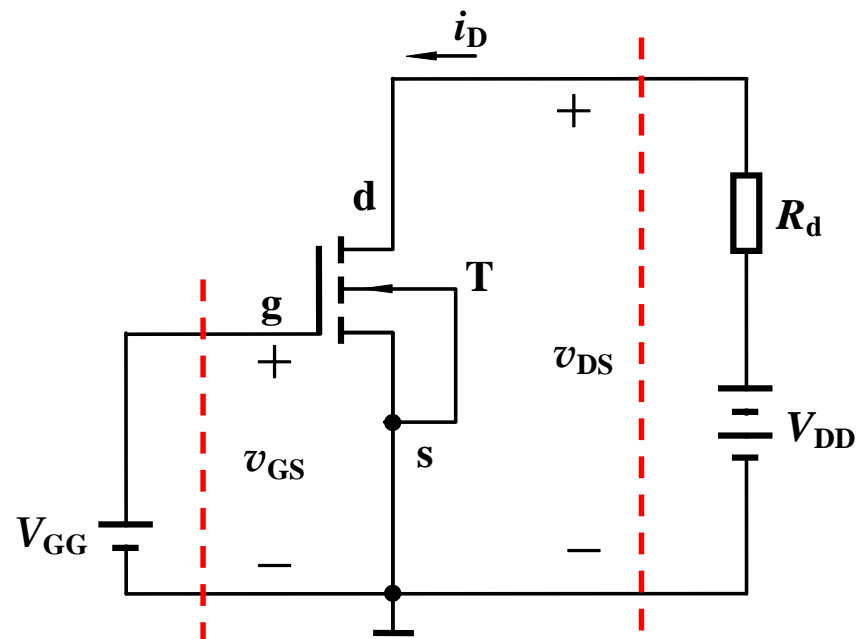
共源放大电路

输出回路左侧的FET端口可用输出特性曲线描述

# 4.3.1 用图解方法确定静态工作点 $Q$



得到静态工作点:  $V_{GSQ}$ 、 $I_{DQ}$ 、 $V_{DSQ}$



$$v_{GS} = V_{GG} = V_{GSQ}$$

$$\text{直流负载线: } v_{DS} = V_{DD} - i_D R_c$$

## 4.3 图解分析法

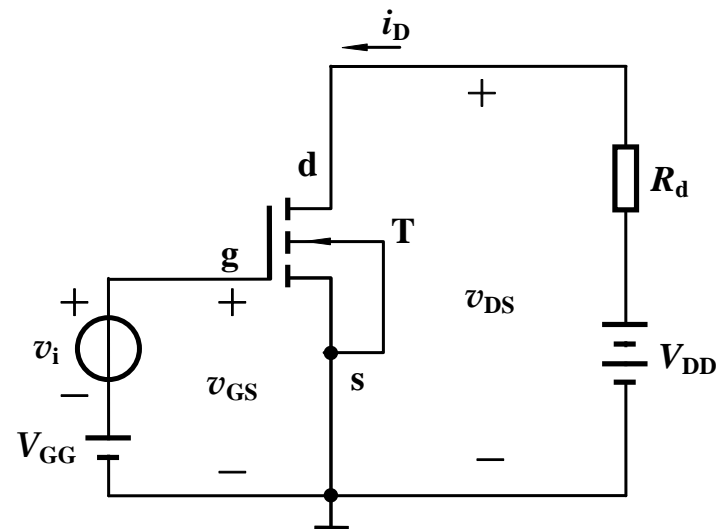
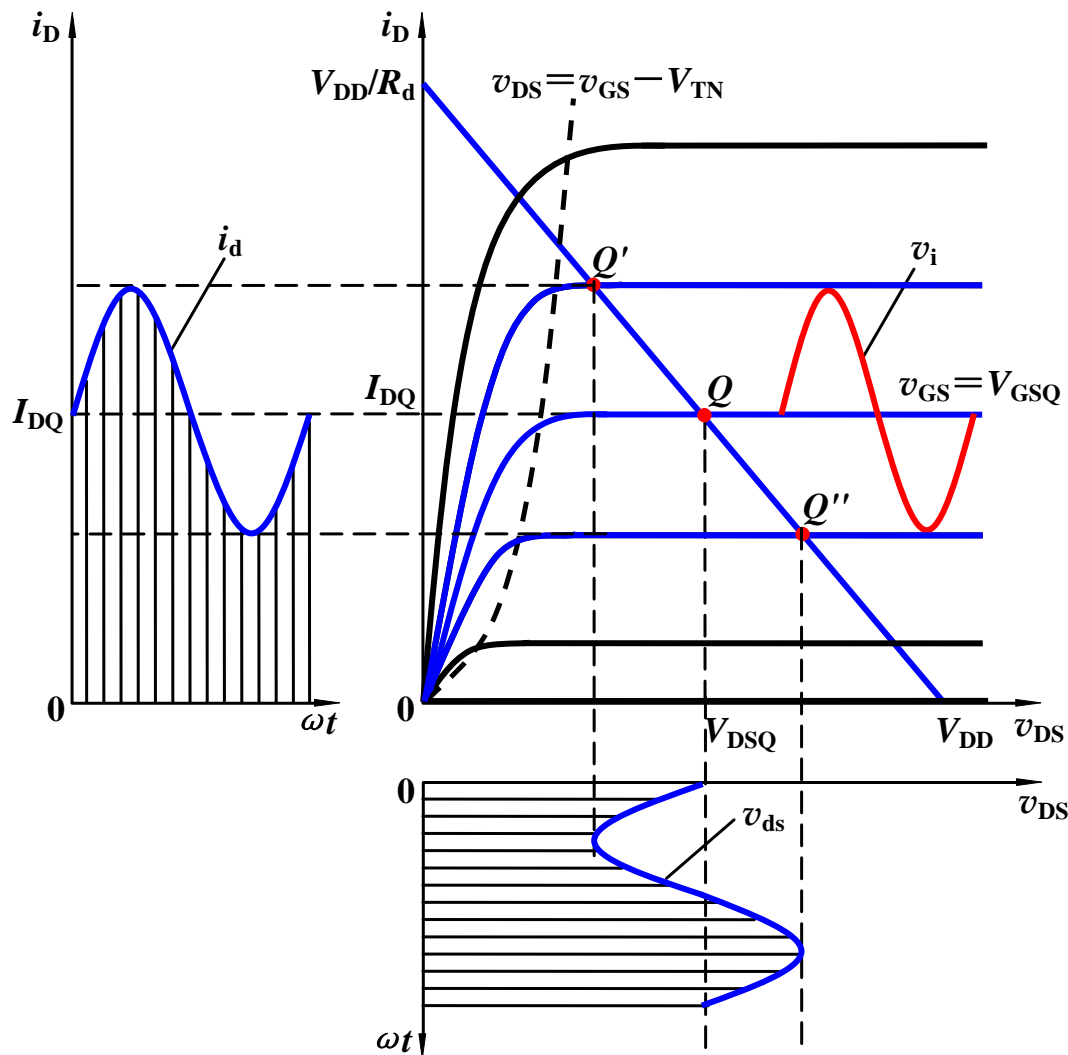
4.3.1 用图解方法确定静态工作点 $Q$

4.3.2 动态工作情况的图解分析

4.3.3 图解分析法的适用范围

## 4.3.2 动态工作情况的图解分析

### 1. 正常工作情况



共源放大电路

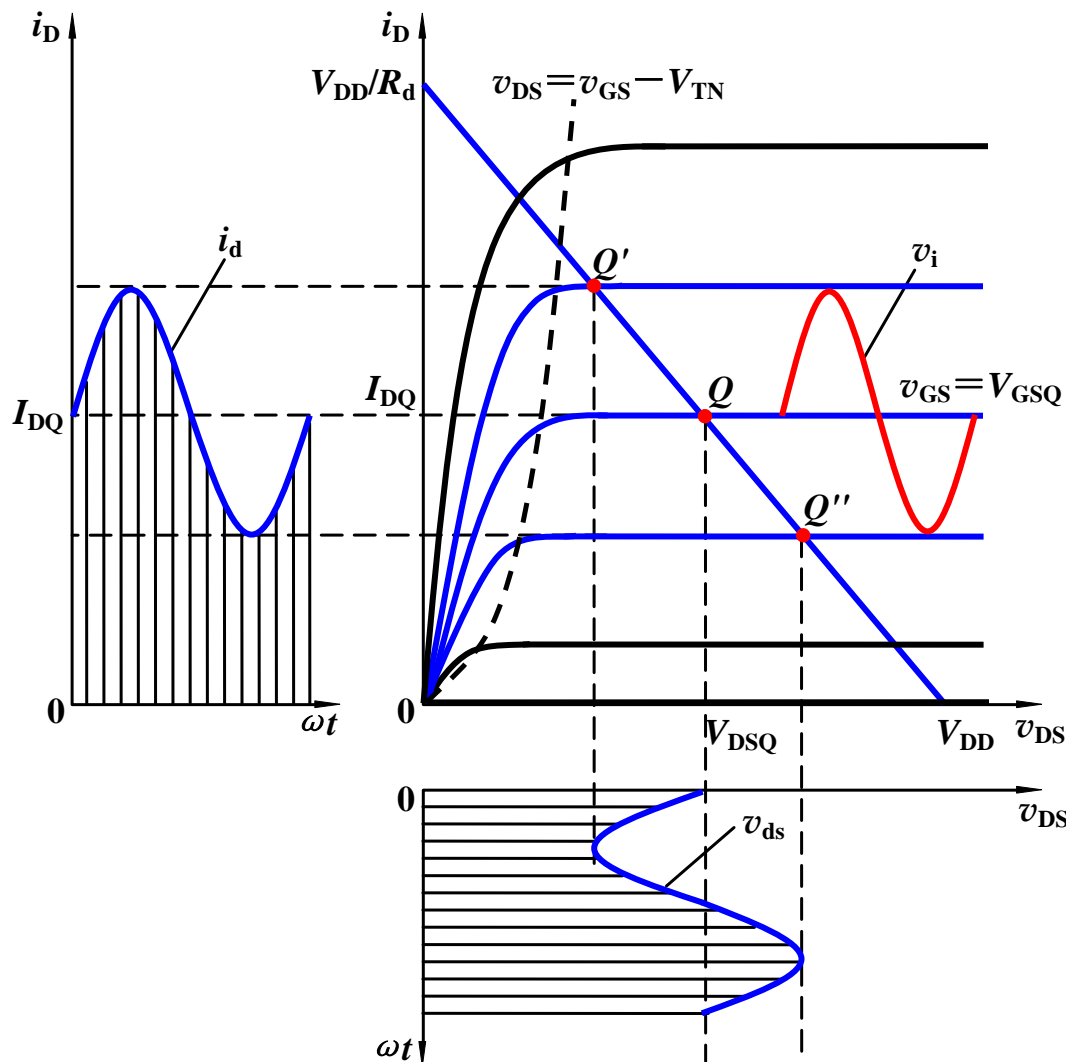
$$v_{GS} = V_{GSQ} + v_i$$

工作点沿负载线移动



## 4.3.2 动态工作情况的图解分析

### 1. 正常工作情况



图解分析可得如下结论:

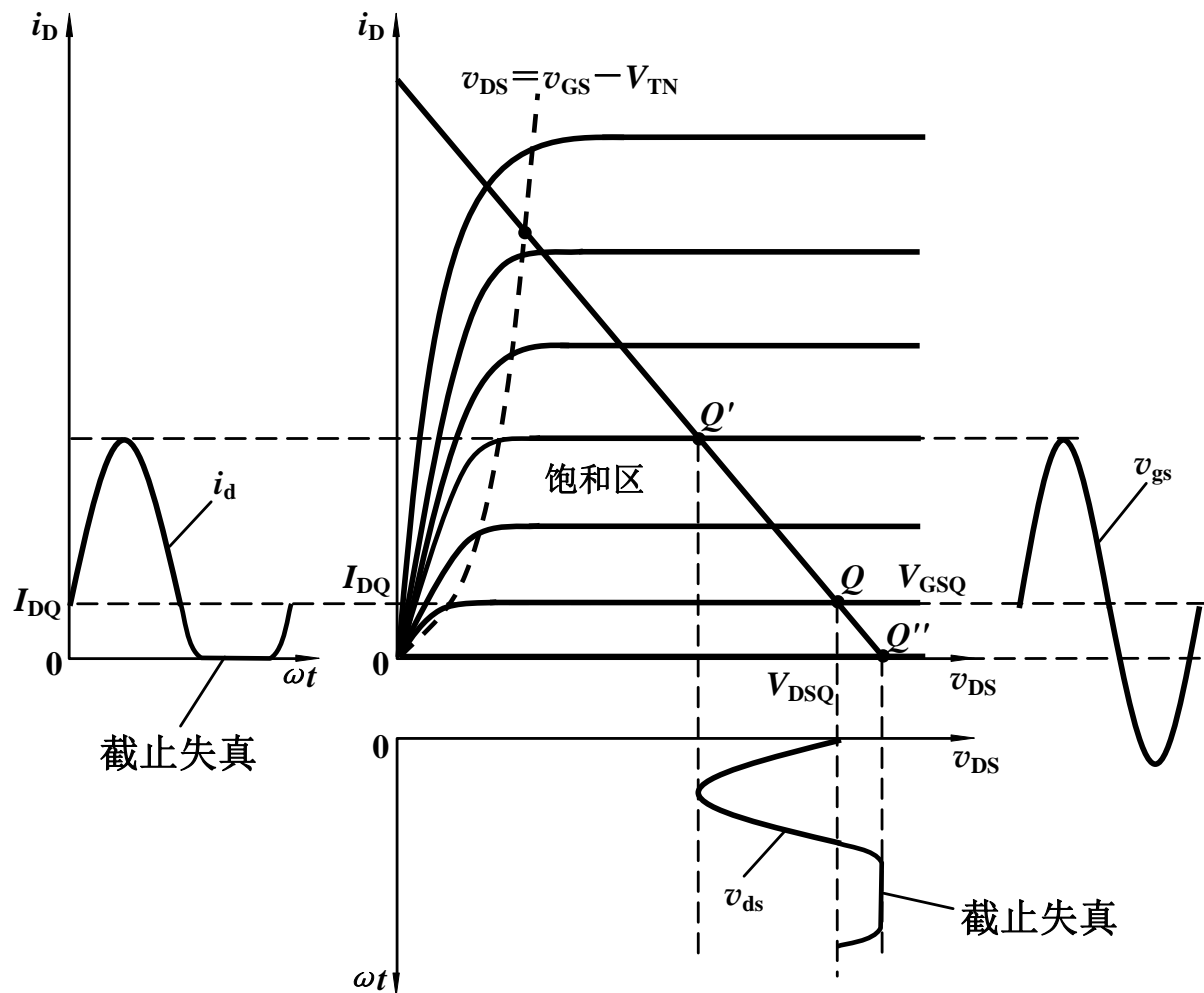
1.  $v_i \uparrow \rightarrow v_{GS} \uparrow \rightarrow i_D \uparrow \rightarrow v_{DS} \downarrow \rightarrow |v_{ds}(v_o)| \uparrow$  ( $v_i$  正半周时)
2.  $v_{ds}$  与  $v_i$  相位相反;
3. 可以测量出放大电路的电压放大倍数;
4. 可以确定最大不失真输出幅度。

# 动态工作时,  $i_D$  的实际电流方向是否改变,  $v_{GS}$ 、 $v_{DS}$  的实际电压极性是否改变?

## 4.3.2 动态工作情况的图解分析

### 2. 静态工作点对波形失真的影响

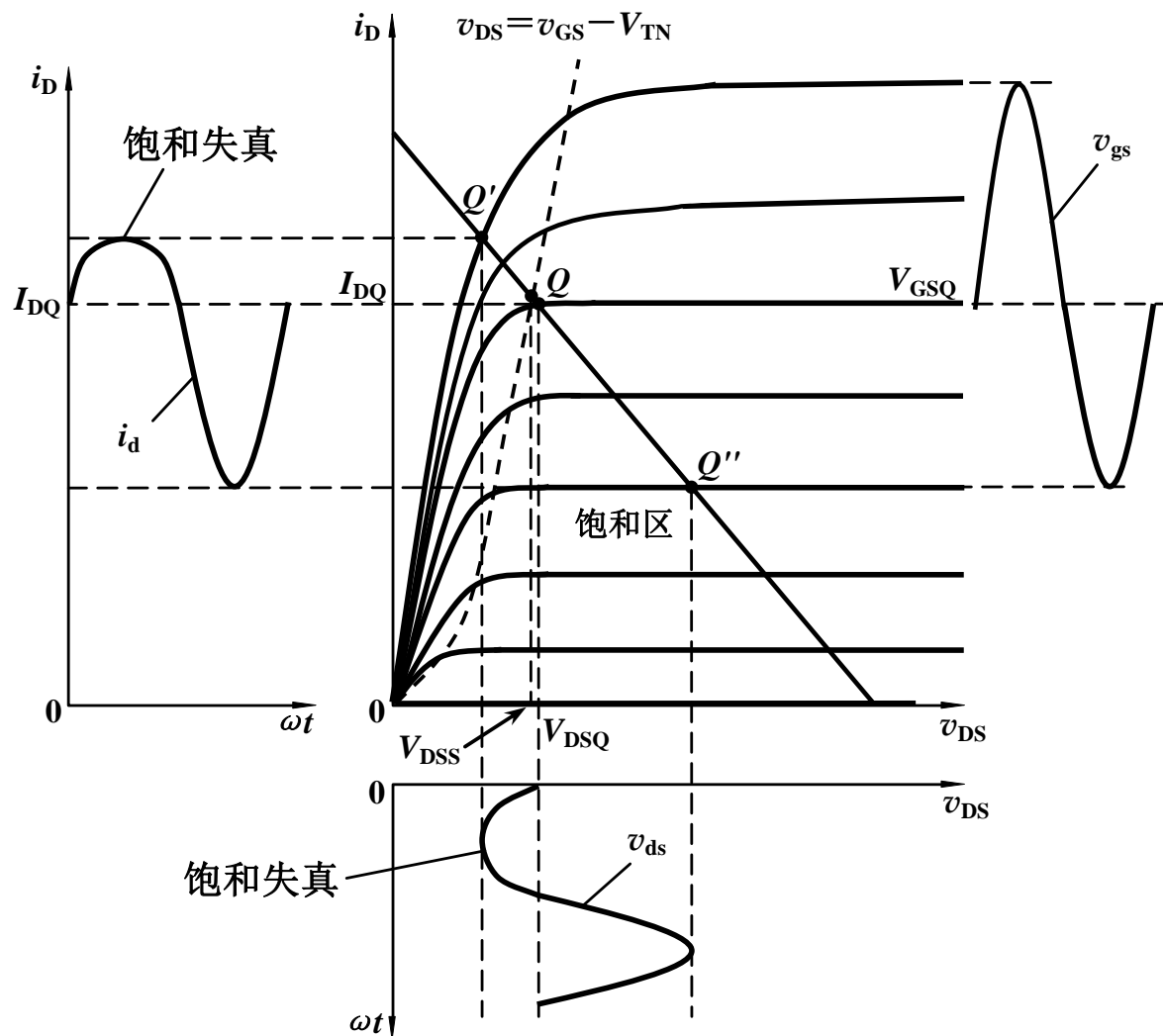
截止失真  
(NMOS)



## 4.3.2 动态工作情况的图解分析

### 2. 静态工作点对波形失真的影响

饱和失真  
(NMOS)



## 4.3 图解分析法

4.3.1 用图解方法确定静态工作点 $Q$

4.3.2 动态工作情况的图解分析

4.3.3 图解分析法的适用范围

## 4.3.3 图解分析法的适用范围

幅度较大而工作频率不太高的情况

优点：

直观、形象。有助于建立和理解交、直流共存，静态和动态等重要概念；有助于理解正确选择电路参数、合理设置静态工作点的重要性。能全面地分析放大电路的静态、动态工作情况。

