

第3章 电子器件及其电路模型

(semiconductor elements) (circuit analysis)

3.0* 半导体基础知识

3.1 半导体二极管

3.2 晶体三极管

3.3 场效应管

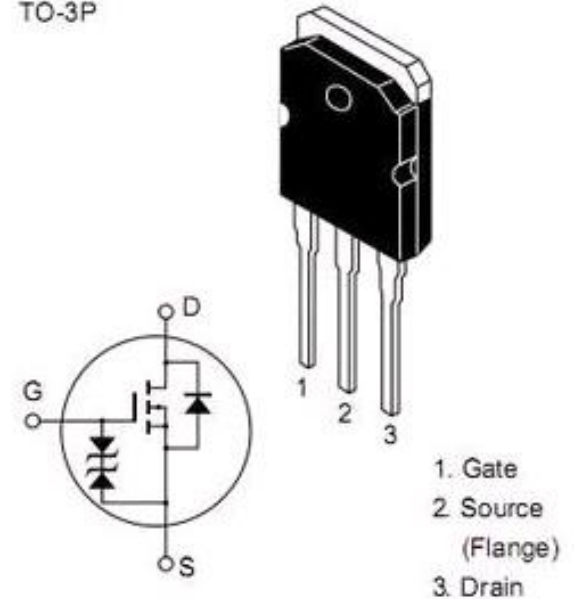
3.4 集成运算放大器

3.5 数字逻辑电路基础

§ 3.3 场效应管

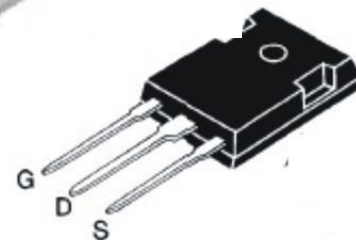
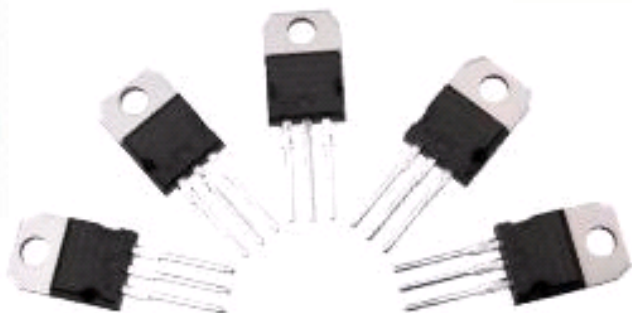
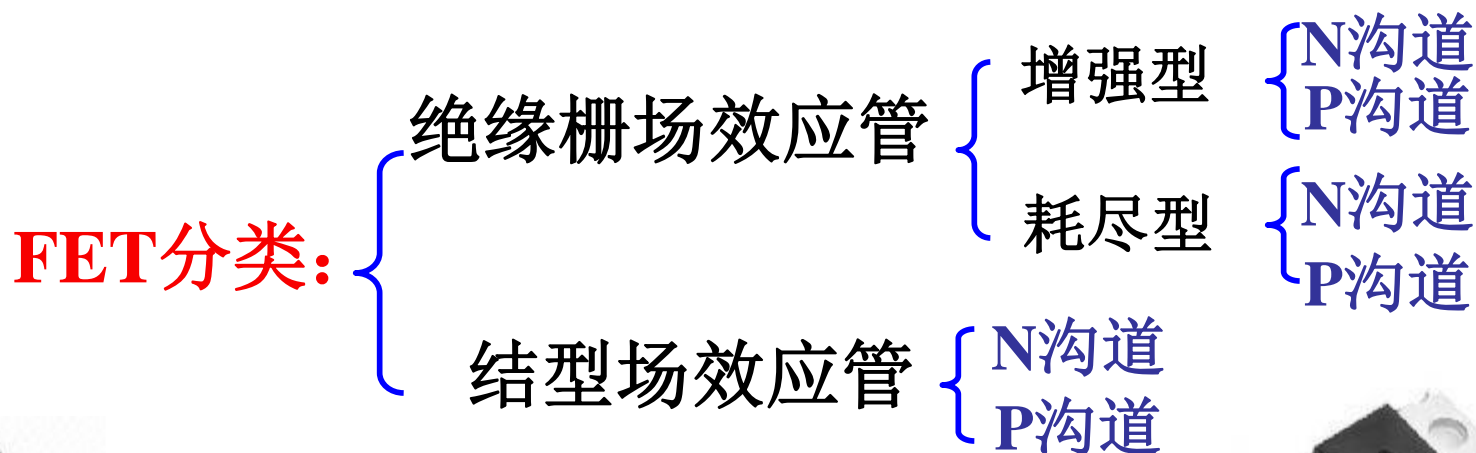
- 一、绝缘栅型场效应三极管
- 二、结型场效应管
- 三、场效应管参数
- 四、场效应管静态分析

TO-3P



场效应管（Field Effect Transistor简称FET）是一种**电压控制**器件($u_{GS} \sim i_D$)，工作时只有一种载流子参与导电，因此它是**单极型**器件。

FET因其制造工艺简单，功耗小，温度特性好，输入电阻极高等优点，得到了广泛应用。

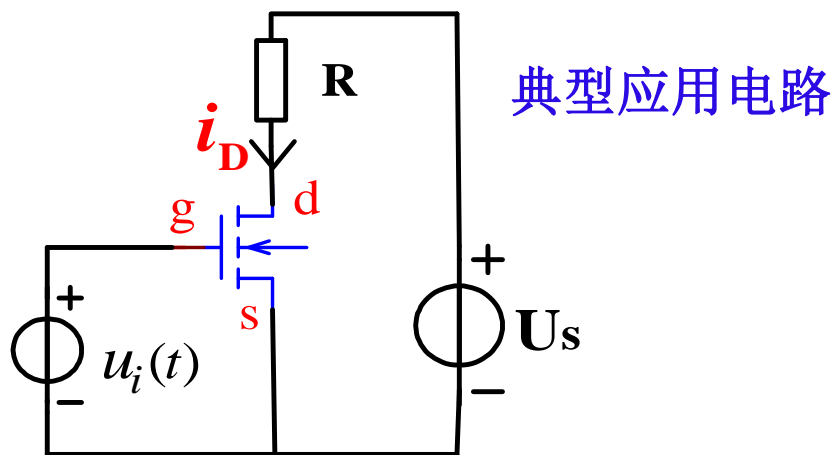


场效应管用**FET**表示（**Field Effect Transistor**）。具有输入电阻高、热稳定性好、工艺简单、易于集成等优点。

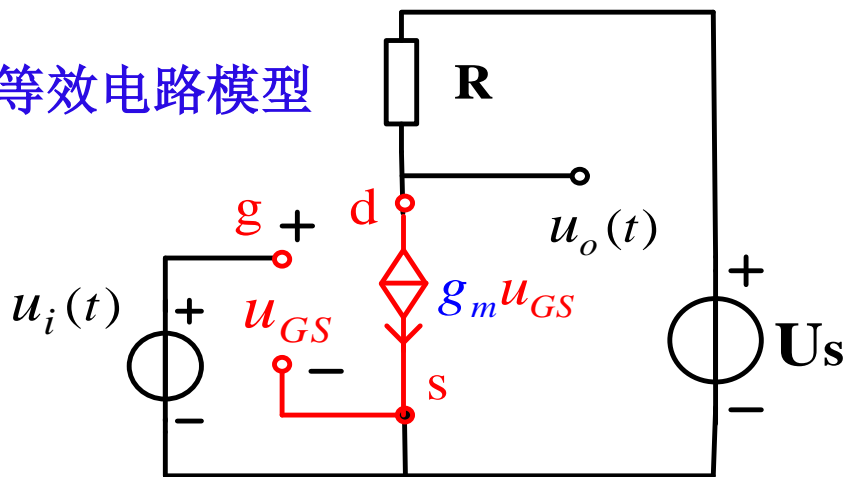
- **场效应管分类： Metal-Oxide-Semiconductor**
 - 绝缘栅型IGFET(或MOS)（**Insulted Gate Type**）
 - 增强型MOS（**Enhancement**）
 - N沟道
 - P沟道
 - 耗尽型MOS（**Depletion**）
 - N沟道
 - P沟道
 - 结型JFET（**Junction Type**）
 - 本质上是耗尽型，分为N沟道和P沟道。

典型场效应管特性及应用介绍

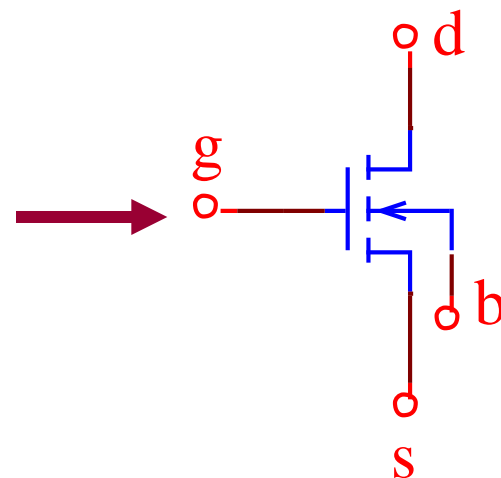
N沟道增强型绝缘栅场效应管



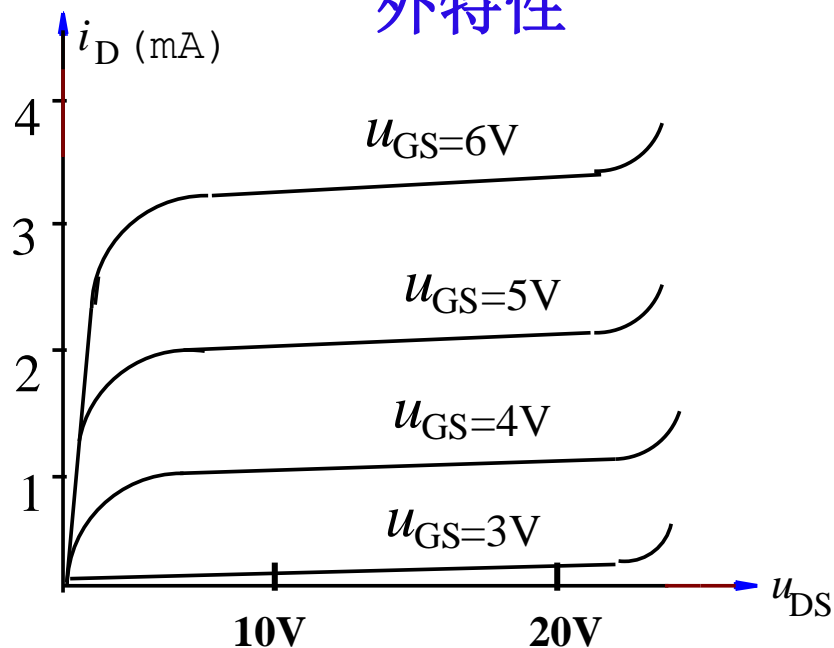
等效电路模型



符号



外特性



一、绝缘栅场效应三极管 (IGFET)

绝缘栅型场效应管 (Metal Oxide_Semiconductor FET),
简称**MOSFET**。分为:

