

## 第三章

# 场效应晶体管及其放大电路



## § 3.1 场效应晶体管

**晶体三极管是多子和少子均参与导电的双极型晶体管。**

**场效应管 (Field Effect Transistor 简称FET) 与双极性晶体管不同，它是多子导电(在电场下的漂移运动)，故又称为单极型晶体管。**

**场效应管是利用电场/电压来控制半导体中电流的一种半导体器件，故因此而得名。**

与双极型晶体管相比，场效应管具有如下特点：

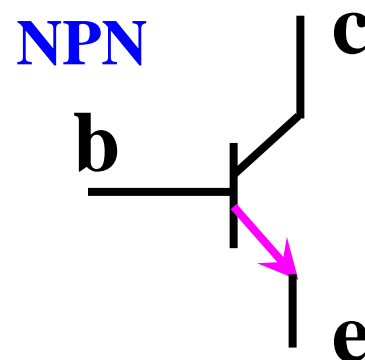
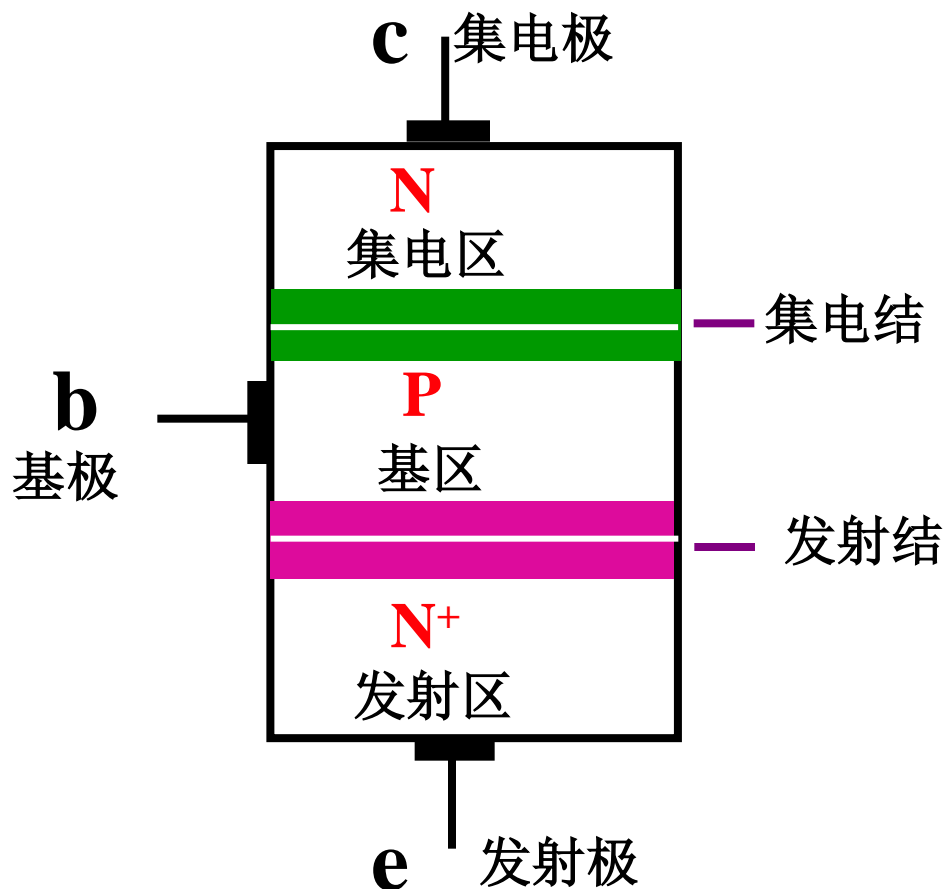
- (1) 输入端电流极小，因此它的输入电阻很大；
- (2) 利用多数载流子导电，因此它的温度稳定性较好；
- (3) 由于不存在少子杂乱运动引起的散粒噪声，所以噪声低；
- (4) 抗辐射能力强、制造工艺简单和便于集成化等优点。

场效应管按结构分有两大类：

场效应管(FET) { 结型场效应管(Junction FET)  
绝缘栅场效应管(Insulated Gate FET)

与结型场效应管相比，绝缘栅型场效应管性能更为优越，发展迅速，应用广泛。

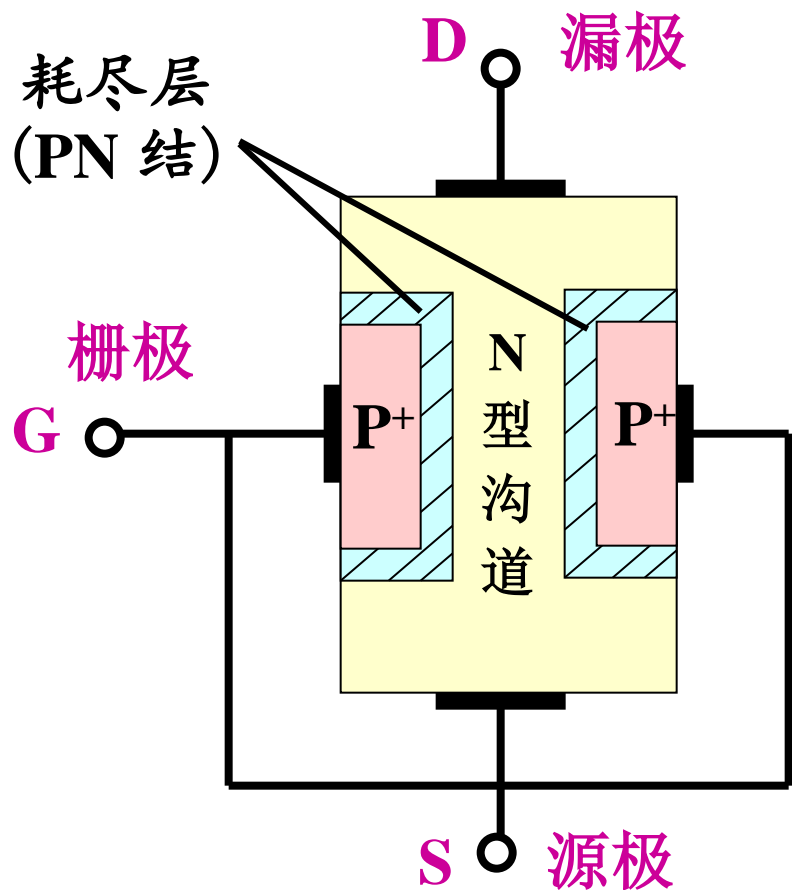
## 回顾：双极型晶体管的结构



发射极箭头方向是指发射结正偏时的电流方向

# 1. 结型场效应管(JFET)

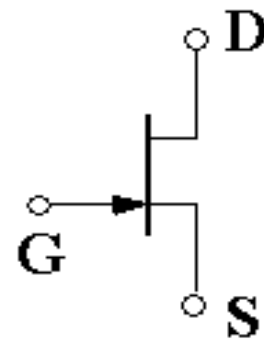
## 一、结构 (N沟道结型场效应管)



两个PN结之间的N型半导体构成导电沟道。

**多数载流子为电子。**

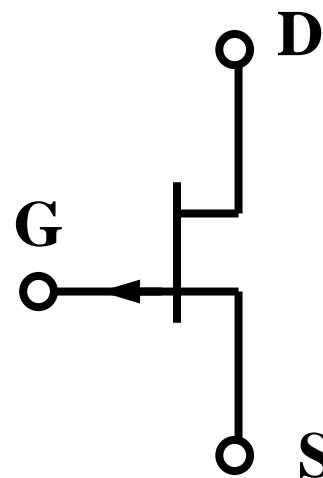
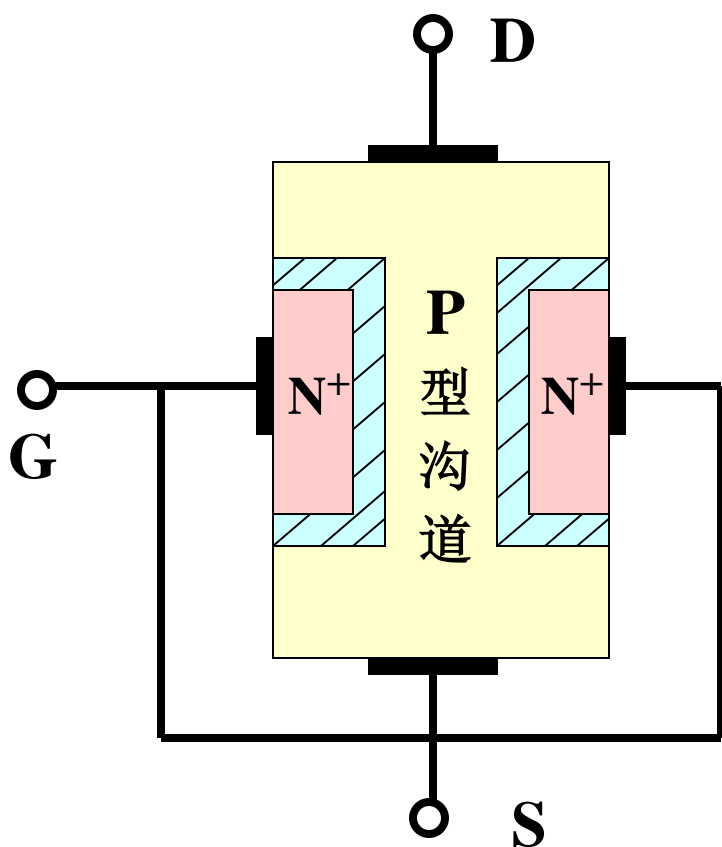
符号



箭头方向表示栅源间PN结加正向偏压时栅极电流的实际流向。

## P 沟道结型场效应管

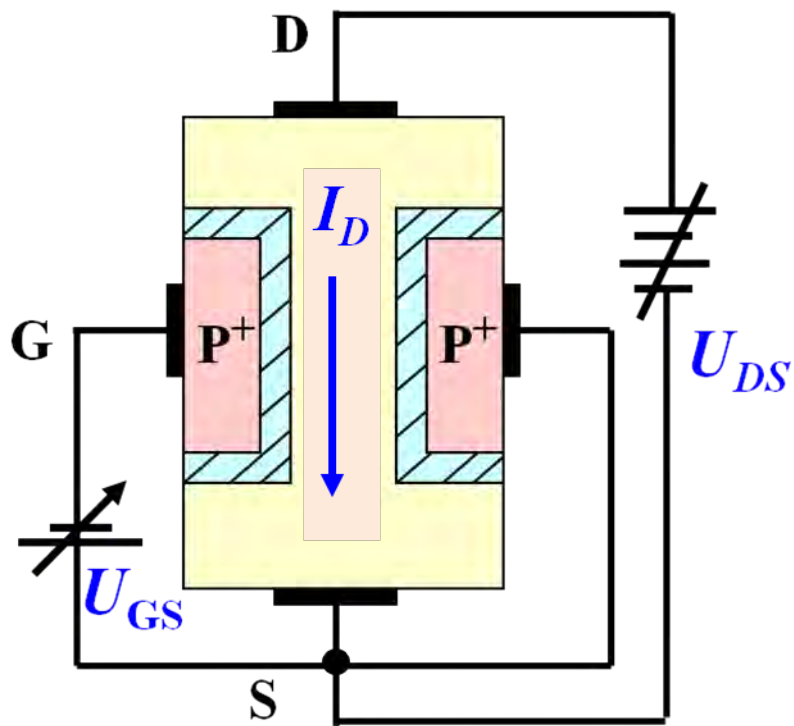
导电沟道为P型半导体，  
多数载流子为空穴。



符号

## 二、工作原理

N沟道JFET工作时, 需在漏极和源极之间加正电压 $U_{DS}$ , 栅极和源极之间加负电压 $U_{GS}$ 。



$U_{DS}$ 加正电压, N沟道的多子(自由电子)便在此电场下作定向漂移运动——形成漏极电流 $I_D$ 。

$U_{GS}$ 加负电压, 栅极电流 $i_G \approx 0$ , 耗尽层会变宽, 且主要向轻掺杂的N(沟道)区扩展, 导电沟道宽度减小, 使沟道自身的电阻值增大。(详情见下)

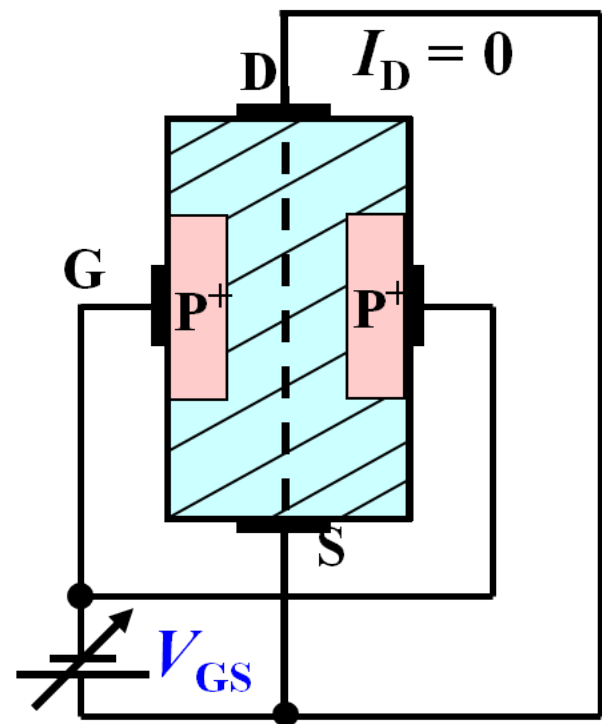
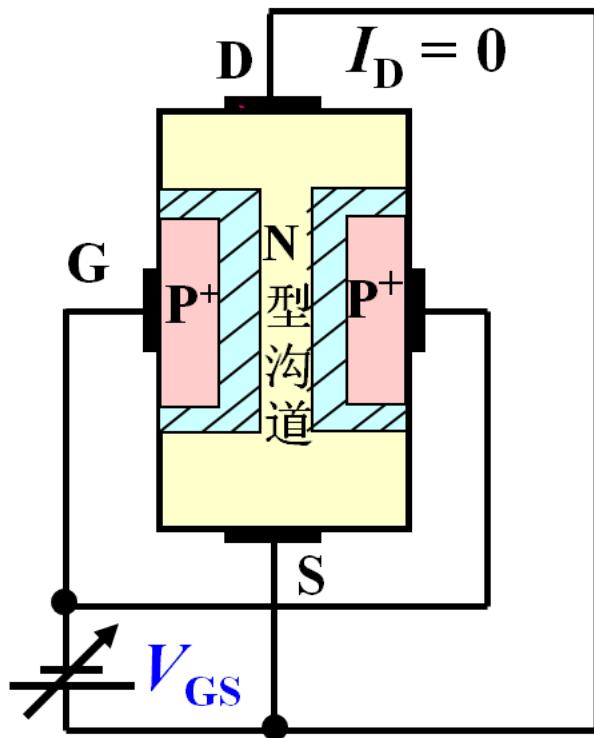
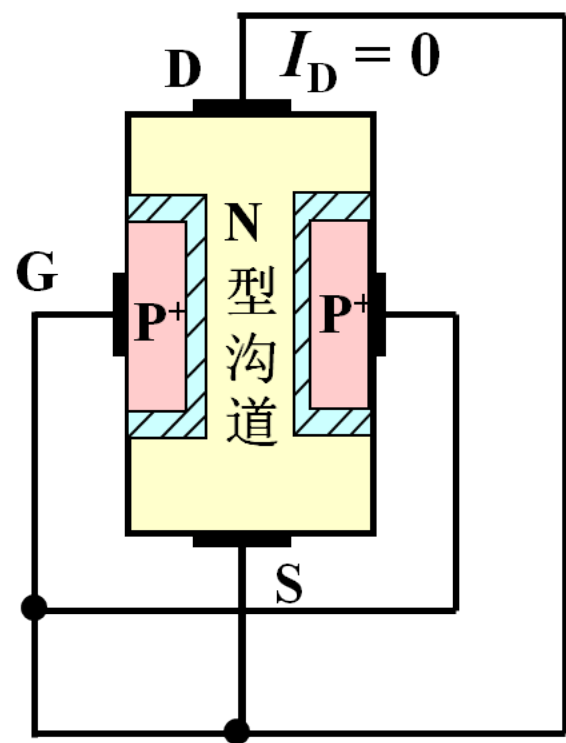
# 1. 当 $U_{DS}=0$ 时, 横向电压 $u_{GS}$ 对导电沟道的控制作用

$U_{GS}=0$  时, 耗尽层自然宽度, 沟道自身的电阻较小

$U_{GS}$  由 0 逐渐减小, 耗尽层变宽,  $\therefore$  沟道变窄  
沟道自身的电阻增大

当  $U_{GS}=U_{GS(off)}$ , 耗尽层合拢, 沟道被夹断  
沟道自身的电阻极大

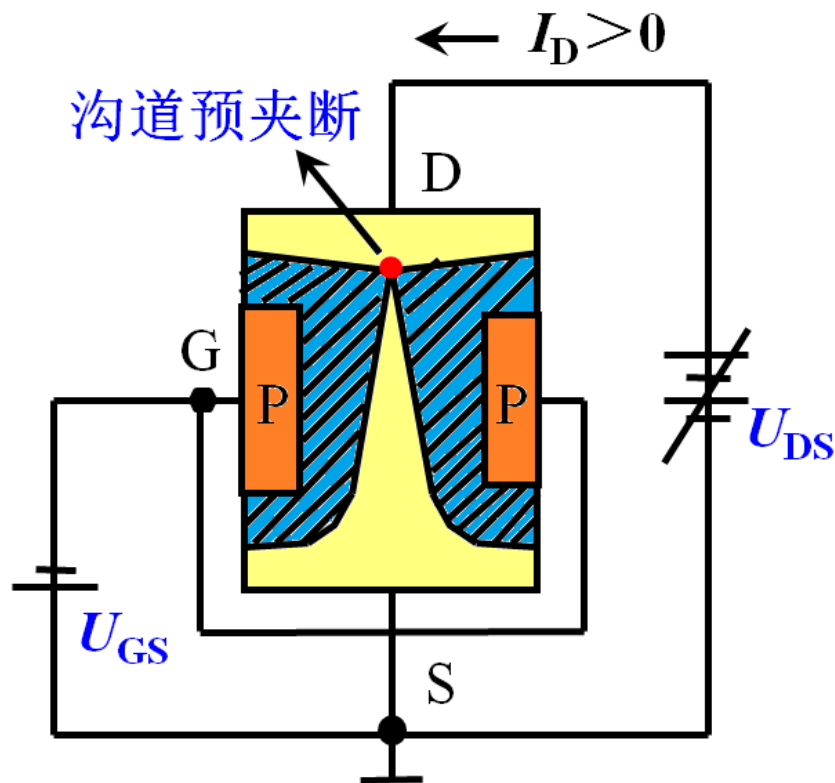
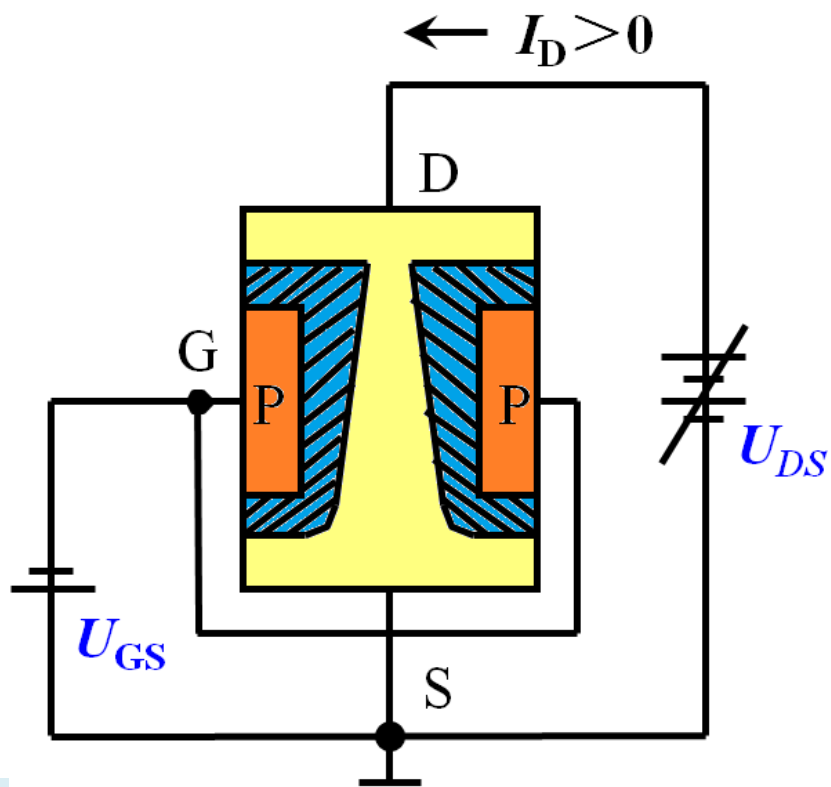
夹断电压