缺点：

不能分析工作频率较高时的电路工作状态，也不能用来分析放大电路的输入电阻、输出电阻等动态性能指标。

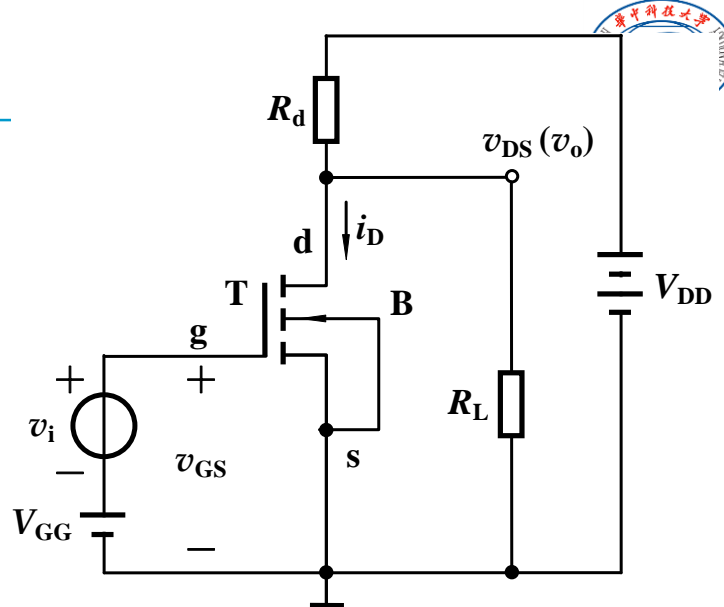
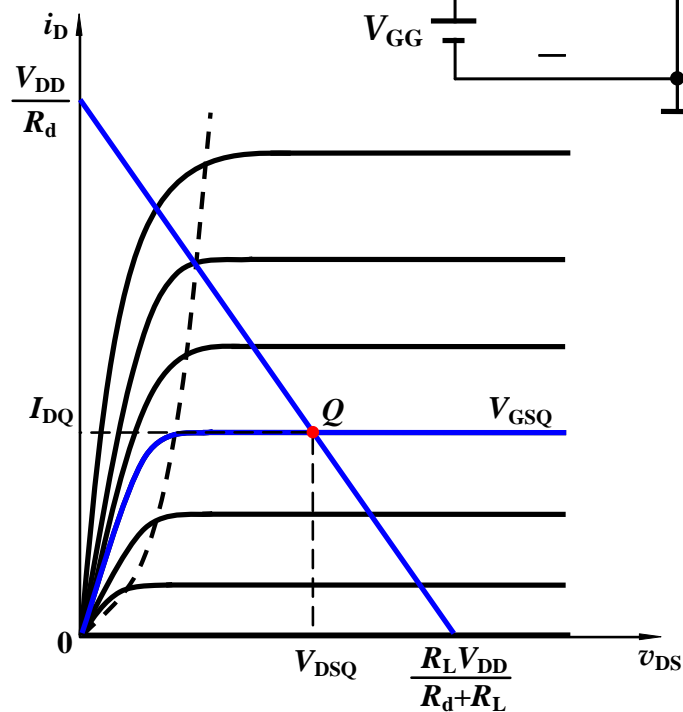
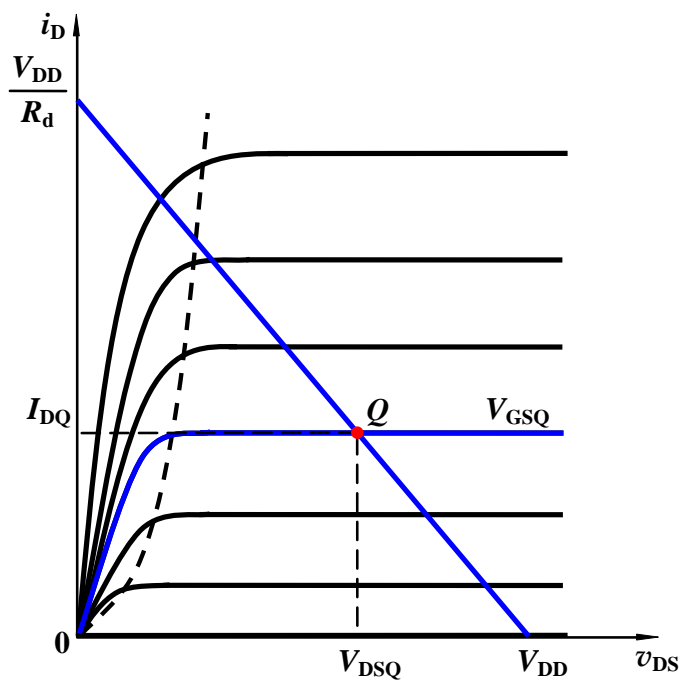


# 思考题

1. 试分析下列问题：

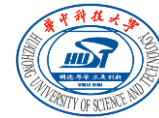
(1) 画出负载线

(2) 接入负载 $R_L$ 时，负载线将如何变化？ $Q$ 点怎样变化？





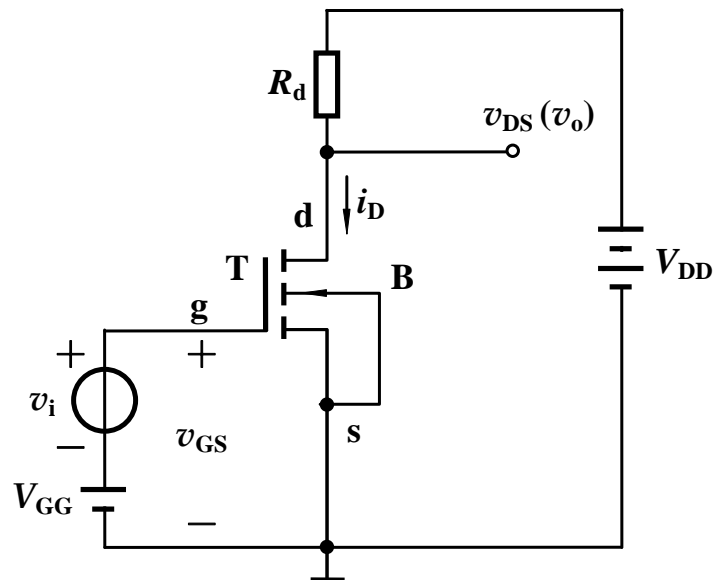
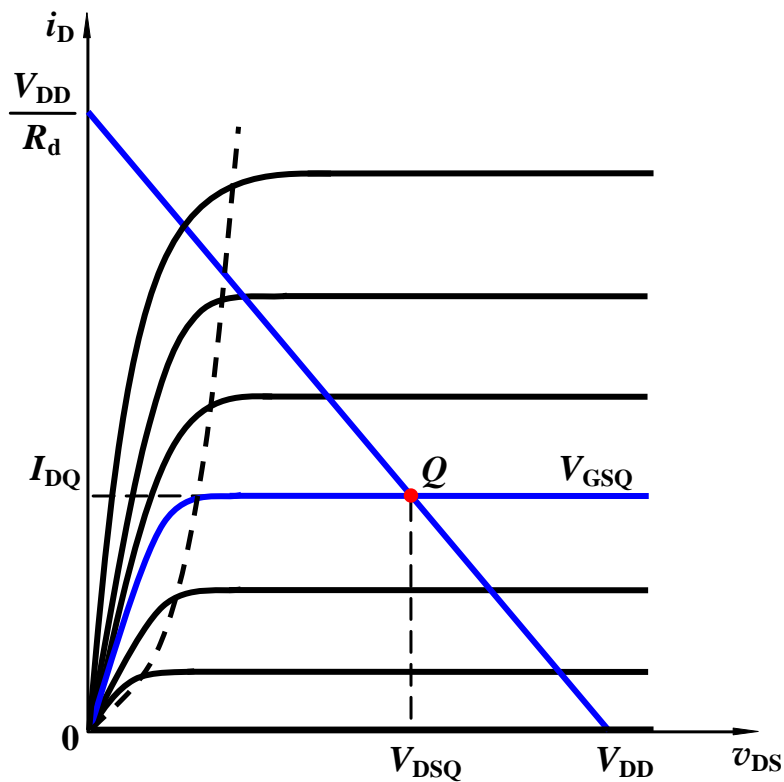
# 思考题



## 2. 试分析下列问题：

(1) 增大 $R_d$ 时，负载线将如何变化？ $Q$ 点怎样变化？

(2) 减小 $V_{DD}$ 时，负载线将如何变化？ $Q$ 点怎样变化？





## 思考题

3. 放大电路如图所示。当测得FET的 $V_{DS}$  接近 $V_{DD}$ 的值时，问管子处于什么工作状态？可能的故障原因有哪些？

答：截止状态

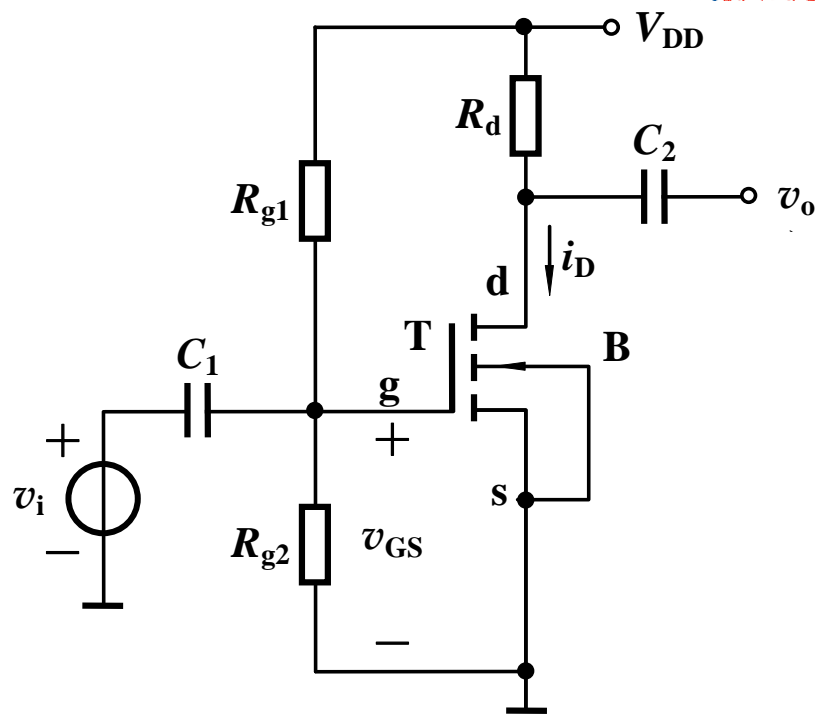
故障原因可能有：

- $R_{g1}$ 支路可能开路

$$v_{GS} = 0 < V_{TN}, \quad I_D = 0, \quad V_{DS} = V_{DD} - I_D R_d = V_{DD}$$

- $C_1$ 可能短路，

$$V_{GS} = 0 < V_{TN}$$



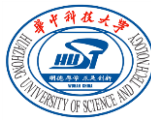
共源放大电路



## 4 场效应三极管及放大电路

- 4.1 金属-氧化物-半导体（MOS）场效应三极管
- 4.2 MOSFET基本共源极放大电路
- 4.3 图解分析法
- 4.4 小信号模型分析法
- 4.5 共漏极和共栅极放大电路
- 4.7 组合放大电路
- 4.9 各种FET的特性及使用注意事项

# 4.4 小信号模型分析法



## 4.4.1 MOSFET的小信号模型

## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路

## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

## 4.4.4 小信号模型分析法的适用范围

## 4.4.1 MOSFET的小信号模型

### 建立小信号模型的意义

由于场效应管是非线性器件，所以分析起来非常复杂。建立小信号模型，就是在特定条件下将非线性器件做线性化近似处理，从而简化由其构成的放大电路的分析和设计。

### 建立小信号模型的思路

当放大电路的输入信号幅值较小时，就可以把三极管小范围内的特性曲线近似地用直线来代替，从而可以把三极管这个非线性器件所组成的电路当作线性电路来处理。

# 4.4.1 MOSFET的小信号模型

## 1. $\lambda=0$ 时

(以增强型NMOS管为例)

在饱和区内有

$$\begin{aligned}
 i_D &= K_n (v_{GS} - V_T)^2 \\
 &= K_n (V_{GSQ} + v_{gs} - V_T)^2 \\
 &= K_n [(V_{GSQ} - V_T) + v_{gs}]^2 \\
 &= K_n (V_{GSQ} - V_T)^2 + 2K_n (V_{GSQ} - V_T)v_{gs} + K_n v_{gs}^2 \\
 &= I_{DQ} + g_m v_{gs} + K_n v_{gs}^2
 \end{aligned}$$

静态值  
(直流)

动态值  
(交流)

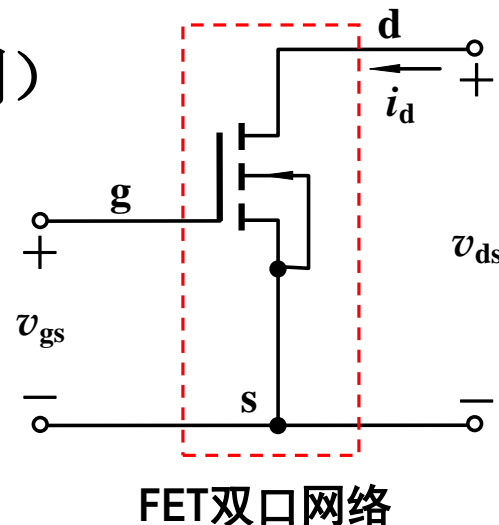
非线性失真项

其中

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

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

$$i_D \approx I_{DQ} + g_m v_{gs} = I_{DQ} + i_d$$



# 4.4.1 MOSFET的小信号模型

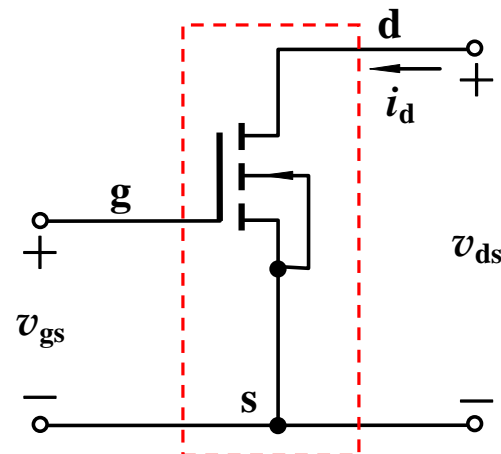
## 1. $\lambda=0$ 时

$$i_D = I_{DQ} + g_m v_{gs} = I_{DQ} + i_d$$

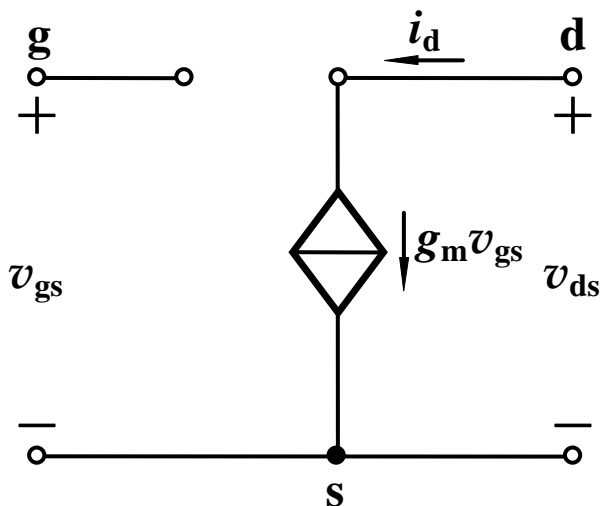
纯交流

$$i_d = g_m v_{gs}$$

电路模型



FET双口网络



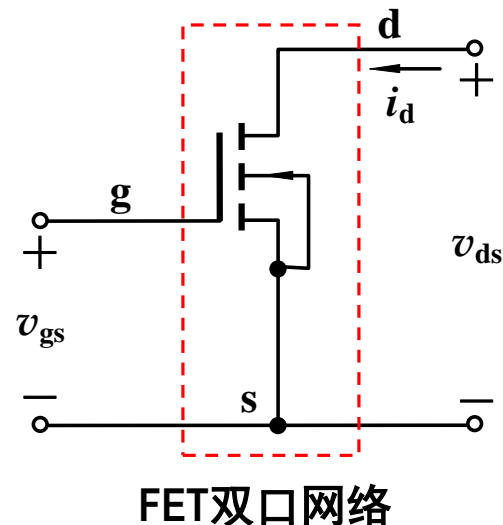
- $g_m v_{gs}$  是受控源，且为电压控制电流源(VCCS)。
- 电流方向与  $v_{gs}$  的极性是关联的。

# 4.4.1 MOSFET的小信号模型

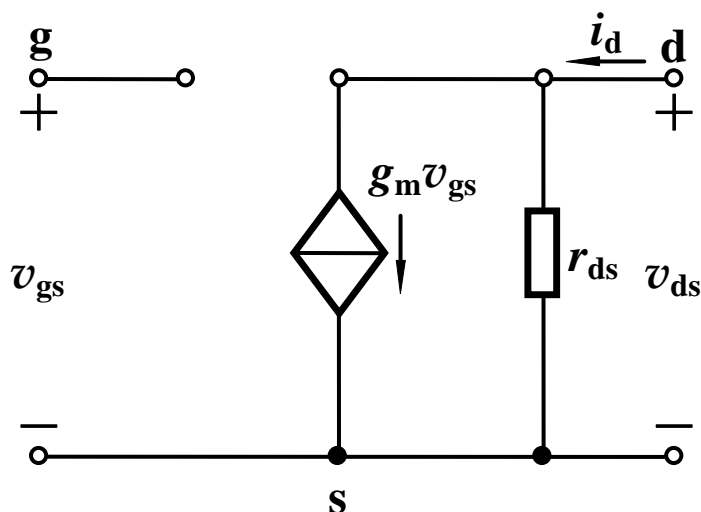
## 2. $\lambda \neq 0$ 时

d、s端口看入有一电阻 $r_{ds}$

$$r_{ds} = \left. \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D} \right|_{V_{GSQ}} = \frac{1}{\lambda K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2} \approx \frac{1}{\lambda I_{DQ}} = \frac{V_A}{I_{DQ}}$$



电路模型



# 4.4.1 MOSFET的小信号模型

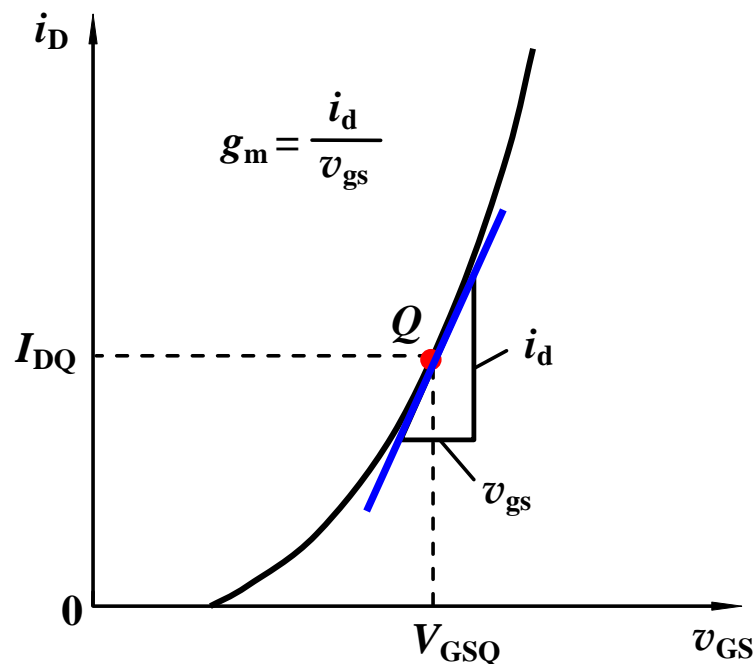
## 3. 参数的物理意义

$g_m$ ——低频互导

$$g_m = \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{GS}} \right|_{V_{DSQ}}$$

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

转移特性曲线 $Q$ 点  
上切线的斜率



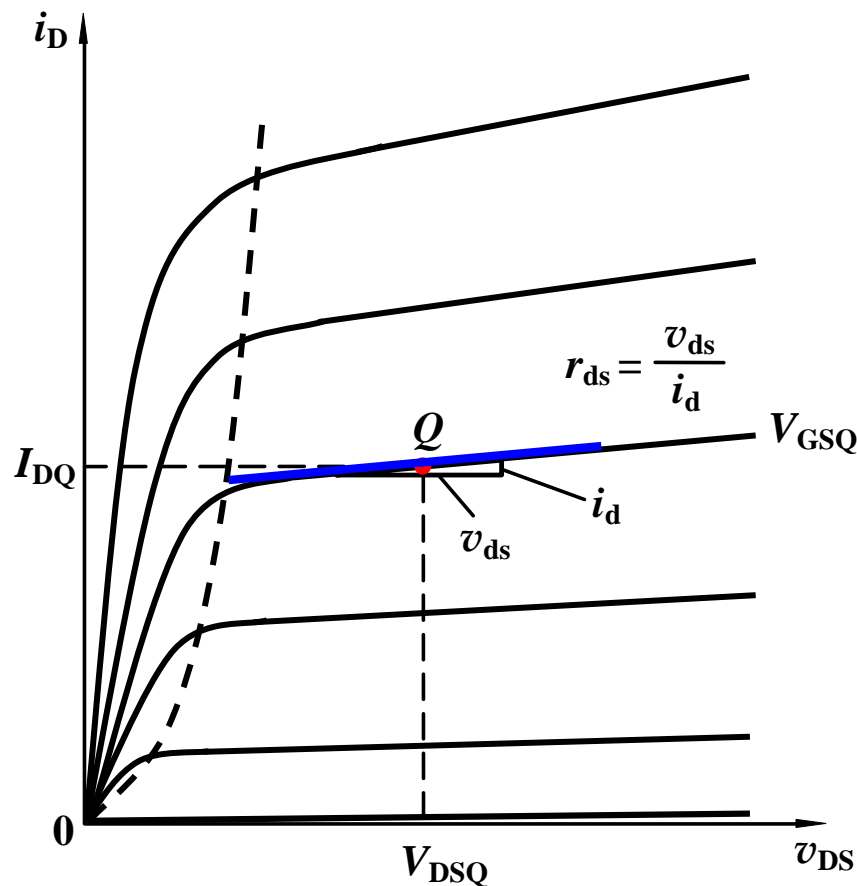
## 4.4.1 MOSFET的小信号模型

### 3. 参数的物理意义

$r_{ds}$  —— 输出电阻

$$\begin{aligned} r_{ds} &= \left. \frac{\partial v_{DS}}{\partial i_D} \right|_{V_{GSQ}} \\ &= \frac{1}{\lambda K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2} \\ &\approx \frac{1}{\lambda I_{DQ}} = \frac{V_A}{I_{DQ}} \end{aligned}$$