增强型 → N沟道、P沟道

耗尽型 → N沟道、P沟道

s: Source 源极

d: Drain 漏极

g: Gate 栅极

B: Base 衬底

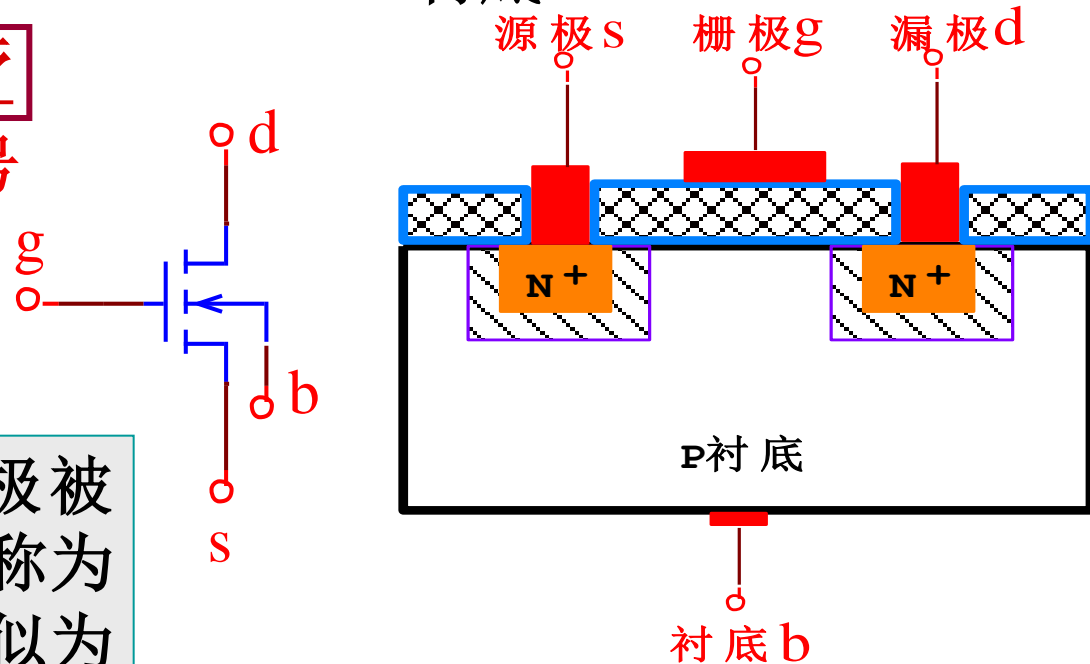
1. N沟道增强型MOS管

(1) 结构

符号

4个电极: 漏极D,
源极S, 栅极G 和 衬底B。

MOS管的栅极与其它电极被
SiO₂绝缘层隔开了, 所以称为
绝缘栅, 栅极输入电阻近似为
 ∞ , $i_G \approx 0$ 。

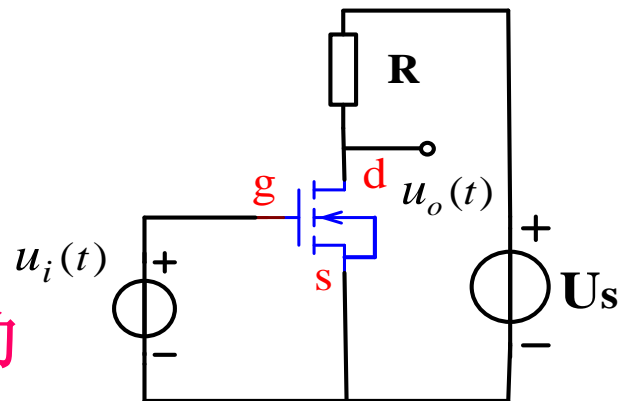


衬底引线箭头由P指向N

(2) 工作原理

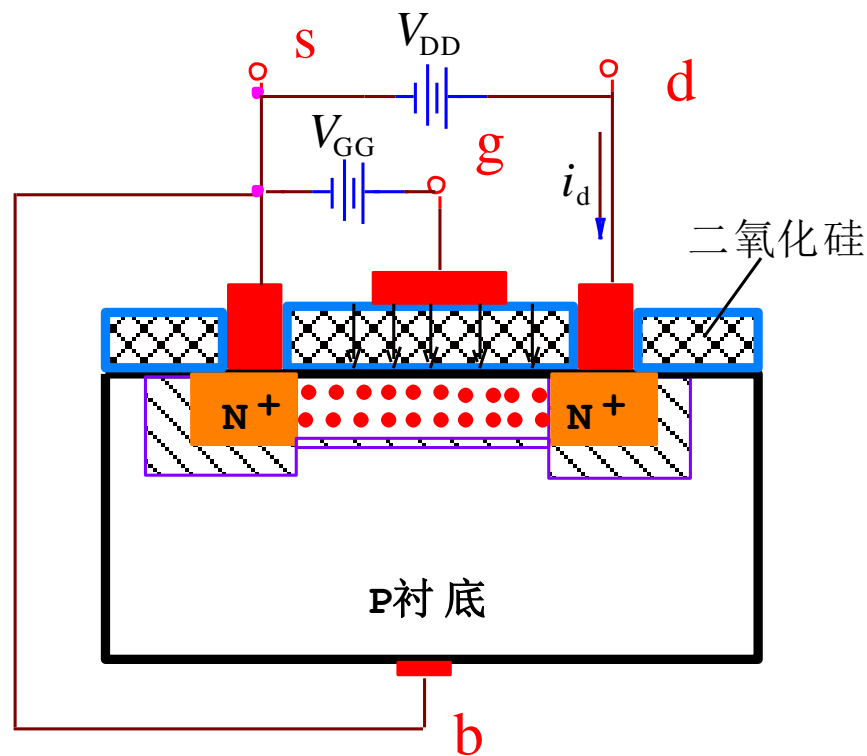
① 栅源电压 u_{GS} 的控制作用

当 $u_{GS}=0V$ 时，漏源之间相当两个背靠背的二极管，在 d、s 之间无电流，管子截止。



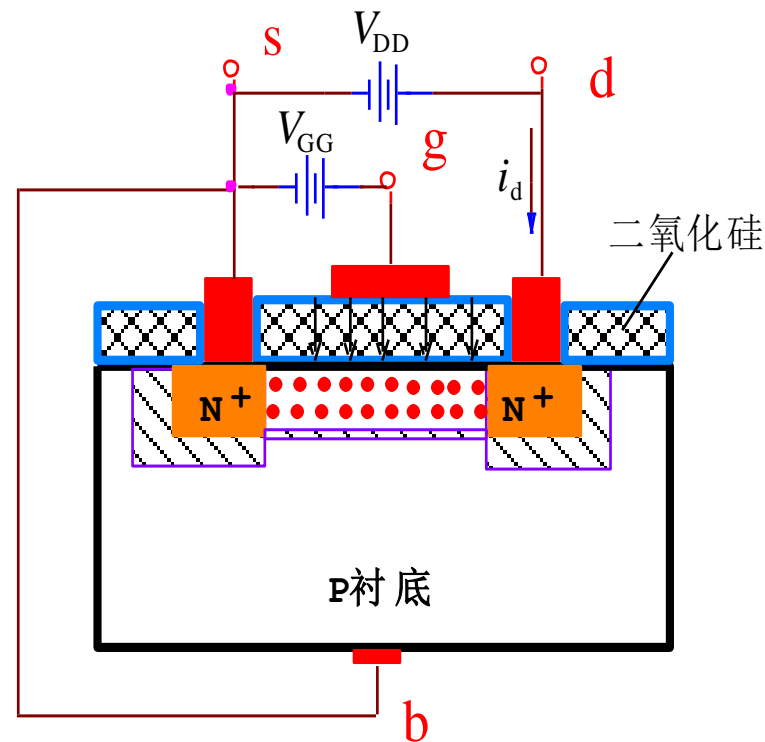
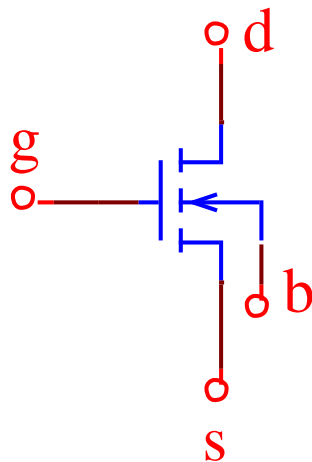
当 $u_{GS} > 0V$ 时 → 纵向电场
→ 将靠近栅极下方的空穴向⁻排斥 → 耗尽层。

再增加 u_{GS} → 纵向电场 ↑
→ 将 P 区少子电子聚集到 P 区表面 → 形成导电沟道，
如果此时加有漏源电压，
就可以形成漏极电流 i_d 。



定义：

开启电压 (U_T)——刚刚产生沟道所需的栅源电压 U_{GS} 。



N沟道增强型MOS管的基本特性：

$u_{GS} < U_T$ ，管子截止，

$u_{GS} > U_T$ ，管子导通。

u_{GS} 越大，沟道越宽，在相同的漏源电压 u_{DS} 作用下，漏极电流 I_D 越大。

②漏源电压 u_{DS} 对漏极电流 i_d 的控制作用

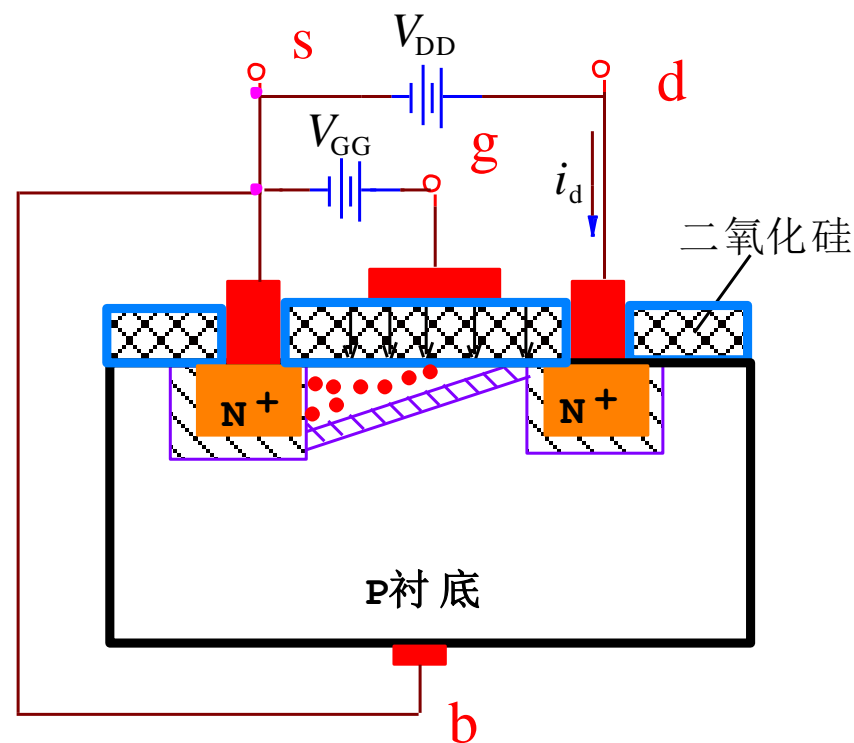
当 $u_{GS} > U_T$ ，且固定为某一值时，来分析漏源电压 u_{DS} 对漏极电流 i_D 的影响。（设 $U_T=2V$ ， $u_{GS}=4V$ ）