2. 当 $u_{GS}$ 固定且 $|u_{GS}| < |u_{GSoff}|$ 时, 纵向电压 $u_{DS}$ 对漏极电流 $i_D$ 的影响

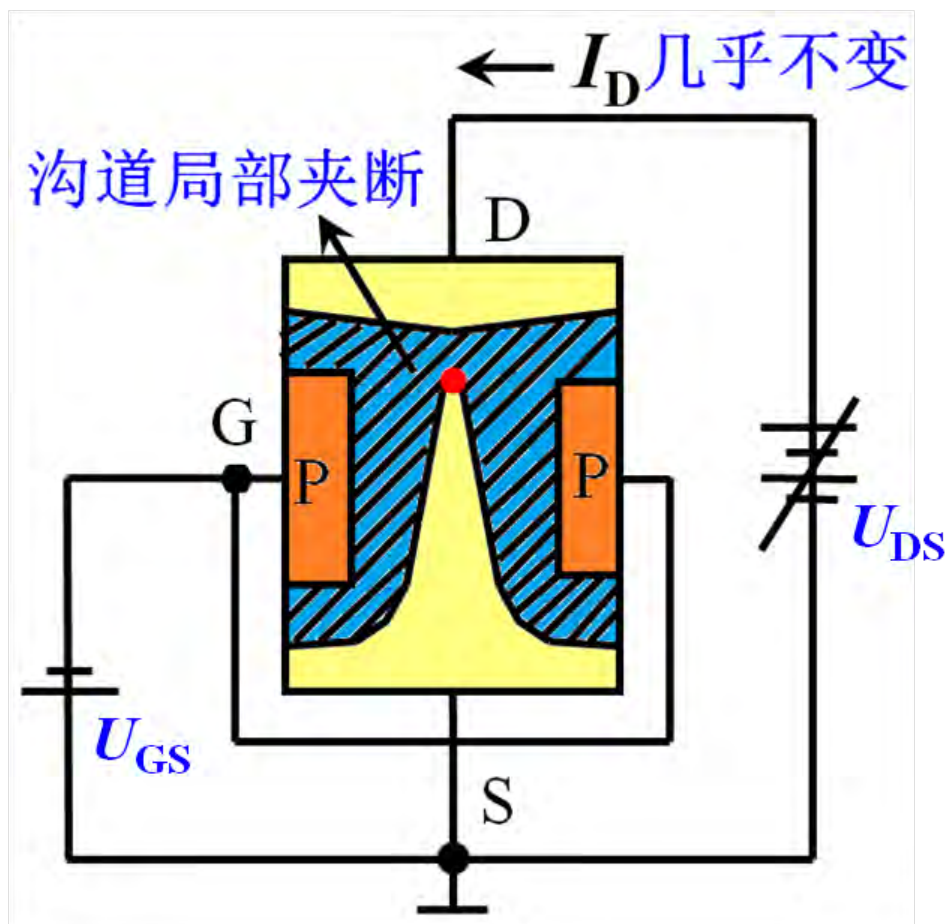
$|u_{GD}| < |U_{GS(off)}|$  (预夹断前)

$|u_{GD}| = |U_{GS(off)}|$  (预夹断时)



沟道成楔型结构 (上窄下宽)

$|u_{GD}| > |U_{GS(off)}|$  (预夹断后)



此时，

$U_{DS}$  的增大，几乎全部用来克服沟道的电阻， $I_D$  几乎仅仅决定于  $u_{GS}$ ，而与  $u_{DS}$  无关。此时，可以把  $i_D$  近似看成  $u_{GS}$  控制的电流源。

### 三、特性曲线

$i_G=0$ ——输入电流

$U_{GS}$ ——输入电压

$i_D$ ——输出电流

$U_{DS}$ ——输出电压

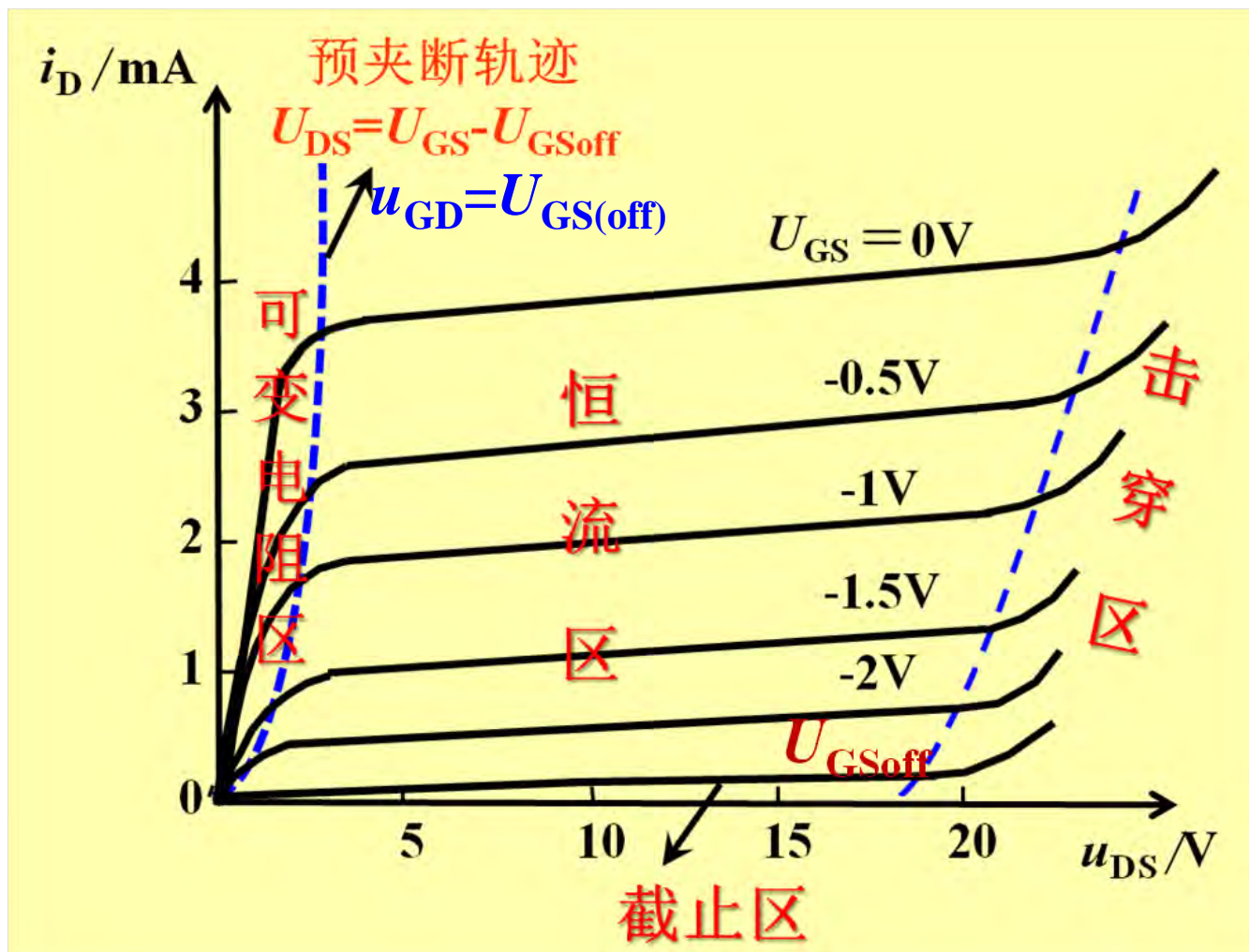
因为N沟JFET工作时,需在漏极和源极之间加正电压 $U_{DS}$ ,在栅极和源极之间加负电压 $U_{GS}$ ,所以栅极输入电流 $i_G$ 始终近似为0。

我们只讨论输出特性曲线  $i_D = f(u_{DS}) \Big|_{U_{GS}=C}$

和转移特性曲线  $i_D = f(u_{GS}) \Big|_{U_{DS}=C}$ 。

# 1. 输出特性曲线 $i_D = f(u_{DS}) \Big|_{U_{GS}=C}$

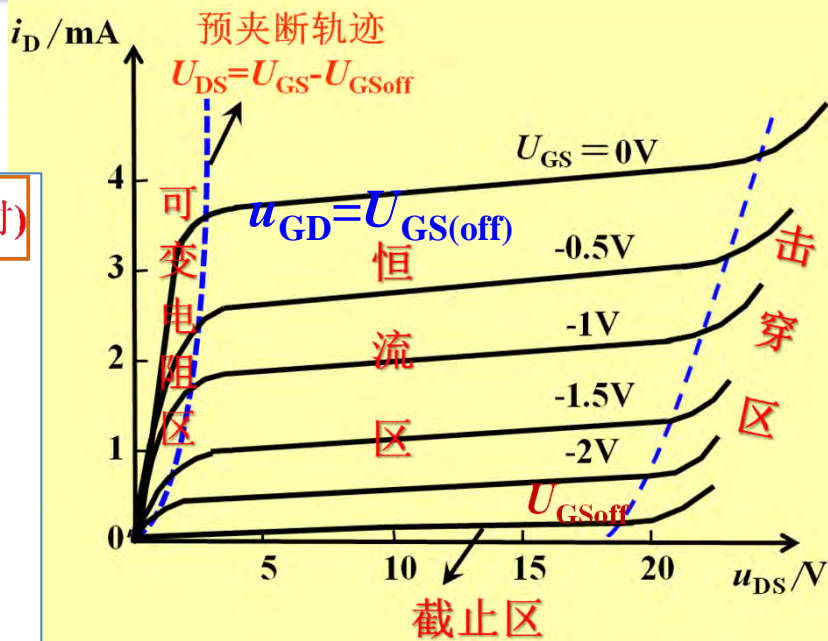
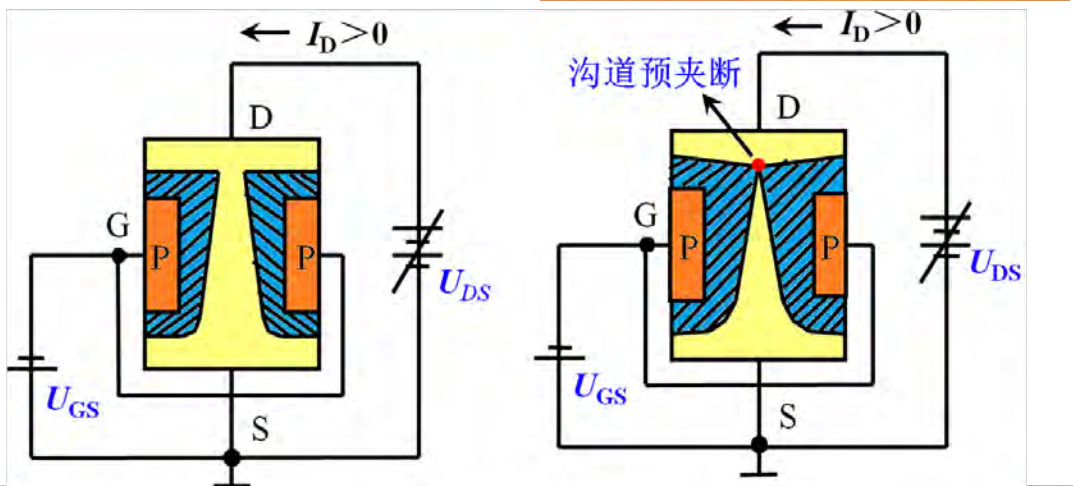
分为四个区域：可变电阻区、恒流区、截止区、击穿区。



# (1) 可变电阻区

$|u_{GD}| < |U_{GS(off)}|$  (预夹断前)

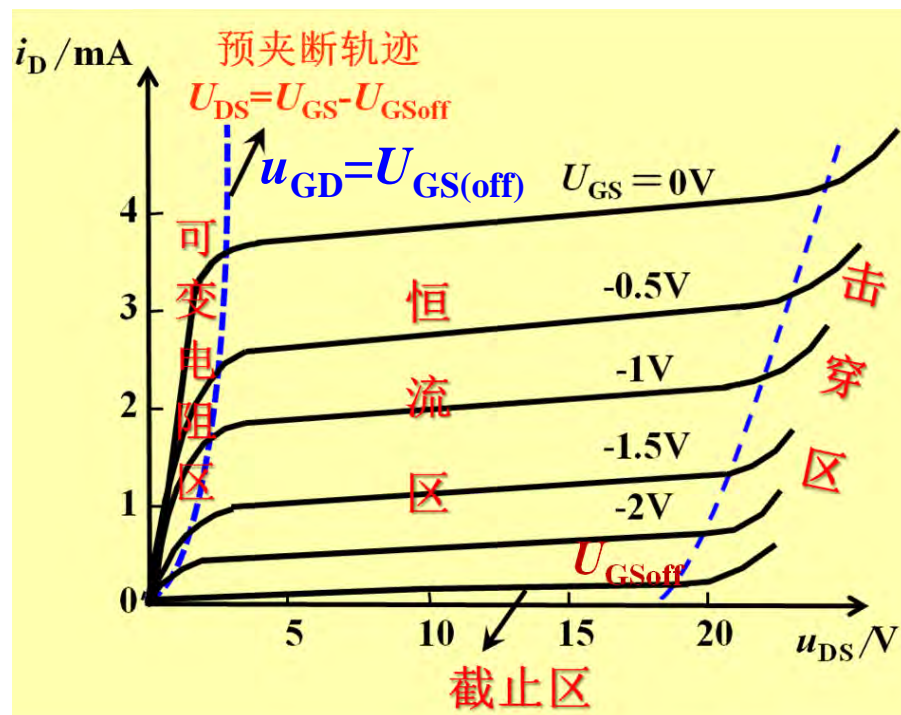
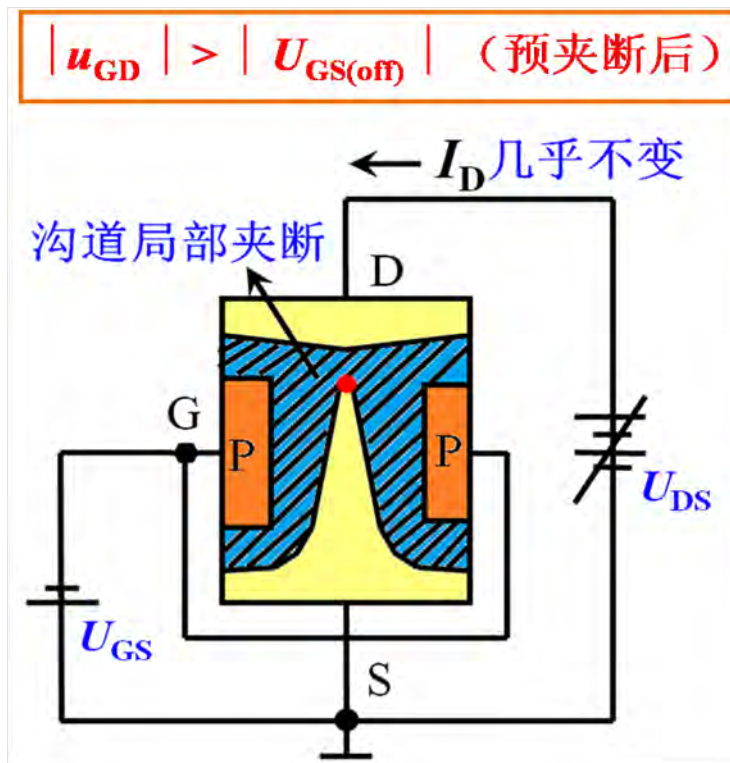
$|u_{GD}| = |U_{GS(off)}|$  (预夹断时)



## 特点:

1. 当  $u_{DS}=0$  时,  $i_D=0$ 。
2. 当  $u_{DS}>0$  时,  $i_D$  几乎与  $u_{DS}$  成线性关系, 沟道相当于线性电阻。改变  $U_{GS}$  时, 特性曲线斜率变化, 因此管沟道可看成一个由  $U_{GS}$  控制的可变电阻。

## (2) 恒流区



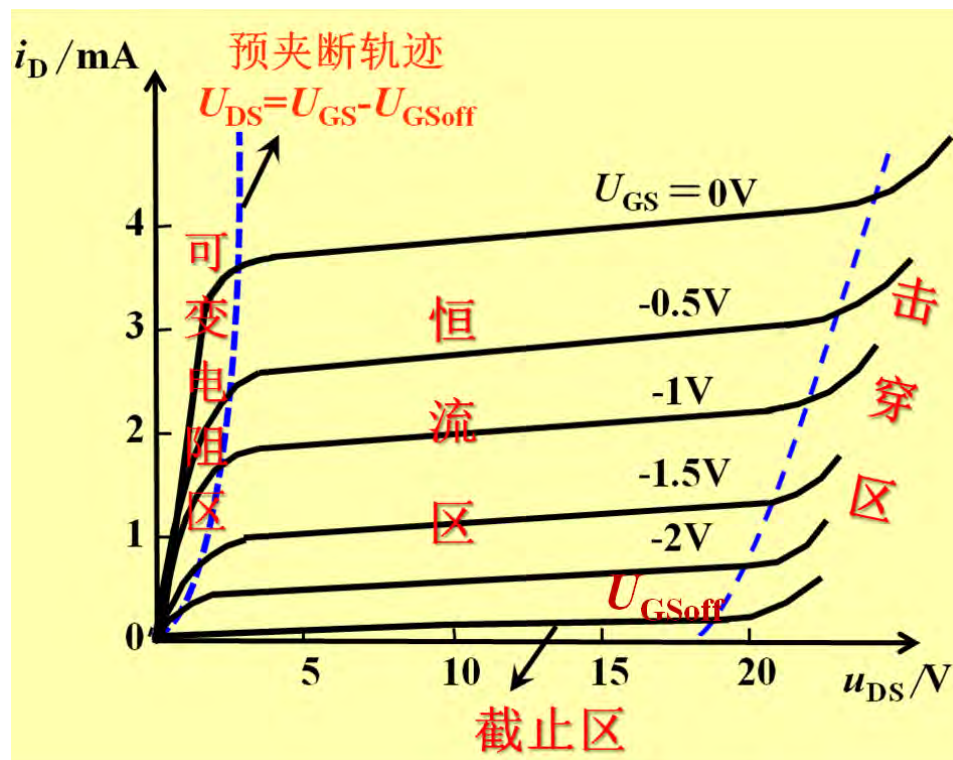
特点:

输出电流  $i_D$  基本上不受输出电压  $U_{DS}$  的影响,

仅取决于  $U_{GS}$ 。 可以把  $i_D$  近似看成  $u_{GS}$  控制的电流源。

### (3) 截止区

靠近横轴的部分，当  $|U_{GS}| \geq |U_{GSoff}|$  时，沟道被全部夹断， $i_D=0$ 。



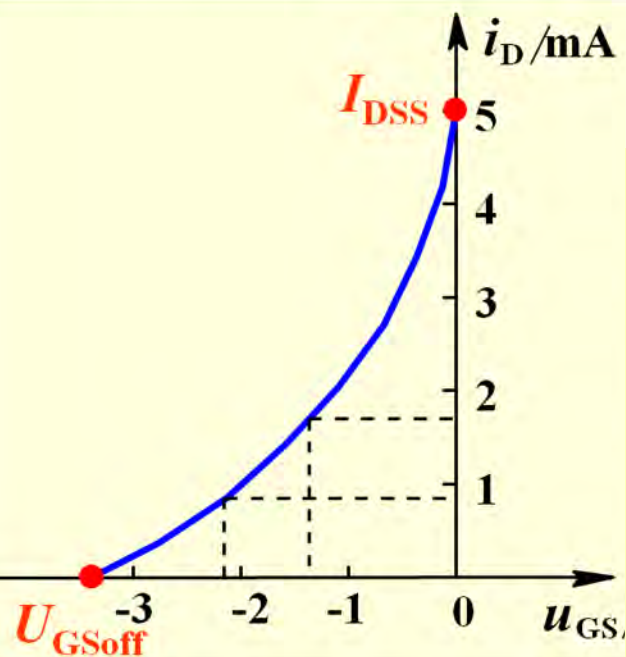
### (4) 击穿区

上翘部分，当  $u_{DS} \geq U_{(BR)DSO}$  时，靠近漏区的PN结反向击穿， $i_D$  急剧增大。

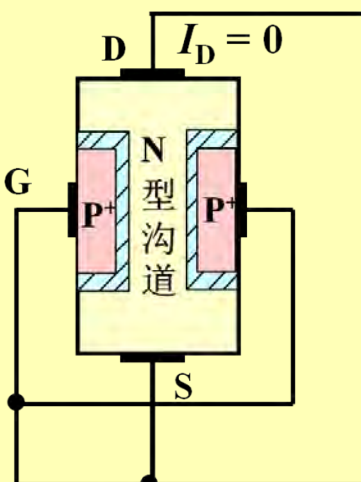
## 2. 转移特性曲线 $i_D = f(u_{GS}) \Big|_{u_{DS}=C}$