输出特性曲线 $Q$ 点  
上切线斜率的倒数





# 4.4.1 MOSFET的小信号模型

## 4. 模型应用的前提条件

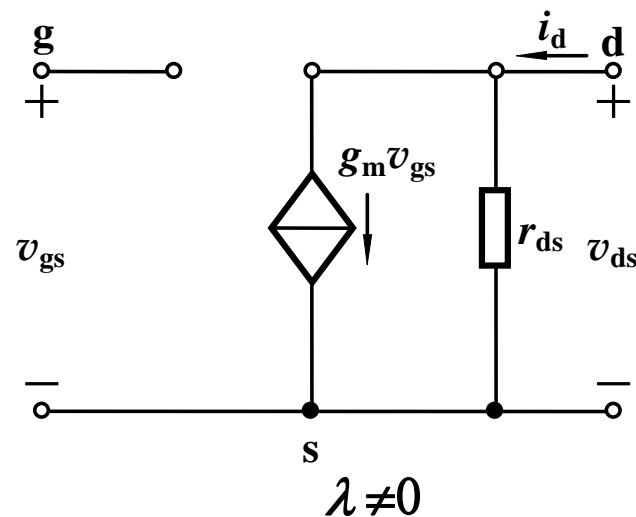
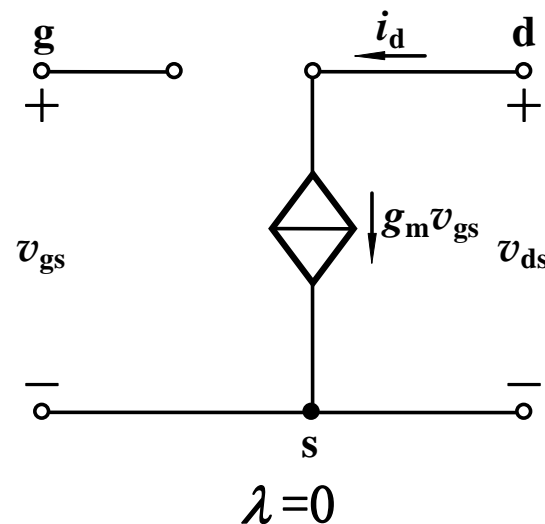
$$v_{gs} \ll 2(V_{GSQ} - V_{TN})$$

### • 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。



# 4.4.1 MOSFET的小信号模型

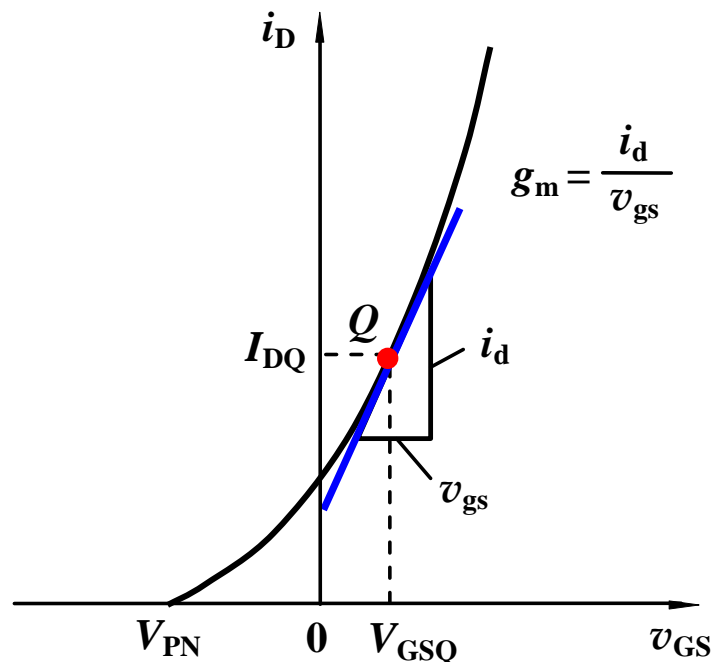
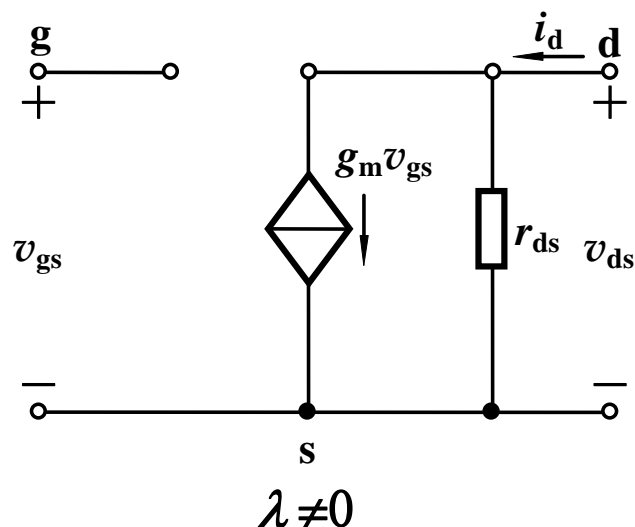
## 5. 其它管型

模型相同，参数类似

### ● 耗尽型NMOS管

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

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



# 4.4.1 MOSFET的小信号模型

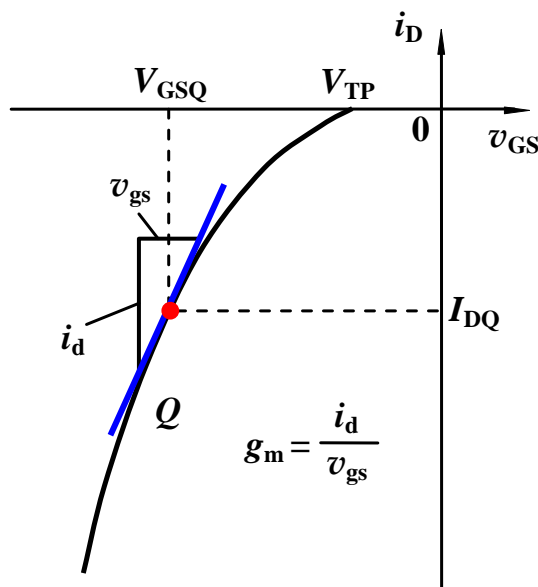
## 5. 其它管型

模型相同，参数类似

### ● 增强型PMOS管

$$g_m = 2K_p(V_{TP} - V_{GSQ})$$

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

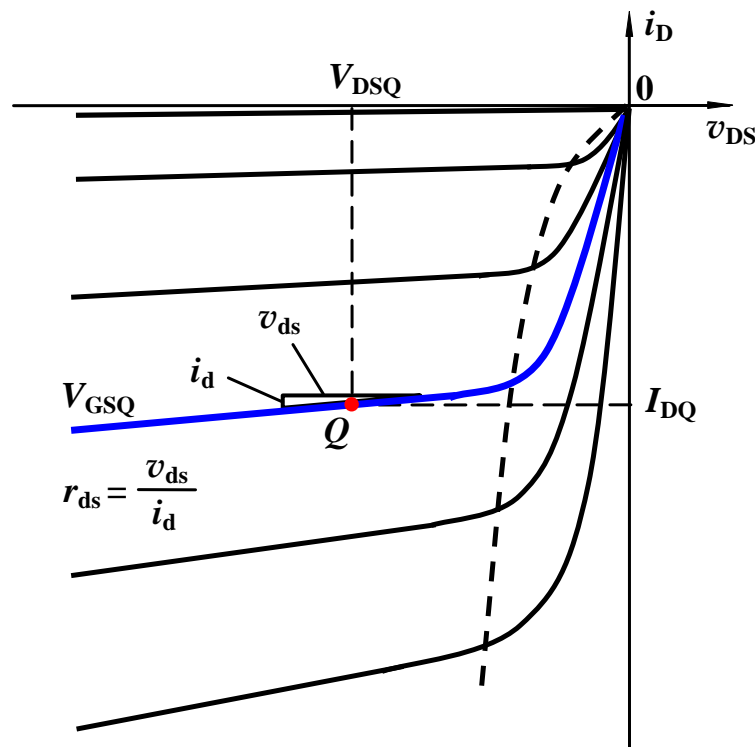


### ● 耗尽型PMOS管

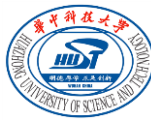
$g_m$ 始终为正数

$$g_m = 2K_p(V_{PP} - V_{GSQ})$$

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



# 4.4 小信号模型分析法



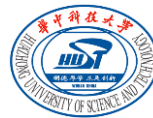
## 4.4.1 MOSFET的小信号模型

## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路

## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

## 4.4.4 小信号模型分析法的适用范围

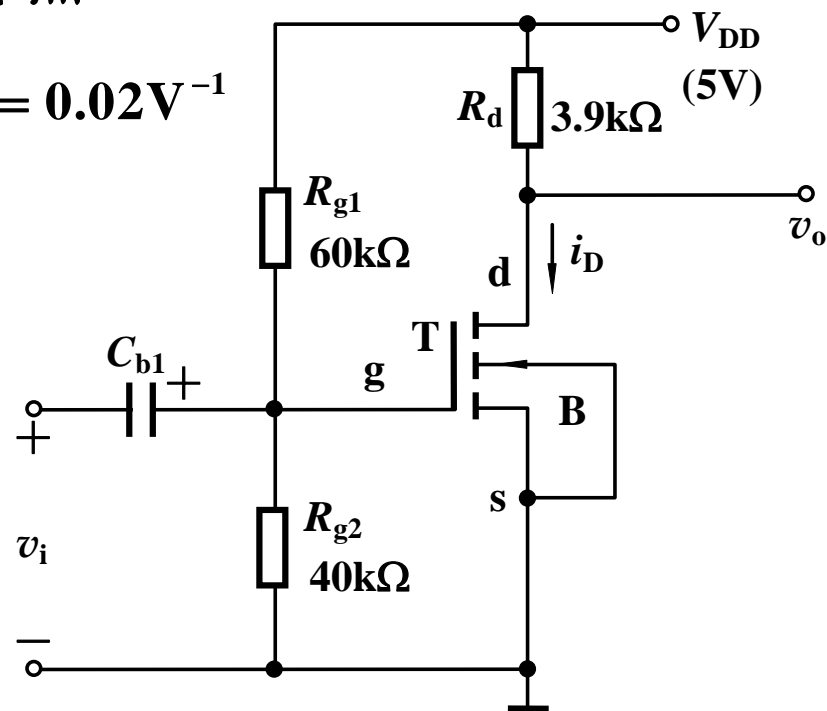
## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路



由于小信号模型的参数是建立在静态工作点基础上的，所以分析时必须先求出电路的静态工作点

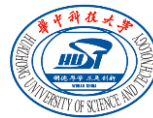
例4.4.1  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA / V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

试确定电路的静态值，求MOS管工作于饱和区的小信号电压增益  $A_v$ 、输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$ 。



共源放大电路

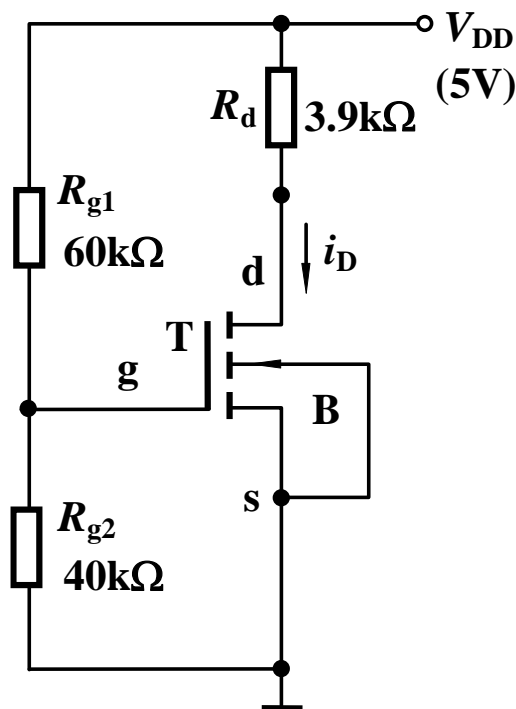
## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路



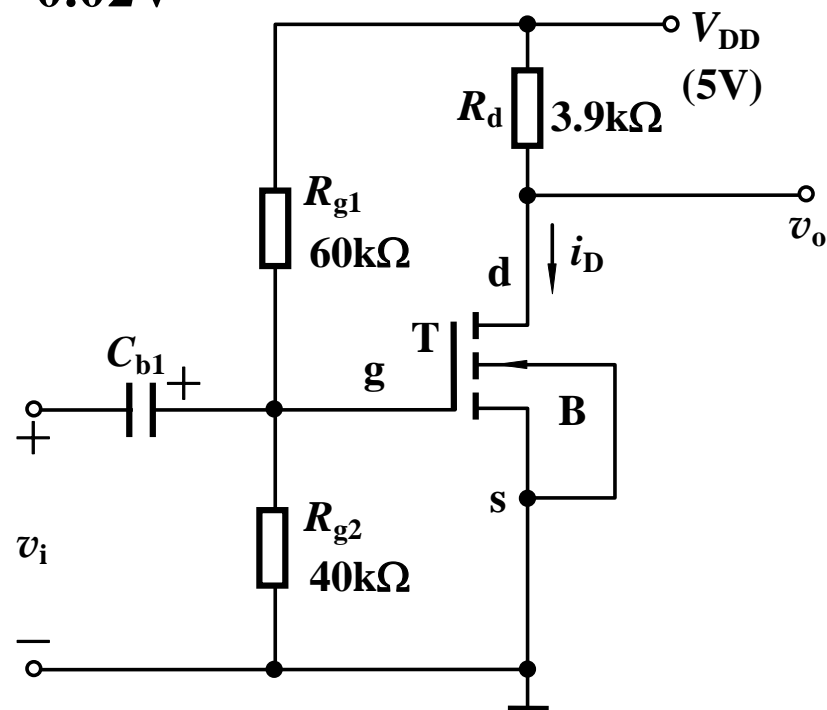
**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA / V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

解：（1）静态工作点

- 增强型？耗尽型？
- 栅源加什么极性偏置电压？

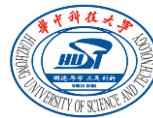


直流通路



- Q点包含哪几个电量？

## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路



**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA / V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

解：（1）静态工作点

$$V_{GSQ} = \left( \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \right) V_{DD} = \frac{40}{60 + 40} \times 5V = 2V$$

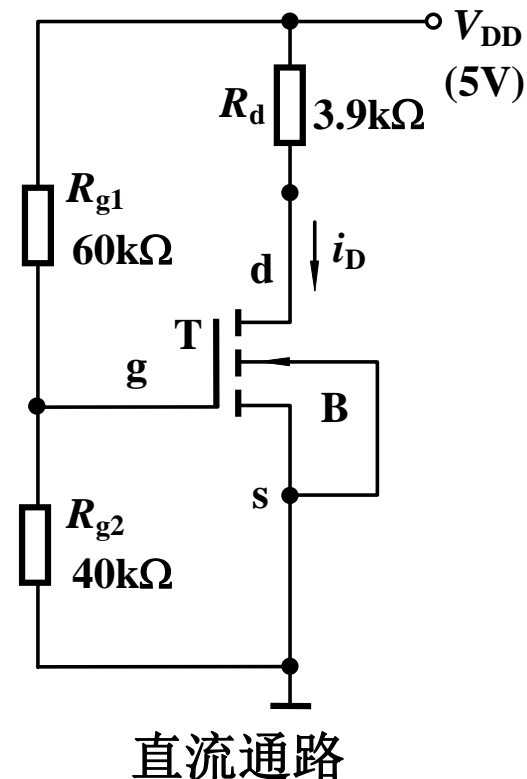
假设工作在饱和区

$$I_{DQ} = K_n (V_{GS} - V_{TN})^2 = (0.8)(2 - 1)^2 mA = 0.8mA$$

$$V_{DSQ} = V_{DD} - I_D R_d = [5 - (0.8)(3.9)]V = 1.88V$$

满足  $V_{DSQ} > (V_{GSQ} - V_{TN})$

假设成立，结果即为所求。



## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路

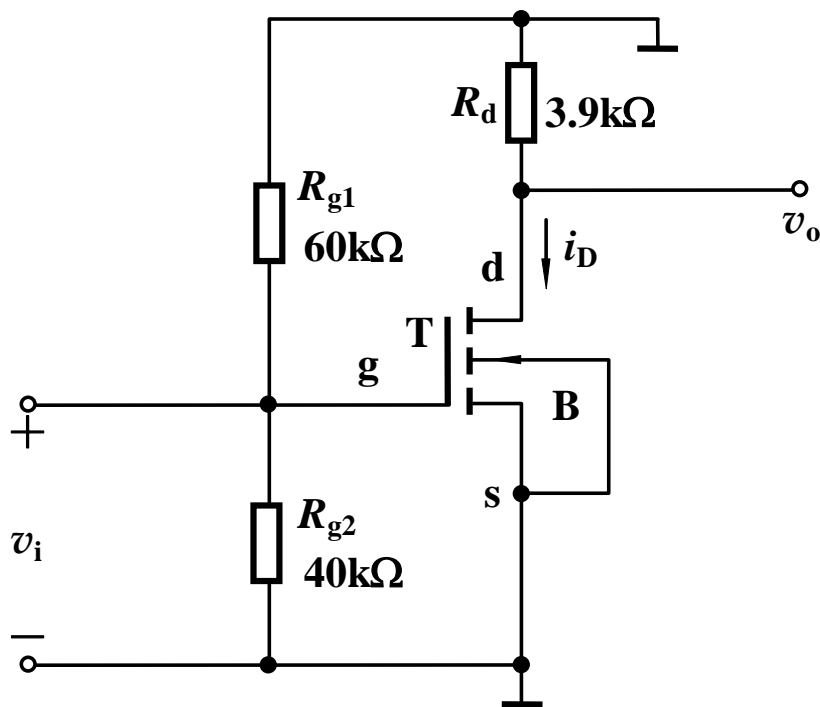


**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA / V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

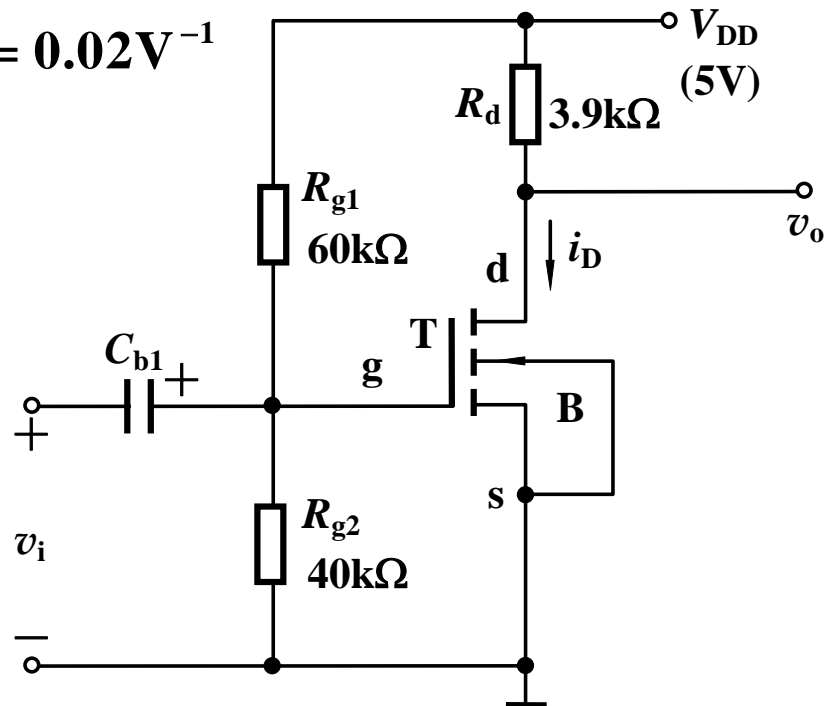
解：（2）动态指标

小信号等效电路

电容和直流电压源对交流相当于短路

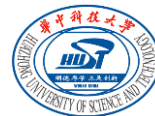


交流通路





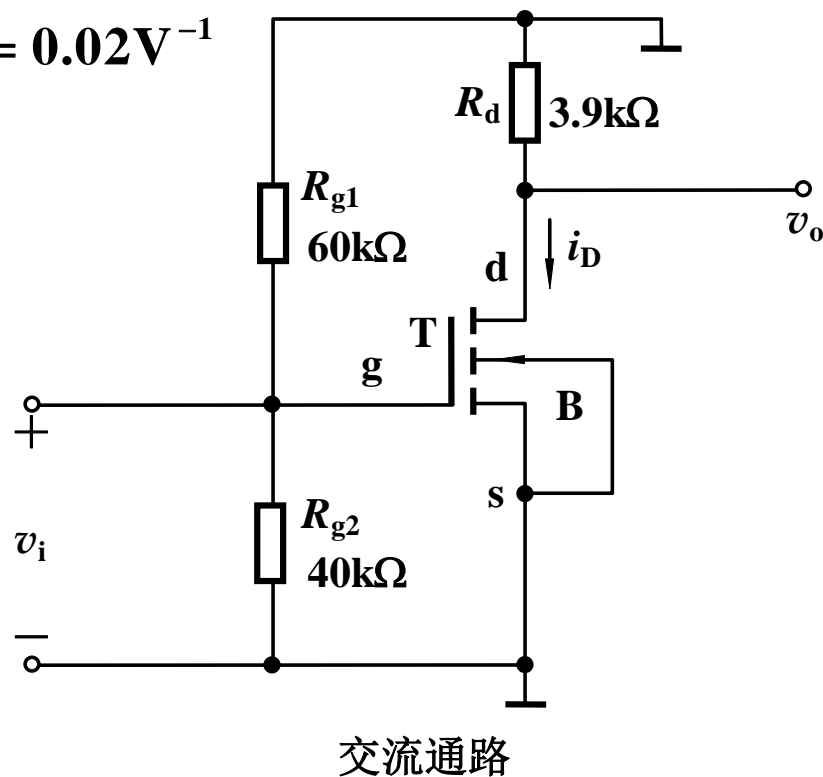
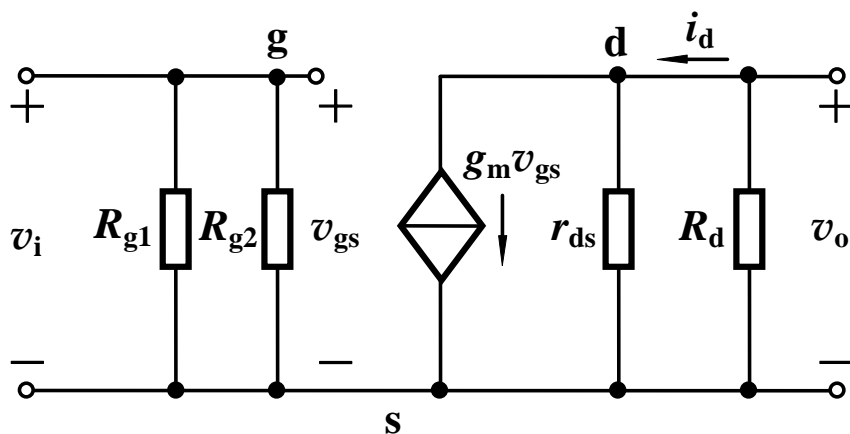
## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路