(a) $u_{ds}=0$ 时， $i_d=0$ 。

(b) $u_{ds} \uparrow \rightarrow i_d \uparrow$ ；
同时沟道靠漏区变窄。

(c) 当 u_{ds} 增加到使 $u_{gd}=U_T$ 时，
沟道靠漏区夹断，称为**预夹断**。

(d) u_{ds} 再增加，预夹断区
加长， u_{ds} 增加的部分基本降
落在随之加长的夹断沟道上
， i_d 基本不变。



(3) 特性曲线

①输出特性曲线: $i_D = f(u_{DS}) \mid u_{GS} = \text{const}$

(a) 可变电阻区 (预夹断前)。

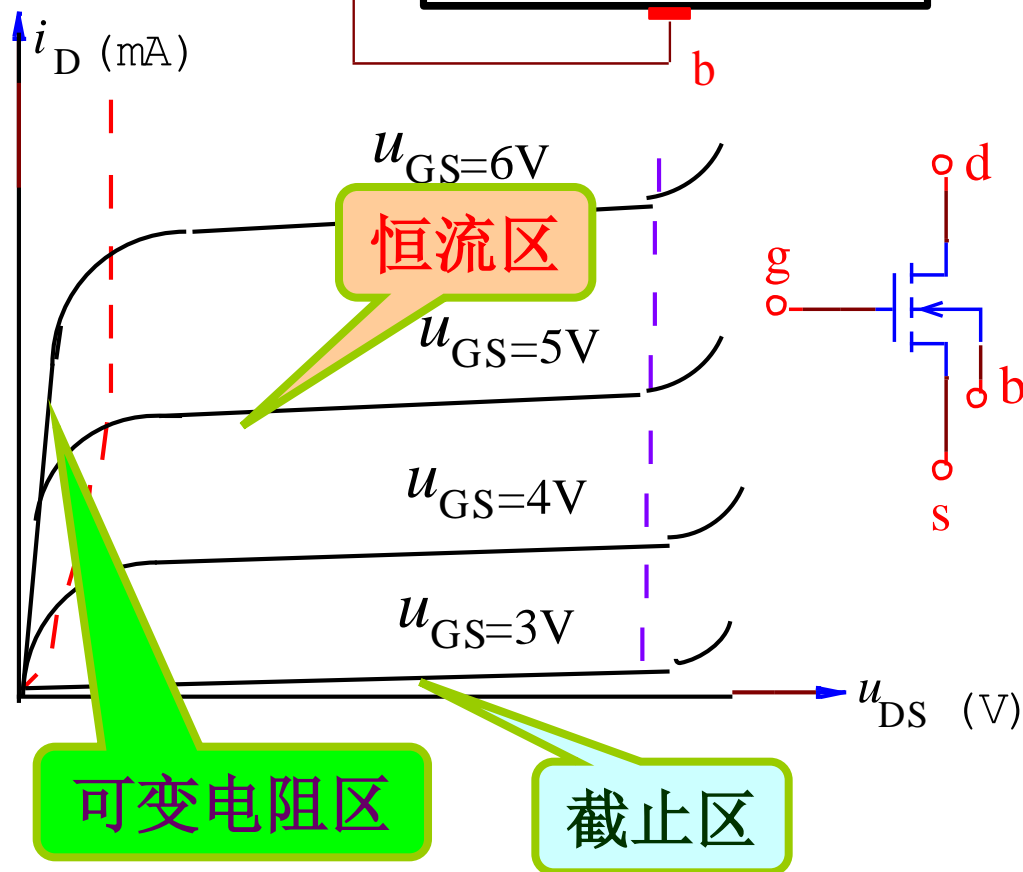
$$0 < u_{DS} < u_{GS} - U_T$$

(b) 恒流区也称饱和区 (预夹断后)。

$$u_{DS} > u_{GS} - U_T$$

(c) 夹断区 (截止区)。

$$u_{GS} < U_T$$

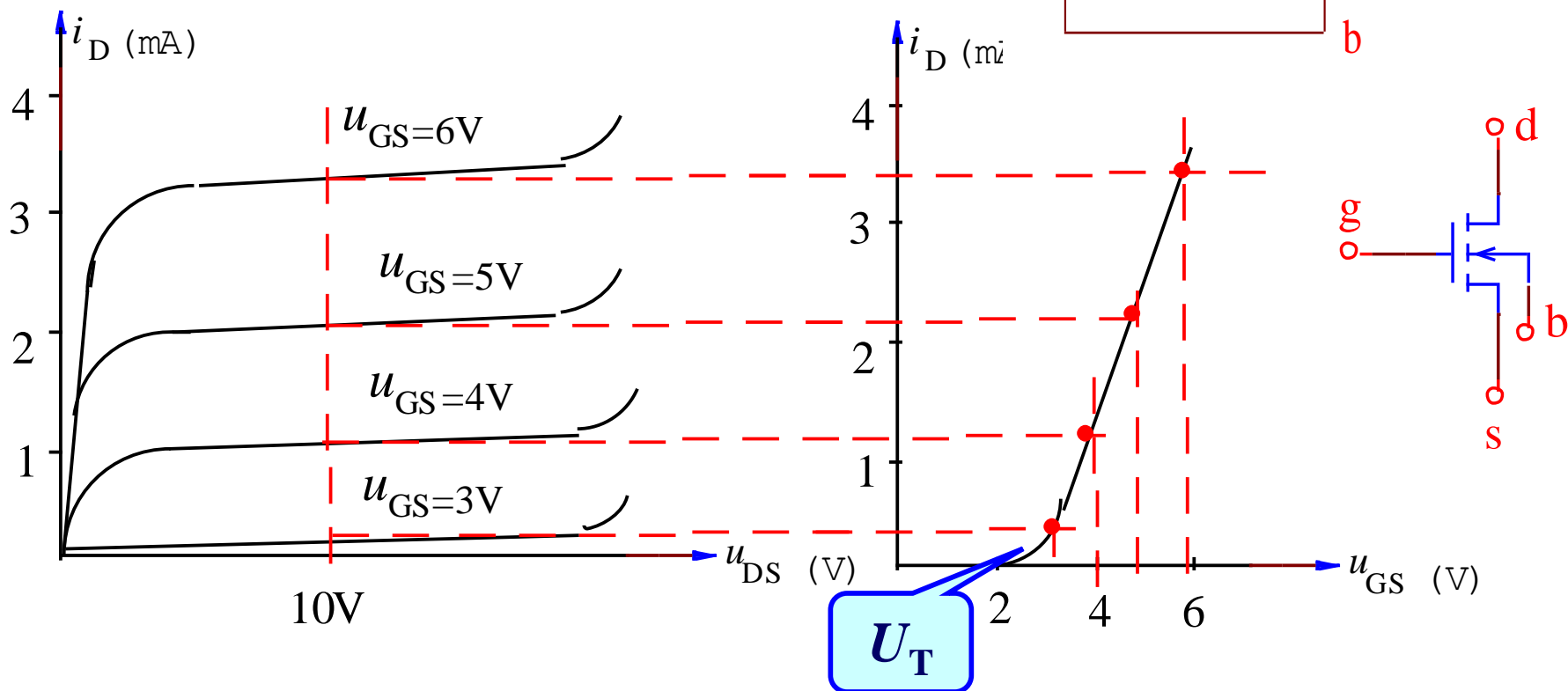


②转移特性曲线：（电压控制电流源）

$$i_D = f(u_{GS}) \mid u_{DS} = \text{const}$$

可根据输出特性曲线作出转移特性曲线。

例：作 $u_{DS}=10\text{V}$ 的一条转移特性曲线：



一个重要参数——跨导 g_m (恒流区)

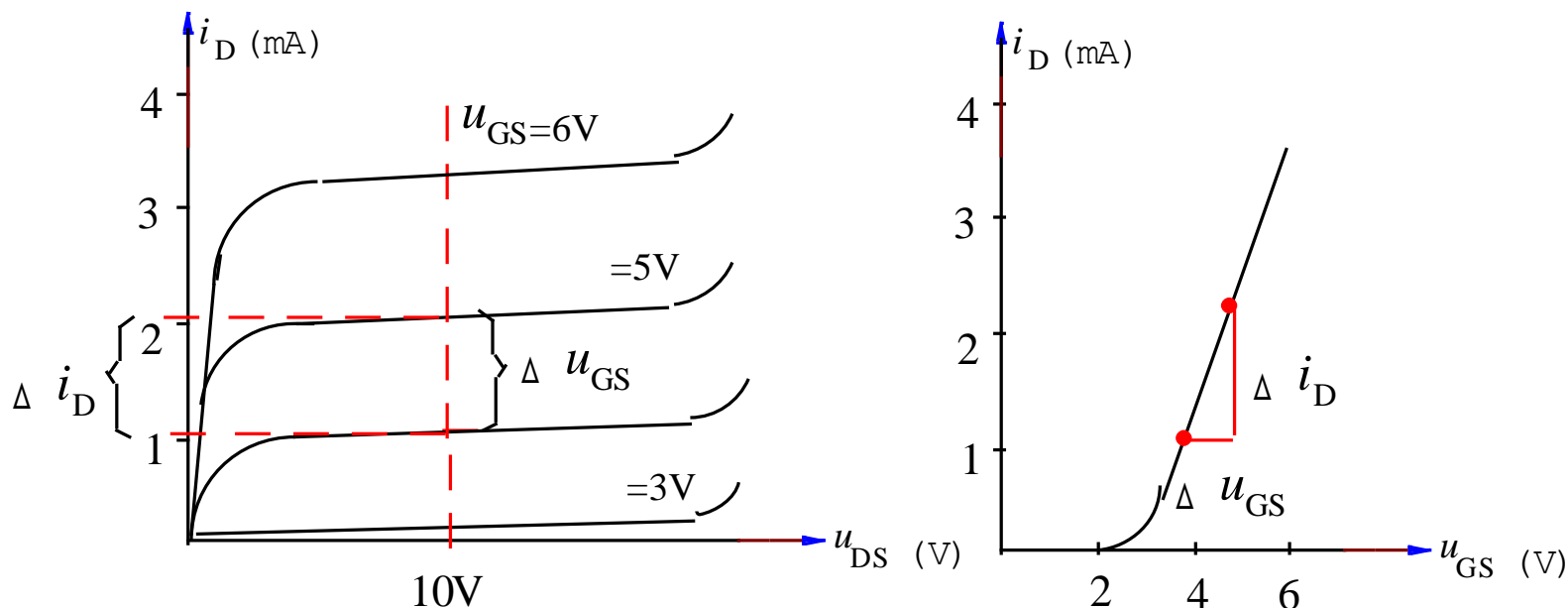
(电压控制电流源控制系数)

$$g_m = \Delta i_D / \Delta u_{GS} \Big|_{u_{DS} = \text{const}} \quad (\text{单位mS})$$

g_m 的大小反映了栅源电压对漏极电流的控制作用。

在转移特性曲线上， g_m 为曲线的斜率。

在输出特性曲线上也可求出 g_m 。



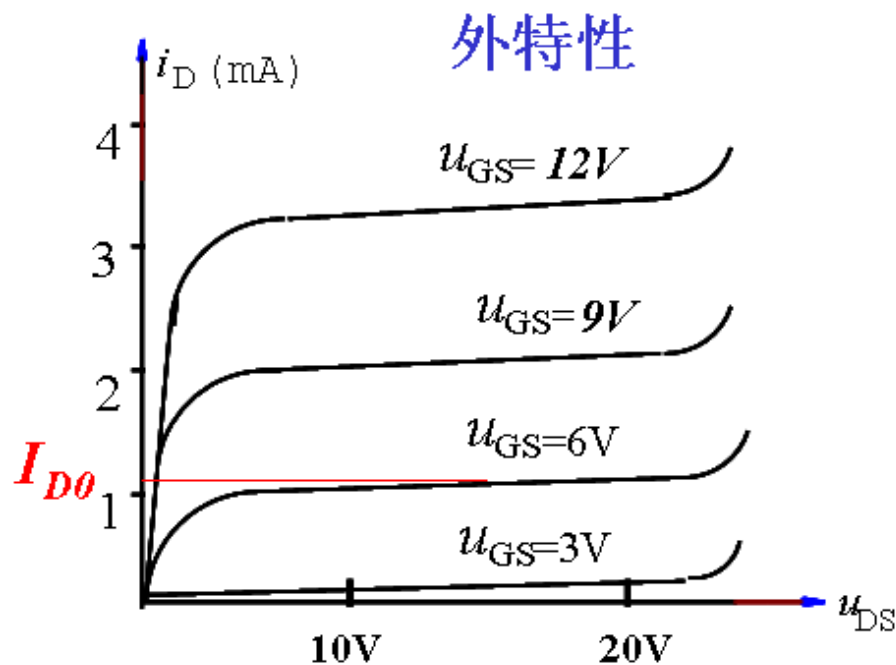
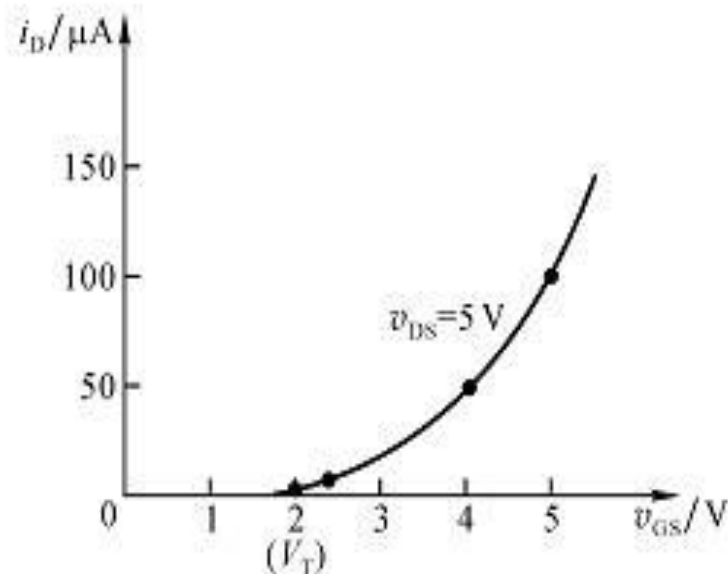
增强型NMOS—FET输出伏安特性

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

$$i_D = I_{D0} \left(\frac{U_{GS}}{U_T} - 1 \right)^2 \quad (\text{恒流区})$$

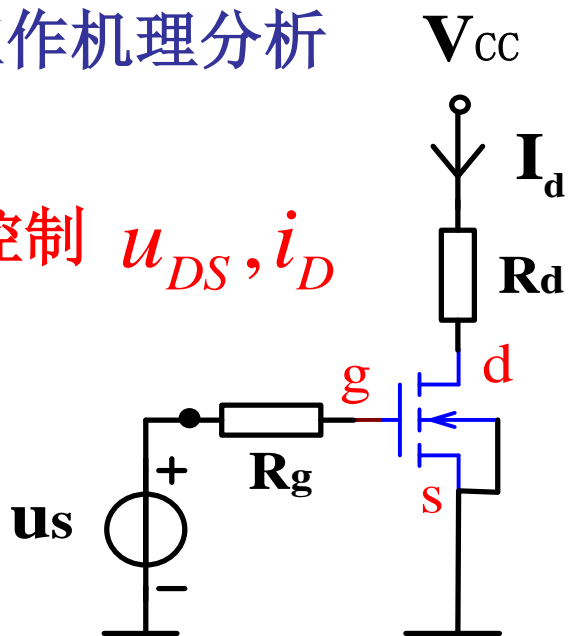
I_{D0} 是 $U_{GS} = 2U_T$ 时的漏极电流

U_T 开启电压

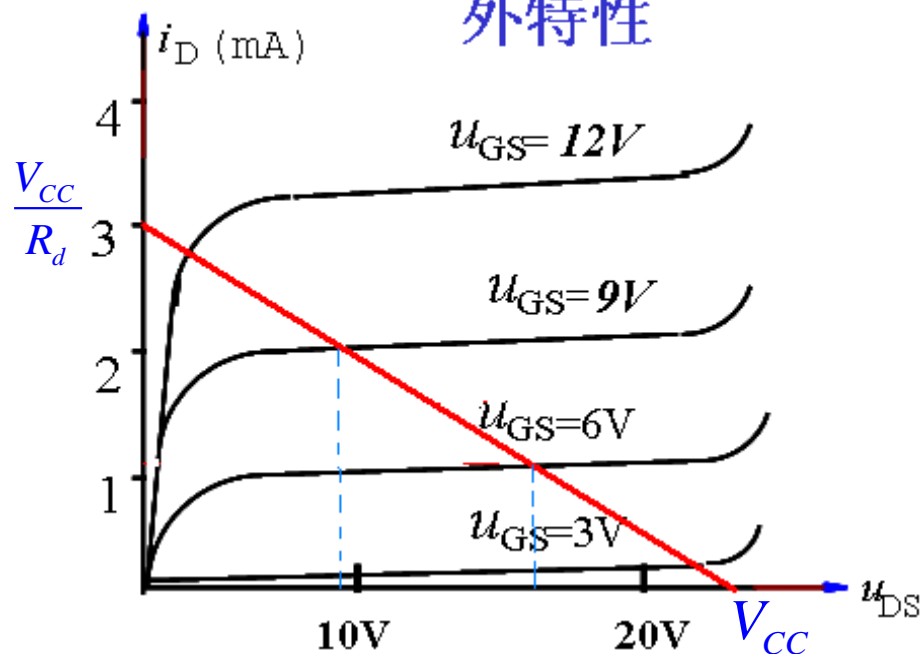


场效应管工作机理分析

$u_i = u_{GS}$ 控制 u_{DS}, i_D



外特性



*例: $I_{D0} = 1mA, U_T = 1V, R_d = 1k\Omega, V_{CC} = 10V$, 求 I_D 。

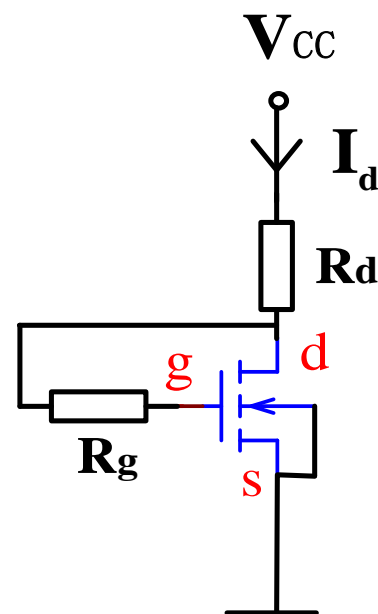
$$i_D \times R_d + U_{DS} = V_{CC} \quad i_D = I_{D0} \left(\frac{U_{GS}}{U_T} - 1 \right)^2$$