场效应管工作在**恒流区**

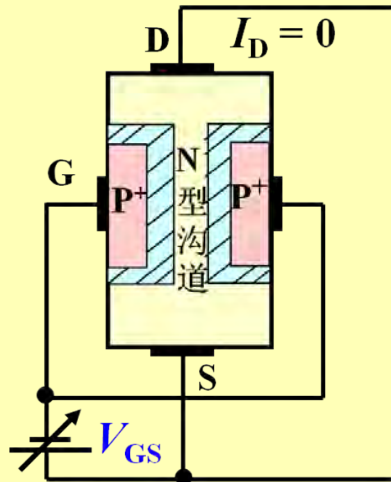
$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GSoff}}\right)^2$$



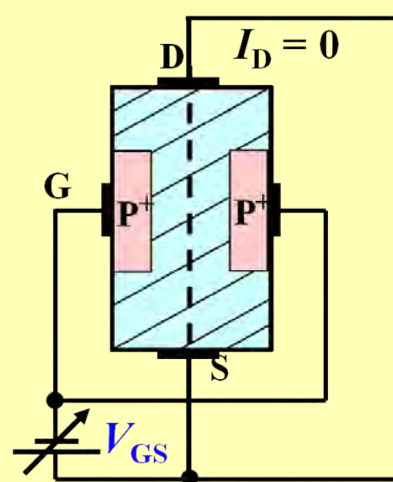
$U_{GS}=0$ 时，耗尽层自然宽度，沟道自身的电阻较小



$U_{GS}$ 由0逐渐减小，耗尽层变宽，∴沟道变窄，沟道自身的电阻增大



当  $U_{GS}=U_{GS(off)}$ ，耗尽层合拢，沟道被夹断，沟道自身的电阻极大



夹断电压

可见，为保证场效  
即对于N型JFET，需

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

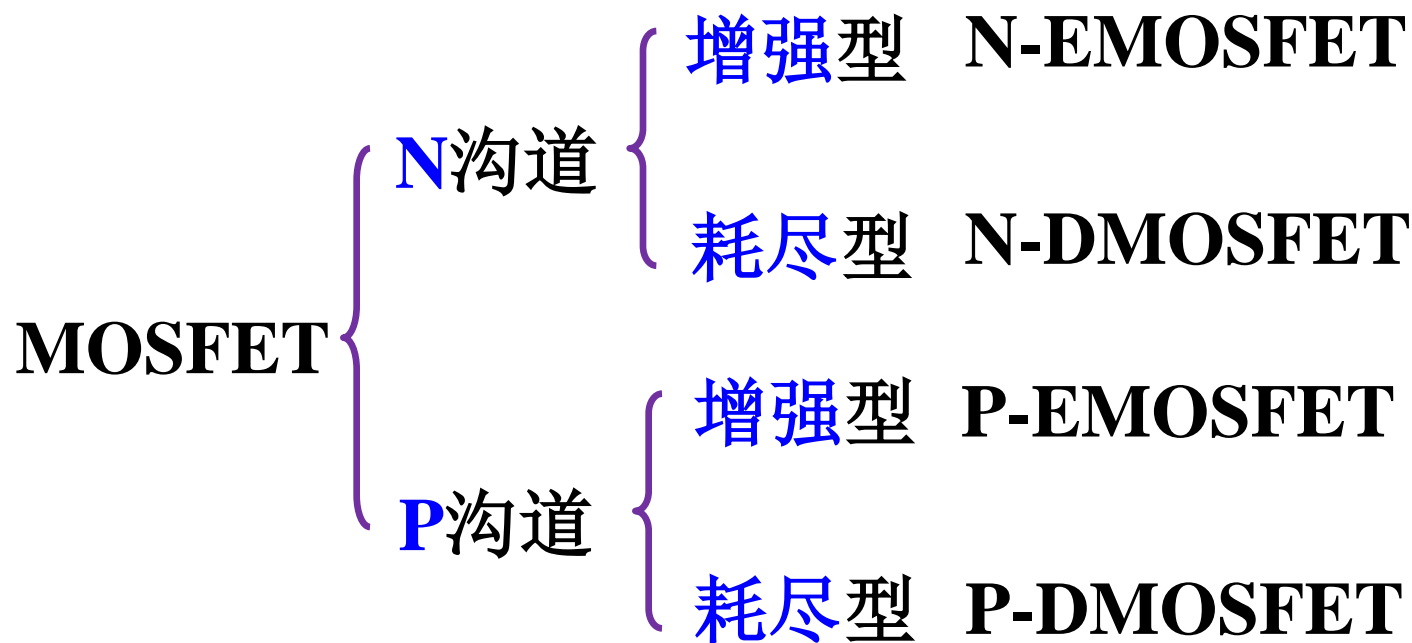
## 2. 绝缘栅场效应管(IGFET)

栅极与沟道之间隔了一层很薄的绝缘层( $\text{SiO}_2$ )。最常见的绝缘栅场效应管是由金属、氧化物和半导体制成,称为金属-氧化物-半导体场效应管,或简称**MOSFET** (Metal Oxide Semiconductor FET)。

与JFET相比,其输入电阻更高,而且功耗更低,集成度高,所以应用更广泛。

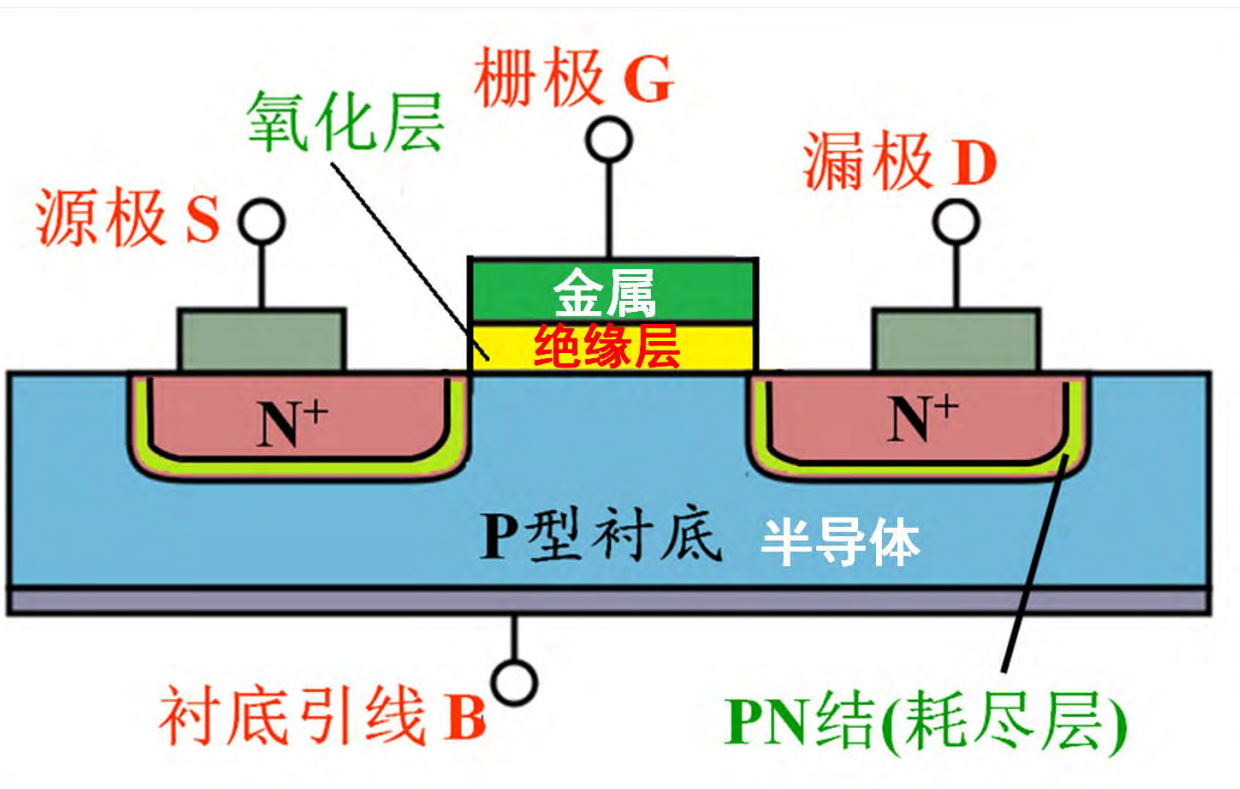
## IGFET分类:

- (1) 根据沟道的导电类型，分为**N沟道**和**P沟道**两类。
- (2) 根据 $u_{GS}=0$ 时，漏源之间是否有导电沟道又可分为**增强型(无 $I_D$ )**和**耗尽型(有 $I_D$ )**两种。

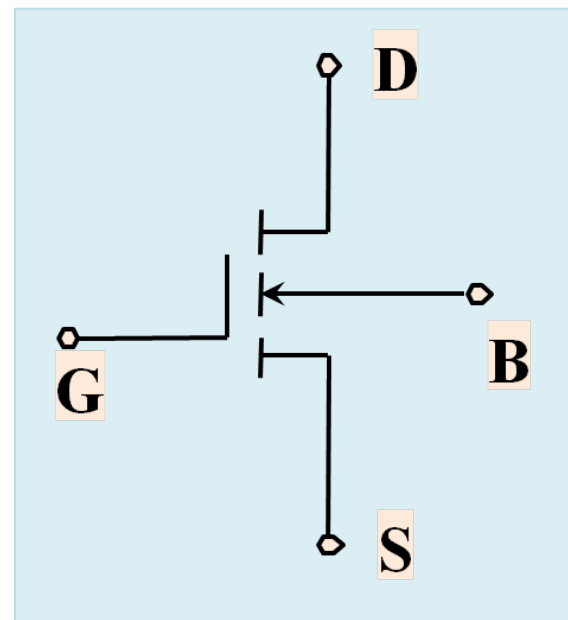


# 一、N沟道增强型MOSFET

## 1. 结构及电路符号



箭头向内表示N沟道



漏源之间的直线断为三段表示不加栅极电压时没有导电沟道

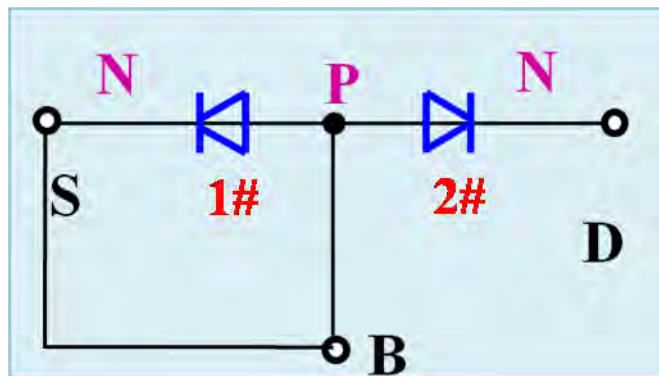
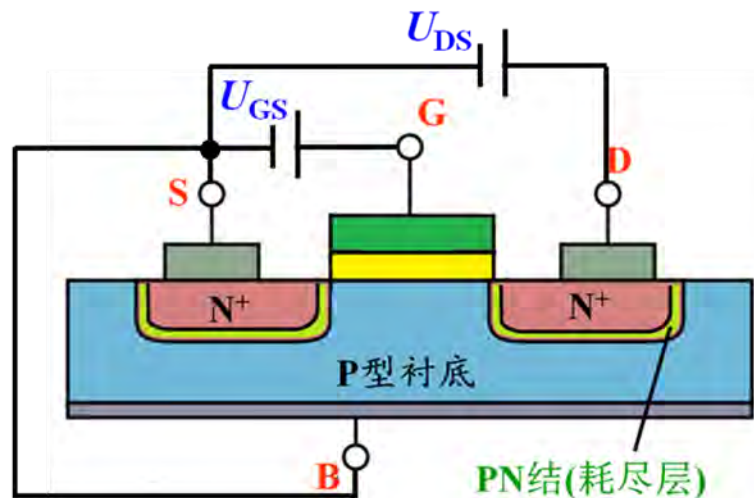
## 2. 导电沟道的形成及工作原理

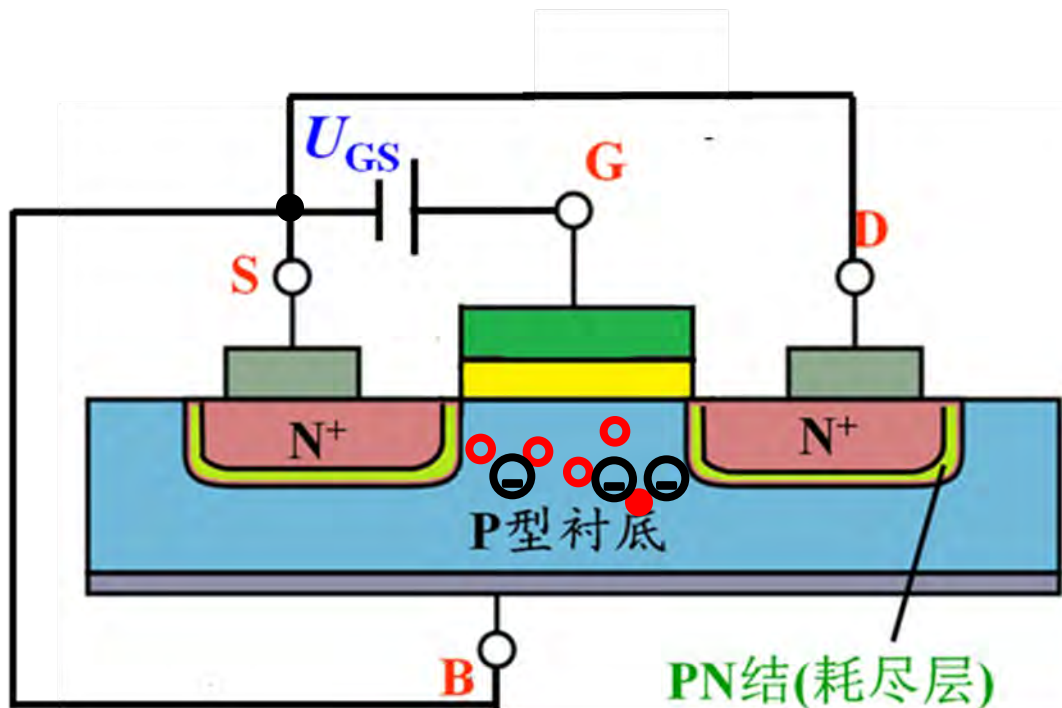
N沟道增强型MOS工作时,通常将源极与衬底相连并接地,栅极和源极之间加正电压 $U_{GS}$ ,在漏极和源极之间加正电压 $U_{DS}$ 。

### (1) 栅源电压 $U_{GS}$ 对 $I_D$ 的控制作用

#### ① 当 $U_{GS}=0$ 时

漏源之间相当于两个背靠背的PN结,因为 $U_S=U_B$ ,所以1#PN结两端无外加电压,故其中没有电流流过,所以无论漏源之间的电压 $U_{DS}$ 如何,漏源之间都没有电流能流过。

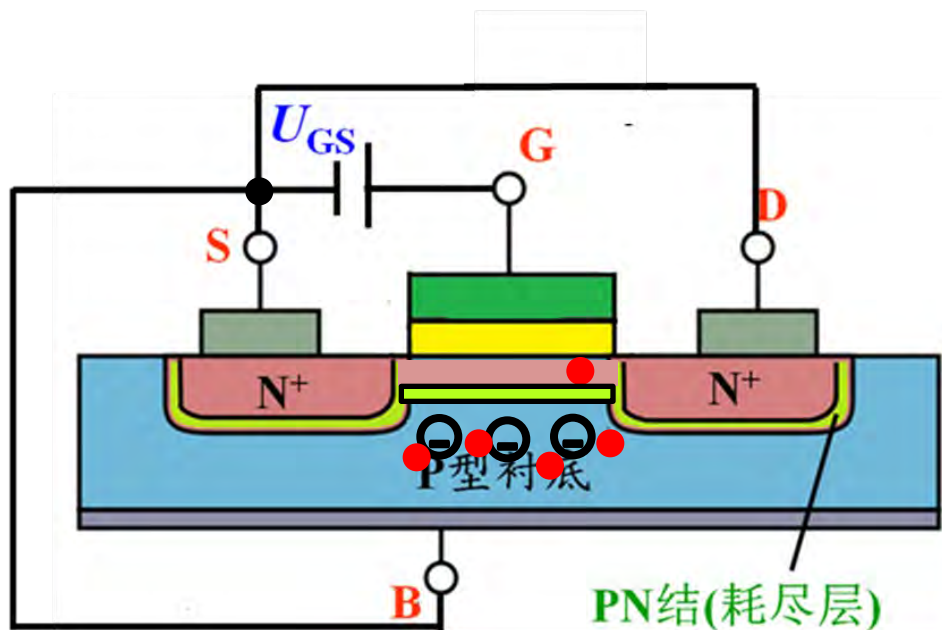


② 当  $U_{GS} > 0$  时

- 电子
- 空穴
- ⊖ 负离子

$U_{GS}$  带给栅极正电荷,将靠近绝缘层下方的P型半导体中的空穴向下排斥,电子将上吸引,但数量有限,不足以形成沟道。

### ③ 当 $U_{GS}$ 增大至 $\geq U_{GS(th)}$ 时



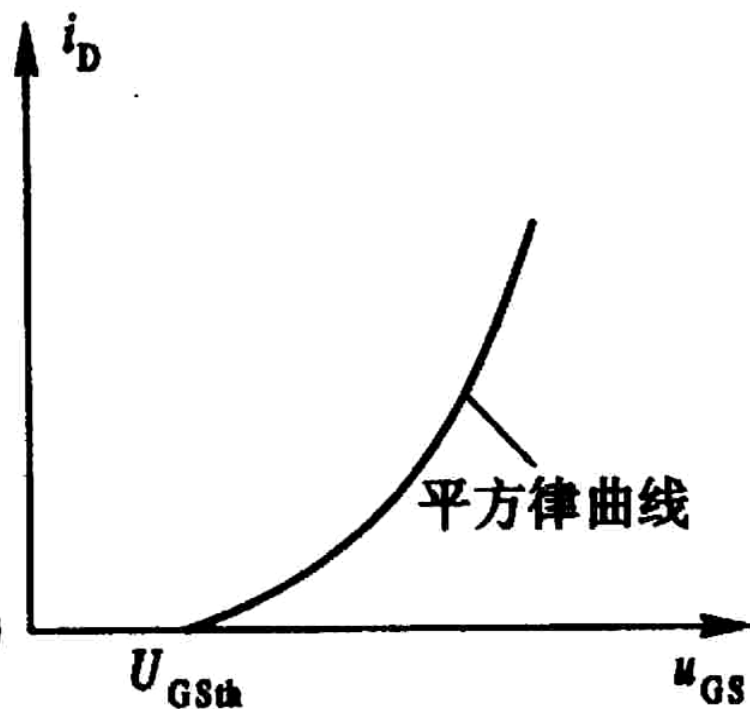
这种必须依靠 G-S 电压作用才能形成导电沟道的 MOS 管，称为**增强型 MOS 管**。

表层中聚集较多的电子，可以形成沟道，将漏极和源极沟通。如果此时加有漏源电压，就可以形成漏极电流  $I_D$ 。因导电沟道中的电子与 P 型半导体的多子空穴的极性相反，故称这一层为**反型层**。