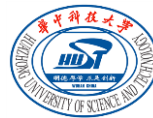
**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA / V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

解：（2）动态指标

小信号等效电路



## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路



**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA / V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

解：（2）动态指标

模型参数  $V_{GSQ} = 2V$

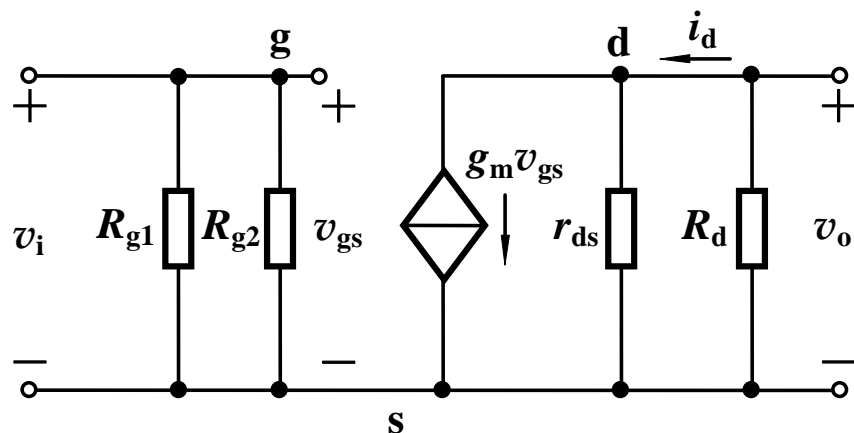
$$\begin{aligned} g_m &= 2K_n(V_{GSQ} - V_{TN}) \\ &= 2 \times 0.8 \times (2 - 1) mA / V \\ &= 1.6 mA / V \end{aligned}$$

$$r_{ds} = \frac{1}{\lambda K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2} = \frac{1}{0.02 \times 0.8 \times (2 - 1)^2} = 62.5 k\Omega$$

电压增益  $v_i = v_{gs}$   $v_o = -g_m v_{gs} (r_{ds} \parallel R_d)$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m v_{gs} (r_{ds} \parallel R_d)}{v_{gs}} = -g_m (r_{ds} \parallel R_d) \approx -g_m R_d = -6.24$$

$A_v = -g_m (r_{ds} \parallel R_d)$  经常当作公式使用



## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路



**例1**  $V_{TN}=1V$   $K_n = 0.8mA / V^2$   $\lambda = 0.02V^{-1}$

解：（2）动态指标

输入电阻

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_{gs1} \parallel R_{gs2} = 24 \text{ k}\Omega$$

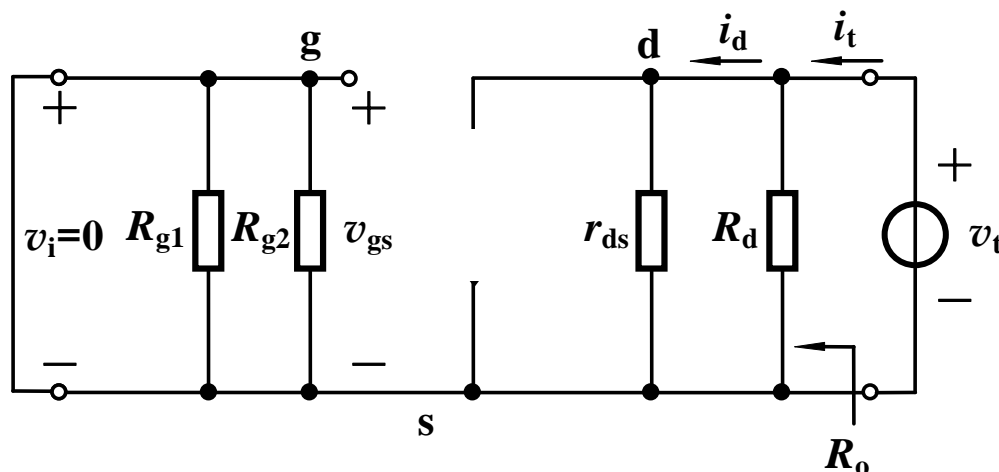
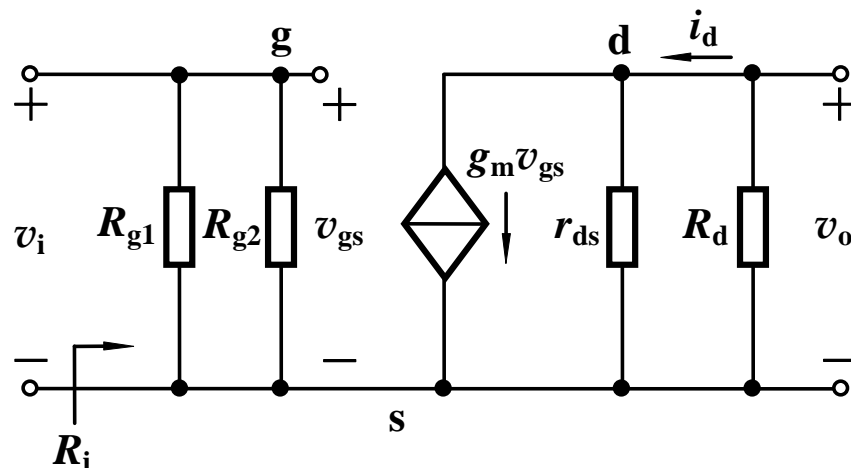
受静态偏置电路的影响，  
栅极绝缘的特性并未充分表现  
出来

输出电阻

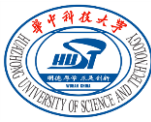
$$v_{gs} = 0$$

$$R_o = \frac{v_t}{i_t} = r_{ds} \parallel R_d \approx R_d$$

$$= 3.9 \text{ k}\Omega$$



# 4.4 小信号模型分析法



## 4.4.1 MOSFET的小信号模型

## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路

## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

## 4.4.4 小信号模型分析法的适用范围

## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

例2  $V_{TN}=1V$ ,  $K_n=0.5mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ ,  
 $V_{DD}=V_{SS}=5V$ ,  $R_d=10k\Omega$ ,  $R_s=0.5k\Omega$ ,  
 $R_{si}=4k\Omega$ ,  $R_{g1}=150k\Omega$ ,  $R_{g2}=47k\Omega$ , 确  
 定静态工作点, 求动态指标。

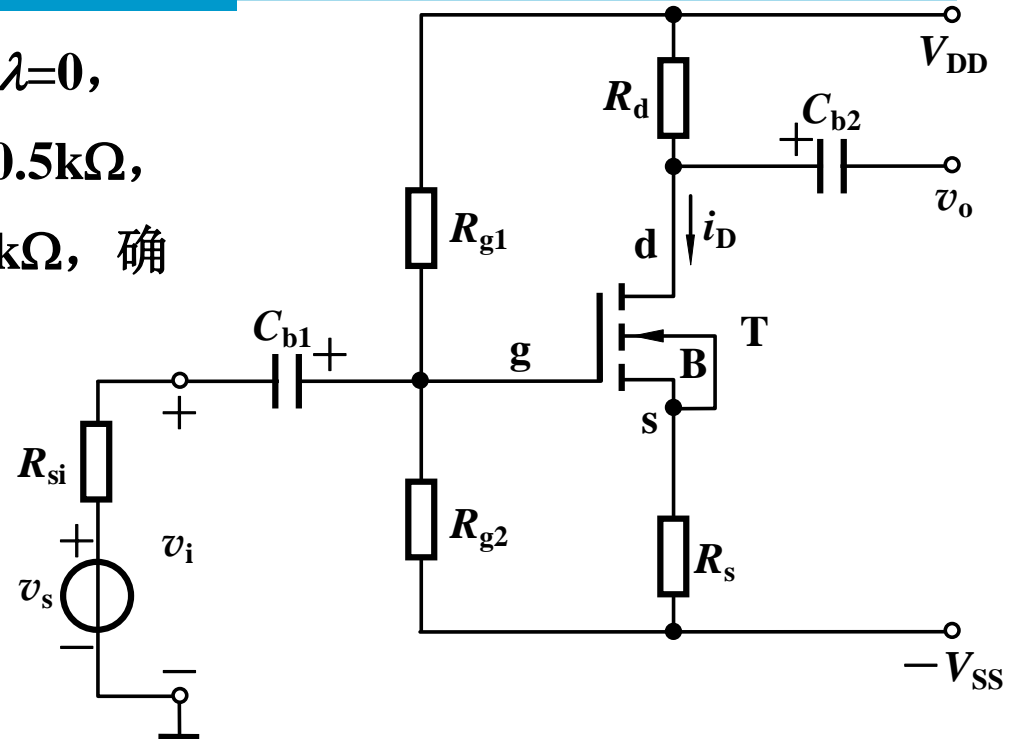
解: (1) 静态工作点  
 假设在饱和区, 根据

$$V_{GSQ} = V_G - V_S$$

$$= \left[ \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} [V_{DD} - (-V_{SS})] + (-V_{SS}) \right] - [I_{DQ} R + (-V_{SS})]$$

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

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



## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

例2  $V_{TN}=1V$ ,  $K_n=0.5mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ ,  
 $V_{DD}=V_{SS}=5V$ ,  $R_d=10k\Omega$ ,  $R_s=0.5k\Omega$ ,  
 $R_{si}=4k\Omega$ ,  $R_{g1}=150k\Omega$ ,  $R_{g2}=47k\Omega$ , 确  
 定静态工作点, 求动态指标。

解: (1) 静态工作点

求得

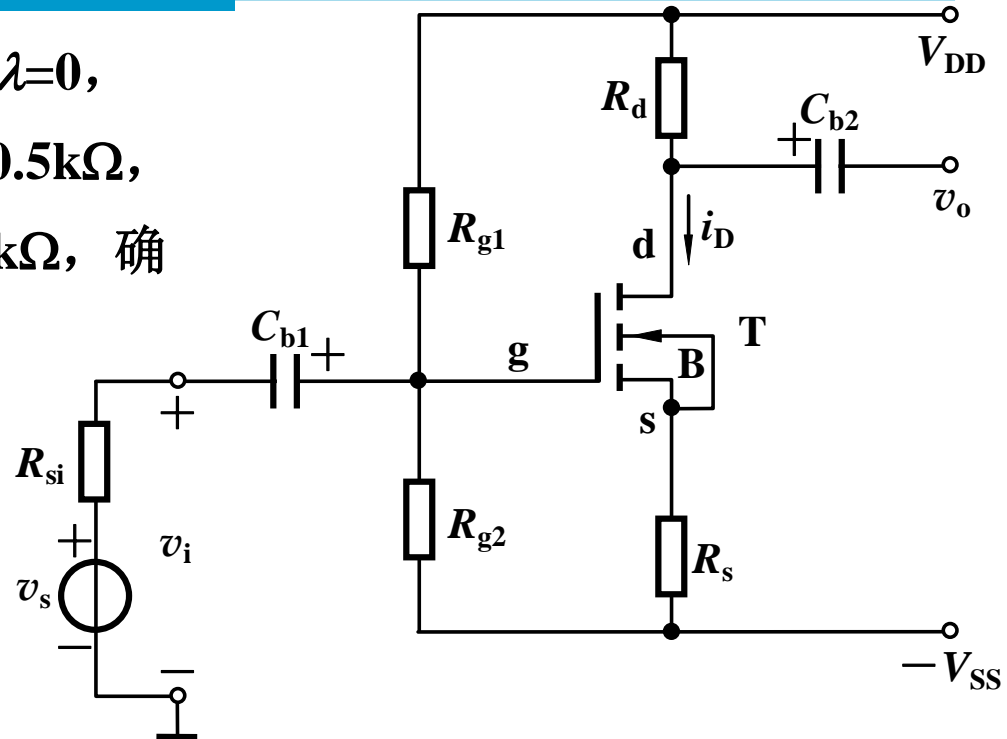
$$V_{GSQ} = 2.1V \quad I_{DQ} = 0.58mA$$

$$V_{DSQ} = 3.91V$$

验证

$$\text{满足 } V_{DS} > (V_{GS} - V_{TN})$$

工作在饱和区

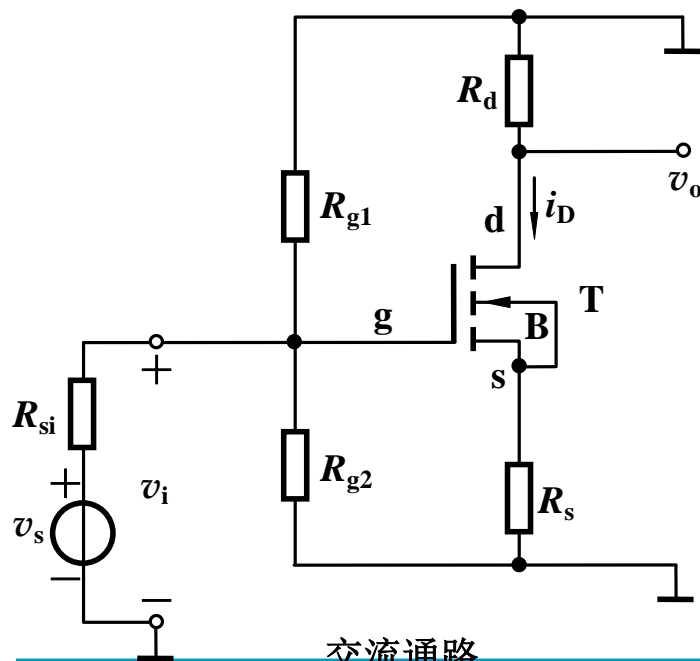


# 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

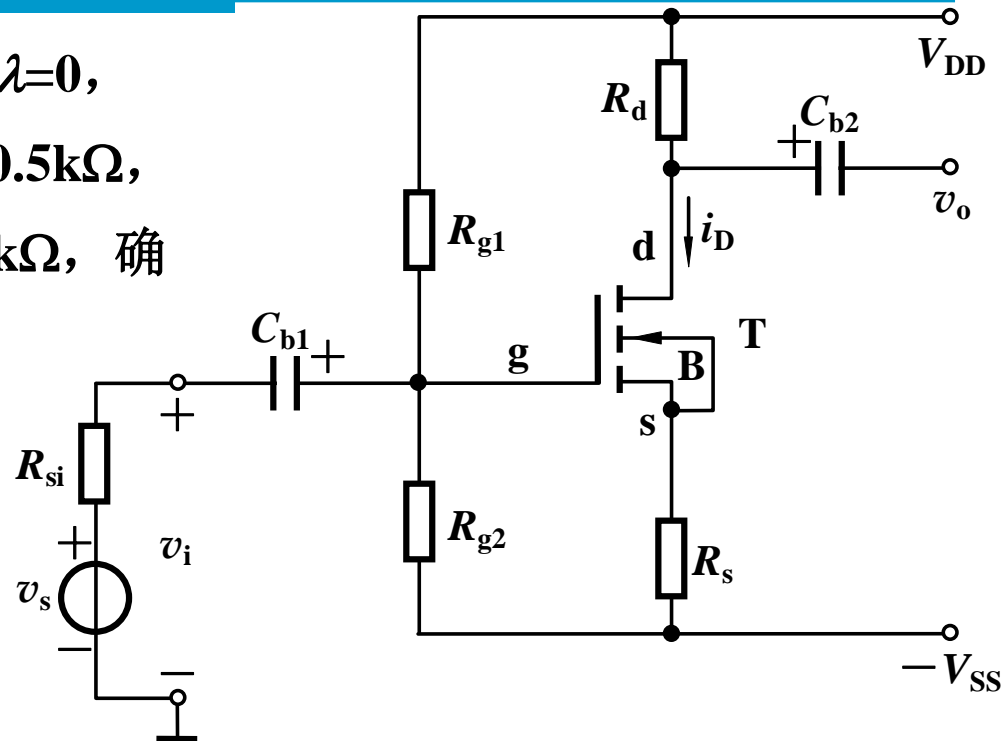
例2  $V_{TN}=1V$ ,  $K_n=0.5mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ ,  
 $V_{DD}=V_{SS}=5V$ ,  $R_d=10k\Omega$ ,  $R_s=0.5k\Omega$ ,  
 $R_{si}=4k\Omega$ ,  $R_{g1}=150k\Omega$ ,  $R_{g2}=47k\Omega$ , 确  
 定静态工作点, 求动态指标。

解: (2) 动态指标

小信号等效电路



交流通路

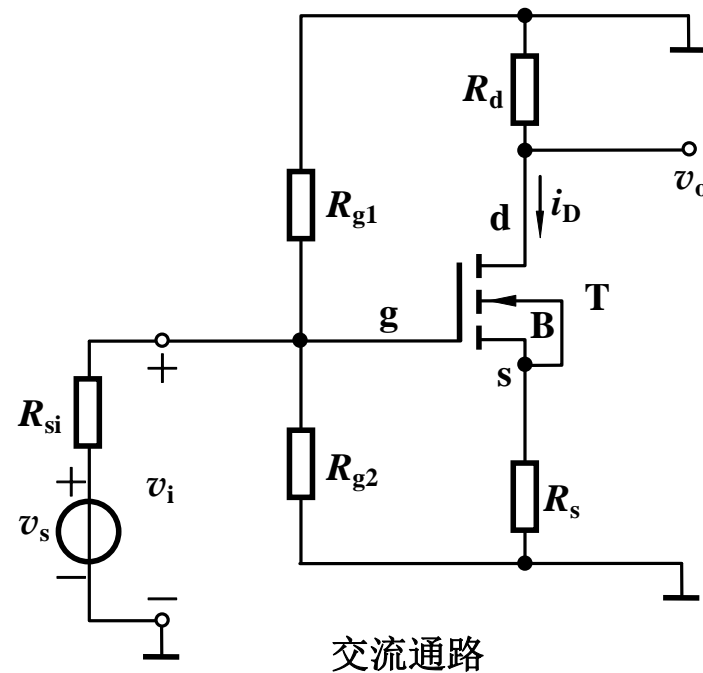
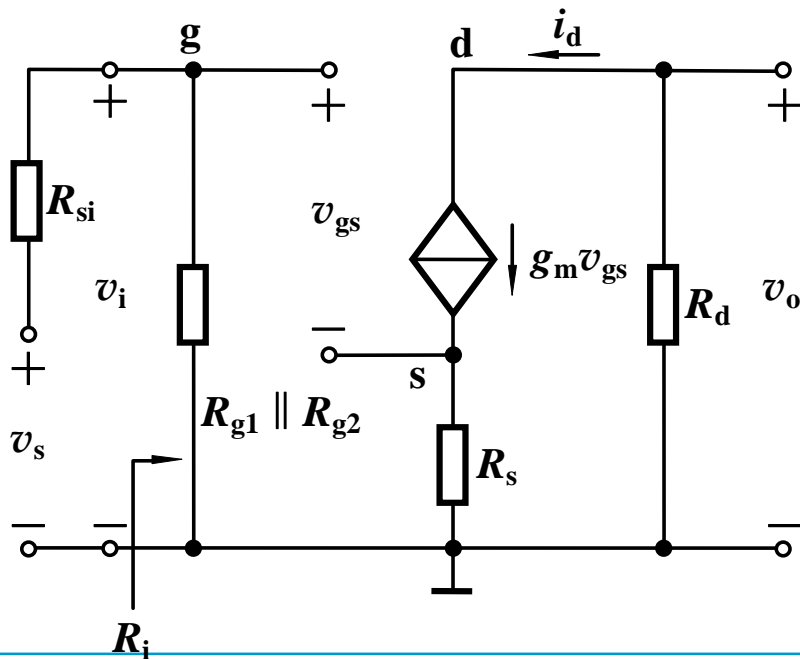


## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

例2  $V_{TN}=1V$ ,  $K_n=0.5mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ ,  
 $V_{DD}=V_{SS}=5V$ ,  $R_d=10k\Omega$ ,  $R_s=0.5k\Omega$ ,  
 $R_{si}=4k\Omega$ ,  $R_{g1}=150k\Omega$ ,  $R_{g2}=47k\Omega$ , 确  
 定静态工作点, 求动态指标。

解: (2) 动态指标

小信号等效电路





## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

例2  $V_{TN}=1V$ ,  $K_n=0.5mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=5V$ ,  $R_d=10k\Omega$ ,  $R_s=0.5k\Omega$ ,  $R_{si}=4k\Omega$ ,  $R_{g1}=150k\Omega$ ,  $R_{g2}=47k\Omega$ , 确定静态工作点, 求动态指标。

解: (2) 动态指标

$$g_m = 2K_n(V_{GSQ} - V_{TN}) = 1.1 \text{ mA/V}$$

电压增益

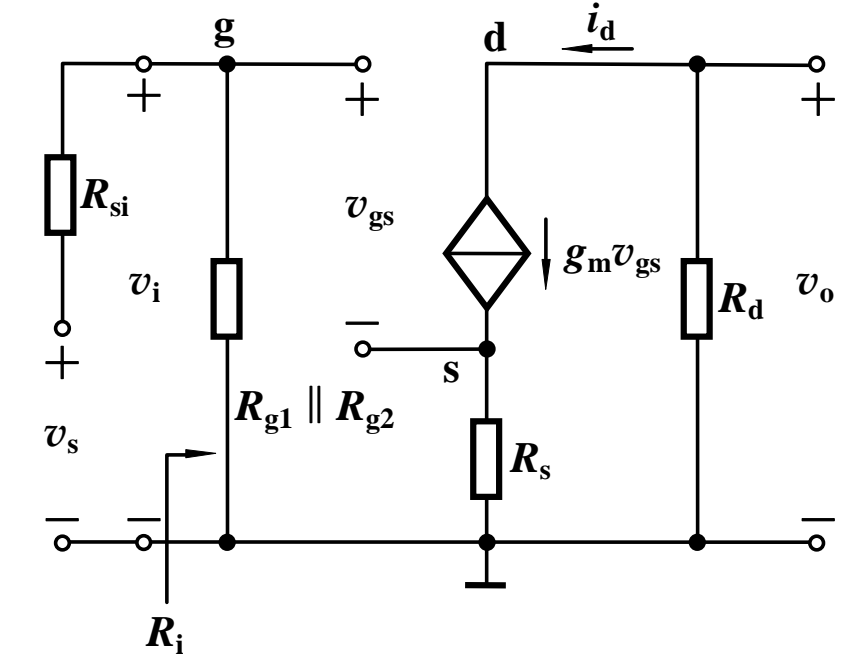
$$v_i = v_{gs} + g_m v_{gs} R_s = v_{gs} (1 + g_m R_s)$$

$$v_o = -g_m v_{gs} R_d$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m R_d}{1 + g_m R_s} \approx -7.1$$

输入电阻

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_{gs1} \parallel R_{gs2} \approx 35.79 \text{ k}\Omega$$



源电压增益

$$\begin{aligned} A_{vs} &= \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} \\ &= A_v \cdot \frac{R_i}{R_{si} + R_i} \approx -6.39 \end{aligned}$$

放大电路的输入电阻不包含信号源的内阻

## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

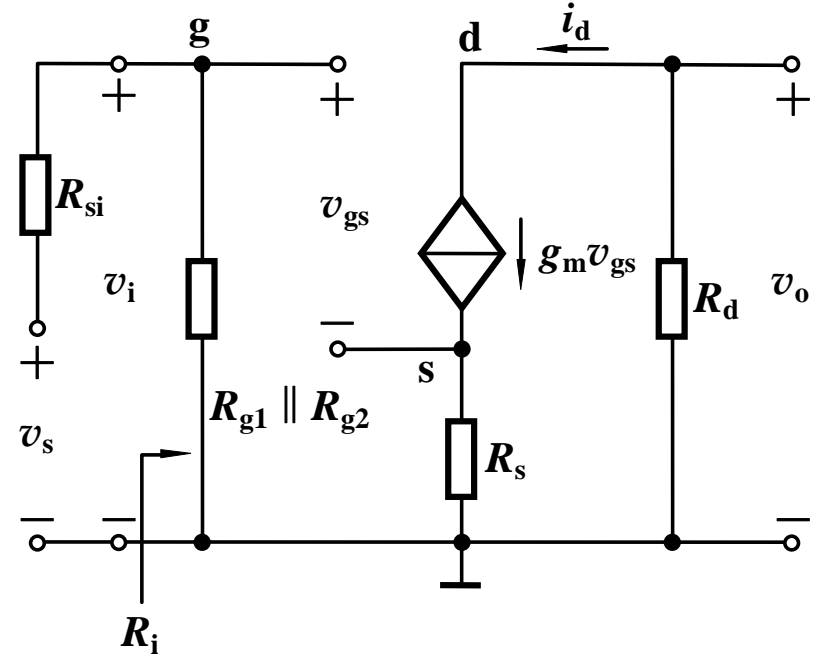
例2  $V_{TN}=1V$ ,  $K_n=0.5mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=5V$ ,  $R_d=10k\Omega$ ,  $R_s=0.5k\Omega$ ,  $R_{si}=4k\Omega$ ,  $R_{g1}=150k\Omega$ ,  $R_{g2}=47k\Omega$ , 确定静态工作点, 求动态指标。

解: (2) 动态指标

输出电阻

为便于分析, 先考虑  $\lambda \neq 0$

时的情况



## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

例2  $V_{TN}=1V$ ,  $K_n=0.5mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ ,  $V_{DD}=V_{SS}=5V$ ,  $R_d=10k\Omega$ ,  $R_s=0.5k\Omega$ ,  $R_{si}=4k\Omega$ ,  $R_{g1}=150k\Omega$ ,  $R_{g2}=47k\Omega$ , 确定静态工作点, 求动态指标。

解: (2) 动态指标

输出电阻

为便于分析, 先考虑 $\lambda \neq 0$ 时的情况

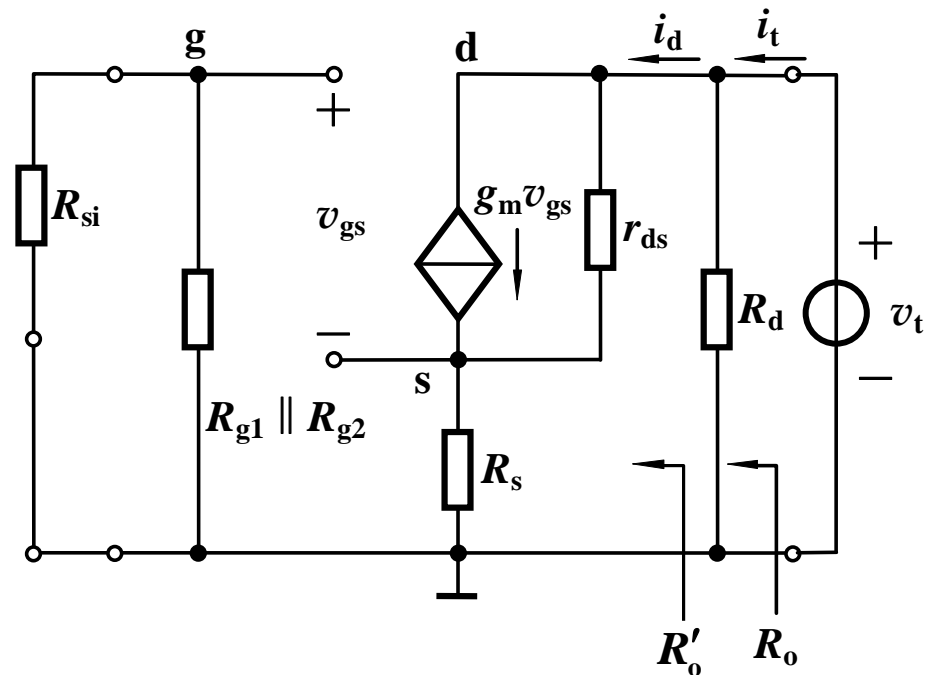
$$v_{gs} = -i_d R_s$$

$$v_t = i_d R_s + (i_d - g_m v_{gs}) r_{ds}$$

$$R'_o = \frac{v_t}{i_d} = r_{ds} \left[ 1 + R_s \left( g_m + \frac{1}{r_{ds}} \right) \right]$$

所以当 $\lambda=0$ 时,  $R'_o \rightarrow \infty$   $R_o = R'_o \parallel R_d = R_d$

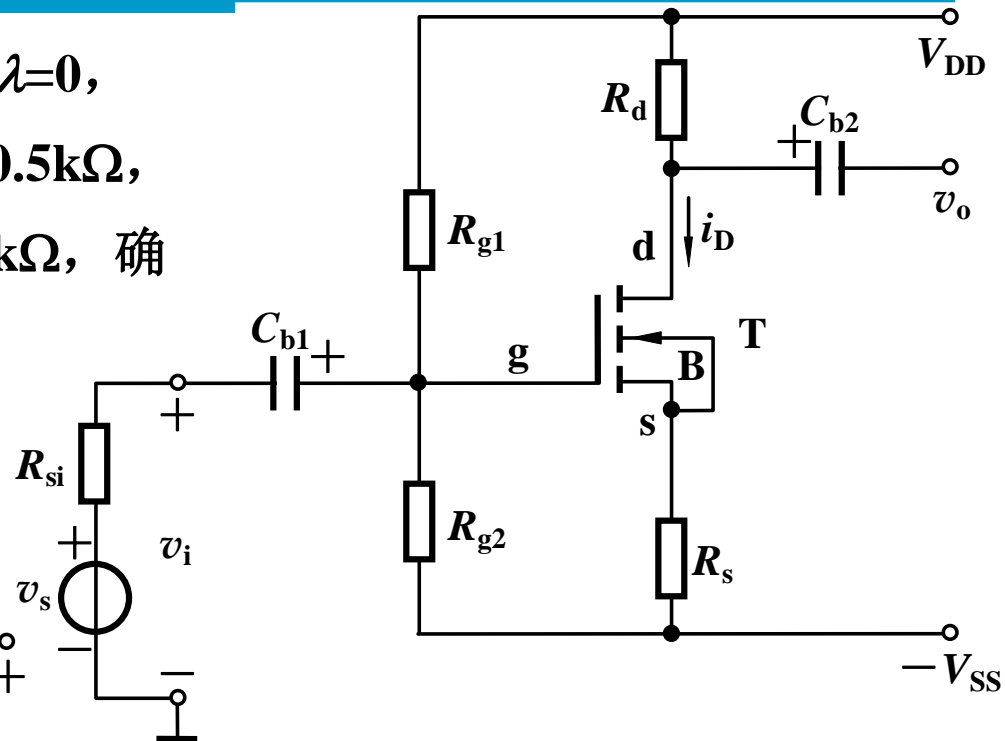
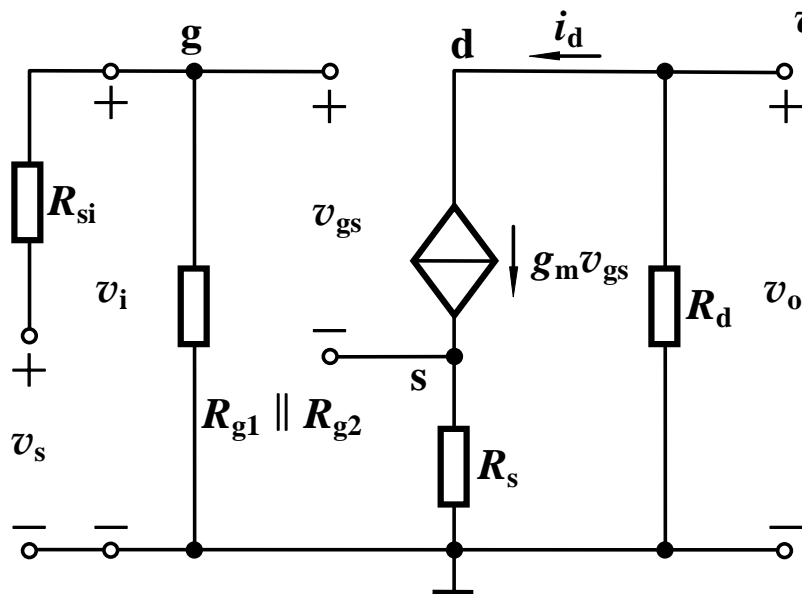
当 $\lambda \neq 0$ 时, 若 $r_{ds} \gg R_d$ , 则  $R_o = R'_o \parallel R_d \approx R_d$



# 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

例2  $V_{TN}=1V$ ,  $K_n=0.5mA/V^2$ ,  $\lambda=0$ ,  
 $V_{DD}=V_{SS}=5V$ ,  $R_d=10k\Omega$ ,  $R_s=0.5k\Omega$ ,  
 $R_{si}=4k\Omega$ ,  $R_{g1}=150k\Omega$ ,  $R_{g2}=47k\Omega$ , 确  
 定静态工作点, 求动态指标。

解: (2) 动态指标



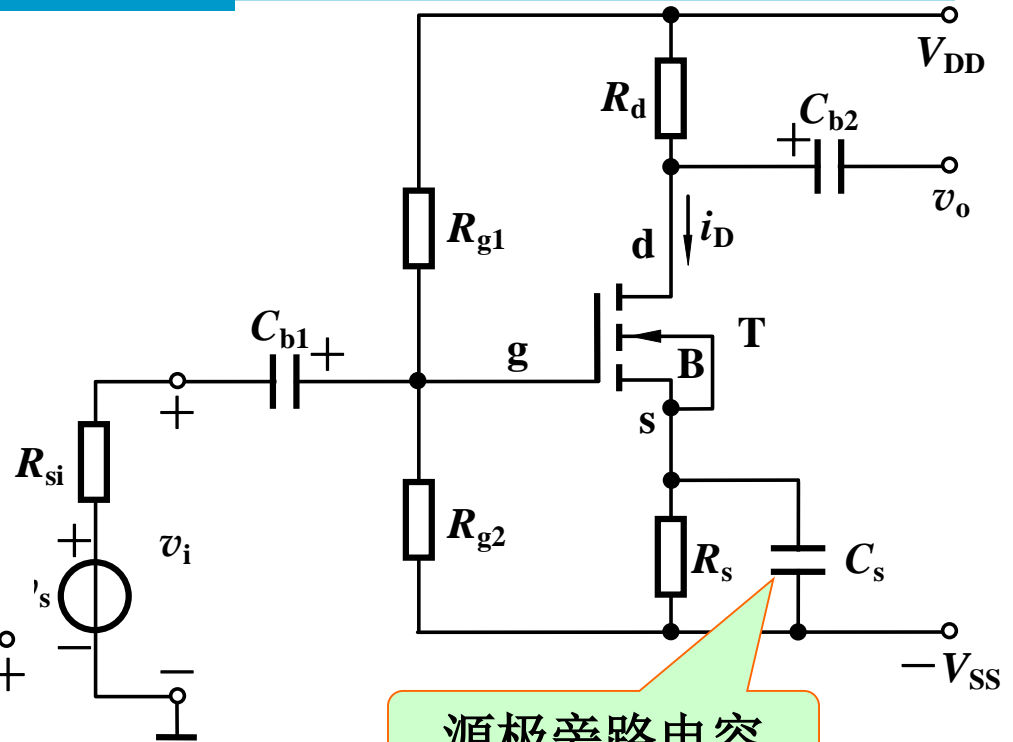
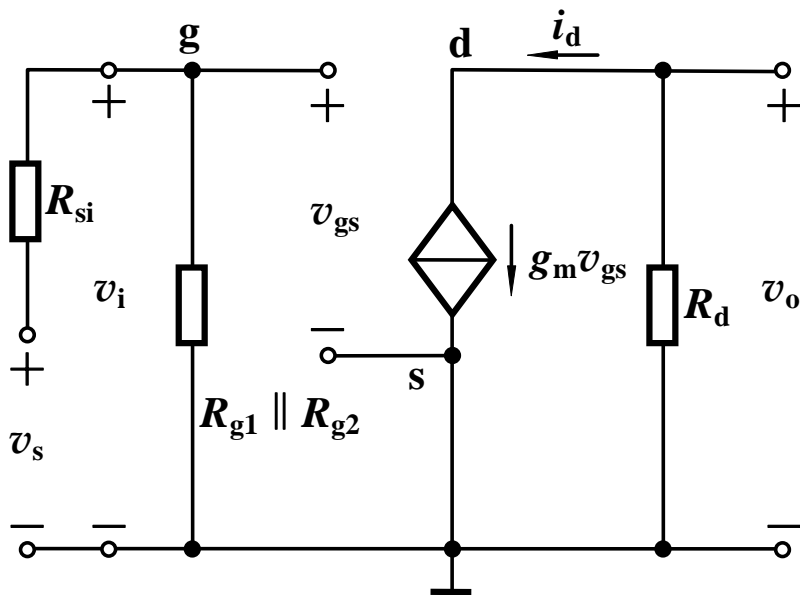
电压增益

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m R_d}{1 + g_m R_s} \approx -7.1$$

能否进一步提高增益?

# 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_m R_d \approx -11$$



源极旁路电容

电压增益

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_m R_d}{1 + g_m R_s} \approx -7.1$$

能否进一步提高增益？

## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

### 例3 双电源供电，电流源偏置

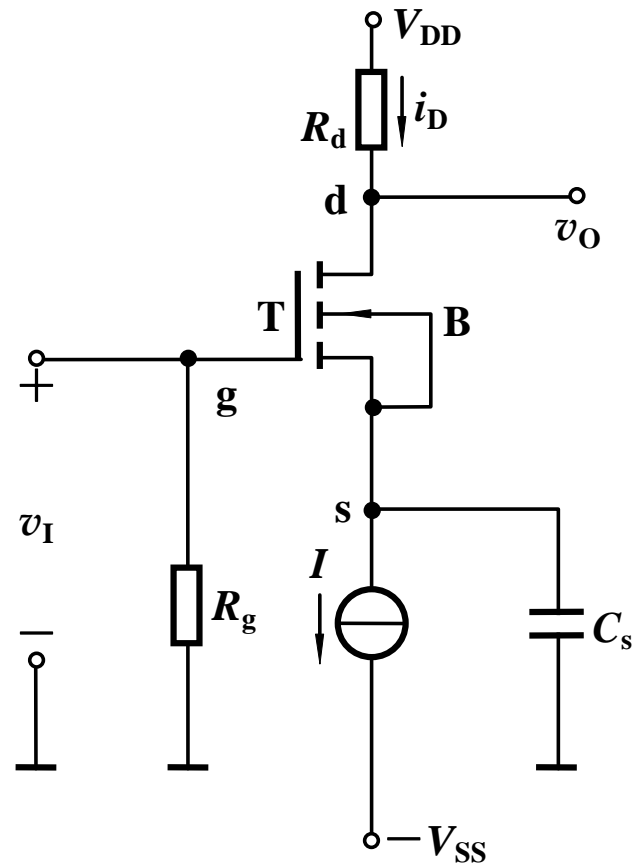
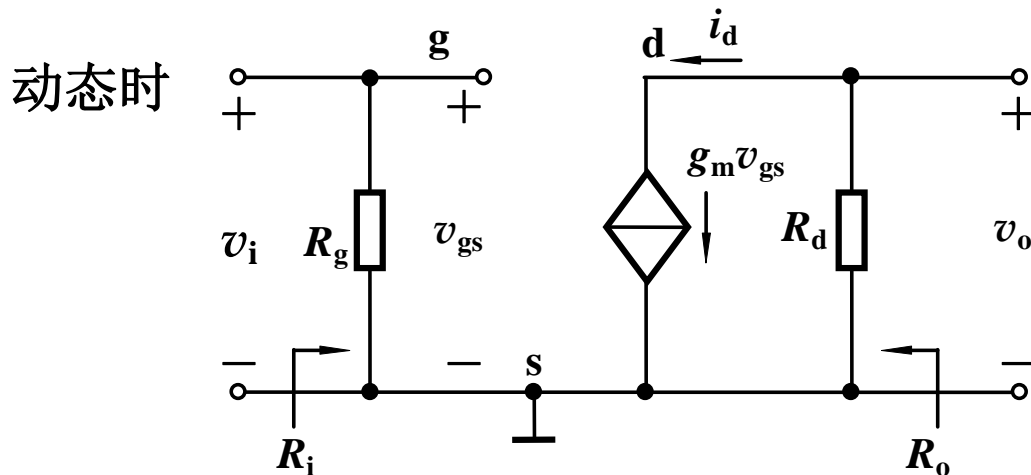
静态时， $v_I = 0$ ， $V_G = 0$ ， $I_{DQ} = I$