$$I_{D0} \left(\frac{U_{DS}}{U_T} - 1 \right)^2 \times R_d + U_{DS} = V_{CC}$$

$$U_{DS}^2 - U_{DS} + 1 = 10 \quad \longrightarrow$$

$$U_{DS} = 3.54V$$

$$I_D = 6.46mA$$



2.N沟道耗尽型MOSFET

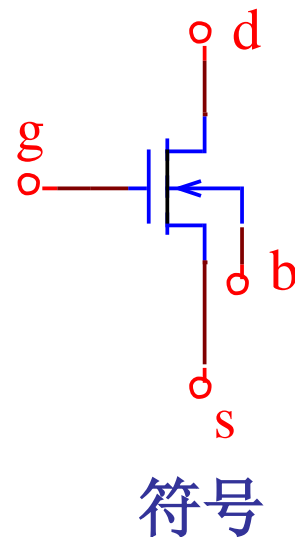
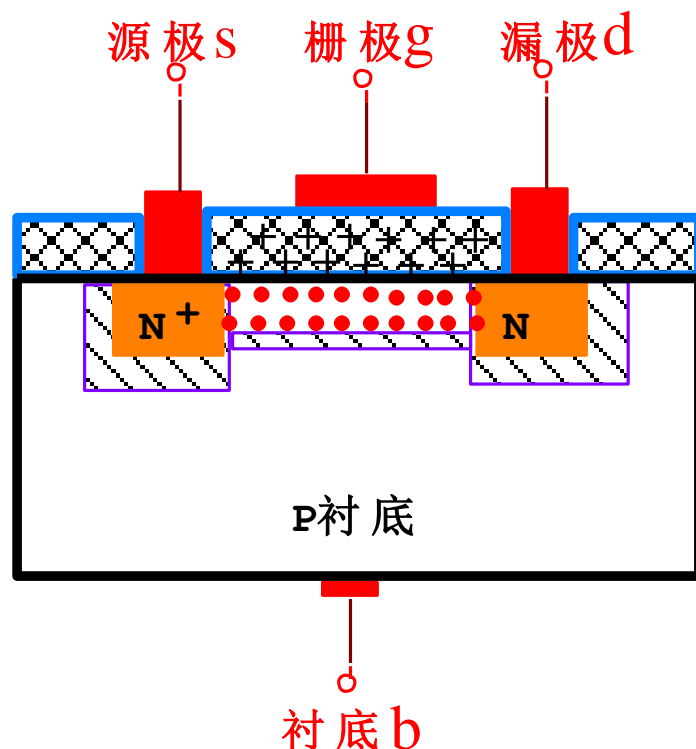
在栅极下方的 SiO_2 层中掺入了大量的金属正离子。所以当 $u_{\text{GS}}=0$ 时，这些正离子已经感应出反型层，形成了沟道。

特点：

当 $u_{\text{GS}}=0$ 时，就有沟道，
加入 u_{DS} ，就有 i_{D} 。

当 $u_{\text{GS}}>0$ 时，沟道增宽，
 i_{D} 进一步增加。

当 $u_{\text{GS}}<0$ 时，沟道变窄，
 i_{D} 减小。

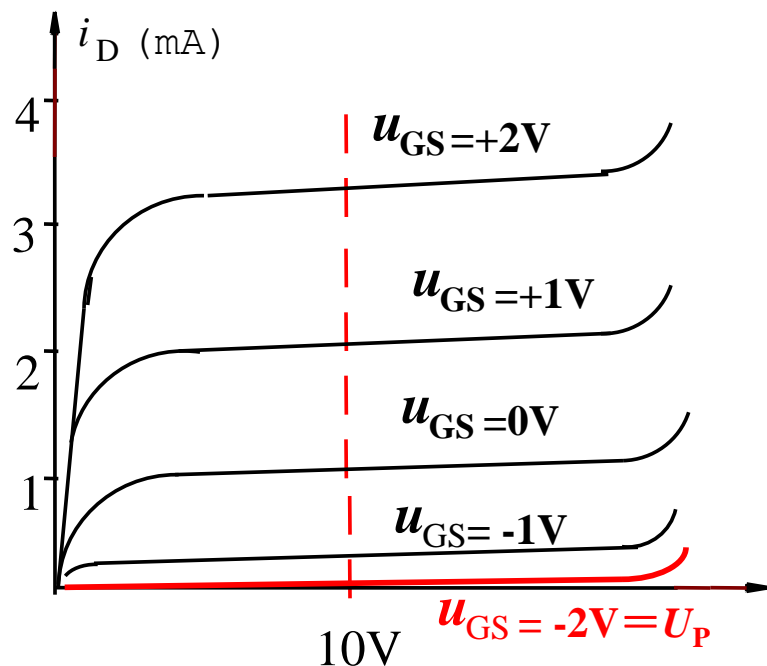


定义：

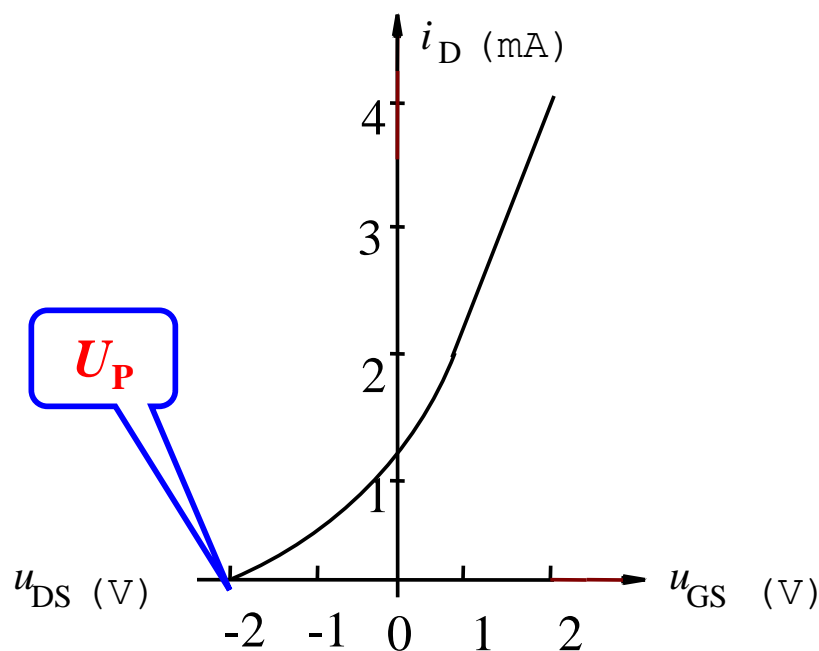
夹断电压 (U_{P})——沟道刚刚消失所需的栅源电压 u_{GS} 。

N沟道耗尽型MOSFET的特性曲线

输出特性曲线



转移特性曲线

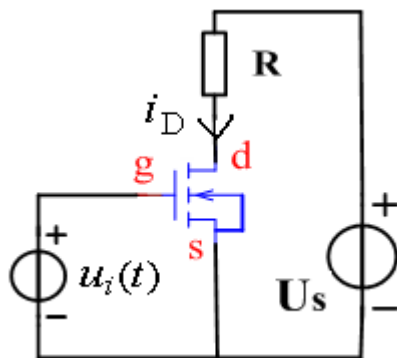
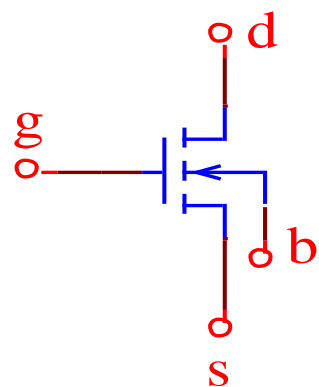


转移特性用电流方程:

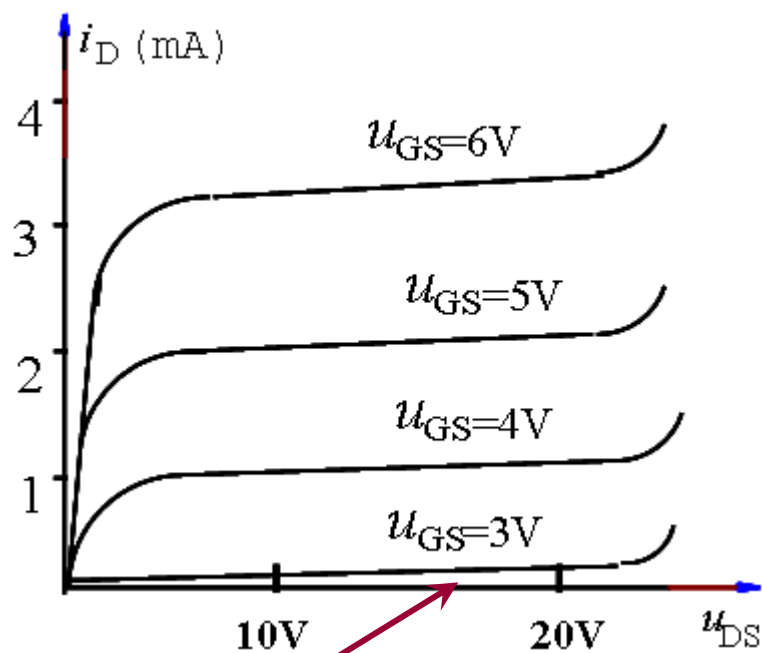
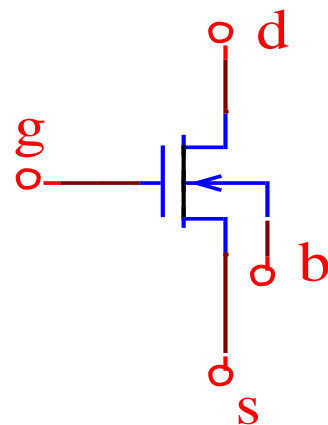
$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$$

I_{DSS} 是 $U_{GS} = 0$ 时的漏极电流，称为饱和漏极电流

N沟道增强型

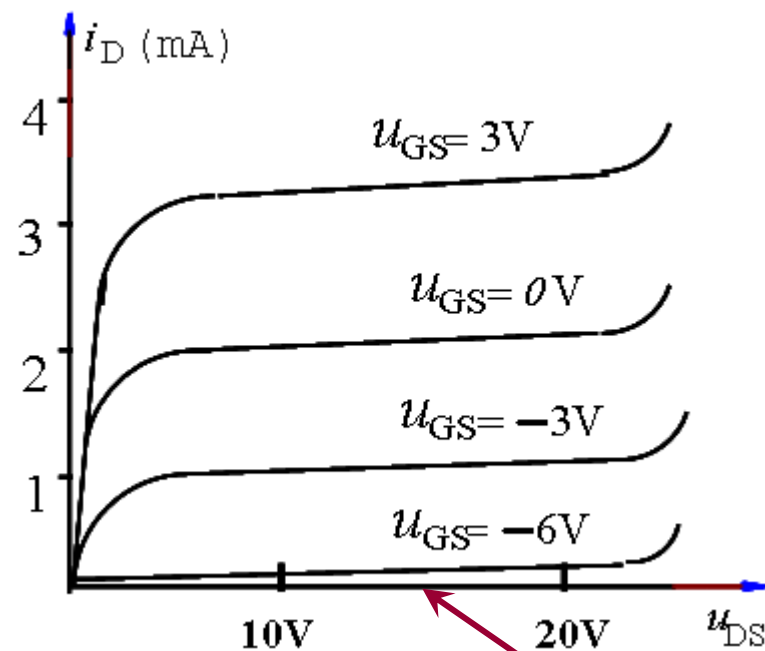


N沟道耗尽型



开启电压

从特性曲线判别管子型号

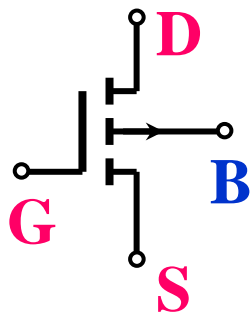
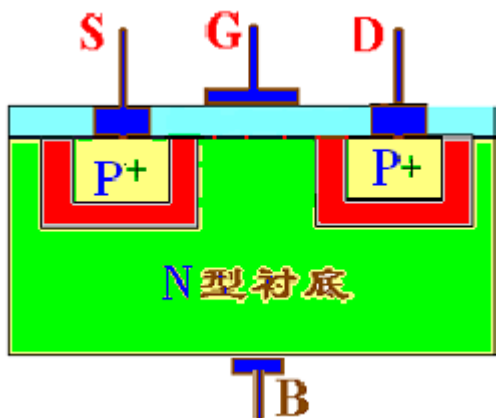