$U_{GS(th)}$  为形成这种反型层沟道所需的栅源电压值，称**开启电压**。

$u_{GS}$  越大  $\rightarrow$  沟道越宽  $\rightarrow$  沟道电阻越小  $\rightarrow i_D$  越大

相应的N沟增强型MOSFET的转移特性如下：



在一定的漏极正电压 $u_{DS}$ 下，

(1) 当 $u_{GS} < U_{GSth}$ 时， $i_D = 0$ 。

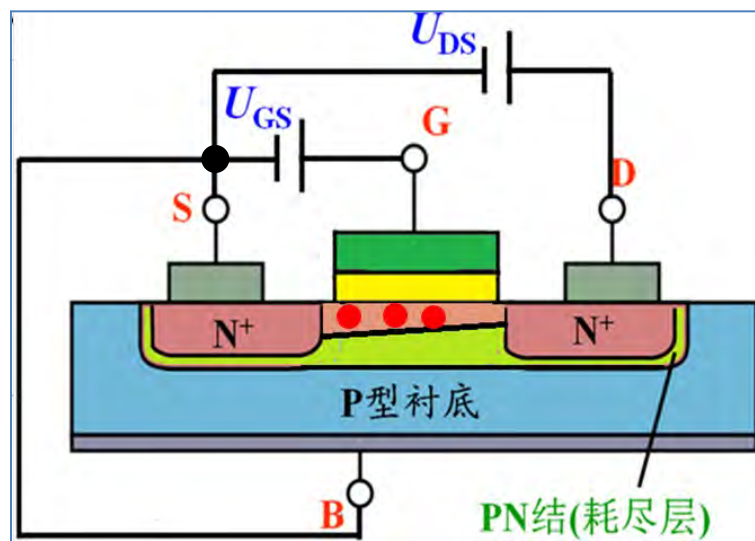
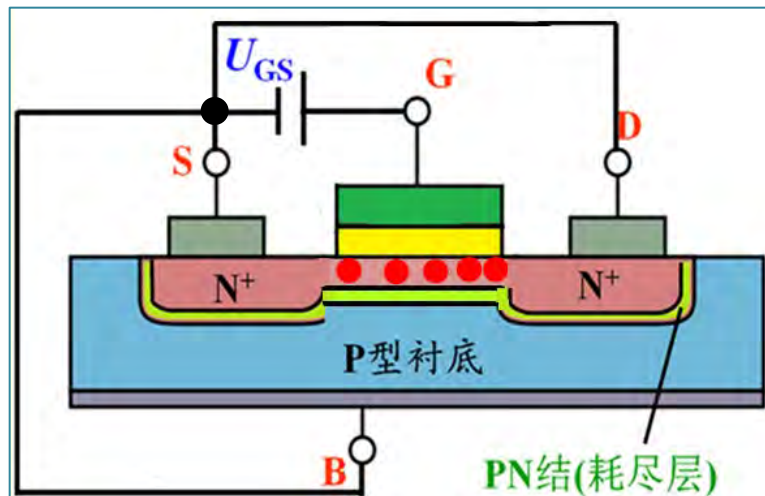
(2) 当 $u_{GS} > U_{GSth}$ 时， $i_D > 0$ ， $u_{GS}$ 越大， $i_D$ 也随之增大，二者符合平方律关系。

$$i_D = k \frac{W}{L} (u_{GS} - U_{GSth})^2$$

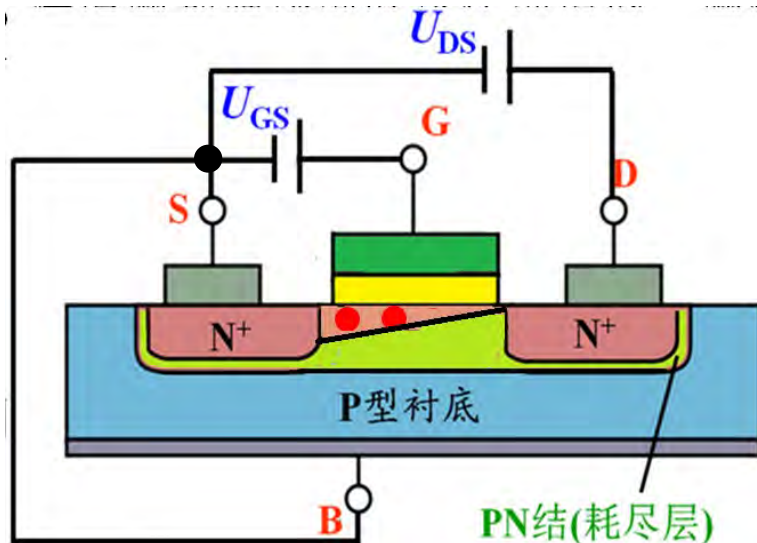
## (2) 漏源电压 $u_{DS}$ 对沟道导电能力的控制

当  $U_{GS}$  固定且  $> U_{GS(th)}$  时,  $U_{DS}$  从 0 逐渐增加, 此时沟道的变化如下:

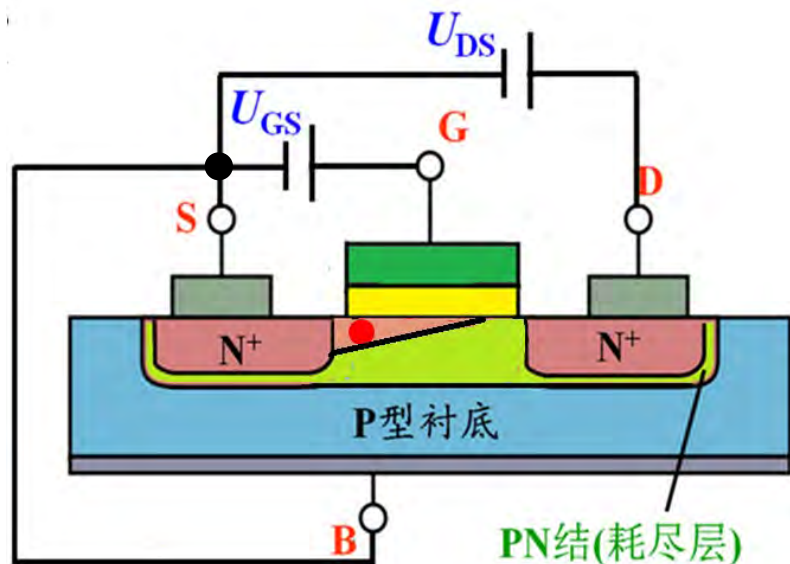
① 因为源极和衬底相连接, 所以加入  $u_{DS}$  后,  $u_{DS}$  将沿漏到源逐渐降落在沟道内, 漏极和衬底之间反偏最大, 所以此 PN 结的宽度最大, 这样在漏源之间就形成了一个倾斜的 PN 结区, 从而影响沟道的导电性。



②当  $u_{DS}$  进一步增加至  $u_{GD} = U_{GS(th)}$  时，漏端的耗尽层上移，会在漏端出现预夹断状态。

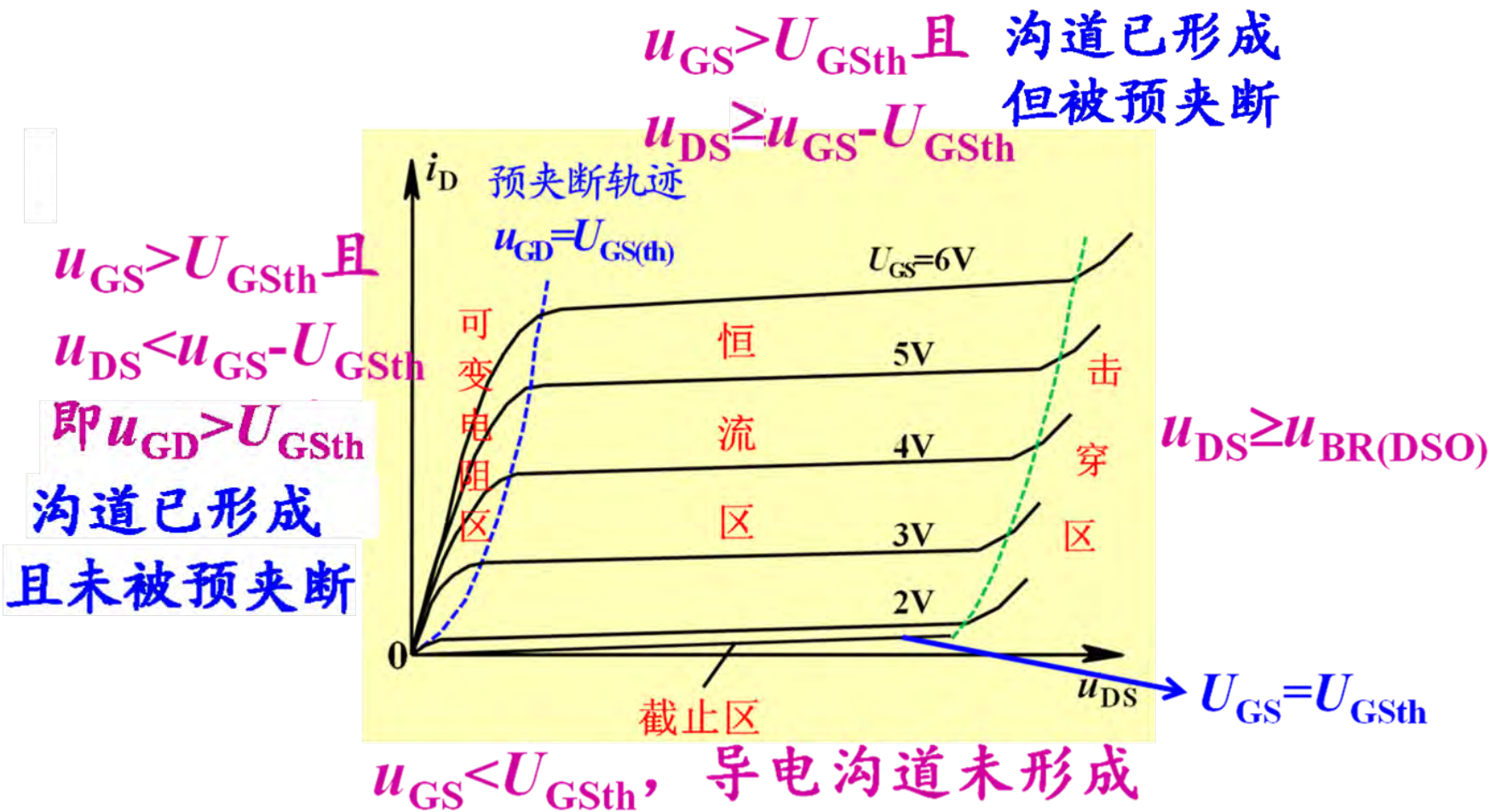


③当  $u_{DS}$  再进一步增加时，漏端的耗尽层向源极伸展，此时  $I_D$  基本不再增加，增加的  $u_{DS}$  基本上降落在夹断区。



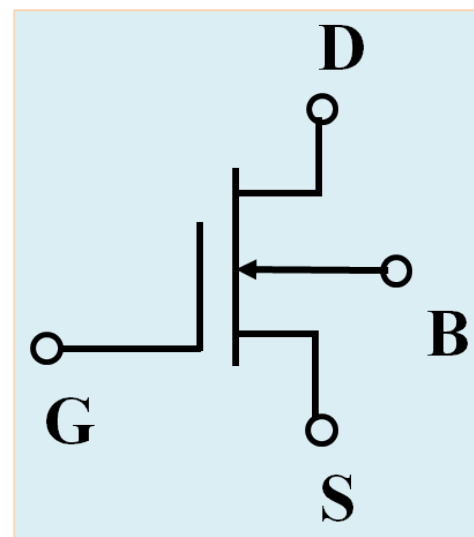
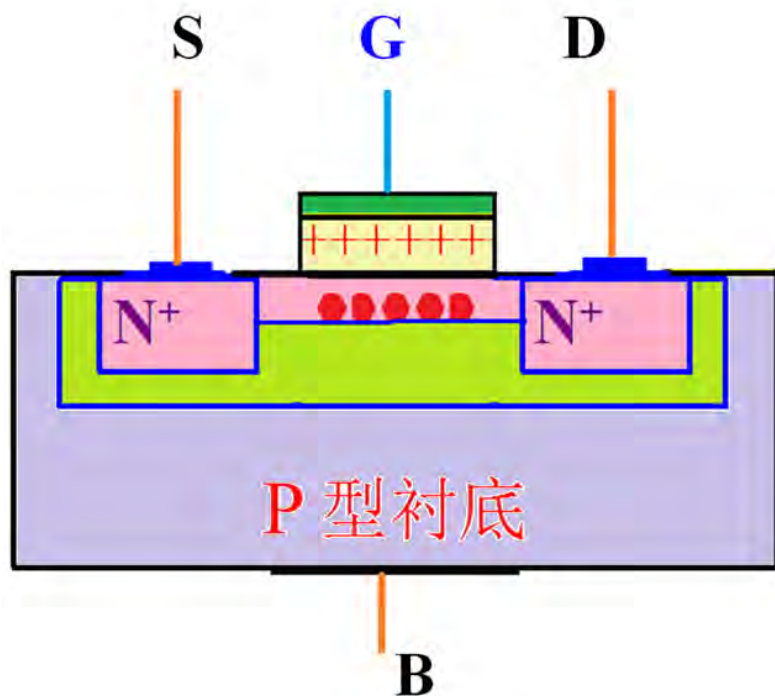
### 3. 输出特性曲线 $i_D = f(U_{DS}) \Big|_{U_{GS}=C}$

分为四个区域：可变电阻区、恒流区、截止区、击穿区。



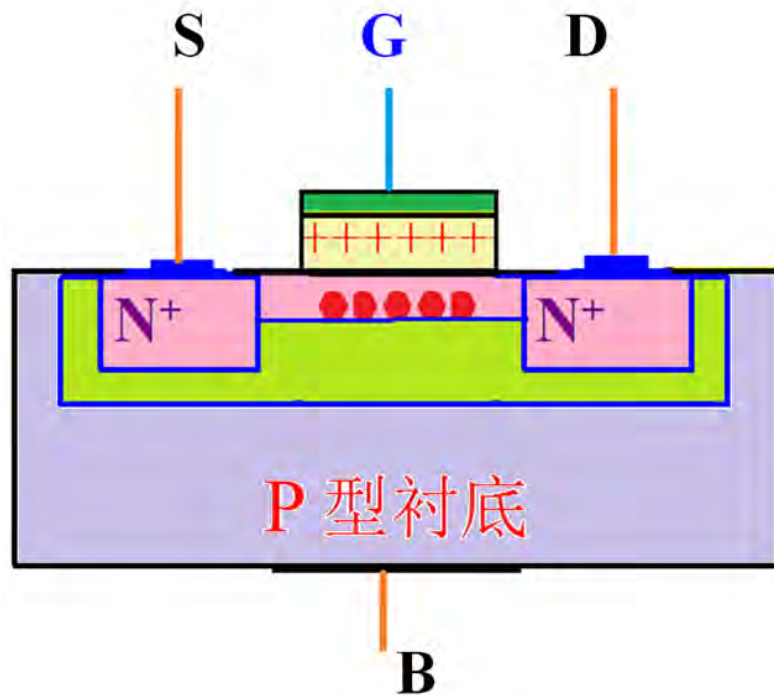
## 二、N沟道耗尽型 MOSFET

漏源之间的直线表示不加栅极电压时，导电沟道就已存在。



制造过程中预先在绝缘层中掺入了正离子，所以即使 $U_{GS}=0$ ，这些正离子电场也能吸引在P型衬底中的电子使其聚集表层形成(原始)N型导电沟道。只要 $u_{DS}>0$ 就可以形成电流 $i_D$ 。

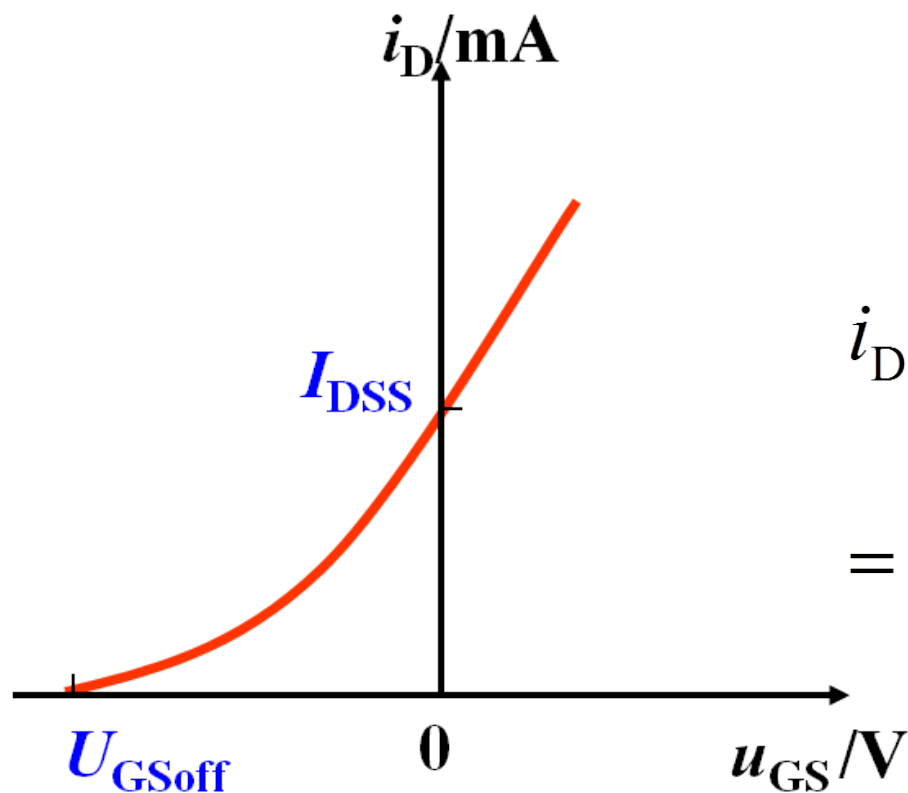
N沟道耗尽型MOS工作时, 通常 $U_{DS} > 0$ ;  $U_{GS}$ 正、负、零均可。



$u_{GS}$ 为正值时 $\rightarrow$ 沟道加宽 $\rightarrow i_D \uparrow$ ;

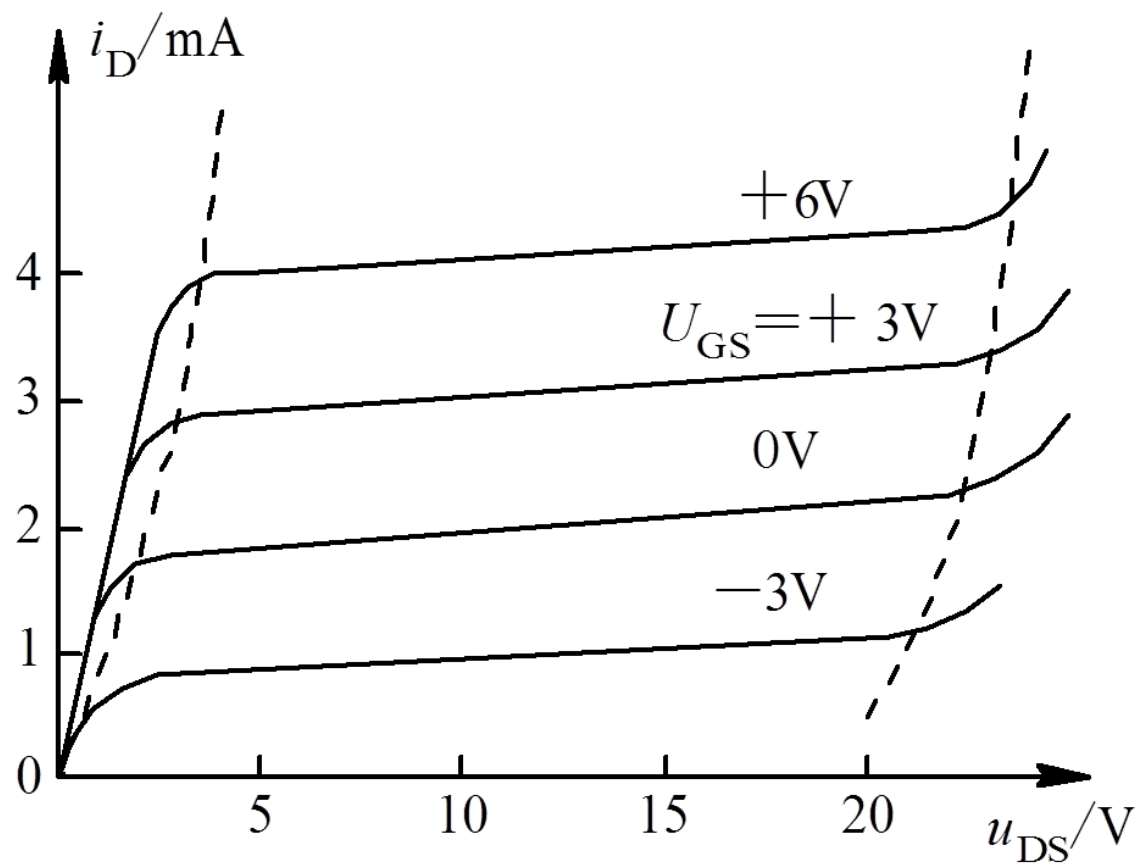
$u_{GS}$ 为负值时 $\rightarrow$ 沟道变窄 $\rightarrow i_D \downarrow$ , 当 $u_{GS}$ 负到 $=U_{GSoff}$ 时 $\rightarrow$ 沟道彻底夹断 $\rightarrow i_D = 0$ , 管子进入截止状态。