根据  $I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2$  (饱和区)

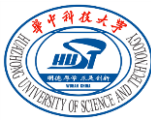
可求得  $V_{GSQ}$

又  $V_S = V_G - V_{GSQ}$        $V_D = V_{DD} - I_{DQ} R_d$

则  $V_{DSQ} = V_D - V_S$



# 4.4 小信号模型分析法



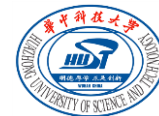
## 4.4.1 MOSFET的小信号模型

## 4.4.2 用小信号模型分析共源极放大电路

## 4.4.3 带源极电阻的共源极放大电路的分析

## 4.4.4 小信号模型分析法的适用范围

## 4.4.4 小信号模型分析法的适用范围



放大电路的输入信号幅度较小，FET工作在其 $I$ - $V$ 特性曲线的饱和区（即近似线性范围）内。模型参数的值是在静态工作点上求得的。所以，放大电路的动态性能与静态工作点位置及稳定性密切相关。

### 优点：

分析放大电路的动态性能指标( $A_v$ 、 $R_i$ 和 $R_o$ 等)非常方便，且适用于频率较高时（用高频模型）的分析。

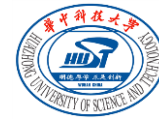
### 缺点：

在放大电路的小信号等效电路中，电压、电流等电量及模型参数均是针对变化量(交流量)而言的，不能用来分析计算静态工作点。



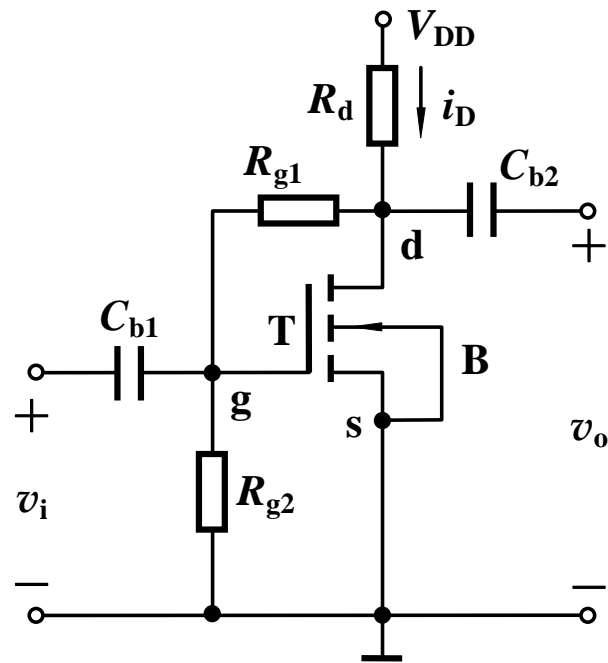
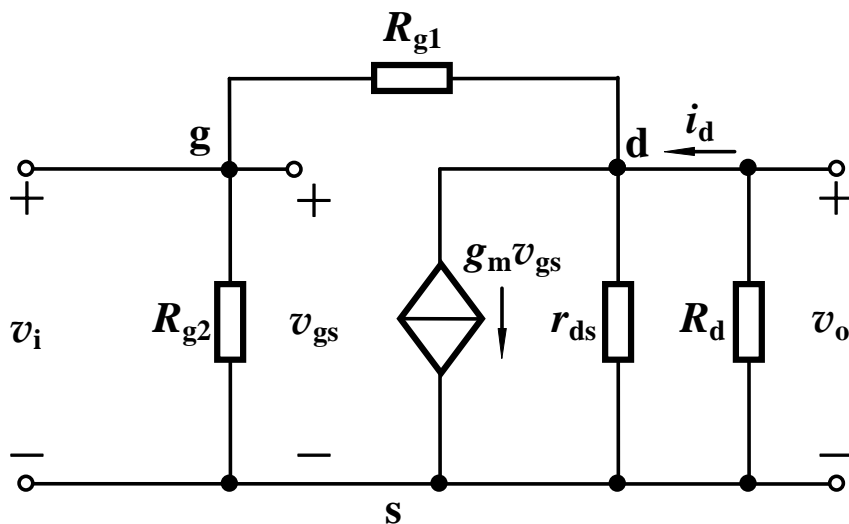


# 思考题



1. MOSFET小信号模型是在什么条件下建立的？

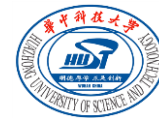
2. 放大电路如图所示。试画出其小信号等效电路。



## 4 场效应三极管及放大电路

- 4.1 金属-氧化物-半导体（MOS）场效应三极管
- 4.2 MOSFET基本共源极放大电路
- 4.3 图解分析法
- 4.4 小信号模型分析法
- 4.5 共漏极和共栅极放大电路
- 4.7 组合放大电路
- 4.9 各种FET的特性及使用注意事项

## 4.5 共漏极和共栅极放大电路

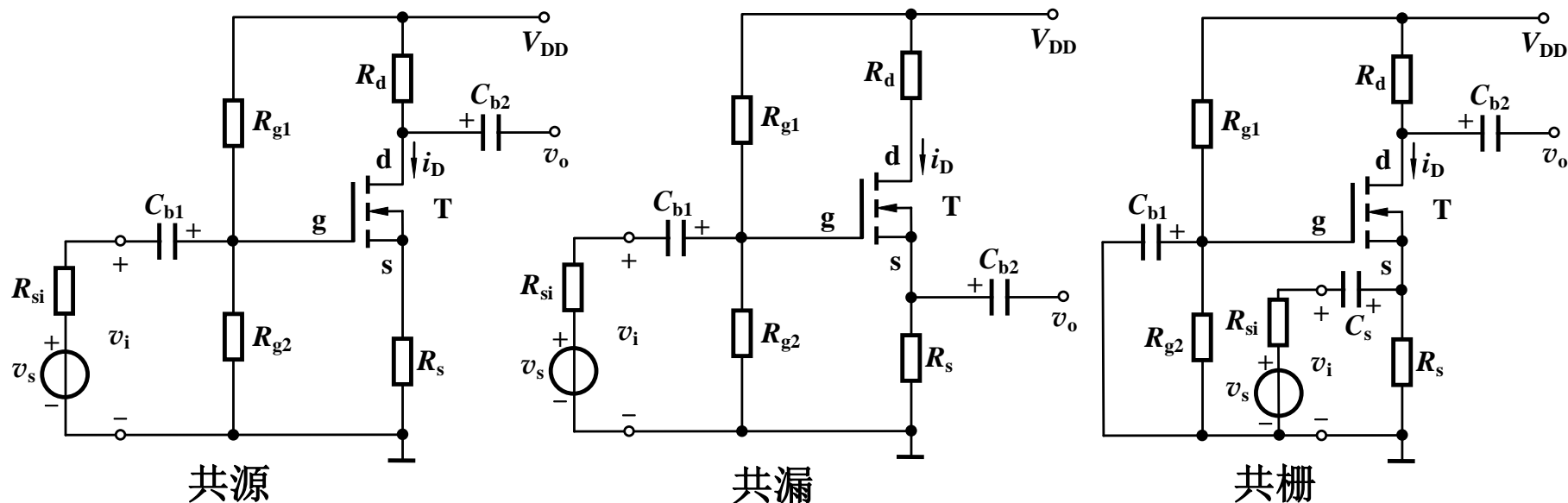


### 4.5.1 共漏极（源极跟随器）放大电路

### 4.5.2 共栅极放大电路

### 4.5.3 MOSFET放大电路三种组态的总结和比较

# 三种组态的判断



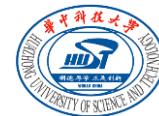
较好的方法并不是试图寻找接地的电极，而是寻找信号的输入电极和输出电极。

即观察输入信号加在哪个电极，输出信号从哪个电极取出，剩下的那个电极便是共同电极。如

共源极放大电路，信号由栅极输入，漏极输出；  
共漏极放大电路，信号由栅极输入，源极输出；  
共栅极放大电路，信号由源极输入，漏极输出。

**栅极始终不能做  
输出电极，漏极  
不能做输入极**

## 4.5.1 共漏极（源极跟随器）放大电路

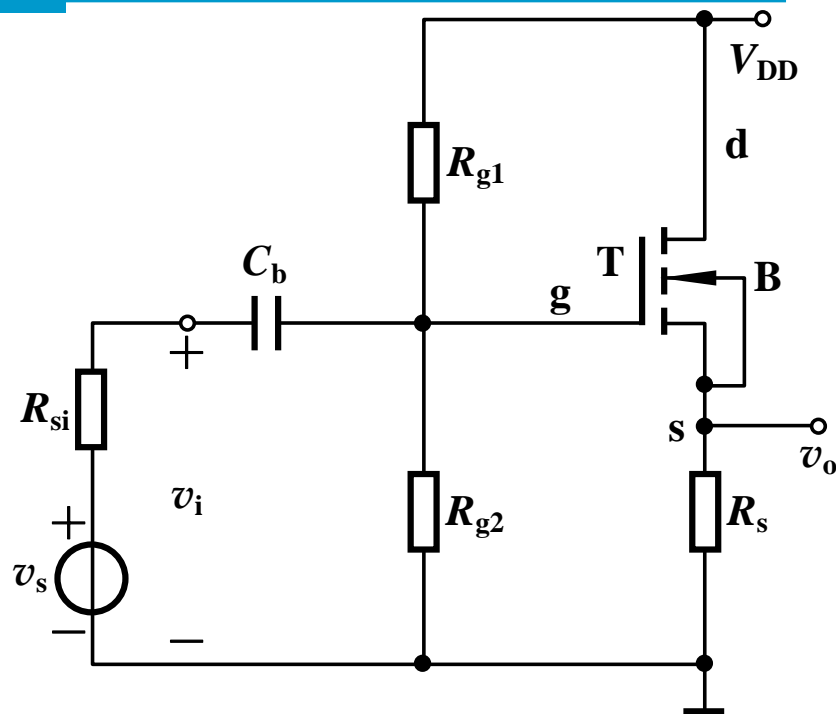


### 1. 静态分析

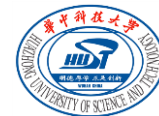
设MOS管工作于饱和区

$$\begin{cases} I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2 \\ V_{GSQ} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot V_{DD} - I_{DQ} R_s \\ V_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} R_s \end{cases}$$

需验证是否工作在饱和区



# 4.5.1 共漏极（源极跟随器）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

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

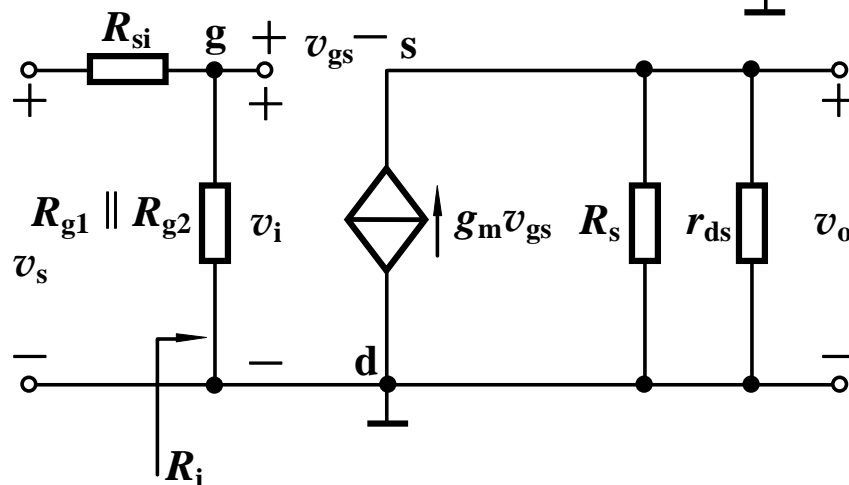
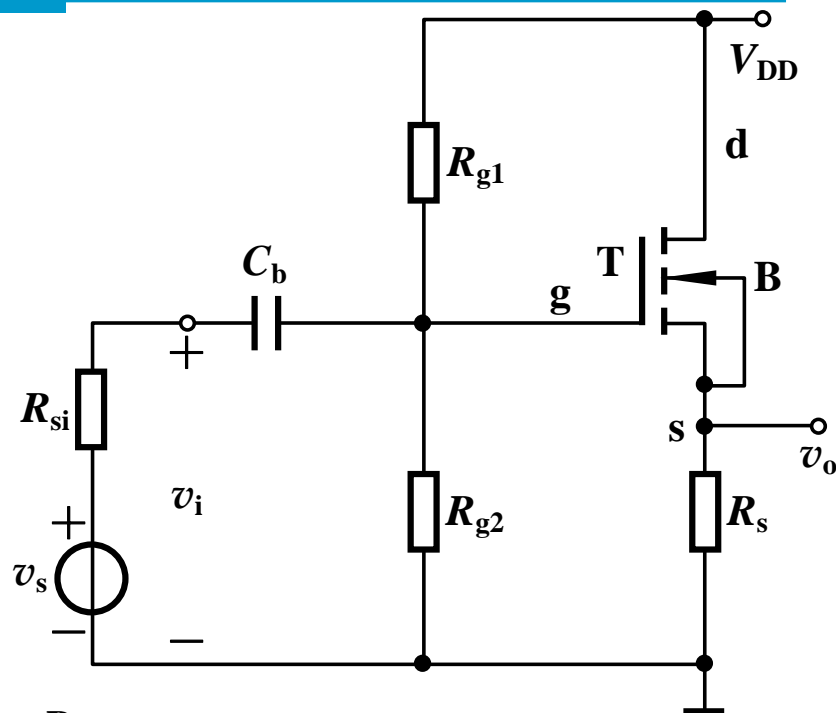
$$= v_{gs} [1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})]$$

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

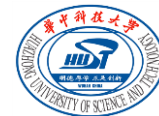
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m v_{gs} (R_s \parallel r_{ds})}{v_{gs} [1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})]}$$

$$= \frac{g_m (R_s \parallel r_{ds})}{1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})} \approx 1$$

输出与输入同相，且增益小于等于1



# 4.5.1 共漏极（源极跟随器）放大电路



## 2. 动态分析

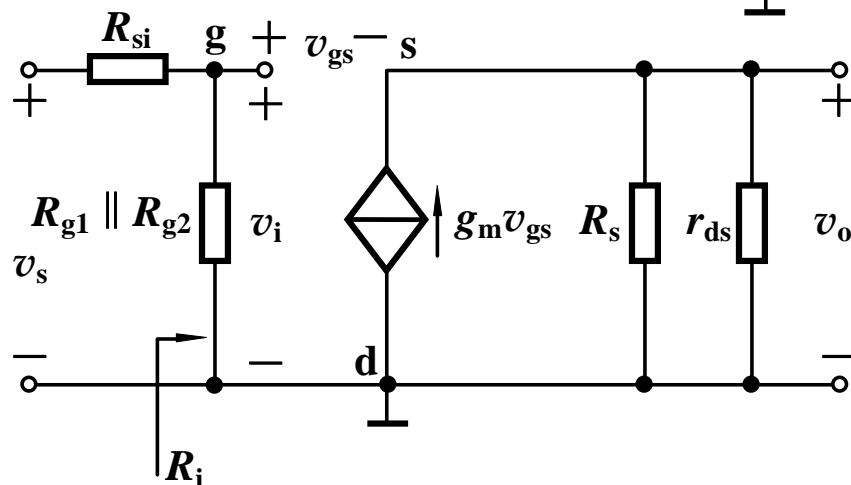
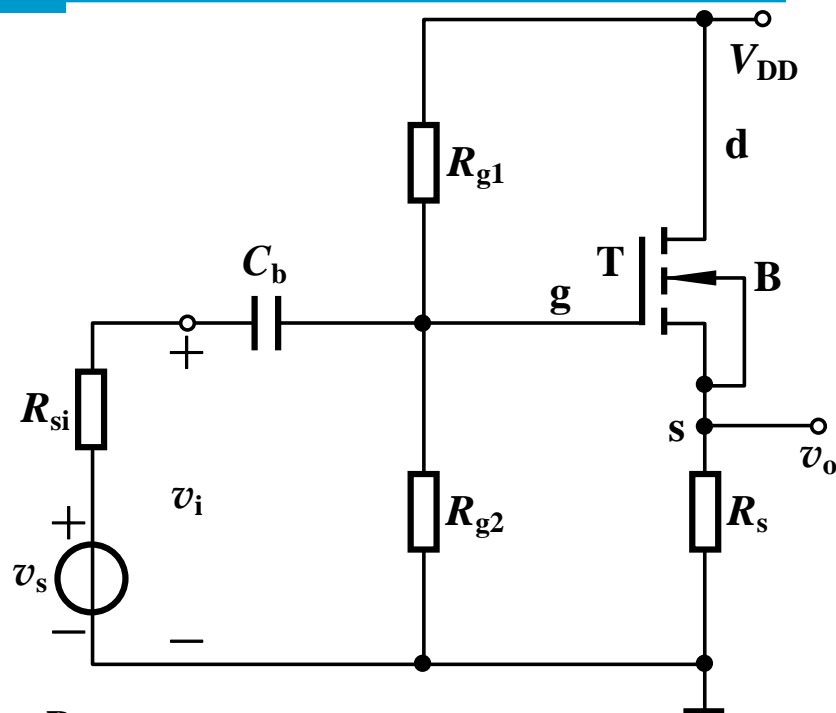
源电压增益

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

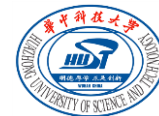
输入电阻

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

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

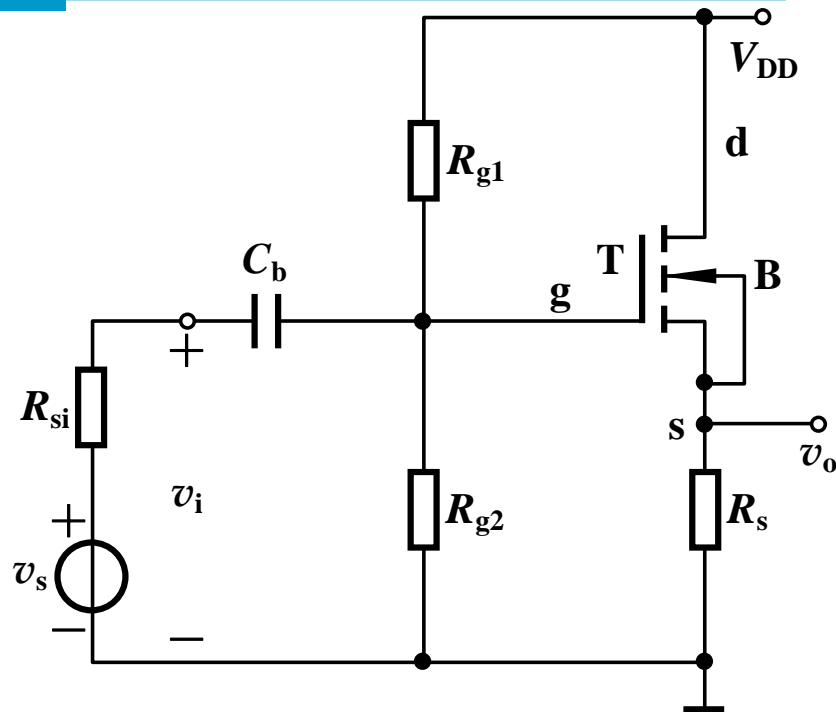
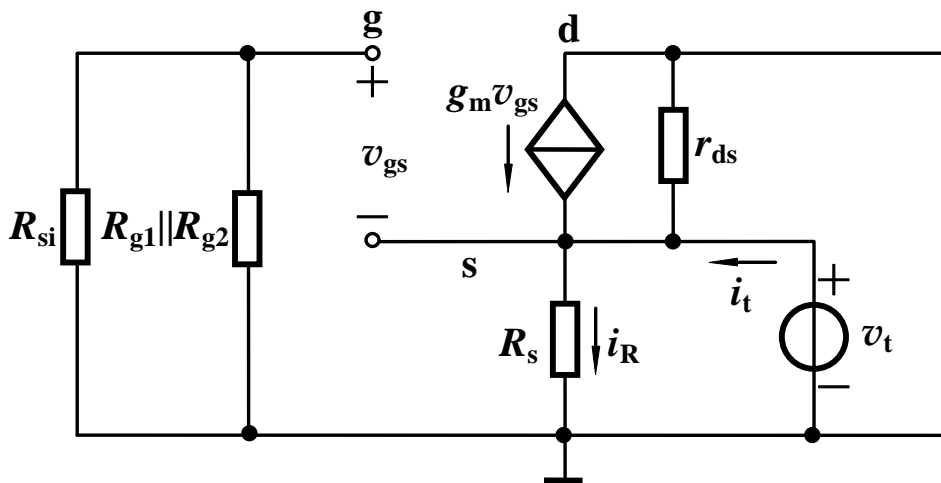