夹断电压

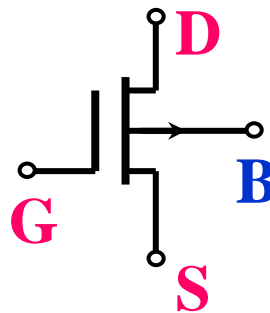
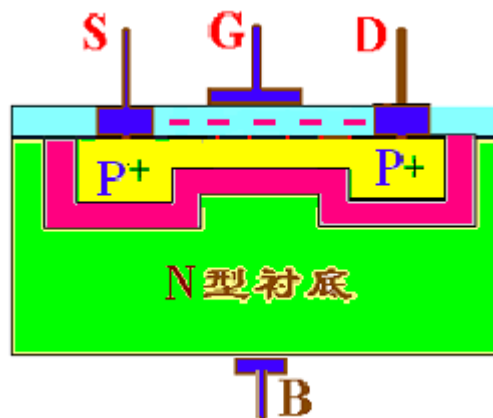
3、P沟道MOSFET

P沟道MOSFET的工作原理与N沟道MOSFET完全相同，只不过导电的载流子不同，供电电压极性不同而已。

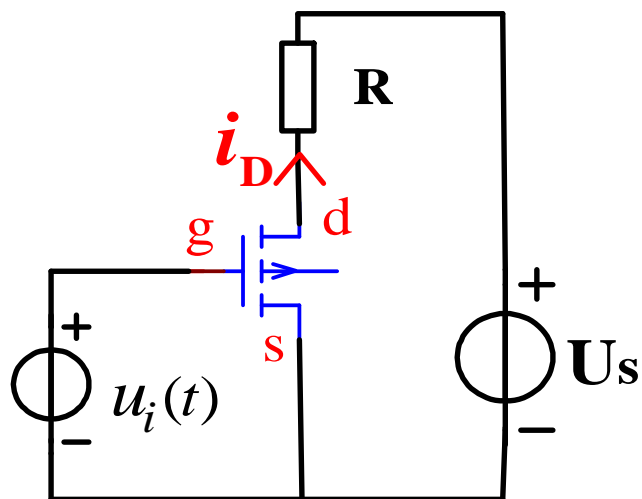
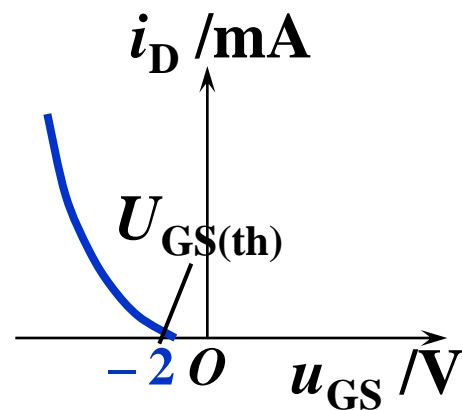
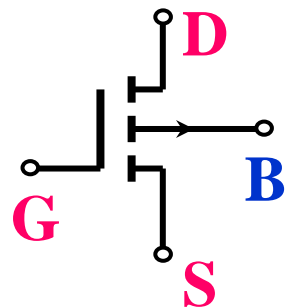
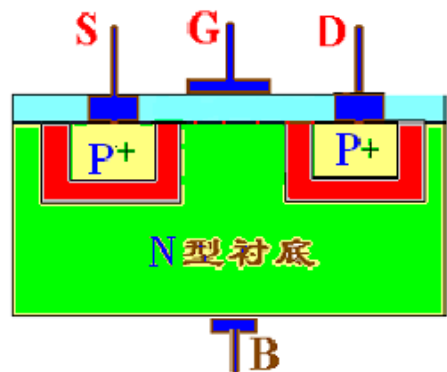
增强型



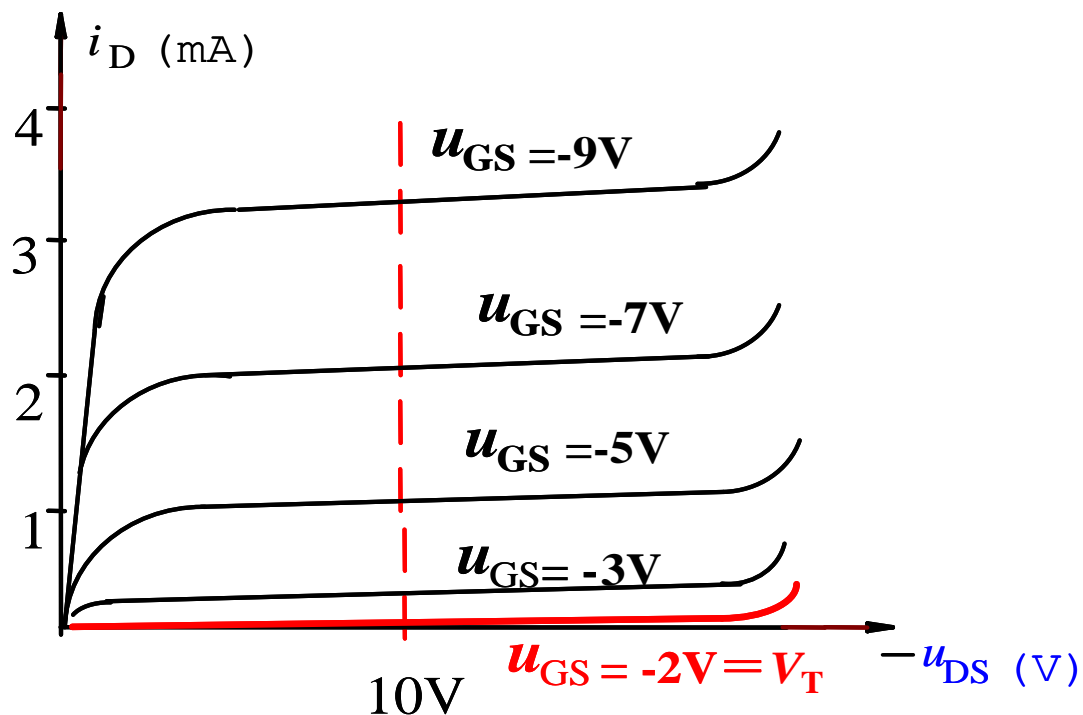
耗尽型



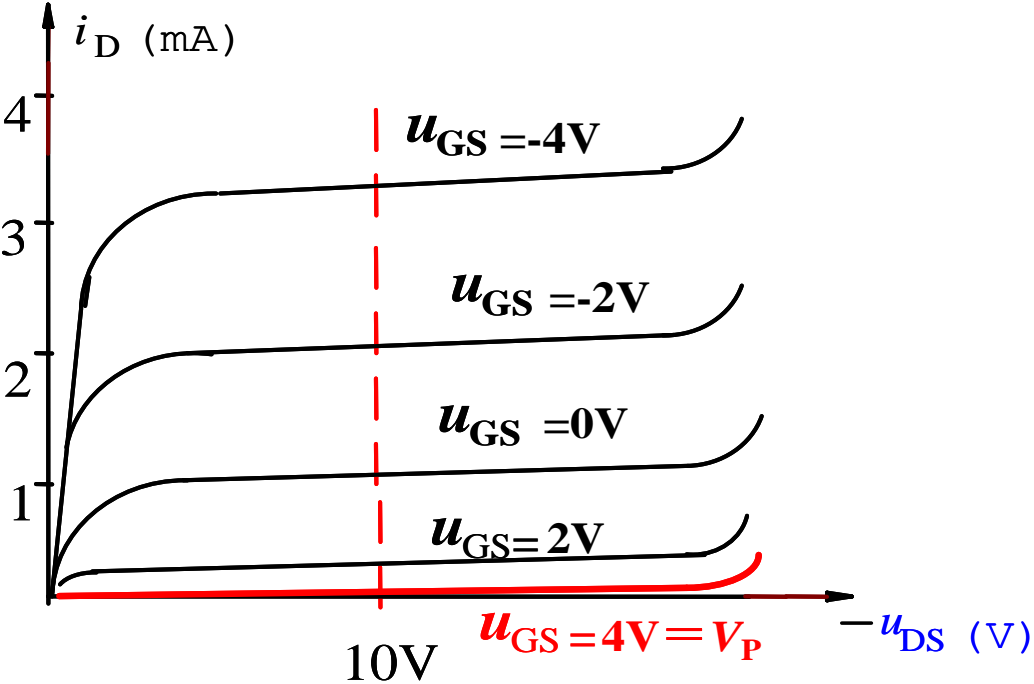
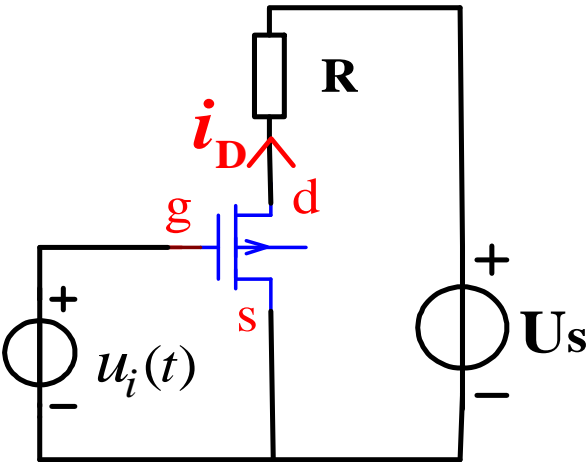
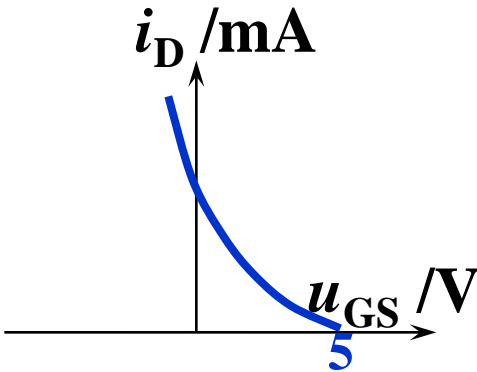
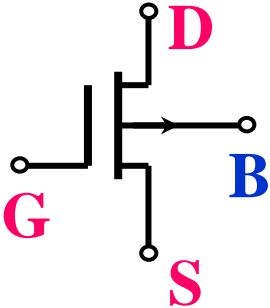
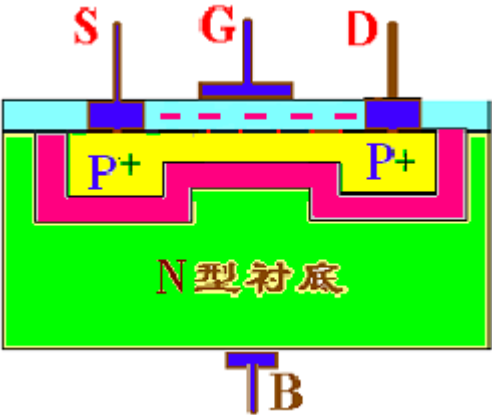
P沟道增强型MOSFET



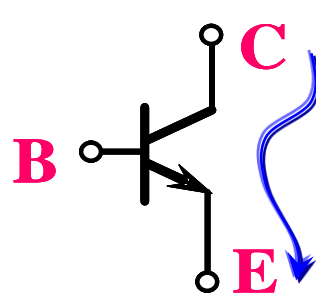
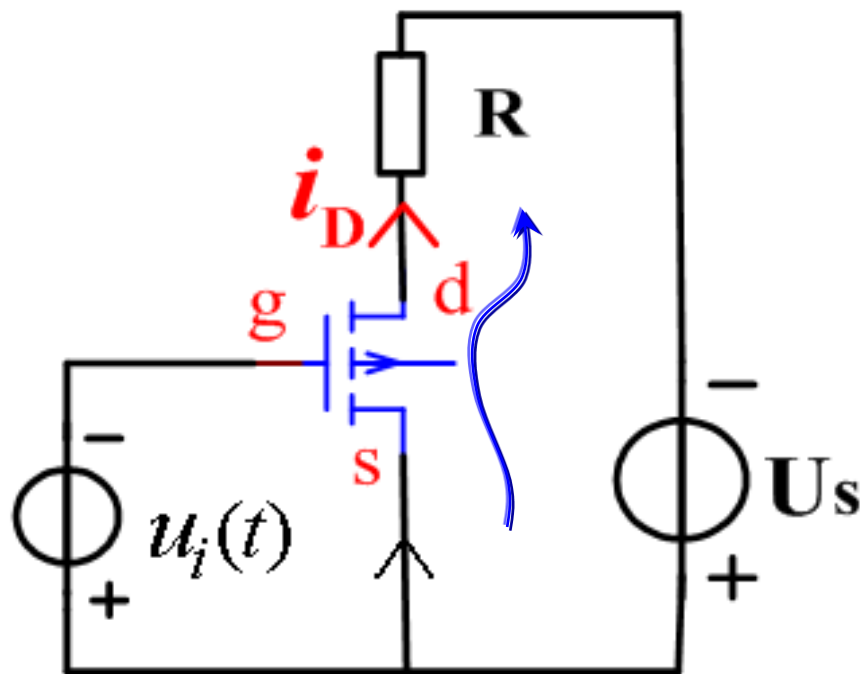
注意各量的参考方向！