## (a) 转移特性

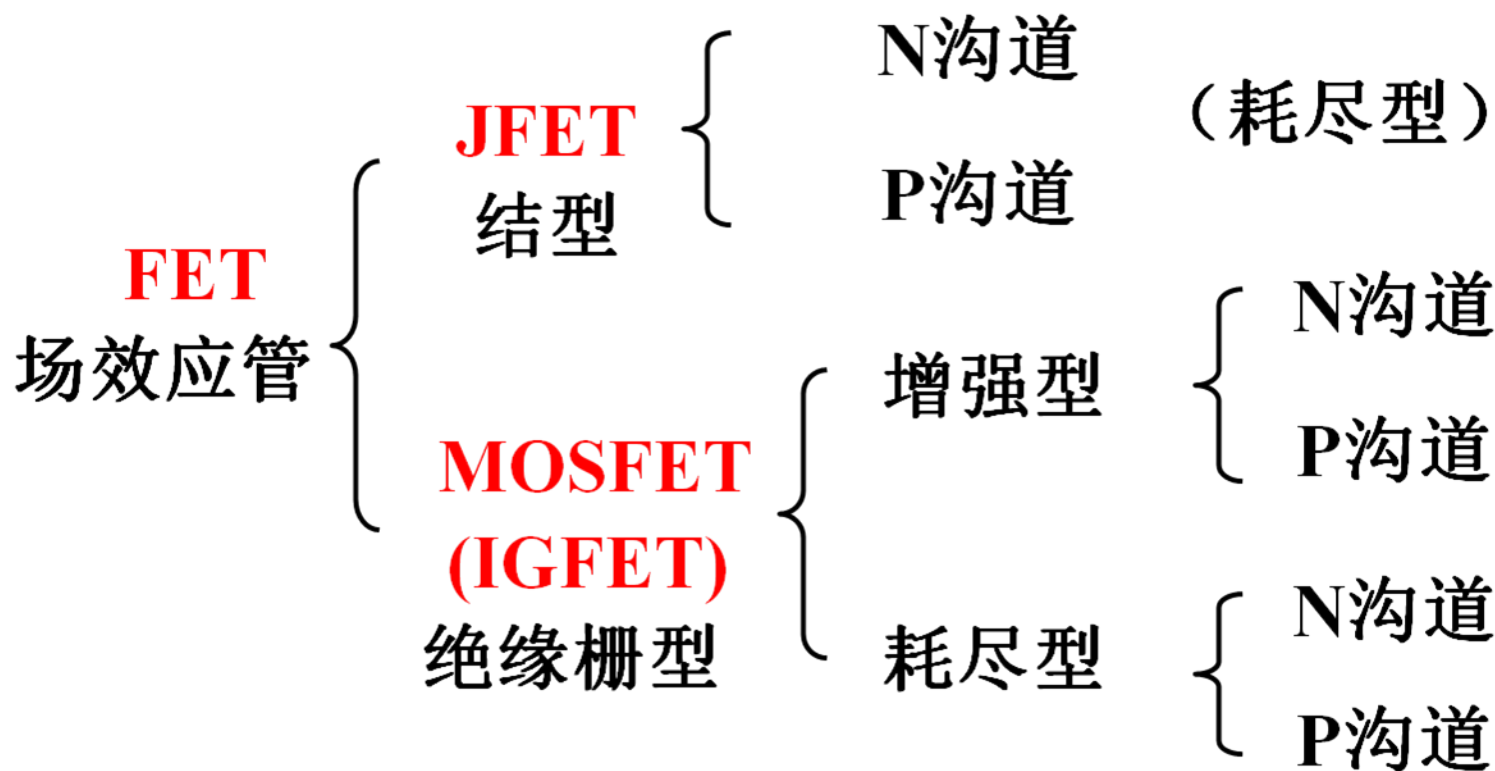
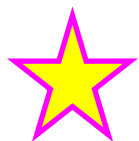


$$i_D = k \frac{W}{L} (u_{GS} - U_{GSoff})^2$$
$$= I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GSoff}}\right)^2$$

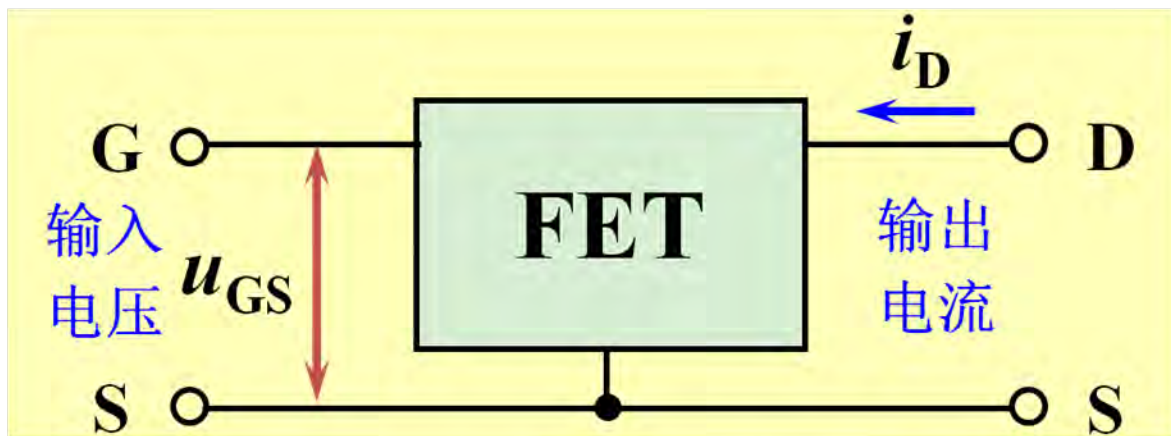
## (b) 输出特性



## 场效应管分类：



**JFET:** 利用栅源电压(输入电压)对**耗尽层厚度**的控制来改变导电沟道的宽度,从而实现**对漏极电流(输出电流)**的控制。



**MOSFET:** 利用栅源电压(输入电压)对**半导体表面感生电荷量**的控制来改变导电沟道的宽度,从而实现**对漏极电流(输出电流)**的控制。



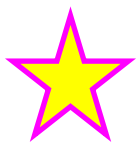
# 各类场效应管的符号和特性曲线

种类		符号 <sub>D</sub>	转移特性曲线	输出特性曲线
结型 N沟道	耗尽型			
结型 P沟道	耗尽型			
绝缘 栅型 N沟道	增强型			

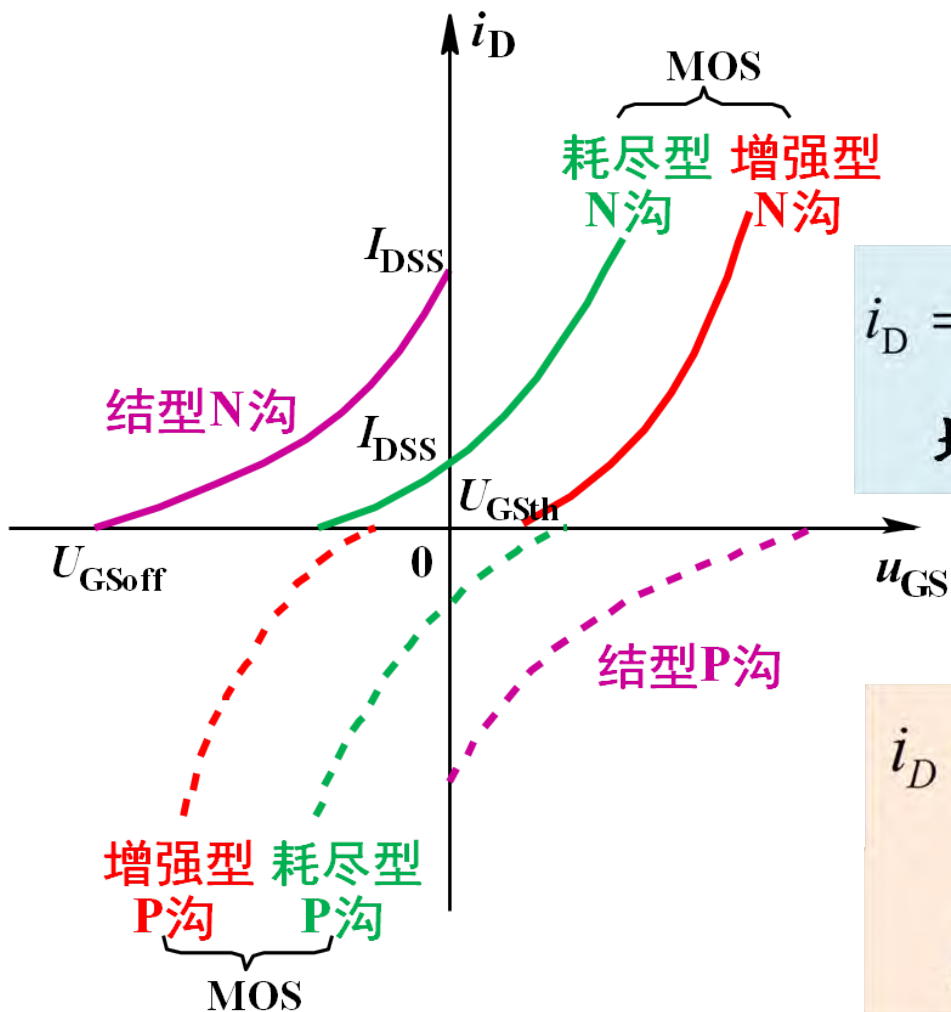


种类		符号	转移特性曲线	输出特性曲线
绝缘栅型 N沟道	耗尽型			
	增强型			
绝缘栅型 P沟道	耗尽型			

# 各种场效应管的转移特性曲线



N沟道:  $i_D \geq 0$



$$i_D = k \frac{W}{L} (u_{GS} - U_{GSth})^2$$

**增强型MOSFET**

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

**JFET**  
**耗尽型MOSFET**

P沟道:  $i_D \leq 0$

# 输出特性曲线

$i_D$

N沟道:  $i_D \geq 0$

MOS -N沟

结型  
N沟

耗尽型

增强型

$U_{GS}/V$

0  
-1  
-2  
-3  
-4  
-5  
-6

3  
2  
1  
0  
-1  
-2  
-3

9  
8  
7  
6  
5  
4  
3

0

$u_{DS}$

-3  
-4  
-5  
-6  
-7  
-8  
-9

3  
2  
1  
0  
-1  
-2  
-3

6  
5  
4  
3  
2  
1  
0

$U_{GS}/V$

增强型 耗尽型

结型

P沟

MOS -P沟

P沟道:  $i_D \leq 0$

把在放大电路中场效应管对  $u_{GS}$ 、 $u_{DS}$  的极性要求用“+”、“-”填入表内

	结型		MOS 增强型		MOS 耗尽型	
	N 沟道	P 沟道	N 沟道	P 沟道	N 沟道	P 沟道
$u_{GS}$						
$u_{DS}$						



		截止区 (导电沟道被完全夹断)	恒流区 (导电沟道被预夹断后)	可变电阻区 (导电沟道被预夹断前)
		源、漏极处的沟道 都被夹断	漏极处的沟道被夹断 源极处的沟道未被夹断	源、漏极处的沟道 都未被夹断
N 沟	N-JFET N-DMOSFET	$u_{GS} < U_{GSoff}$ (负值) 沟道被完全夹断	$u_{GS} > U_{GSoff}$ (负值) $u_{GD} < U_{GSoff}$	$u_{GS} > U_{GSoff}$ (负值) $u_{GD} > U_{GSoff}$
	N-EMOSFET	$u_{GS} < U_{GSth}$ (正值) 沟道尚未形成	$u_{GS} > U_{GSth}$ (正值) $u_{GD} < U_{GSth}$	$u_{GS} > U_{GSth}$ (正值) $u_{GD} > U_{GSth}$
P 沟	P-JFET P-DMOSFET	$u_{GS} > U_{GSoff}$ (正值) 沟道被完全夹断	$u_{GS} < U_{GSoff}$ (正值) $u_{GD} > U_{GSoff}$	$u_{GS} < U_{GSoff}$ (正值) $u_{GD} < U_{GSoff}$
	P-EMOSFET	$u_{GS} > U_{GSth}$ (负值) 沟道尚未形成	$u_{GS} < U_{GSth}$ (负值) $u_{GD} > U_{GSth}$	$u_{GS} < U_{GSth}$ (负值) $u_{GD} < U_{GSth}$

## § 3.2 场效应管的参数与偏置电路

### 一、场效应管的主要参数

#### 1. 直流参数

(1). JFET和耗尽型MOSFET的主要参数有：

a. 饱和漏极电流 $I_{DSS}$ ： $u_{GS}=0$ 时的漏极电流。

b. 夹断电压 $U_{GSoff}$ ：当栅源电压 $u_{GS}=U_{GSoff}$ 时， $i_D=0$ 。

(2). 增强型MOSFET的主要参数有：开启电压 $u_{GSth}$ 。

(3). 输入电阻 $R_{GS}$ 很高，通常认为 $R_{GS} \rightarrow \infty$ 。

这是因为JFET中PN结反偏，MOSFET中栅极和导电沟道间有绝缘隔离层。

## 2. 交流参数

(1). 跨导  $g_m$   $g_m = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_{u_{DS}=C}$  (mA/V) ★

对JFET和耗尽型MOSFET:  $i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GSoff}}\right)^2$

$$\therefore g_m = \left. \frac{di_D}{du_{GS}} \right|_Q = \frac{-I_{DSS}}{U_{GSoff}} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GSoff}}\right) = -\frac{2I_{DSS}}{U_{GSoff}} \sqrt{\frac{I_{DQ}}{I_{DSS}}}$$

而对增强型MOSFET:  $i_D = k \frac{W}{L} (u_{gs} - U_{GSth})^2$

$$\therefore g_m = \sqrt{\frac{2u_n C_{ox} W}{L} I_{DQ}} = 2\sqrt{kI_{DQ}}$$

(2). 输出电阻  $r_{ds}$   $r_{ds} = \frac{|U_A|}{I_{DQ}}$ , 其中  $U_A$  为厄尔利电压。

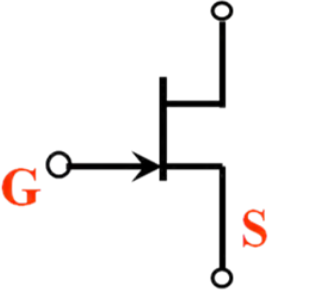
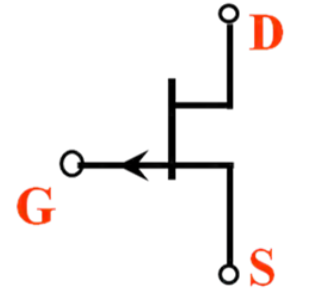
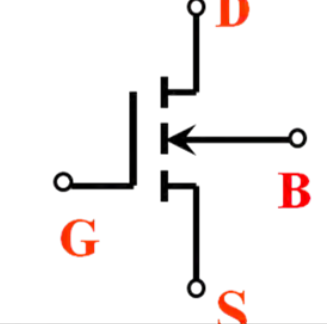
## 3. 极限参数

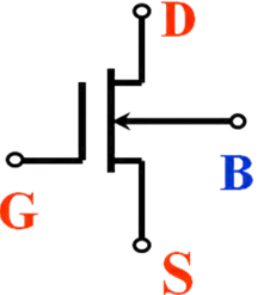
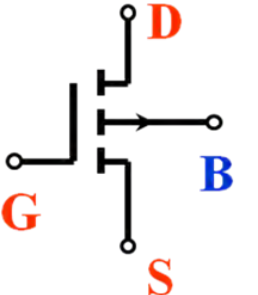
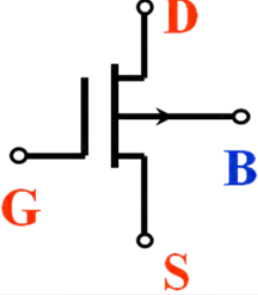
(1) 栅源击穿电压  $U_{(\text{BR})\text{GSO}}$  °

(2) 漏源击穿电压  $U_{(\text{BR})\text{DSO}}$  °

(3) 最大功耗  $P_{\text{DM}}$ :  $P_{\text{DM}}=I_{\text{D}} \cdot U_{\text{DS}}$

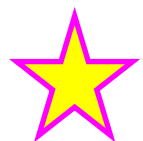
# 回顾

种类		符号 <sub>D</sub>
结型 N沟道	耗尽型	
结型 P沟道	耗尽型	
绝缘 栅型 N沟道	增强型	

种类		符号
绝缘 栅型 N沟道	耗尽型	
绝缘 栅型 P沟道	增强型	
	耗尽型	

## FET工作状态的判断

	截止区	可变电阻区	恒流区
<b>P-FET</b>	$u_{GS} > u_{GSoff}(u_{GSth})$	$u_{GS} < u_{GSoff}(u_{GSth})$ $u_{GD} < u_{GSoff}(u_{GSth})$	$u_{GS} < u_{GSoff}(u_{GSth})$ $u_{GD} > u_{GSoff}(u_{GSth})$
<b>N-FET</b>	$u_{GS} < u_{GSoff}(u_{GSth})$	$u_{GS} > u_{GSoff}(u_{GSth})$ $u_{GD} > u_{GSoff}(u_{GSth})$	$u_{GS} > u_{GSoff}(u_{GSth})$ $u_{GD} < u_{GSoff}(u_{GSth})$



## 场效应管工作状态的判断方法

### 1. 先判断是否处于截止状态（导电沟道被完全夹断）

不论是那种FET，只要**靠近源极处的沟道被夹断**，则靠近漏极处的沟道一定也被夹断，即进入完全夹断状态

N沟道： $u_{GS} < U_{GSoff} (U_{GSth})$ ，P沟道： $u_{GS} > U_{GSoff} (U_{GSth})$

### 2. 若不处于截止状态，则可能处于恒流区或是可变电阻区。

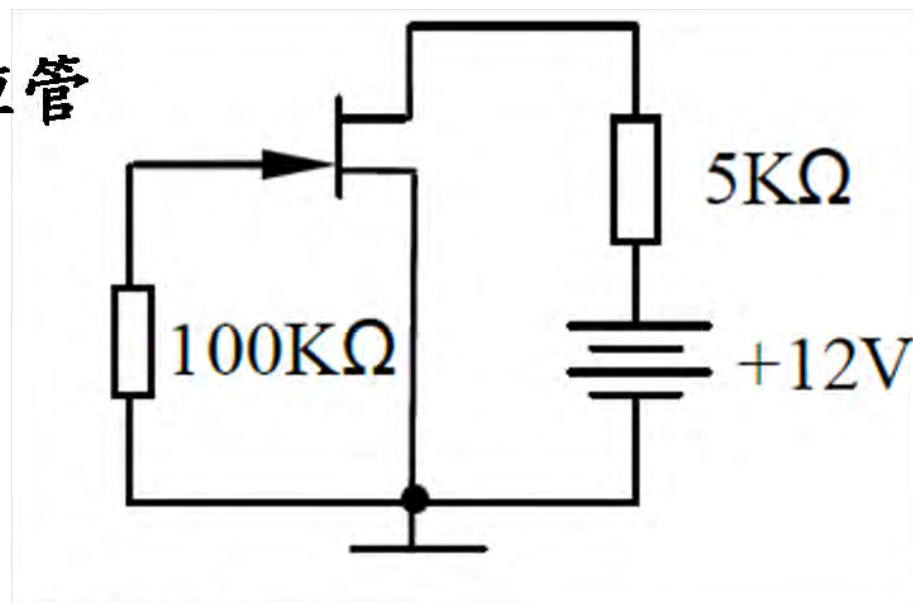
采用**假设法**，先假设处于恒流区，利用恒流区的电流方程求 $U_{GD}$ ，然后判断 $U_{GD}$ 与 $U_{GSoff}/U_{GSth}$ 的关系进而判断假设是否成立。若成立，则处于恒流区，反之，处于可变电阻区。

如上图所示的电路，场效应管

的  $I_{DSS} = 2\text{mA}$ ,  $U_{GSoff} = -4\text{V}$

试判断管子的工作状态。

解：因为  $U_{GS} = 0\text{V} > U_{GSoff}$ ,



所以管子不在截止区，假设在恒流区，有

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

由输出回路得,  $U_{DS} = 12 - 2 * 5 = 2\text{V}$ ,

所以  $U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = 0 - 2 = -2\text{V} > U_{GSoff}$ ，因此工作在可变电阻区