# 4.5.1 共漏极（源极跟随器）放大电路



## 2. 动态分析

输出电阻



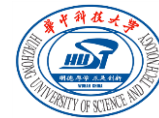
$$\begin{cases} i_T = \frac{v_T}{R_s} + \frac{v_T}{r_{ds}} - g_m v_{gs} \\ v_{gs} = -v_T \end{cases}$$

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

输出电阻较小



## 4.5 共漏极和共栅极放大电路



### 4.5.1 共漏极（源极跟随器）放大电路

### 4.5.2 共栅极放大电路

### 4.5.3 MOSFET放大电路三种组态的总结和比较

## 4.5.2 共栅极放大电路

### 1. 静态分析

根据直流通路有

$$I_{DQ} = I$$

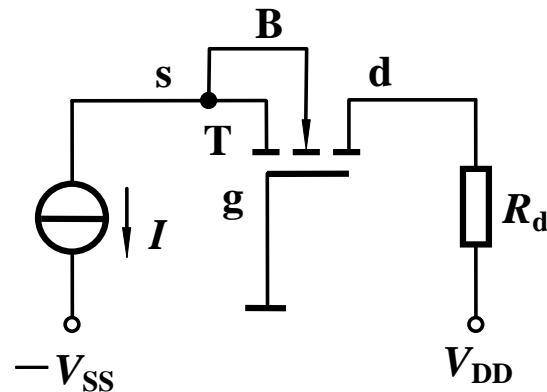
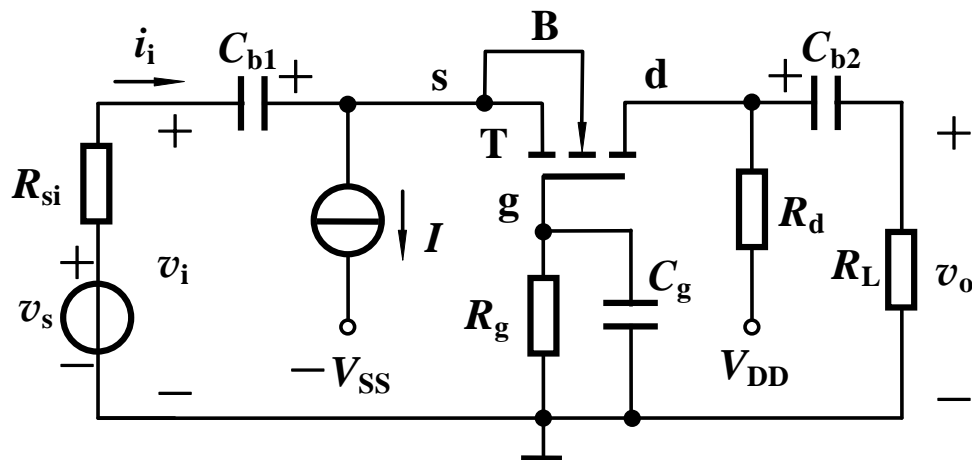
$$\text{由 } I_{DQ} = K_n (V_{GSQ} - V_{TN})^2$$

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



## 4.5.2 共栅极放大电路

### 2. 动态分析

设  $\lambda=0$

电压增益

$$v_i = -v_{gs}$$

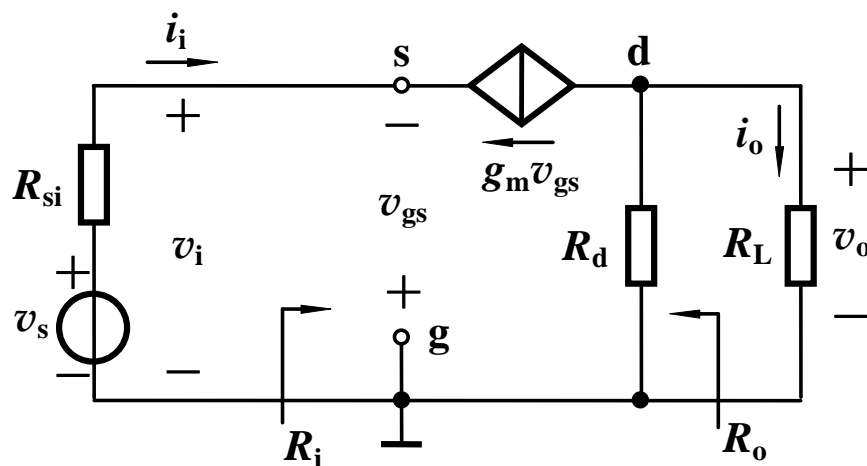
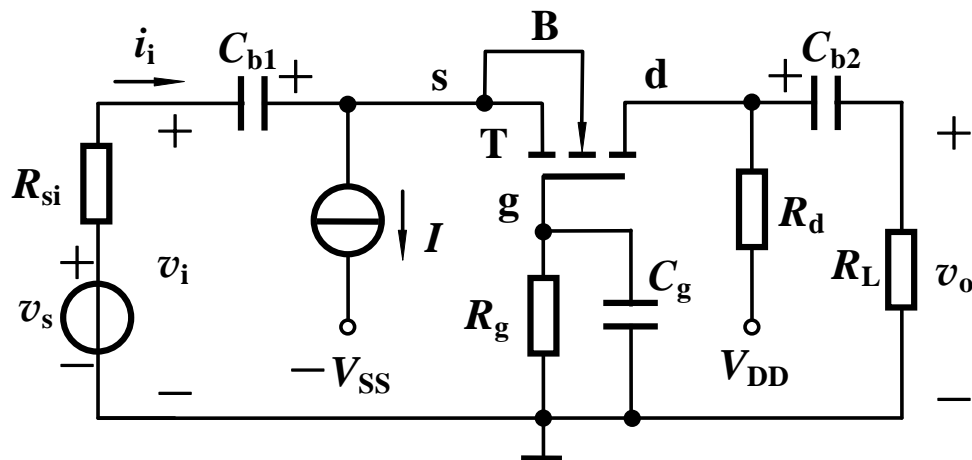
$$v_o = -g_m v_{gs} (R_d \parallel R_L)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = g_m (R_d \parallel R_L)$$

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

## 4.5.2 共栅极放大电路

### 2. 动态分析

输入电阻

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

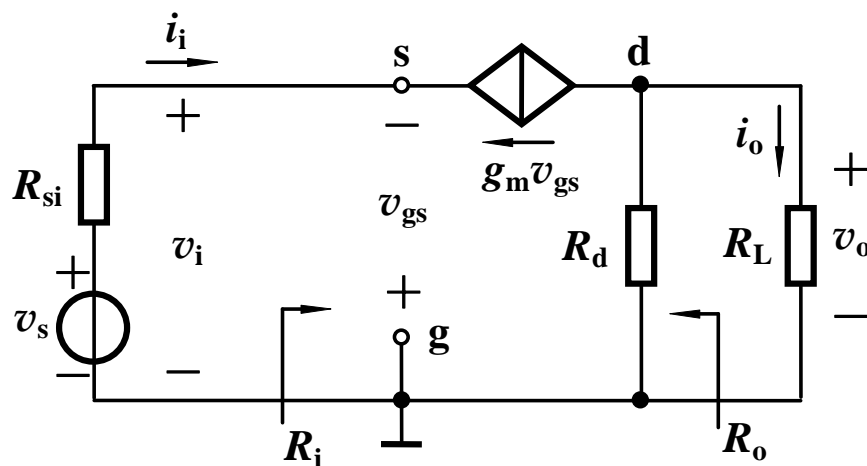
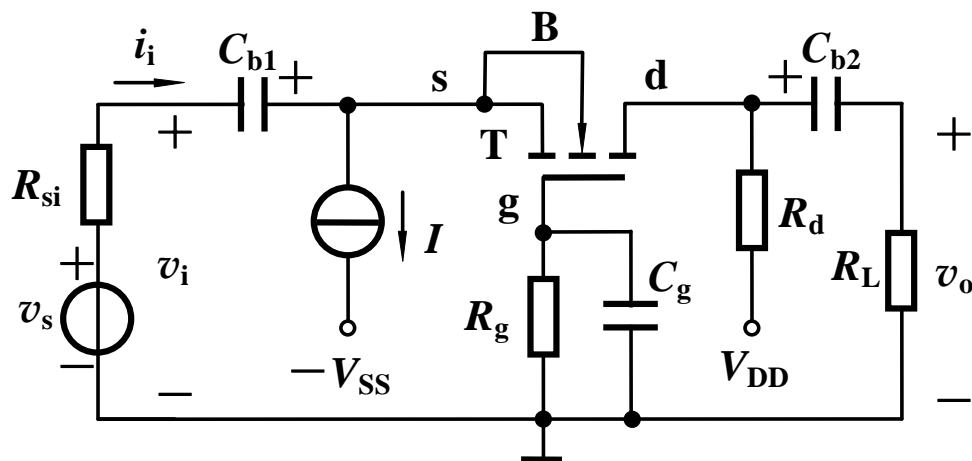
输入电阻远小于其它两种组态

输出电阻

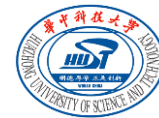
当  $r_{ds} \gg R_d$  和  $r_{ds} \gg R_{si}$  时

$$R_o \approx R_d$$

与共源电路同相



## 4.5 共漏极和共栅极放大电路



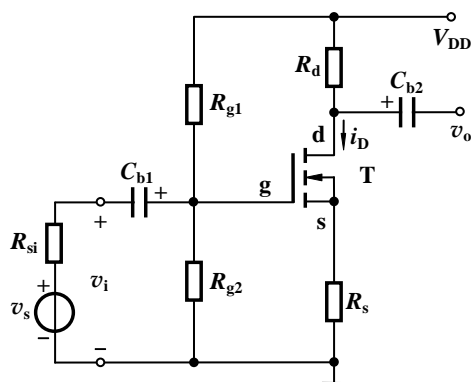
### 4.5.1 共漏极（源极跟随器）放大电路

### 4.5.2 共栅极放大电路

### 4.5.3 MOSFET放大电路三种组态的总结和比较

# 4.5.3 MOSFET放大电路三种组态的总结和比较

共源



电压增益

$$A_v = -g_m (r_{ds} \parallel R_d)$$

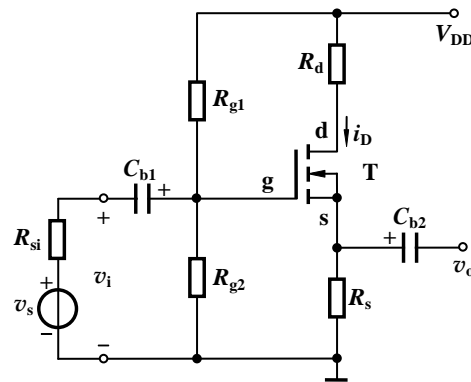
输入电阻

很高

输出电阻

$$R_o \approx R_d$$

共漏

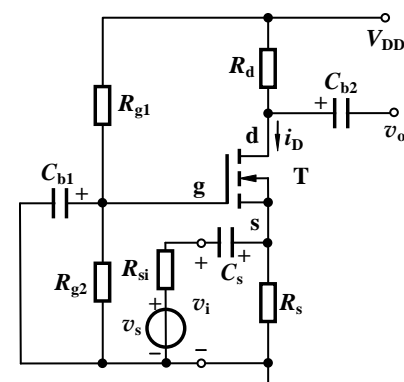


$$A_v = \frac{g_m (R_s \parallel r_{ds})}{1 + g_m (R_s \parallel r_{ds})} \approx 1$$

很高

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

共栅



$$A_v = g_m (R_d \parallel R_L)$$

$$R_i \approx \frac{1}{g_m}$$

$$R_o \approx R_d$$

## 4 场效应三极管及放大电路

- 4.1 金属-氧化物-半导体（MOS）场效应三极管
- 4.2 MOSFET基本共源极放大电路
- 4.3 图解分析法
- 4.4 小信号模型分析法
- 4.5 共漏极和共栅极放大电路
- 4.7 组合放大电路
- 4.9 各种FET的特性及使用注意事项

## 4.7 组合放大电路

### 4.7.1 共源-共漏放大电路

### 4.7.2 共源-共栅放大电路

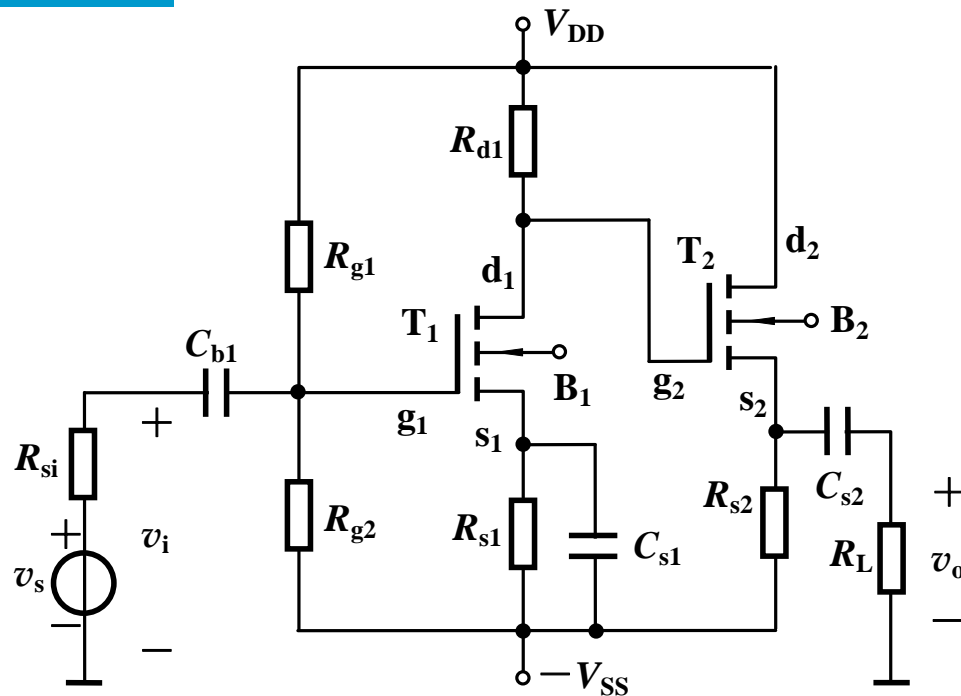
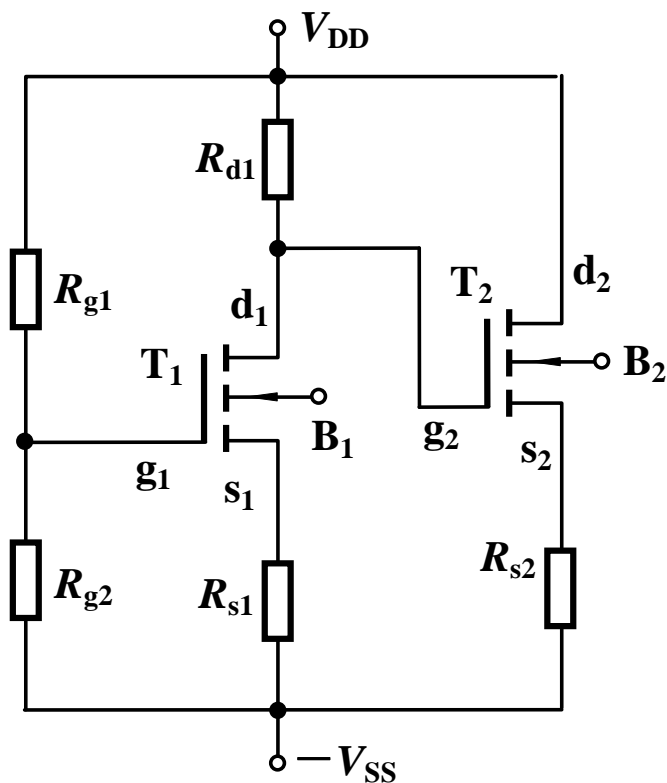


# 4.7.1 共源-共漏放大电路

## 例1

### 1. 静态分析

直流通路



## 4.7.1 共源-共漏放大电路

### 例1

#### 1. 静态分析

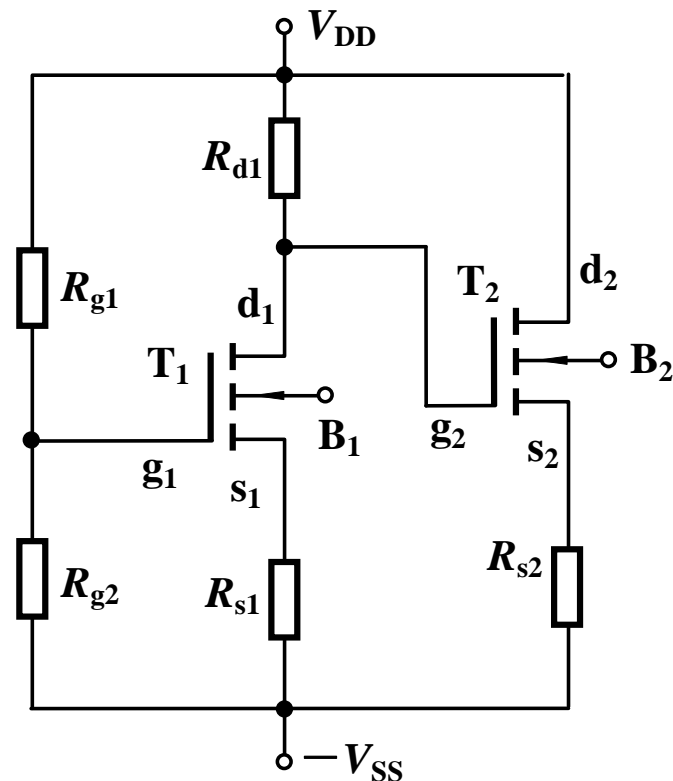
两管栅极均无电流，假设工作在饱和区

$$\begin{cases} I_{DQ1} = K_{n1} (V_{GSQ1} - V_{TN1})^2 \\ V_{GSQ1} = \frac{R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} \cdot (V_{DD} + V_{SS}) - I_{DQ1} R_{s1} \end{cases}$$

$$V_{DSQ1} = V_{DD} + V_{SS} - I_{DQ1} (R_{d1} + R_{s1})$$

$$\begin{cases} I_{DQ2} = K_{n2} (V_{GSQ2} - V_{TN2})^2 \\ V_{GSQ2} = V_{DD} + V_{SS} - I_{DQ1} R_{d1} - I_{DQ2} R_{s2} \end{cases}$$

$$V_{DSQ2} = V_{DD} + V_{SS} - I_{DQ2} R_{s2}$$



已知管子参数和电路参数，  
便可解出两管静态工作点

需验证是否工作在饱和区

# 4.7.1 共源-共漏放大电路

## 例1

### 1. 静态分析

将具体参数值代入，计算得

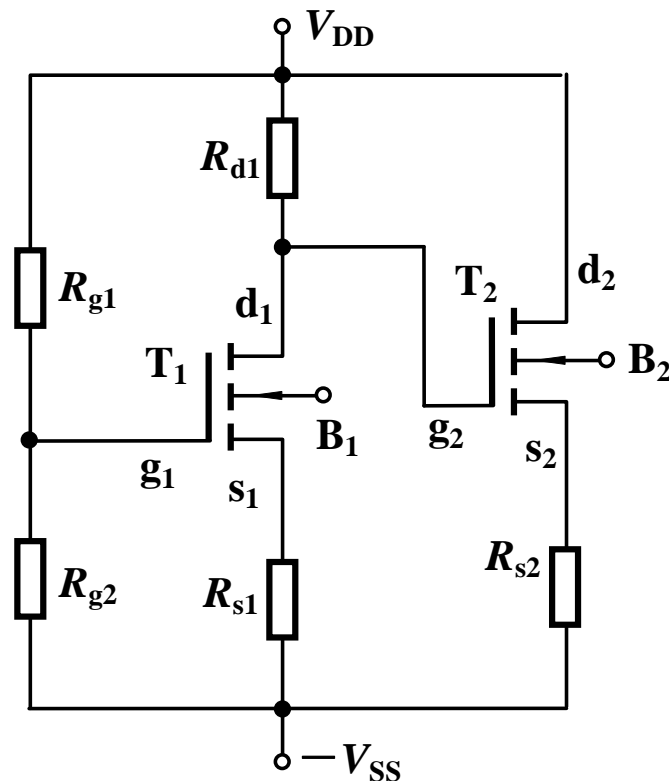
$$V_{GSQ1} = 1.84 \text{ V} \quad I_{DQ2} \approx 0.49 \text{ mA}$$