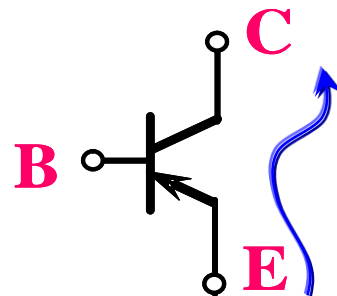
P沟道耗尽型MOSFET



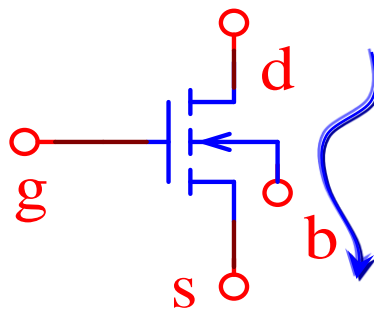
P沟道增强型MOSFET实际电压设置



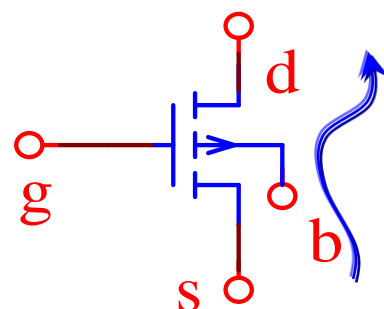
NPN 型



PNP 型



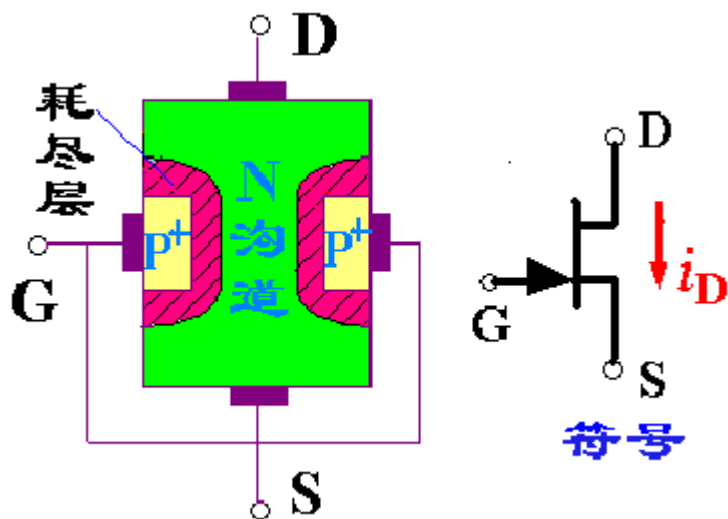
N沟道MOSFET



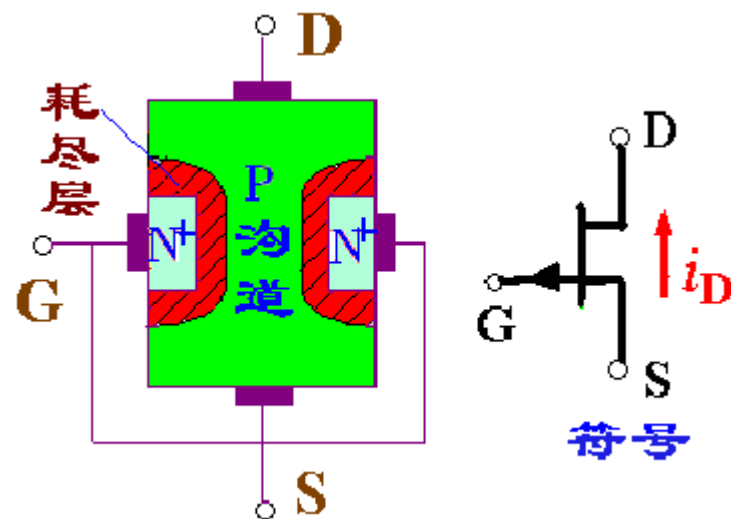
P沟道MOSFET

二、结型场效应管

1. 结构与符号



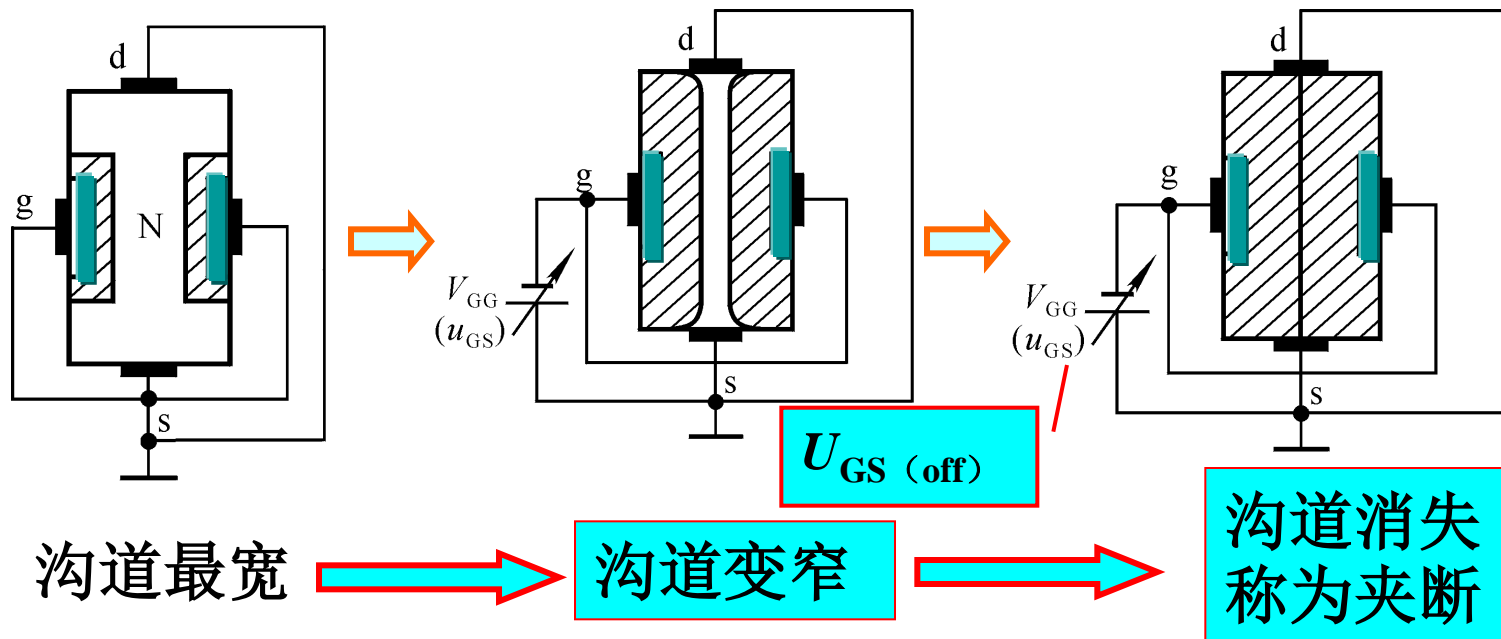
N 沟道 JFET



P 沟道 JFET

N 沟道 JFET

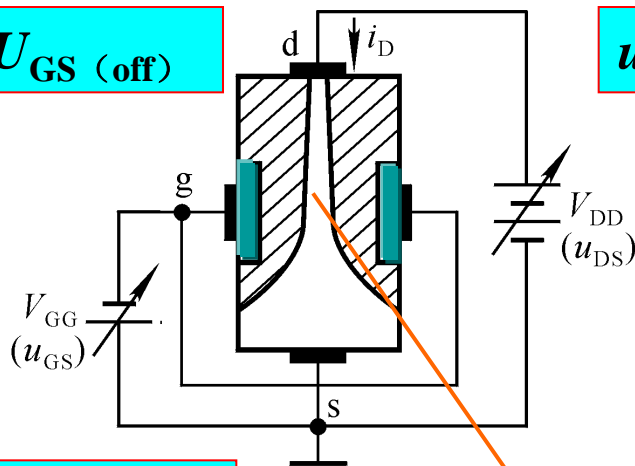
栅-源电压对导电沟道宽度的控制作用



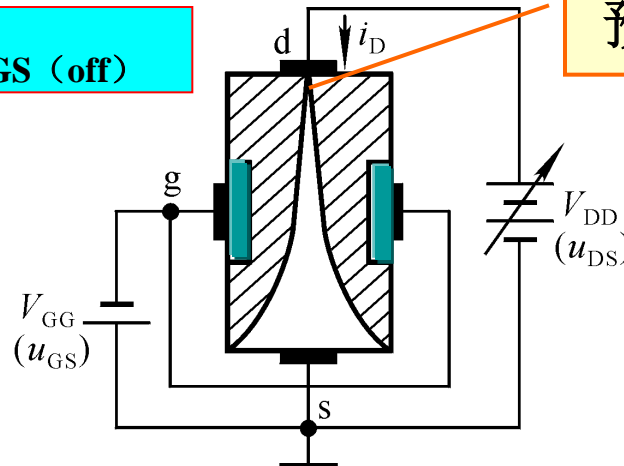
u_{GS} 可以控制导电沟道的宽度。为什么g-s必须加负电压？

漏-源电压对漏极电流的影响

$$u_{GD} > U_{GS}(\text{off})$$

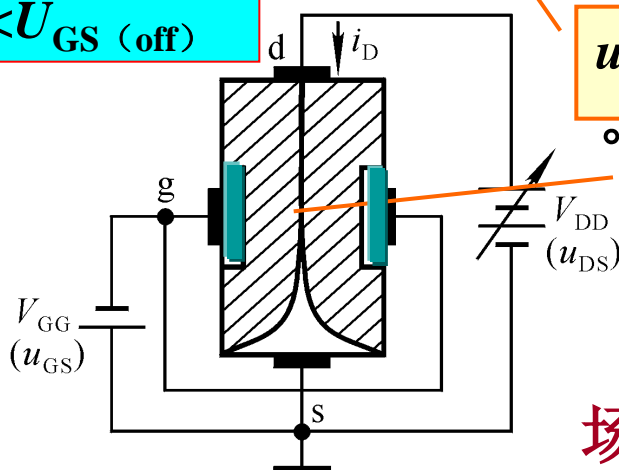


$$u_{GD} = U_{GS}(\text{off})$$



预夹断

$$u_{GD} < U_{GS}(\text{off})$$



$u_{GS} > U_{GS}(\text{off})$ 且不变, V_{DD} 增大, i_D 增大

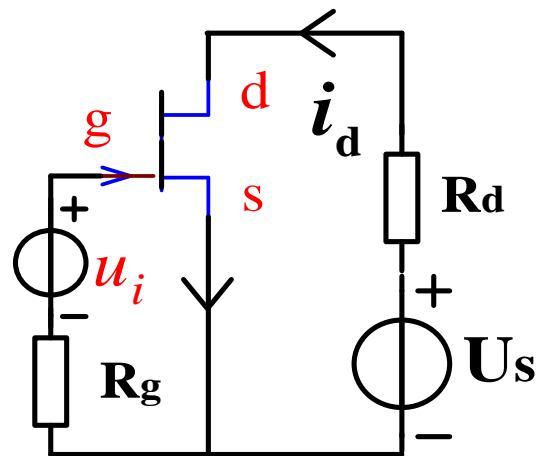
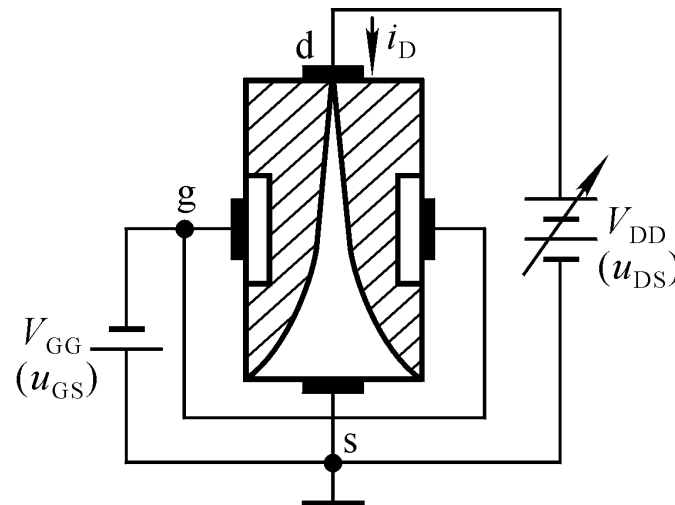
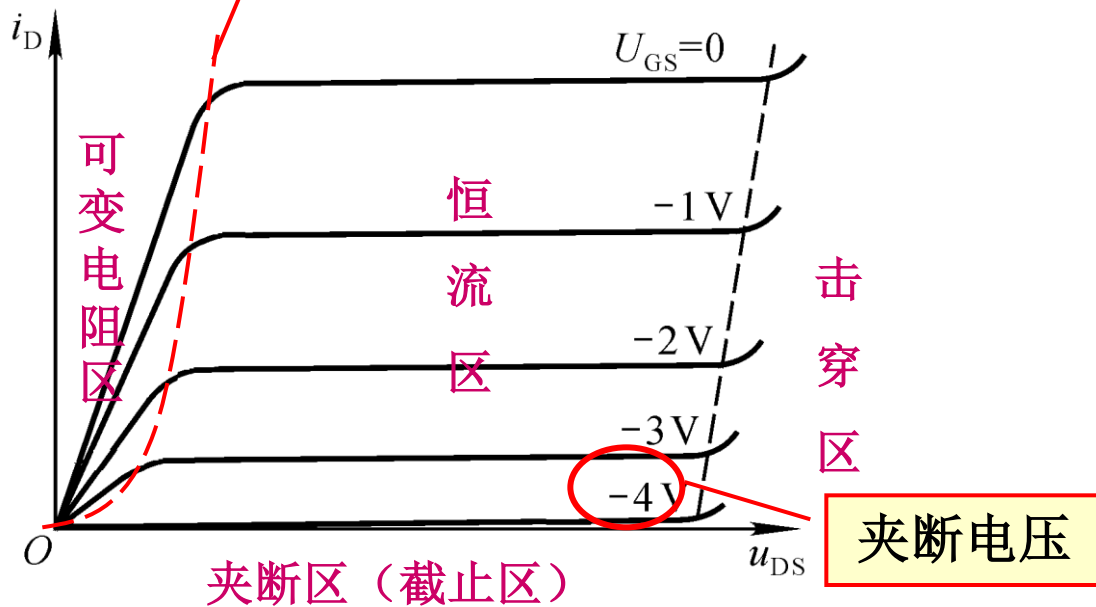
V_{DD} 的增大, 几乎全部用来克服沟道的电阻, i_D 几乎不变, 进入恒流区, i_D 几乎仅仅决定于 u_{GS} 。

场效应管工作在恒流区的条件是什么?