## 二、场效应管的偏置电路

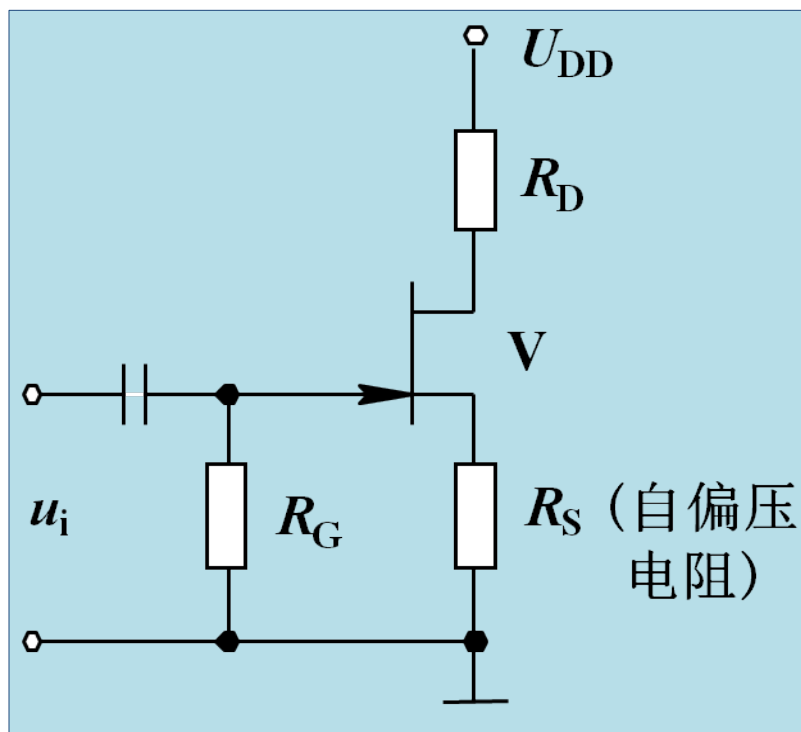
场效应管有三种基本放大电路：共源、共漏和共栅。

其偏置电路也要保证管子工作在恒流区。由于场效应管的输入电流近似为0，因此它是输入电压控制输出电流的器件。需要选择合适的 $U_{GS}$ 和 $U_{DS}$ 以保证管子工作在恒流区。

常用的有两种（直流）偏置电路：★

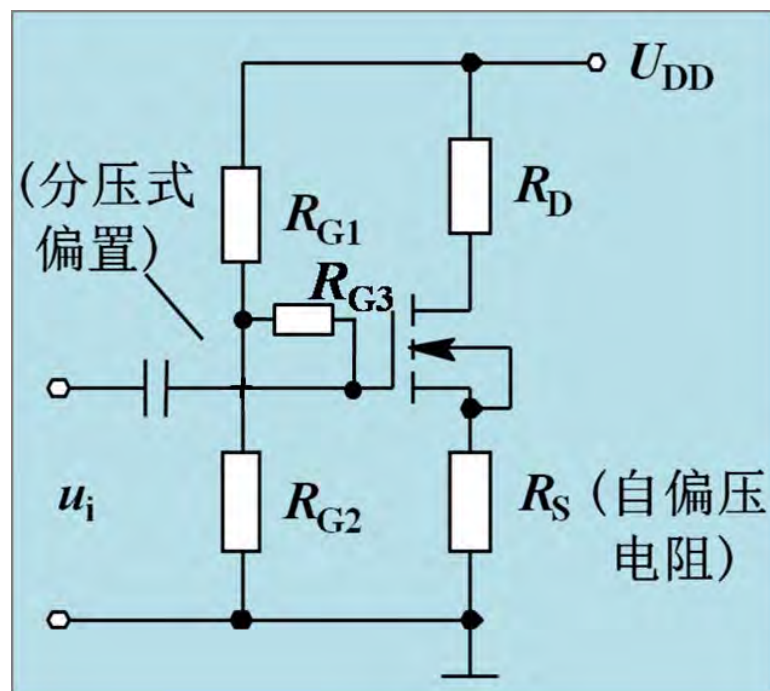
(a) 自给偏置电路

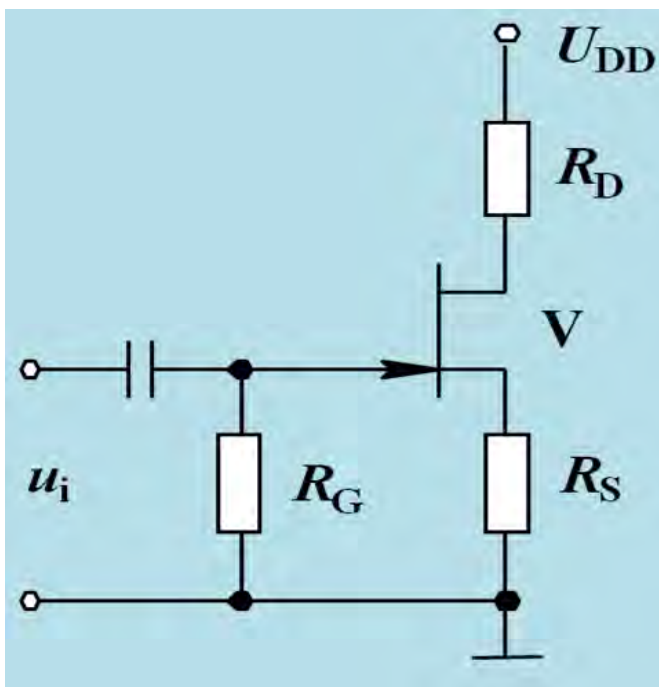
(适合 JFET, DMOSFET)



(b) 分压式偏置电路

(适合 JFET, DMOSFET, EMOSFET)





自给偏压原理:

$\because$  栅极没有提供电源且  $I_G \approx 0$ ,

$\therefore U_G = 0$ ,

当有  $I_S = I_D$  流过电阻  $R_S$  时, 必然会使

$U_S = I_S R_S = I_D R_S$ , 故  $U_{GS} = U_G - U_S = -I_D R_S$

依靠场效应管自身的电流  $I_D$  产生了栅极所需的负偏压, 故称为自给偏压

解析法确定直流工作点:  $Q (U_{GSQ}, I_{DQ}, U_{DSQ})$

$$\begin{cases} I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GSoff}}\right)^2 \\ U_{GSQ} = -I_{DQ} R_S & U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} (R_D + R_S) \end{cases}$$

# 图解法确定直流工作点: $Q (U_{GSQ}, I_{DQ}, U_{DSQ})$

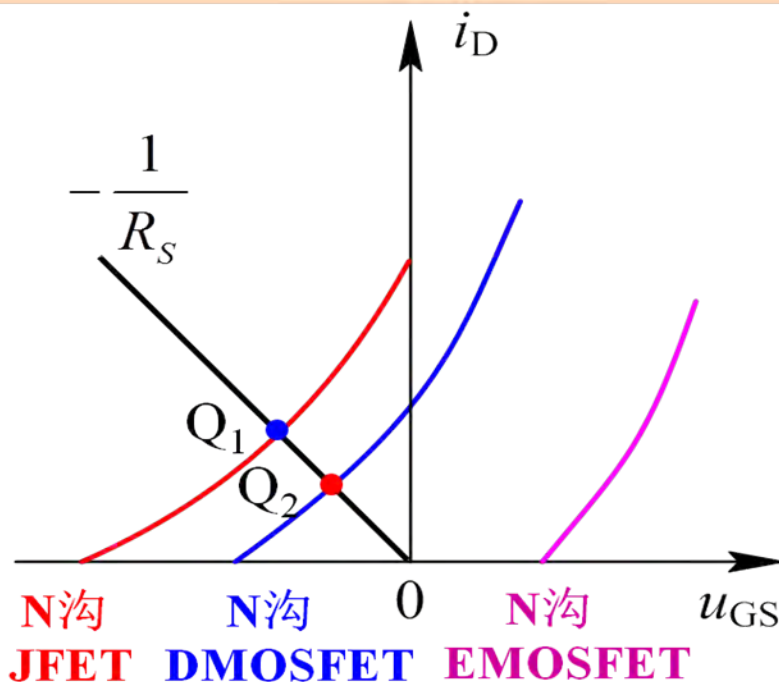
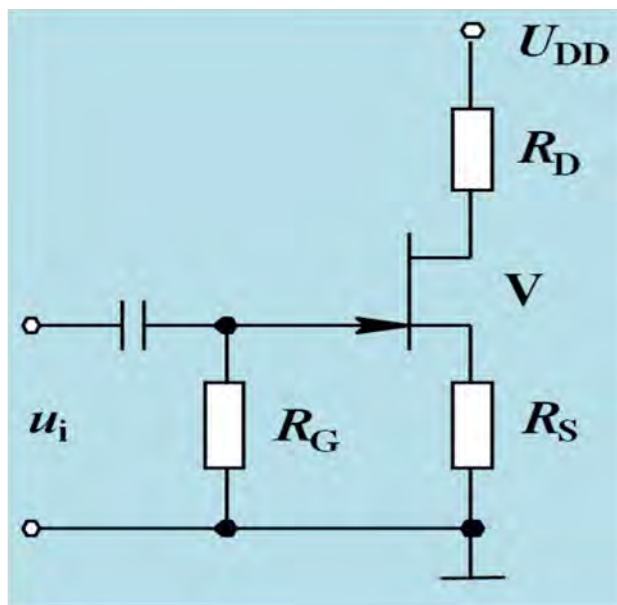
转移特性线方程:

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

栅源回路直流负载线方程:

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

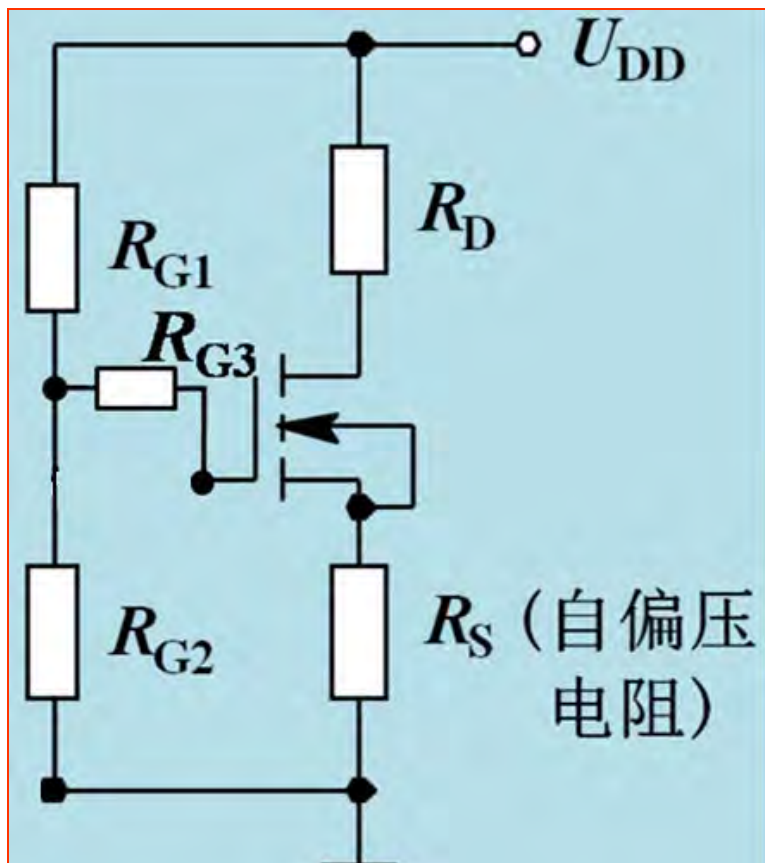
两条线的交点就是静态工作点



## 分压式偏置电路

解析法确定直流工作点:  $Q (U_{GSQ}, I_{DQ}, U_{DSQ})$

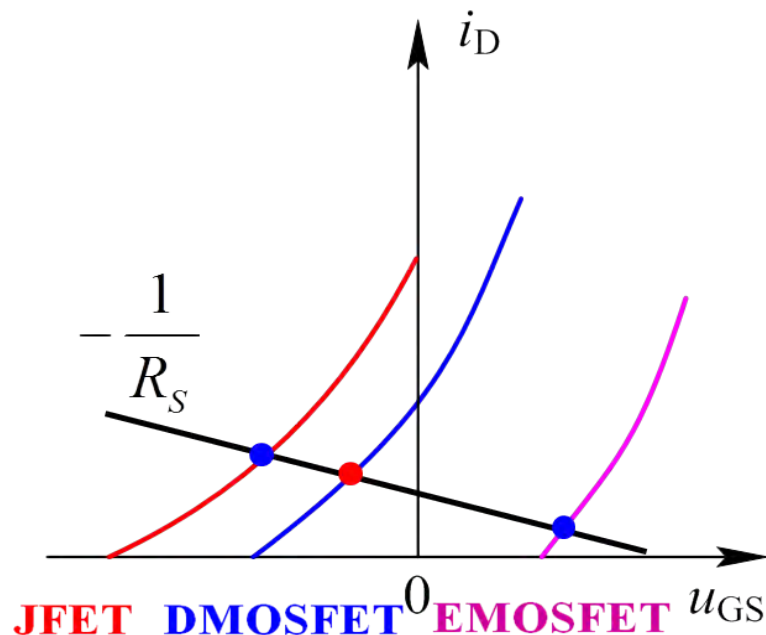
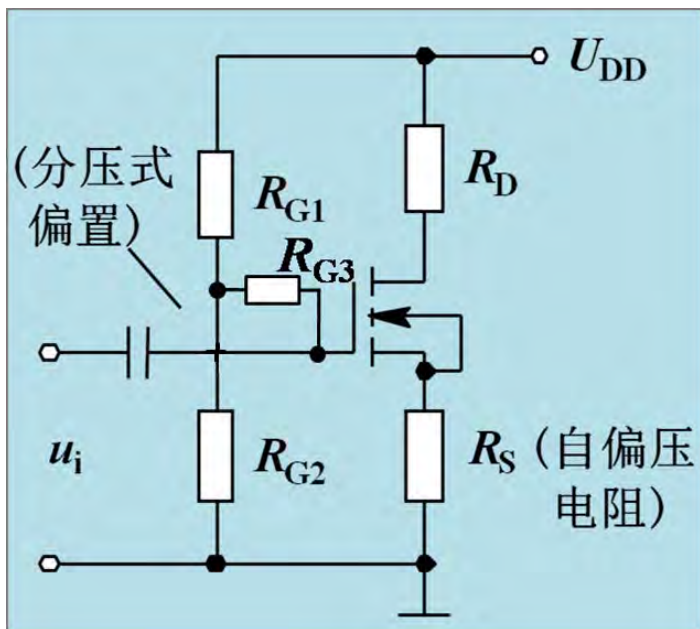
$\because I_G \approx 0, \therefore U_{RG3} \approx 0$ , 故有



$$\begin{cases} U_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD} - I_{DQ} R_S \\ I_{DQ} = k \frac{W}{L} (U_{GSQ} - U_{GSth})^2 \end{cases}$$

$$U_{DSQ} = U_{DD} - I_{DQ} (R_S + R_D)$$

## 图解法确定直流工作点: $Q (U_{GSQ}, I_{DQ}, U_{DSQ})$



转移特性线方程:

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

栅源回路直流负载线方程:

$$U_{GSQ} = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} U_{DD} - I_{DQ} R_S$$

两条线的交点就是静态工作点

# 回顾

## 场效应管工作状态的判断方法

1. 先判断是否处于截止状态（导电沟道被完全夹断）

不论是那种FET，只要**靠近源极处的沟道被夹断**，则靠近漏极处的沟道一定也被夹断，即进入完全夹断状态

**N沟道:**  $u_{GS} < U_{GSoff} (U_{GSth})$ , **P沟道:**  $u_{GS} > U_{GSoff} (U_{GSth})$

2. 若不处于截止状态，则可能处于恒流区或是可变电阻区。

采用**假设法**,先假设处于恒流区,利用恒流区的电流方程求  $U_{GD}$ , 然后判断  $U_{GD}$  与  $U_{GSoff}/U_{GSth}$  的关系进而判断假设是否成立。若成立,则处于恒流区,反之,处于可变电阻区。

		截止区 (导电沟道被完全夹断)	恒流区 (导电沟道被预夹断后)	可变电阻区 (导电沟道被预夹断前)
		源、漏极处的沟道 都被夹断	漏极处的沟道被夹断 源极处的沟道未被夹断	源、漏极处的沟道 都未被夹断
N沟	N-JFET N-DMOSFET	$u_{GS} < U_{GSoff}$ (负值) 沟道被完全夹断	$u_{GS} > U_{GSoff}$ (负值) $u_{GD} < U_{GSoff}$	$u_{GS} > U_{GSoff}$ (负值) $u_{GD} > U_{GSoff}$
	N-EMOSFET	$u_{GS} < U_{GSth}$ (正值) 沟道尚未形成	$u_{GS} > U_{GSth}$ (正值) $u_{GD} < U_{GSth}$	$u_{GS} > U_{GSth}$ (正值) $u_{GD} > U_{GSth}$
P沟	P-JFET P-DMOSFET	$u_{GS} > U_{GSoff}$ (正值) 沟道被完全夹断	$u_{GS} < U_{GSoff}$ (正值) $u_{GD} > U_{GSoff}$	$u_{GS} < U_{GSoff}$ (正值) $u_{GD} < U_{GSoff}$
	P-EMOSFET	$u_{GS} > U_{GSth}$ (负值) 沟道尚未形成	$u_{GS} < U_{GSth}$ (负值) $u_{GD} > U_{GSth}$	$u_{GS} < U_{GSth}$ (负值) $u_{GD} < U_{GSth}$