$$I_{DQ1} = 0.2 \text{ mA} \quad V_{GSQ2} = 2.78 \text{ V}$$

$$V_{DSQ1} = 6.02 \text{ V} \quad V_{DSQ2} = 5.98 \text{ V}$$

由于  $V_{TN1} = V_{TN2} = 1.2 \text{ V}$

可验证两管均工作在饱和区



# 4.7.1 共源-共漏放大电路

## 例1

## 2. 动态分析

小信号等效电路

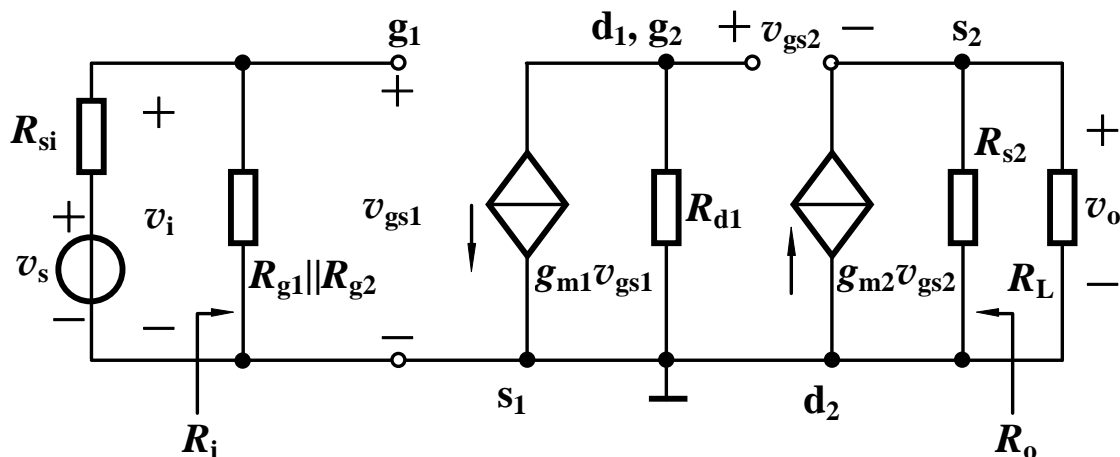
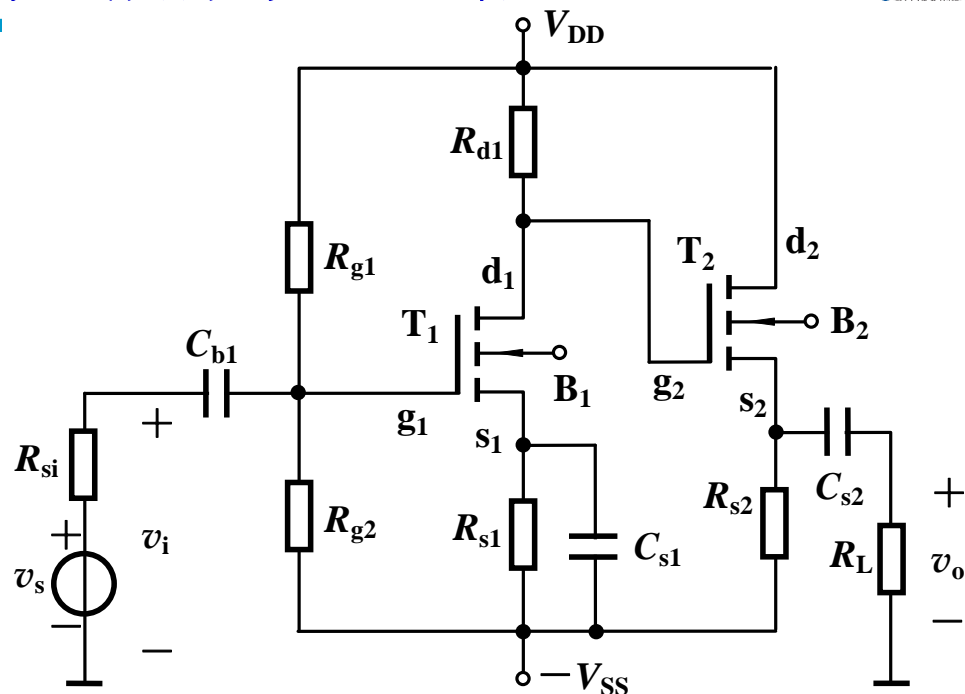
根据  $g_m = 2K_n(V_{GSQ} - V_{TN})$

可求得  $g_m$

电压增益

$$\begin{cases} v_i = v_{gs1} \\ v_o = g_{m2} v_{gs2} (R_{s2} \parallel R_L) \\ -g_{m1} v_{gs1} R_{d1} = v_o + v_{gs2} \end{cases}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{g_{m1} g_{m2} R_{d1} (R_{s2} \parallel R_L)}{1 + g_{m2} (R_{s2} \parallel R_L)}$$



# 4.7.1 共源-共漏放大电路

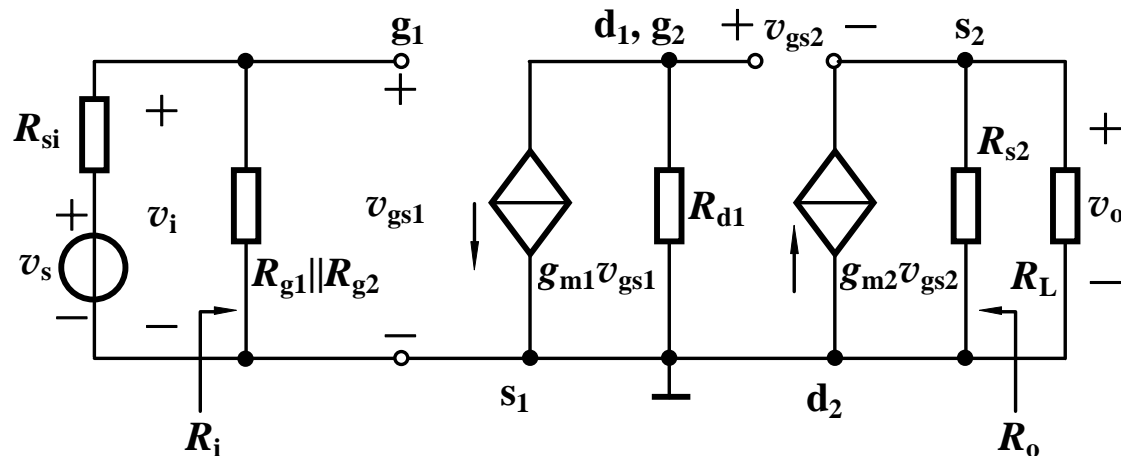
例1

## 2. 动态分析

输入电阻

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

输出电阻就是后一级共漏电路的输出电阻



$$R_o = R_{s2} \parallel r_{ds2} \parallel \frac{1}{g_{m2}} = R_{s2} \parallel \frac{1}{g_{m2}} \quad (\lambda_2 = 0)$$

源电压增益

$$A_{vs} = \frac{v_o}{v_s} = \frac{v_o}{v_i} \cdot \frac{v_i}{v_s} = - \frac{g_{m1} g_{m2} R_{d1} (R_{s2} \parallel R_L)}{1 + g_{m2} (R_{s2} \parallel R_L)} \cdot \left( \frac{R_i}{R_i + R_{si}} \right)$$

## 4.7 组合放大电路

### 4.7.1 共源-共漏放大电路

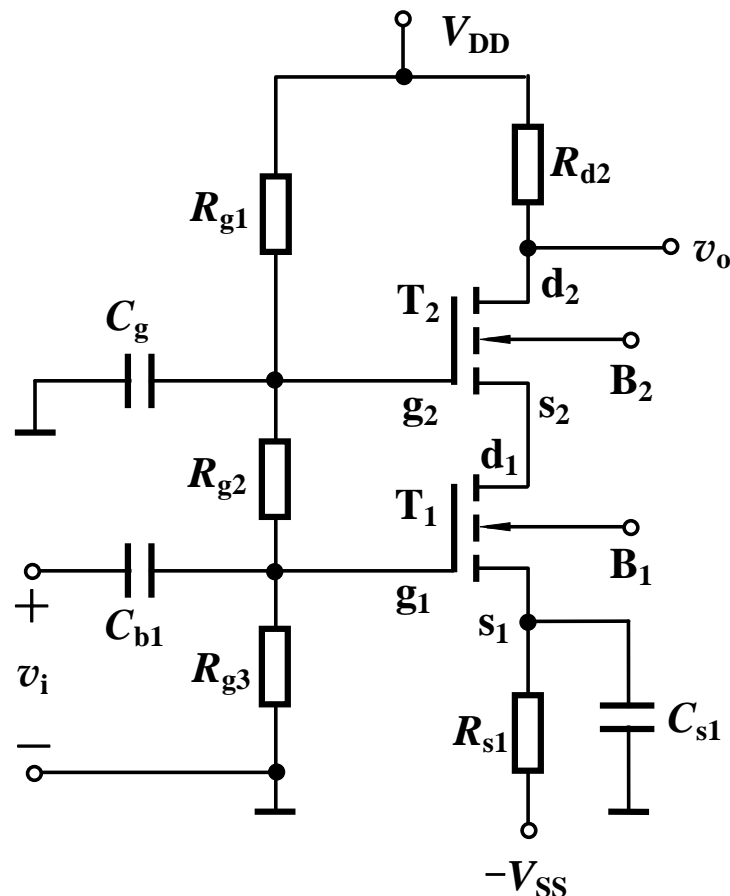
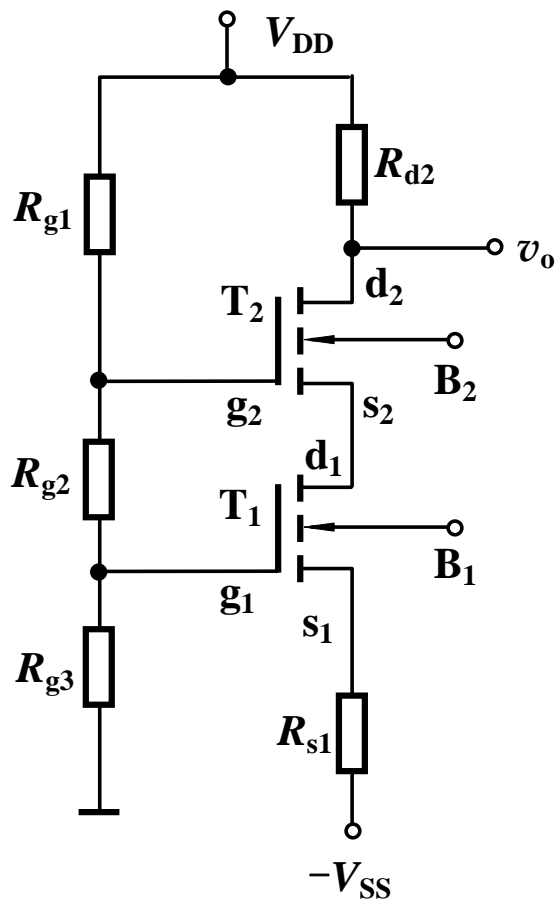
### 4.7.2 共源-共栅放大电路

# 4.7.2 共源-共栅放大电路

例2

## 1. 静态分析

直流通路



## 4.7.2 共源-共栅放大电路

### 例2

#### 1. 静态分析

假设工作在饱和区

$$\begin{cases} I_{DQ1} = K_{n1}(V_{GSQ1} - V_{TN1})^2 \\ V_{GSQ1} = \frac{R_{g3}}{R_{g1} + R_{g2} + R_{g3}} \cdot V_{DD} - I_{DQ1}R_{s1} + V_{SS} \end{cases}$$

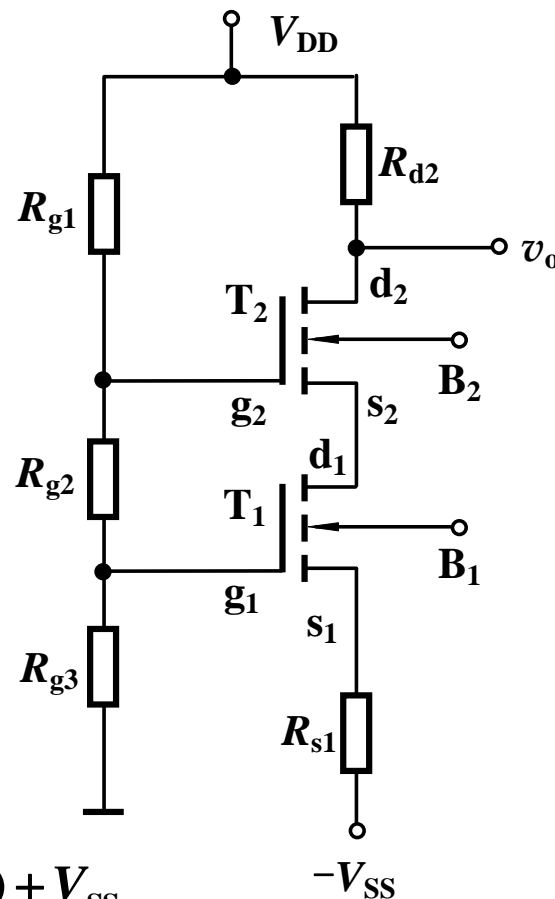
$$I_{DQ1} = I_{DQ2}$$

$$I_{DQ2} = K_{n2}(V_{GSQ2} - V_{TN2})^2$$

$$V_{GSQ2} = \frac{R_{g2} + R_{g3}}{R_{g1} + R_{g2} + R_{g3}} \cdot V_{DD} - (V_{DSQ1} + I_{DQ1}R_{s1}) + V_{SS}$$

$$V_{DD} + V_{SS} = I_{DQ2}R_{d2} + V_{DSQ2} + V_{DSQ1} + I_{DQ1}R_{s1}$$

需验证是否工作在饱和区



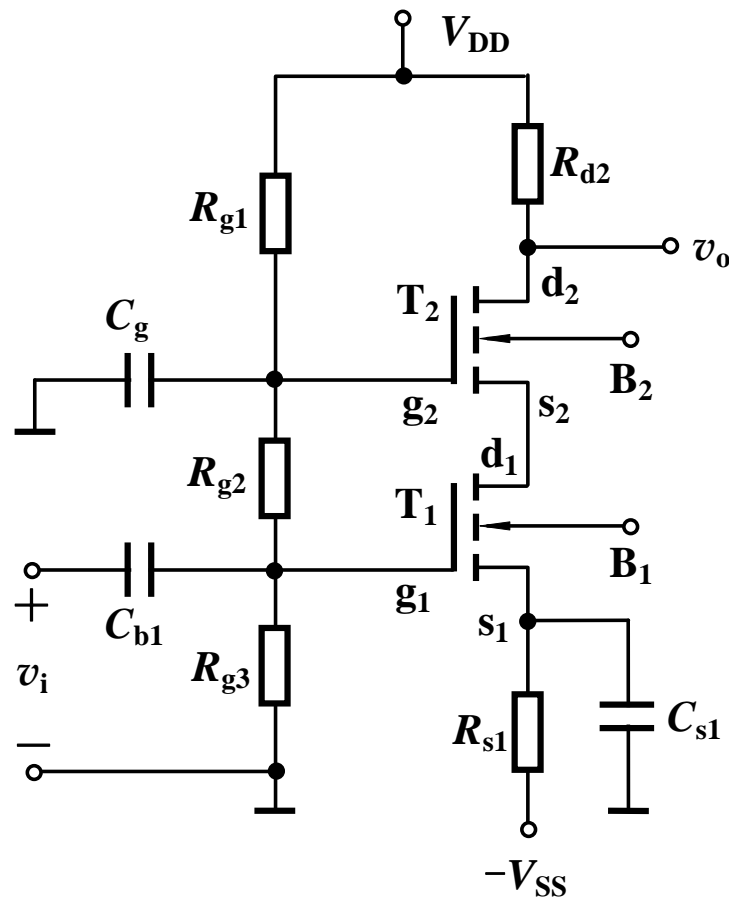
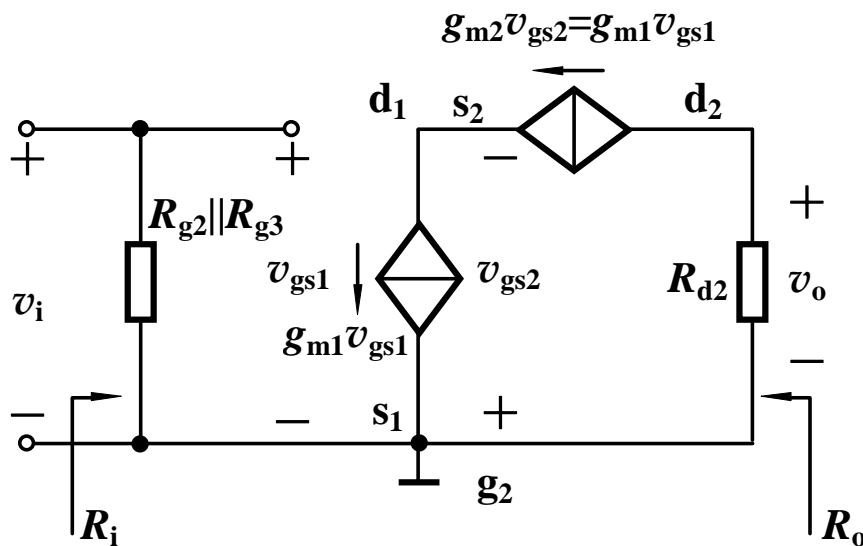


## 4.7.2 共源-共栅放大电路

### 例2

### 2. 动态分析

小信号等效电路



电压增益

$$v_i = v_{gs1}$$

$$v_o = -g_{m2} v_{gs2} R_{d2} = -g_{m1} v_{gs1} R_{d2}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -g_{m1} R_{d2}$$

## 4.7.2 共源-共栅放大电路

### 例2

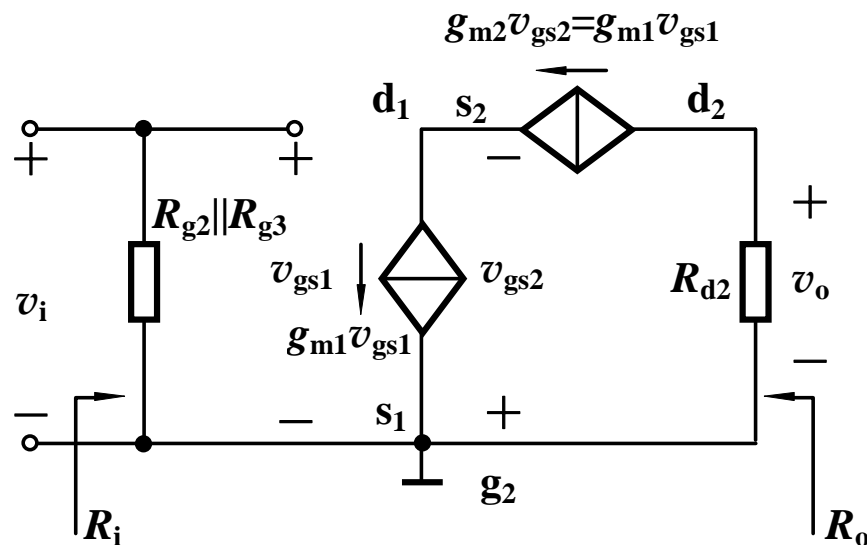
### 2. 动态分析

输入电阻

$$R_i = R_{g2} \parallel R_{g3}$$

输出电阻

$$R_o \approx R_{d2} \quad (\lambda_2 = 0)$$



## 4 场效应三极管及其放大电路

- 4.1 金属-氧化物-半导体 (MOS) 场效应三极管
- 4.2 MOSFET基本共源极放大电路
- 4.3 图解分析法
- 4.4 小信号模型分析法
- 4.5 共漏极和共栅极放大电路
- 4.7 组合放大电路
- 4.9 各种FET的特性及使用注意事项



## 4.9 各种FET的特性及使用注意事项

表 4.10.1 各种场效应管的特性比较

|               | N 沟道  |            |                         | P 沟道  |            |                         |
|---------------|---|------------|-------------------------|---|------------|-------------------------|
|               | 增强型 MOSFET  | 耗尽型 MOSFET | 耗尽型 JFET                | 增强型 MOSFET  | 耗尽型 MOSFET | 耗尽型 JFET                |
| 电路符号          |   |            |                         |   |            |                         |
| $V_T$ 或 $V_P$ | +   | -          | -                       | -   | +          | +                       |
| $K_n$ 或 $K_p$ | $K_n = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} (W/L) = \frac{1}{2} K'_n (W/L)$ |            | $K_n = I_{DSS} / V_P^2$ | $K_p = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} (W/L) = \frac{1}{2} K'_n (W/L)$ |            | $K_p = I_{DSS} / V_P^2$ |
| 输出特性          |   |            |                         |   |            |                         |
| 转移特性          |   |            |                         |   |            |                         |

## 思考：

- 对于MOSFET有没有给出其输出特性曲线完整的数学模型（特性方程）？
- 三极管放大作用的本质是其控制作用。在MOSFET中，是通过怎样的控制关系反映其放大作用的？
- MOSFET中的 $i_D$ 和 $v_{GS}$ 是线性关系吗？这种关系反应了哪个参数的特性？意味着怎样的物理意义？
- MOSFET的栅极绝缘带来了哪些好处？
- 增强型和耗尽型MOSFET有何差别？N沟道和P沟道MOSFET有何差别？处于放大状态时它们各需要怎样的静态偏置？

## 思考：

- ☐ 如何理解放大电路的静态和动态？它们与直流通路和交流通路有何关系？画直流通路和交流通路的方法是什么？
- ☐ MOSFET小信号模型适用的前提条件是什么？
- ☐ MOSFET的小信号模型参数 $g_m$ 与静态工作点有关吗？
- ☐ MOSFET中的宽长比可直接影响它的互导参数，这一关系带来了什么好处？
- ☐ 如何分析MOSFET放大电路的静态工作点和动态指标？
- ☐ MOSFET三种组态（共源、共漏、共栅）放大电路各有什么特点？