输出特性

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

预夹断轨迹, $u_{GD} = U_{GS(\text{off})}$

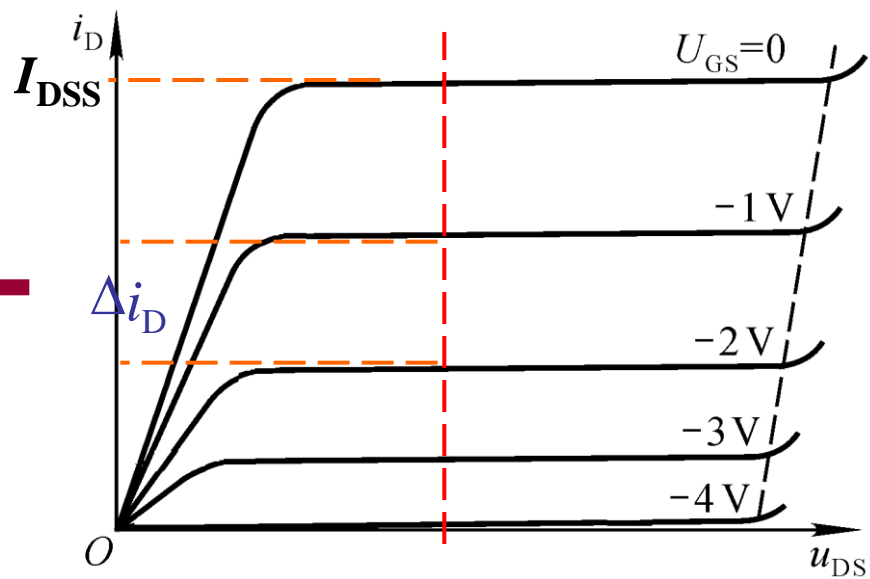
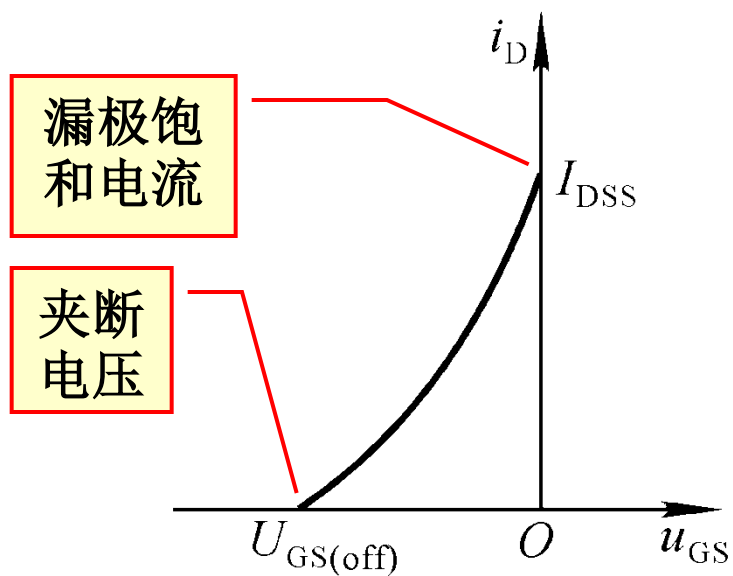


场效应管工作在恒流区, 因而 $u_{GS} > U_{GS(\text{off})}$ 且 $u_{GD} < U_{GS(\text{off})}$ 。

不同型号的管子 $U_{GS(\text{off})}$ 、 I_{DSS} 将不同。

转移特性

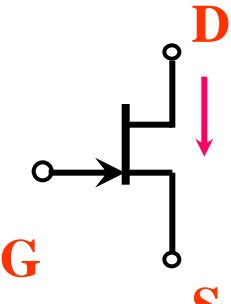
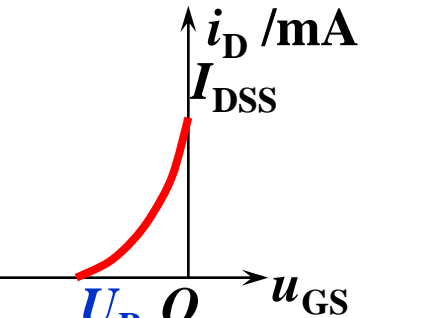
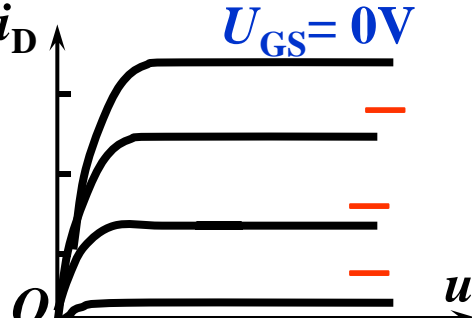
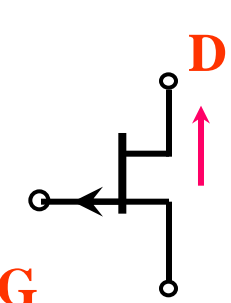
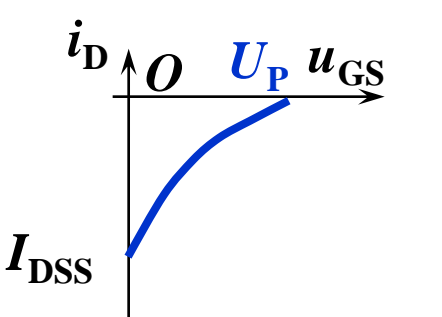
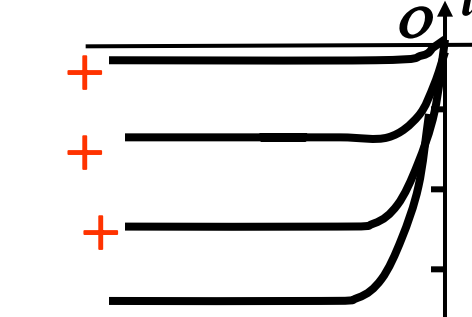
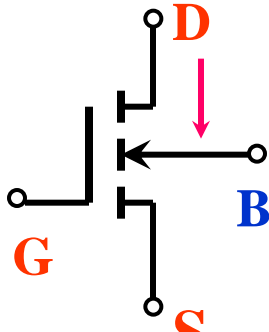
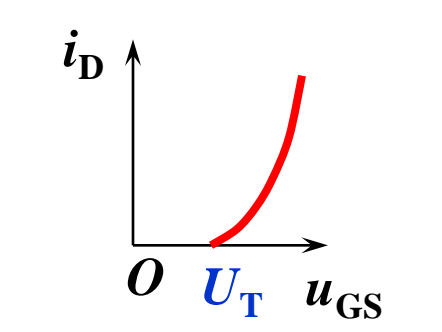
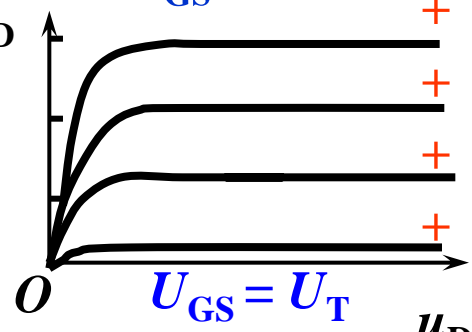
$$i_D = f(u_{GS}) \Big|_{U_{DS}=\text{常量}}$$

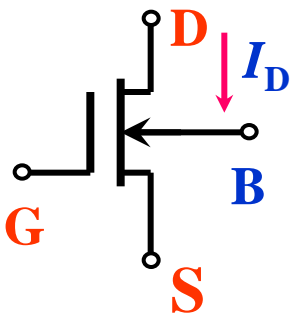
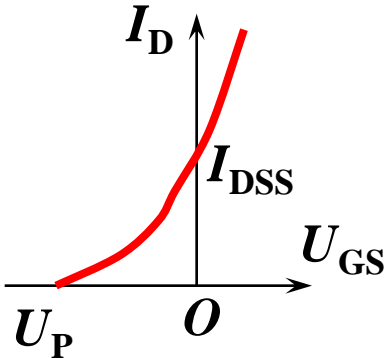
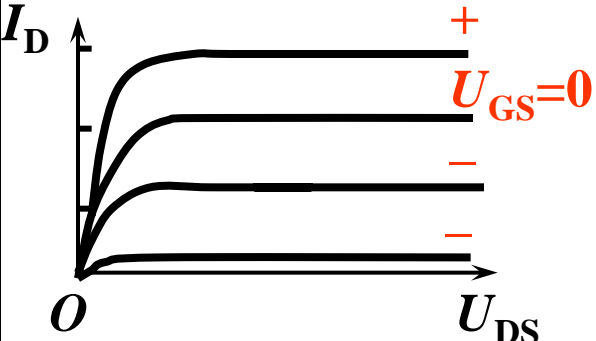
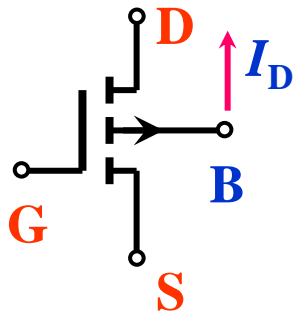
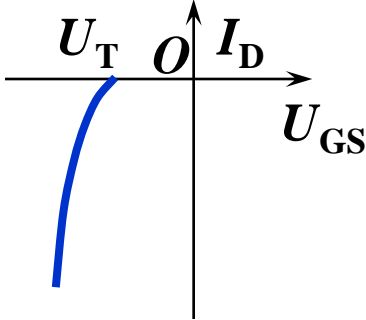
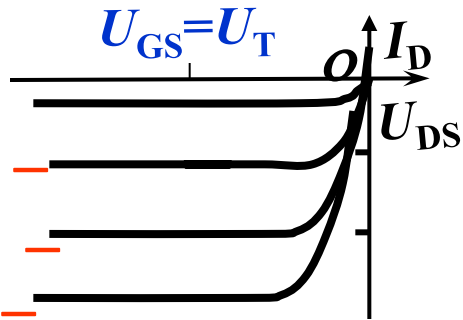
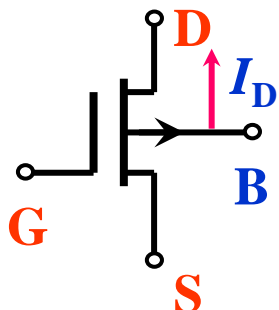
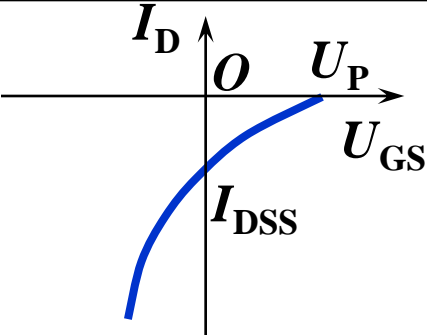
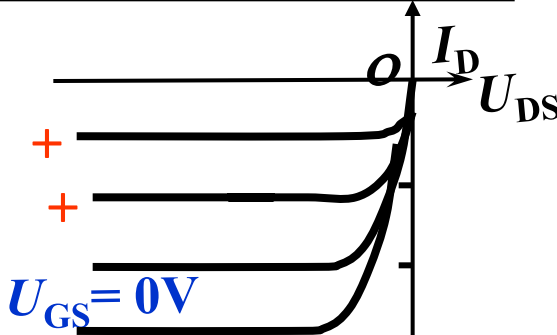
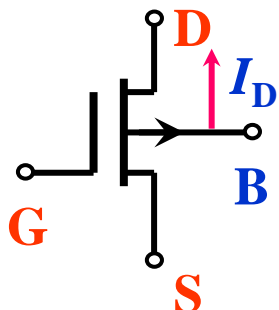
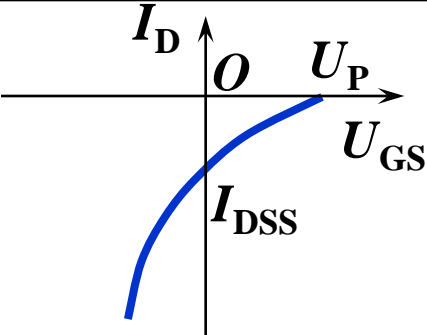
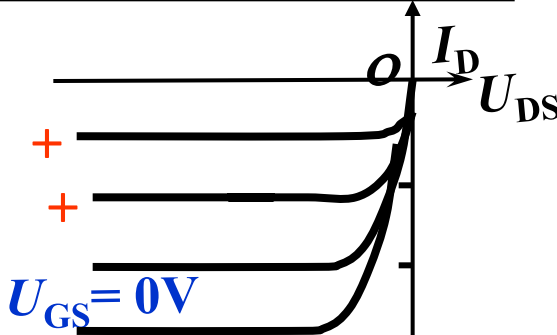