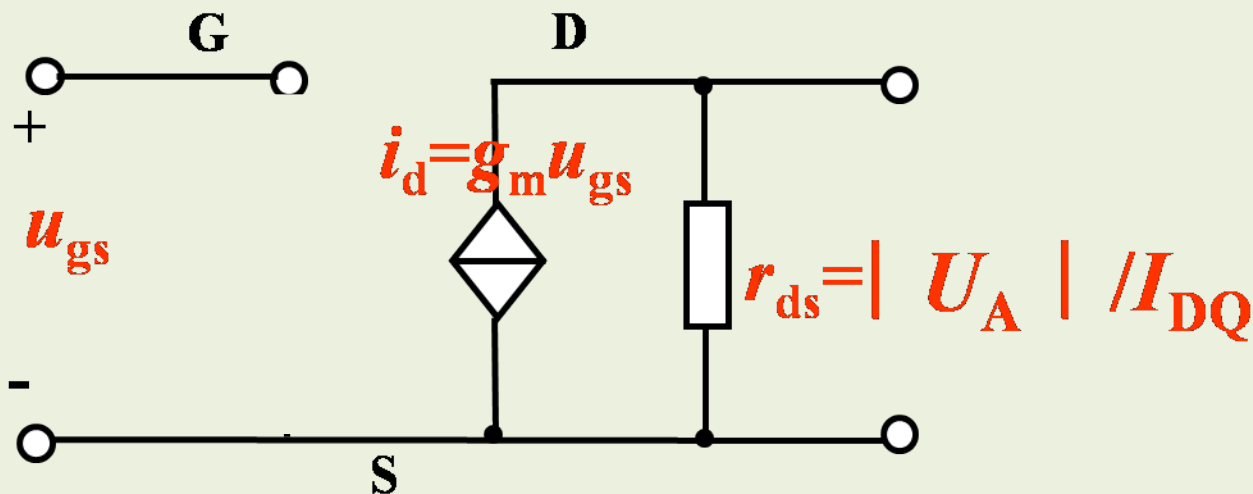
## § 3.3 场效应管的放大电路

分析方法与双极型晶体管类似：

先画出交流通路

然后用模型代替场效应管就可以得到交流等效电路

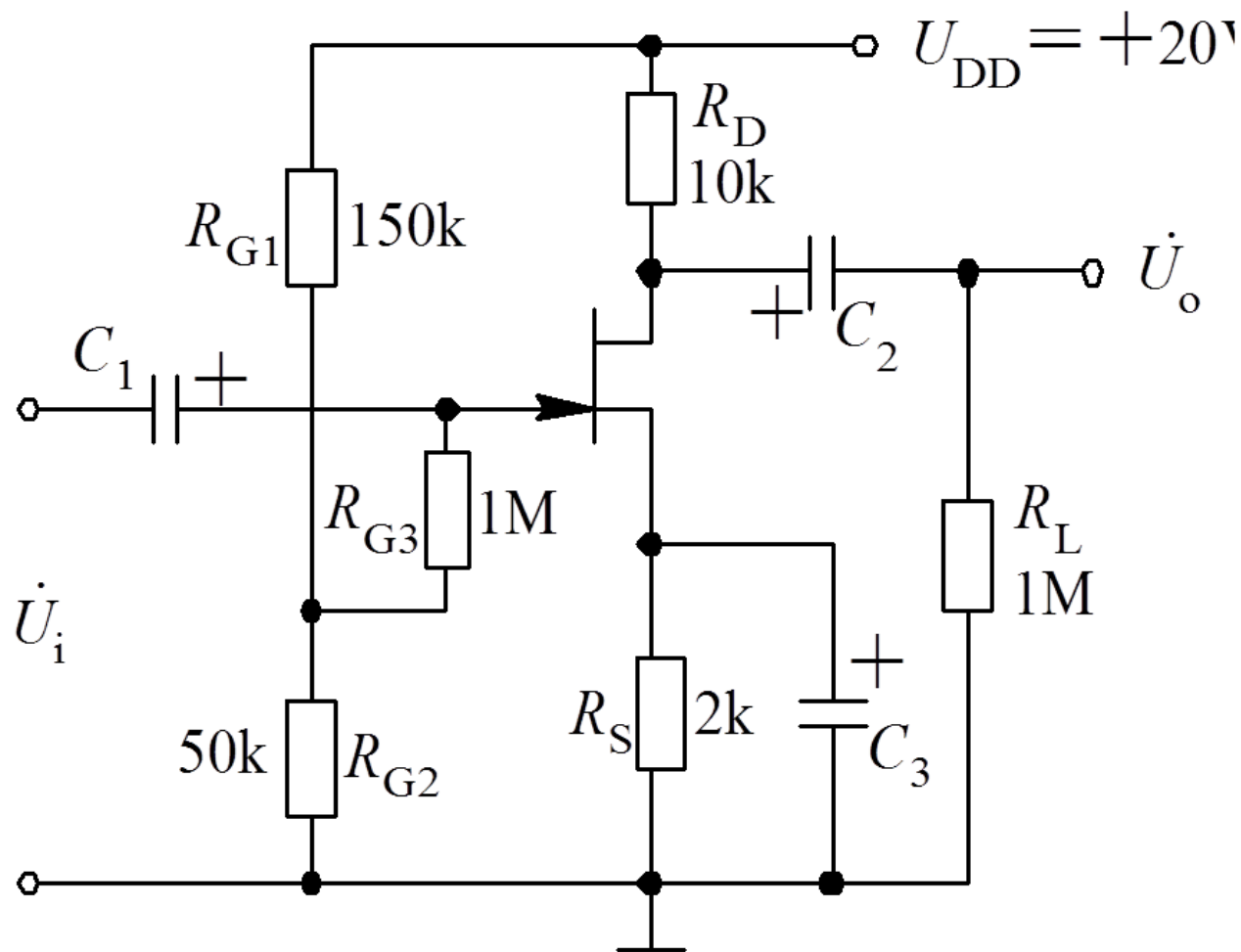
低频交流小信号等效电路（恒流区）：



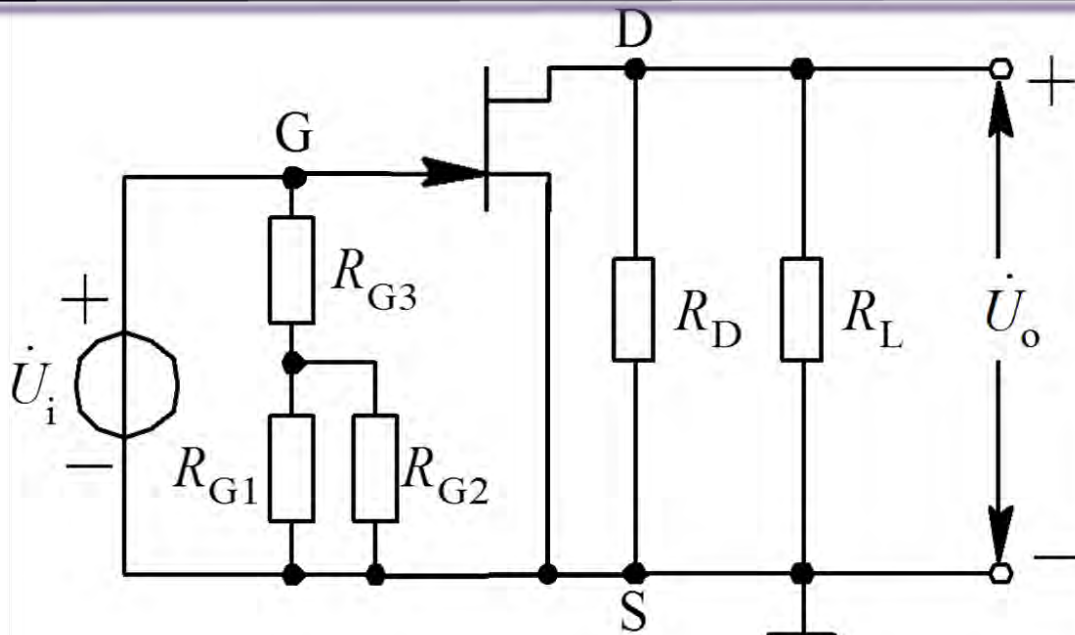
$$\because I_G = 0,$$

$$\therefore r_{gs} = \infty$$

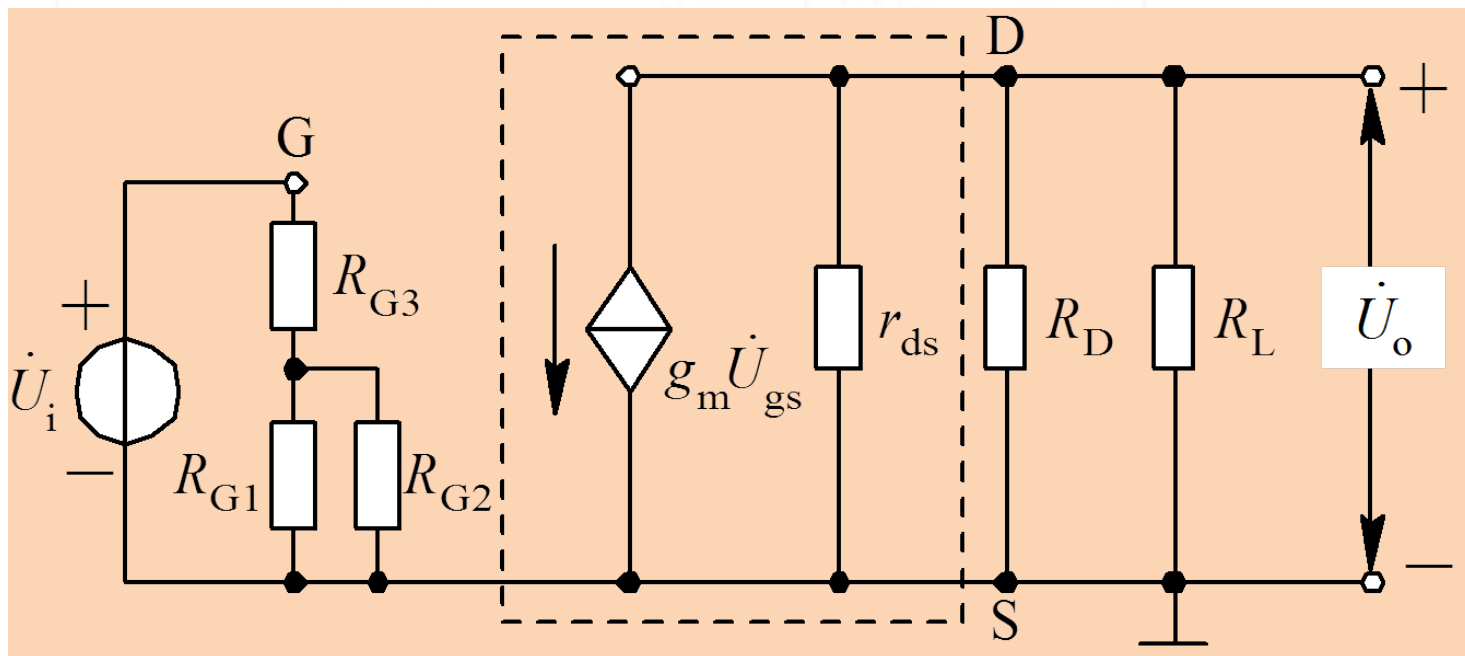
# 一、共源放大电路的交流分析

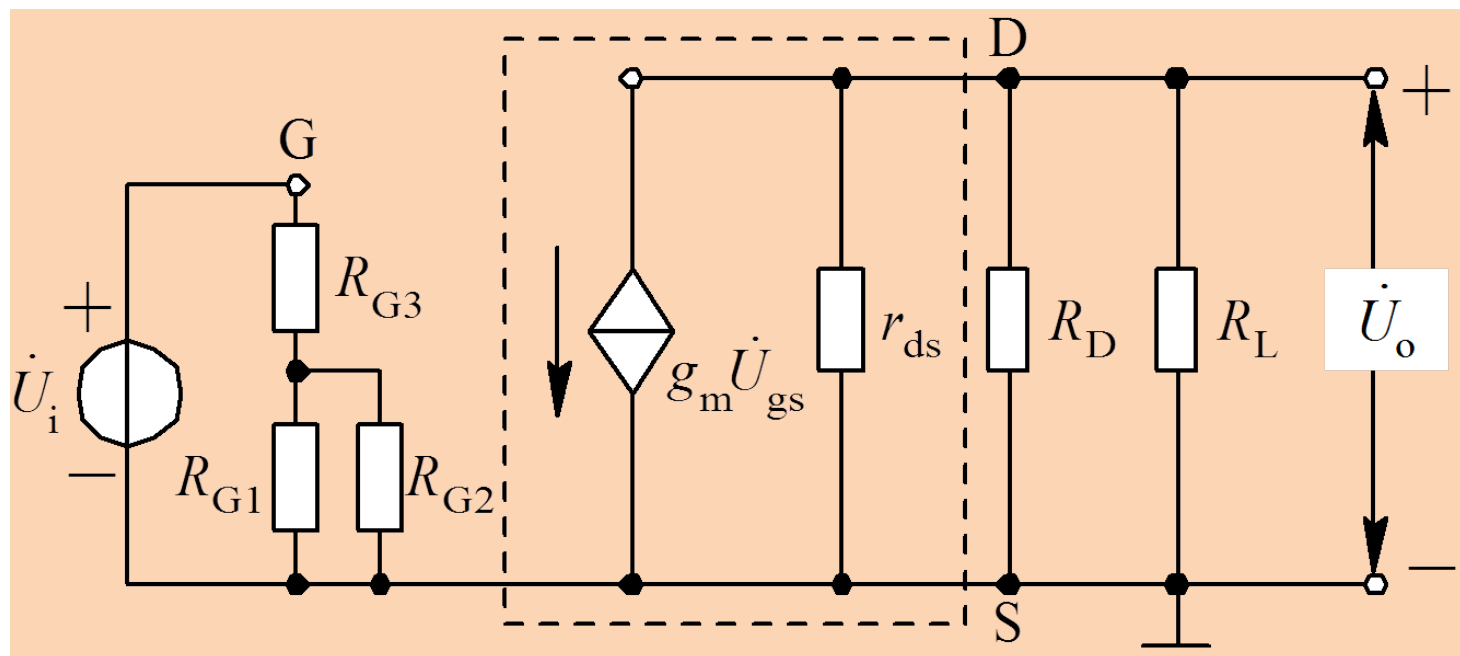


交流  
通路



交流  
等效  
电路

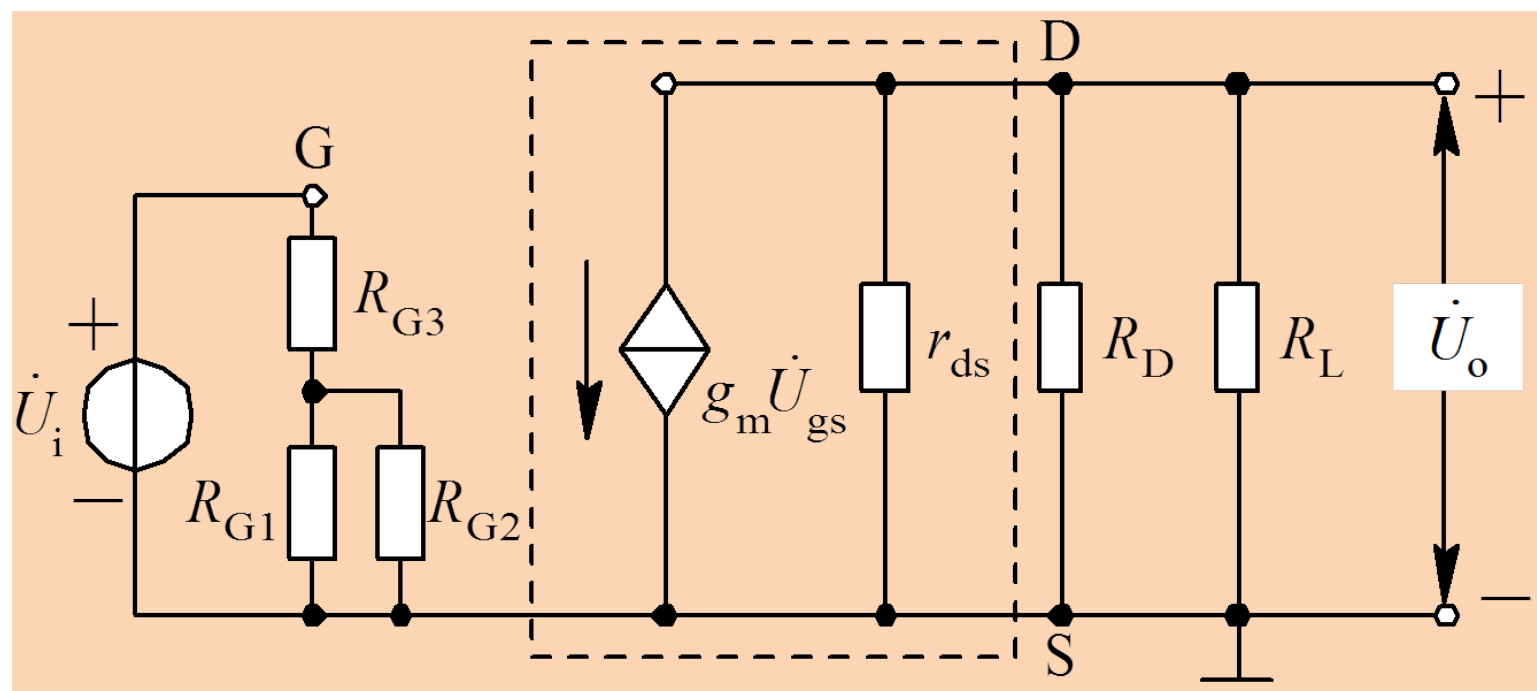




## 1. 电压放大倍数 $A_u$ :

$$U_o = -g_m U_{gs} (r_{ds} \parallel R_D \parallel R_L) \approx -g_m U_{gs} (R_D \parallel R_L)$$

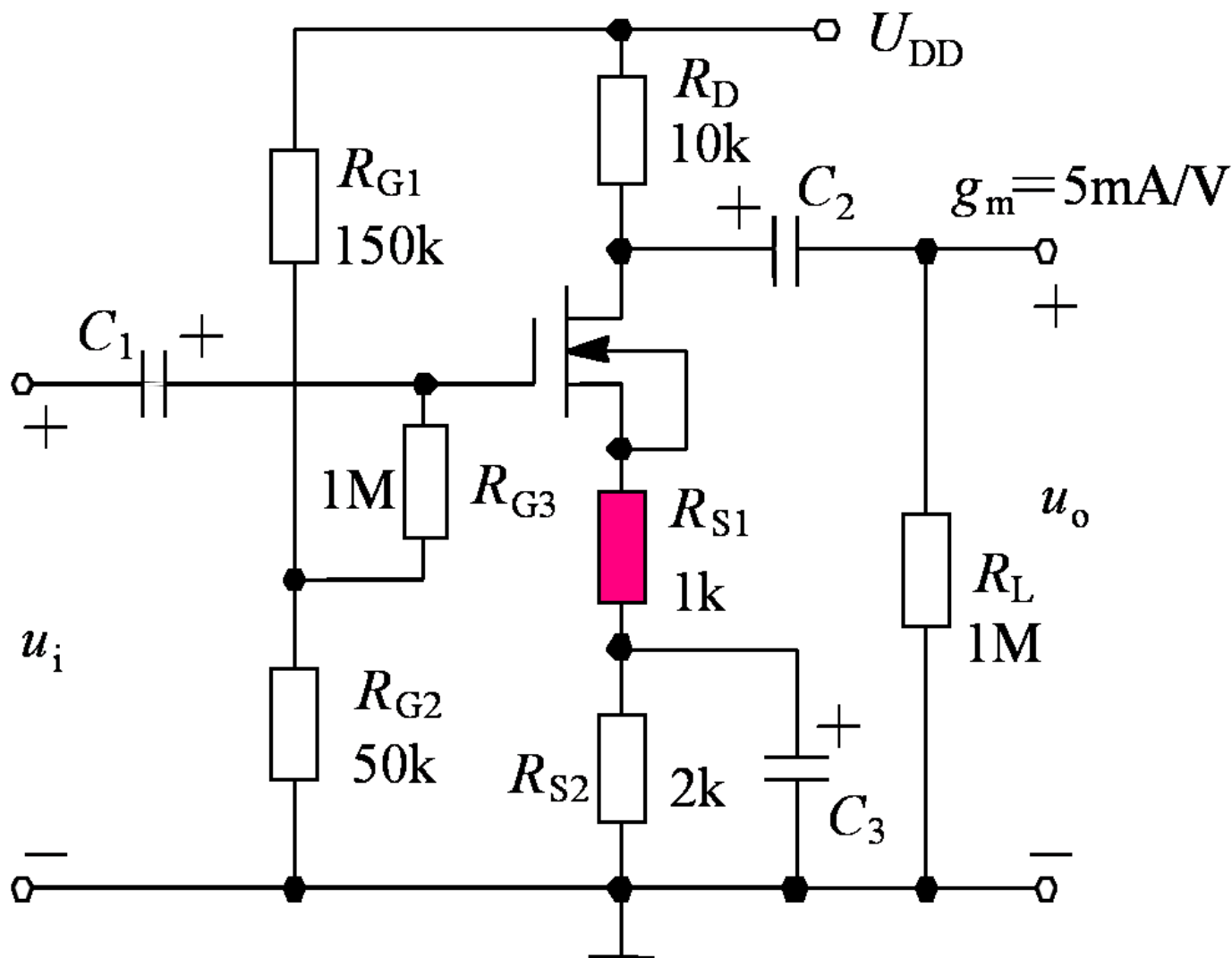
$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{U_o}{U_{gs}} \approx -g_m (R_D \parallel R_L)$$

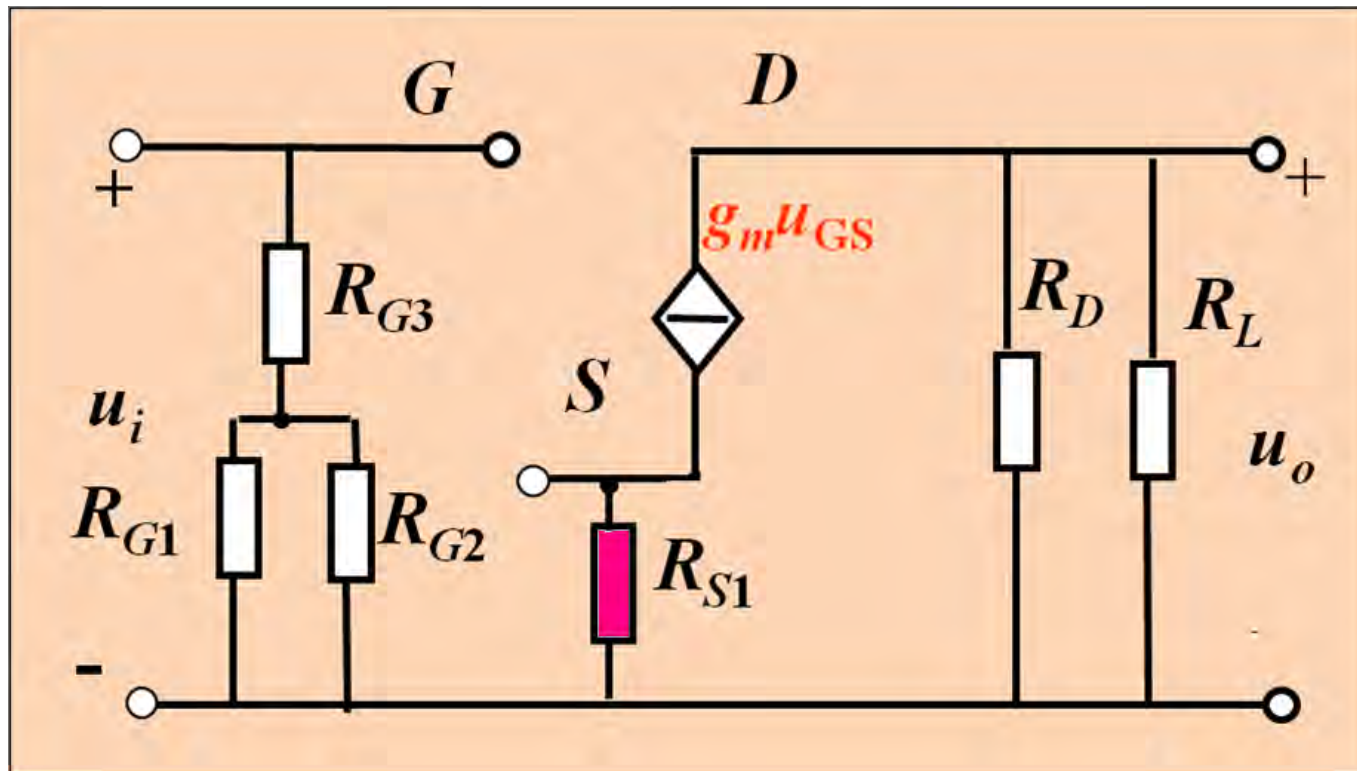


2. 输入电阻:  $R_i = R_{G3} + R_{G1} \parallel R_{G2}$

3. 输出电阻:  $R_o = R_D \parallel r_{ds} \approx R_D$

在源极加入电阻，再计算各项交流指标

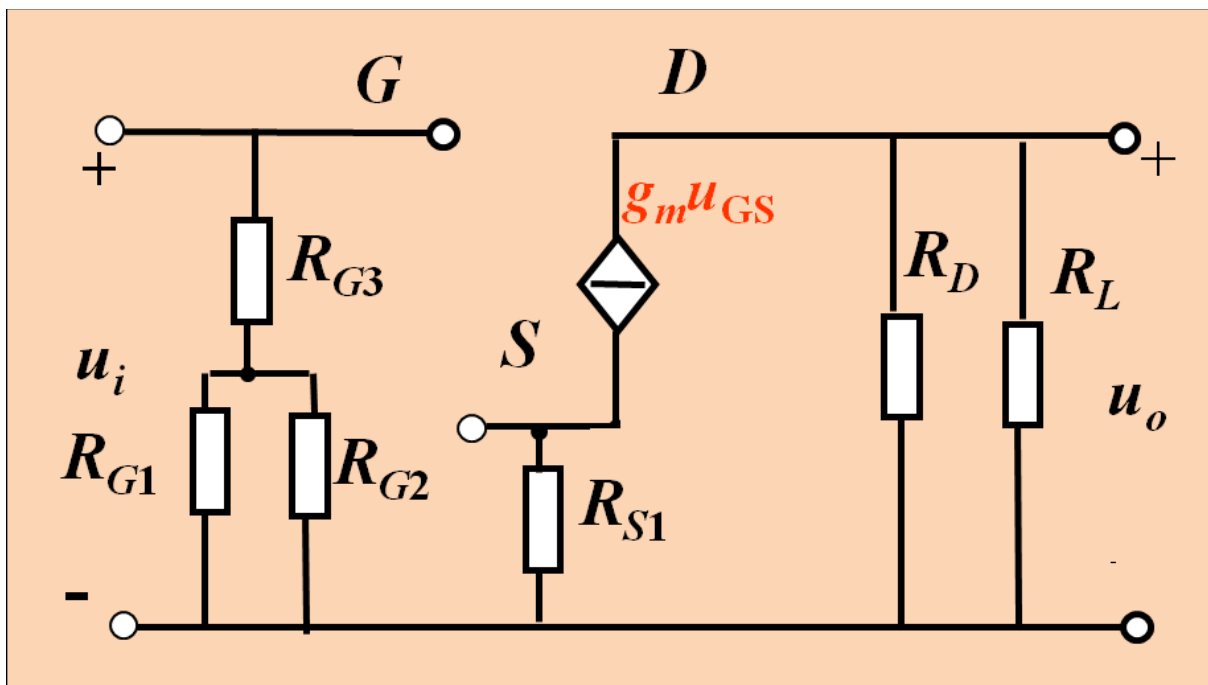




输入电阻:  $R_i = R_{G3} + R_{G1} \parallel R_{G2}$

输出电阻:  $R_o = R_D$

$$\left( u_{GS} + g_m u_{GS} \cdot R_{S1} = 0 \Rightarrow u_{GS} = 0 \Rightarrow g_m u_{GS} = 0 \right)$$



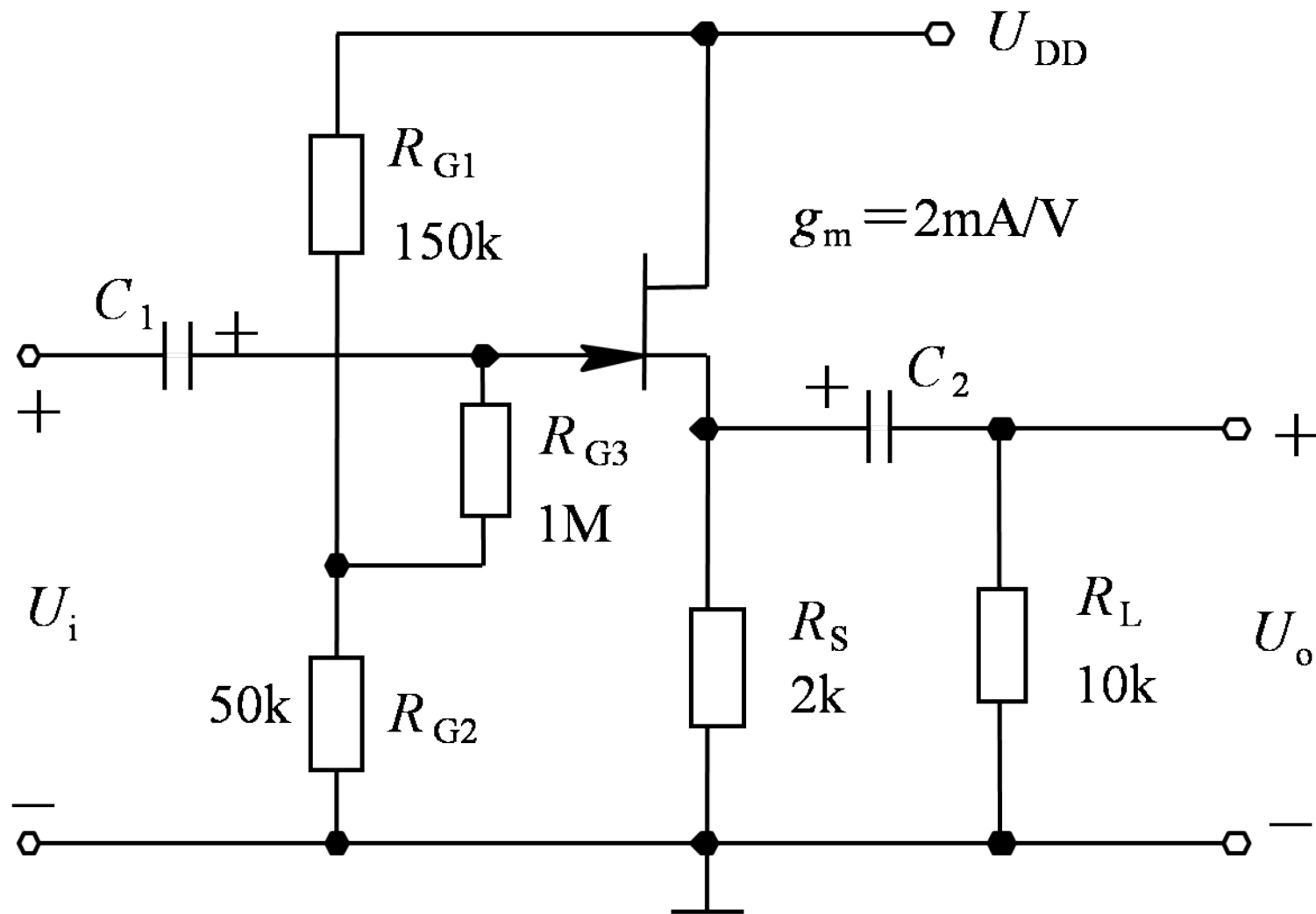
$$U_o = -I_d (R_D // R_L) = -g_m U_{gs} (R_D // R_L)$$

$$U_i = U_{gs} + I_d R_{S1} = U_{gs} + g_m U_{gs} R_{S1}$$

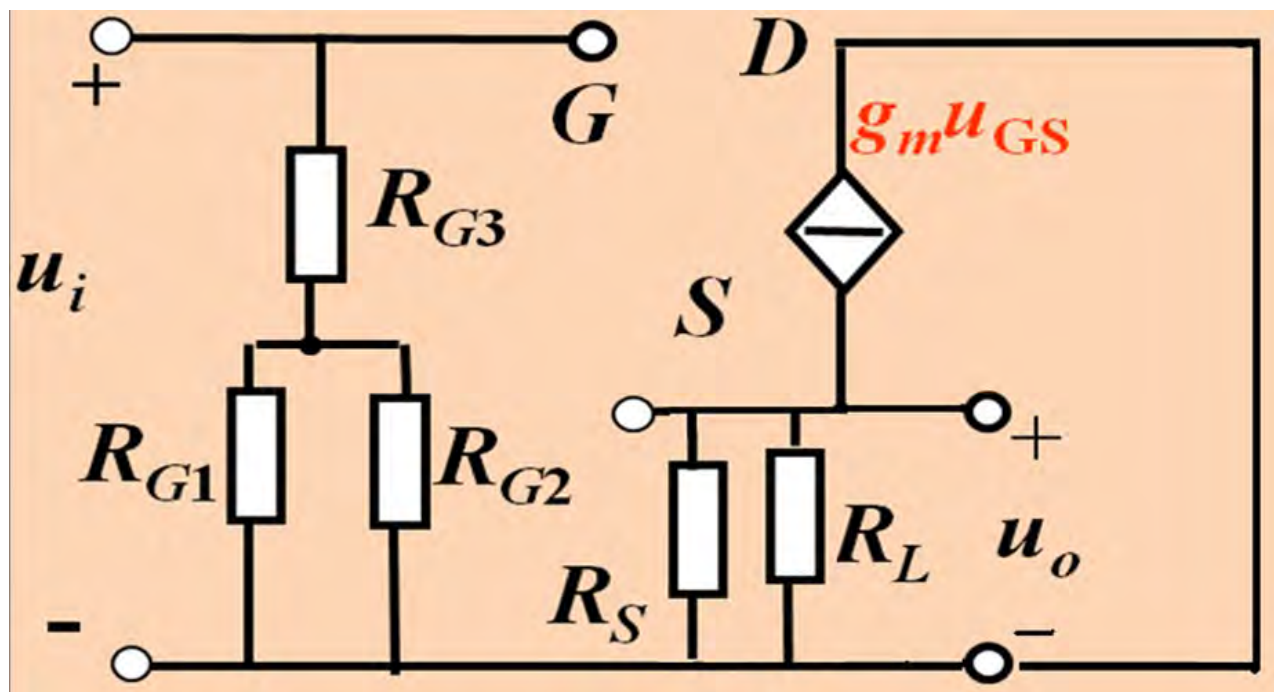
$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{g_m}{1 + g_m R_{S1}} (R_D // R_L) = -8.3$$

源极电阻的存在  
使电压放大倍数  
减小，输入、输  
出电阻不变

## 二、共漏放大电路的交流分析



# 交流等效电路

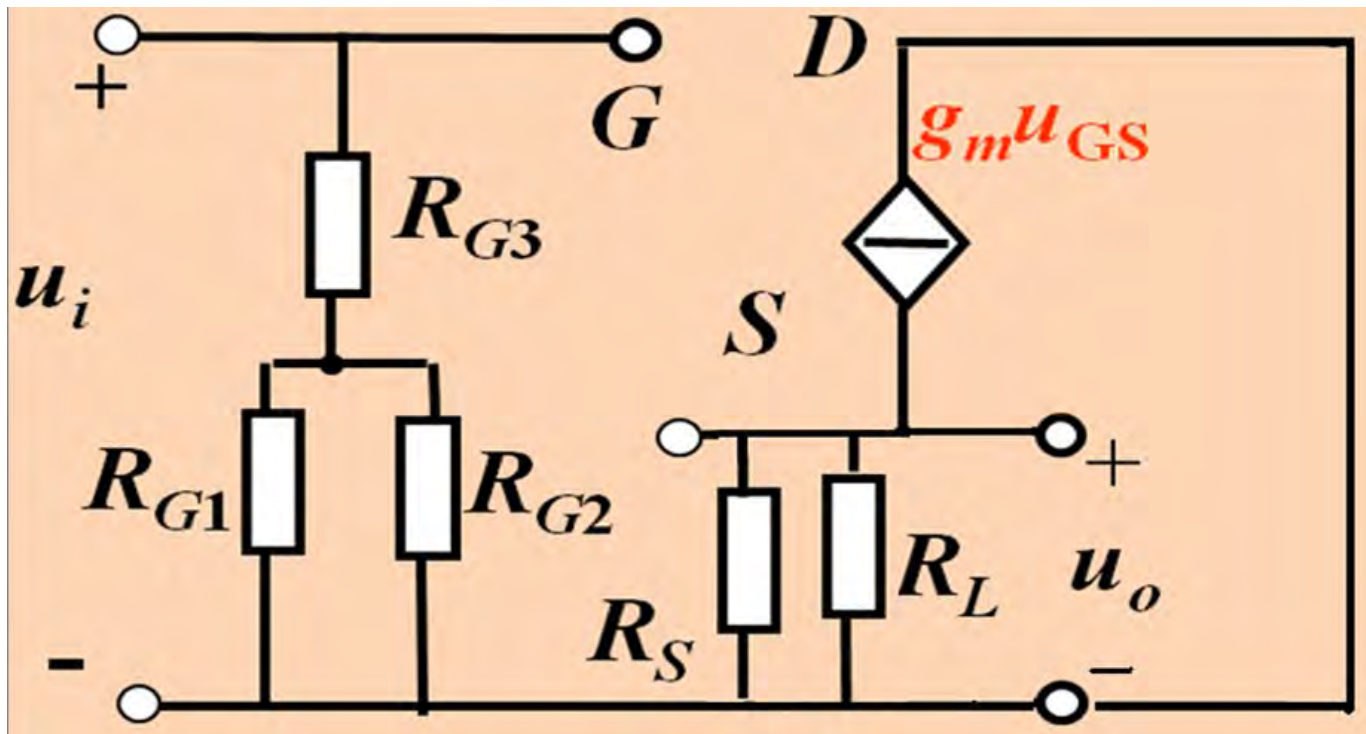


## 1. 电压放大倍数 $A_u$

$$U_o = I_d (R_S // R_L) = g_m U_{gs} (R_S // R_L)$$

$$U_i = U_{gs} + I_d (R_S // R_L) = U_{gs} + g_m U_{gs} (R_S // R_L)$$

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{g_m (R_S // R_L)}{1 + g_m (R_S // R_L)} = 0.76$$

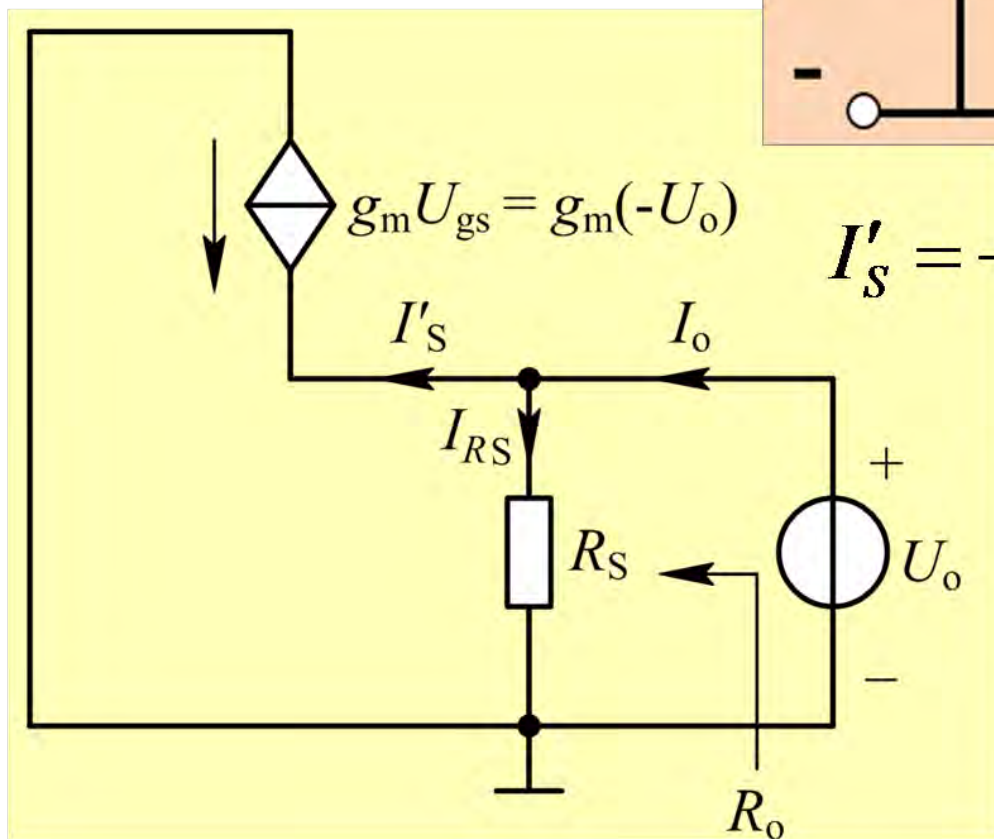
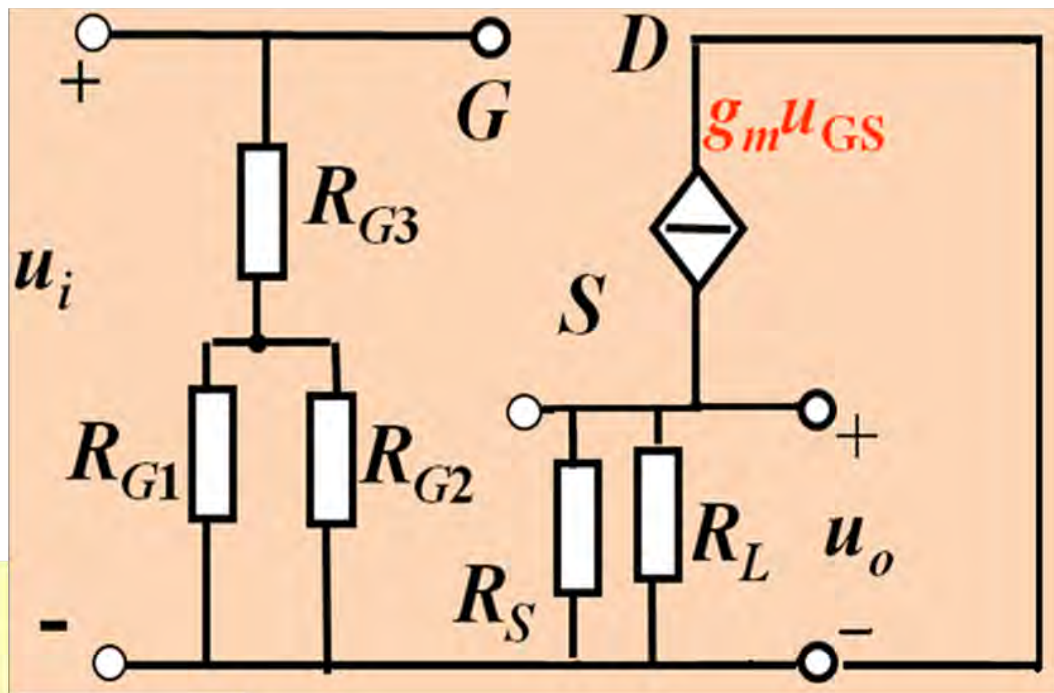


## 2. 输入电阻:

$$R_i = R_{G3} + R_{G1} \parallel R_{G2}$$

### 3. 输出电阻:

求输出电阻的等效电路



$$I'_S = -g_m U_{gs} = -g_m(-U_o) = g_m U_o$$

$$R'_o = \frac{U_o}{I'_S} = \frac{1}{g_m}$$

$$R_o = R_S // \frac{1}{g_m}$$

与双极型三极管类似，  
在共源组态和共漏组态两种放大电路中，  
共源组态的电压放大倍数比较大，  
共漏组态的输出电阻比较小。共漏组态的输出电压  
与输入电压是同相的。

	双极型三极管	场效应三极管
结构	NPN型 PNP型  C与E一般不可倒置使用	结型耗尽型 N沟道 P沟道 绝缘栅增强型 N沟道 P沟道 绝缘栅耗尽型 N沟道 P沟道 D与S有的型号可倒置使用
载流子	多子扩散少子漂移	多子漂移
输入量	电流输入	电压输入
控制	电流控制电流源CCCS( $\beta$ )	电压控制电流源VCCS( $g_m$ )
噪声	较大	较小
温度特性	受温度影响较大	较小, 可有零温度系数点
输入电阻	几十到几千欧姆	几兆欧姆以上
放大能力	$\beta$ (大)	$g_m$ (小)

作业： 3.1

 3.3

 3.5

 3.10

 3.12