低频跨导:

$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \Big|_{U_{DS}=\text{常量}}$$

各类场效应管的符号和特性曲线

种类		符号	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			
	增强型			

三、场效应管参数

- (1) 开启电压 U_T (增强型) $U_{GS(on)}$
- (2) 夹断电压 U_P (耗尽型) $U_{GS(off)}$
- (3) 饱和漏极电流 I_{DO} (增强型)、 I_{DSS} (耗尽型、结型)
- (4) 跨导 g_m : $g_m = \Delta i_D / \Delta u_{GS} \mid u_{DS} = \text{const}$
- (5) 直流输入电阻 R_{GS} —— 栅源间的等效电阻。

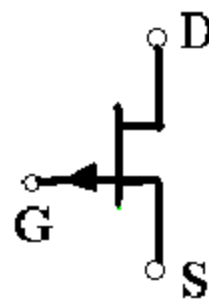
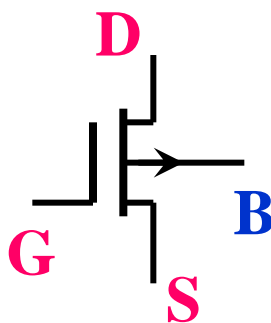
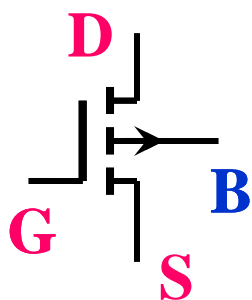
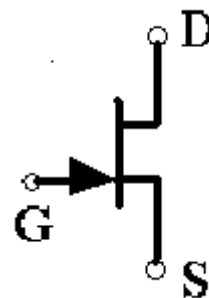
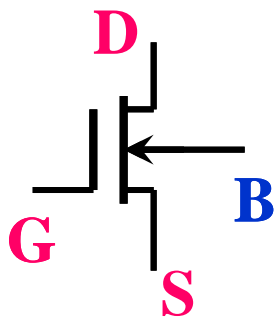
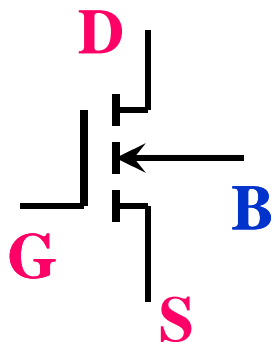
极限参数

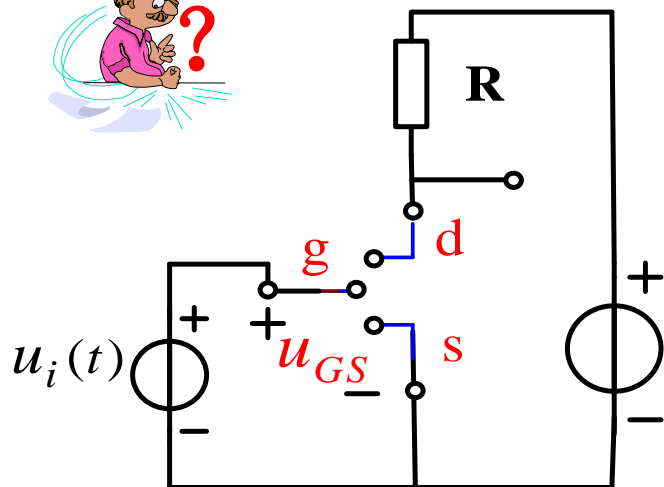
- (1) 最大漏-源电压 $V_{(BR)DS}$
- (2) 最大栅-源电压 $V_{(BR)GS}$
- (3) 最大耗散功率 P_{DM}



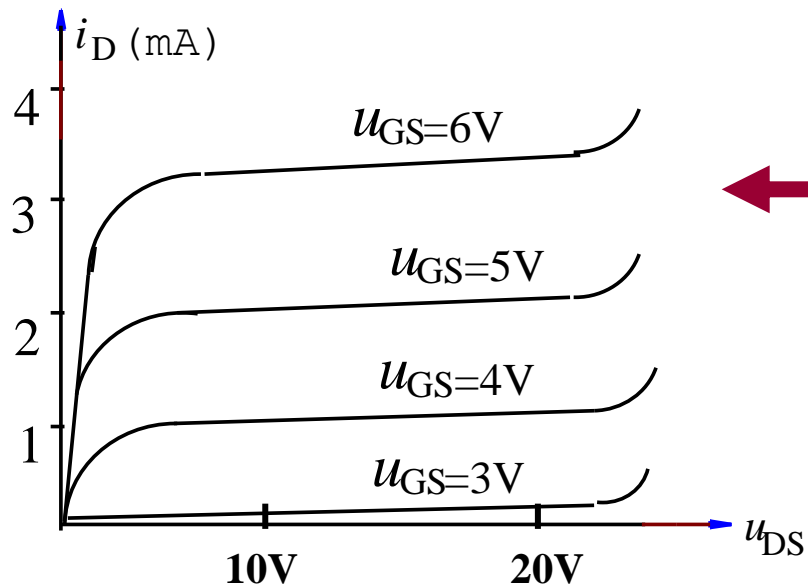
判别MOS管型号

指明漏极电流的方向

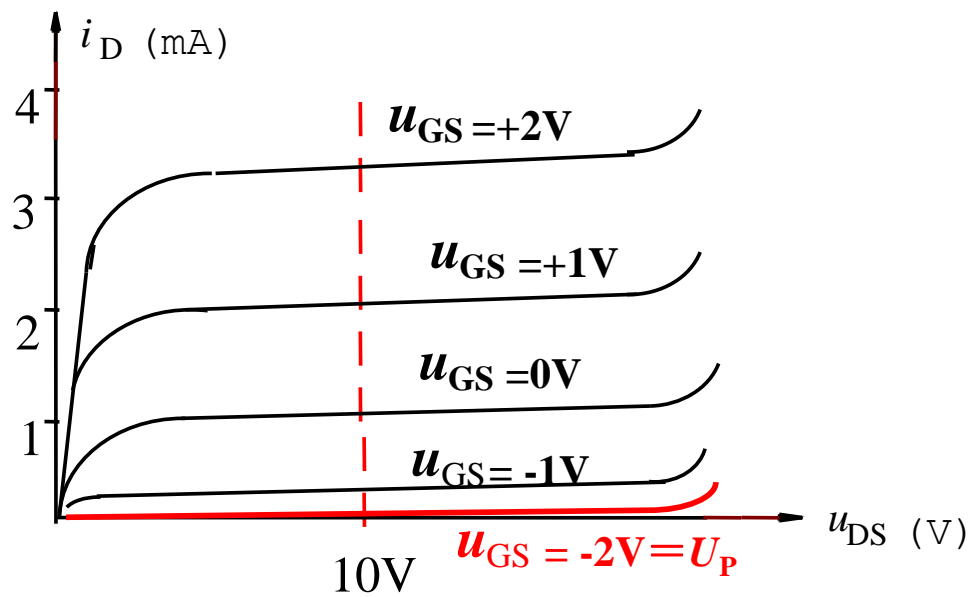


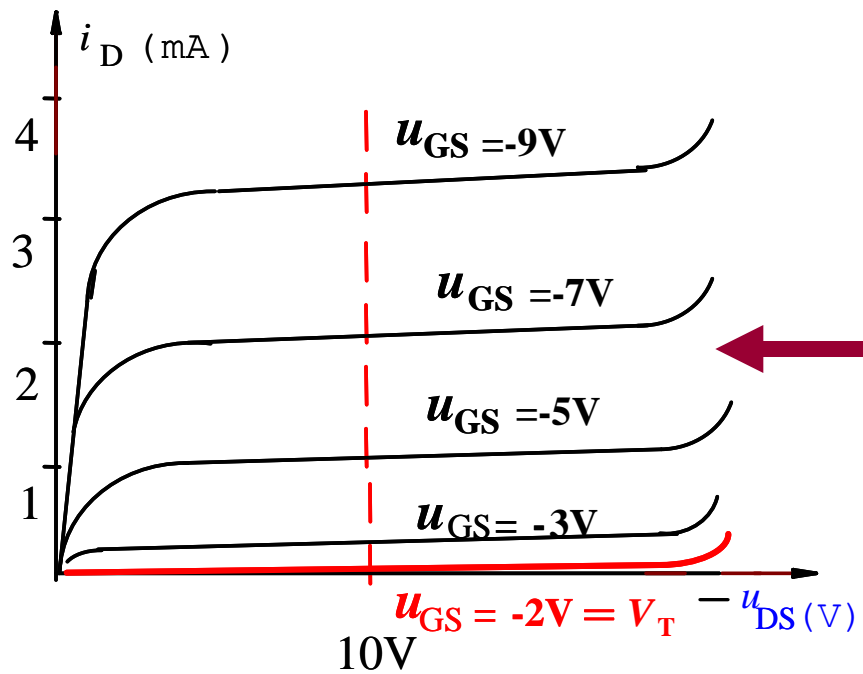
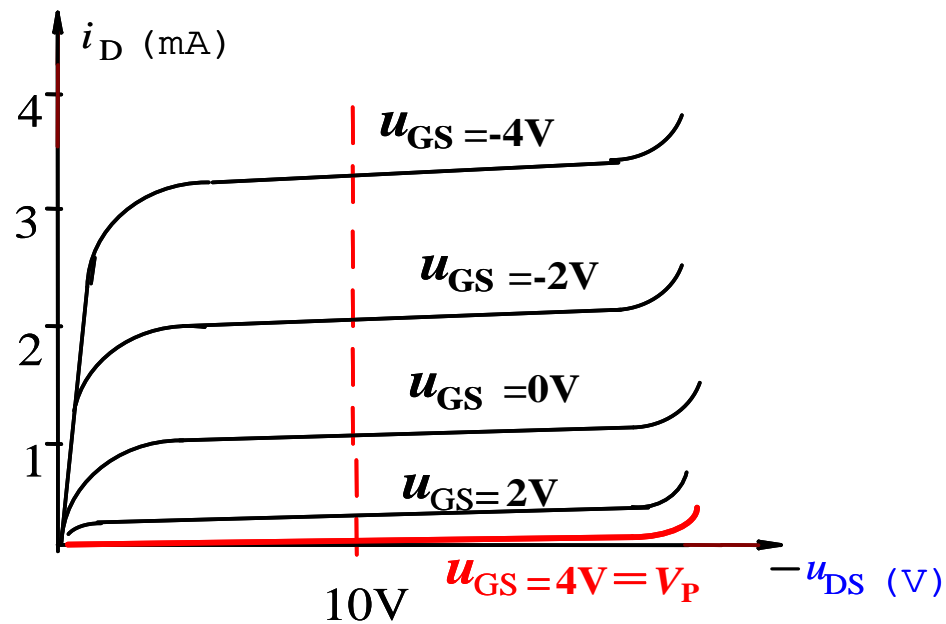
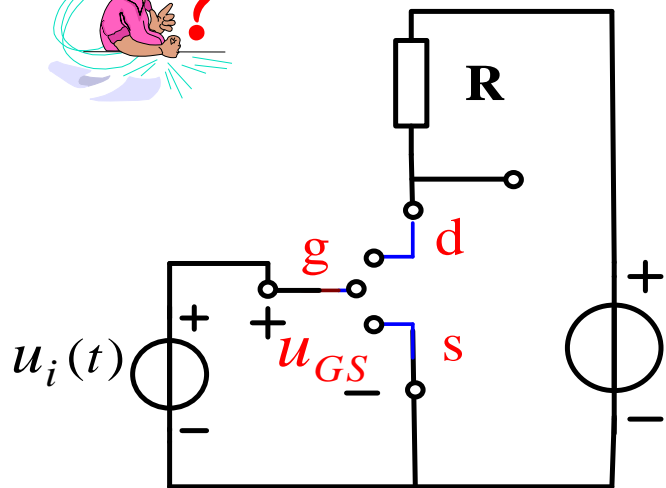


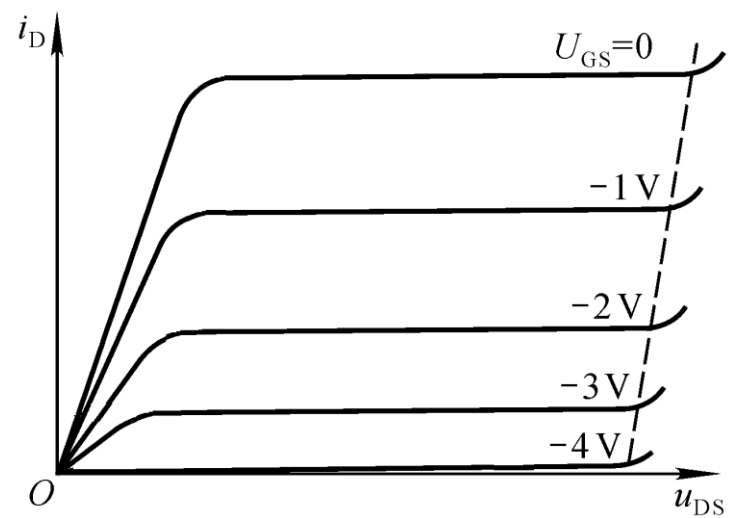
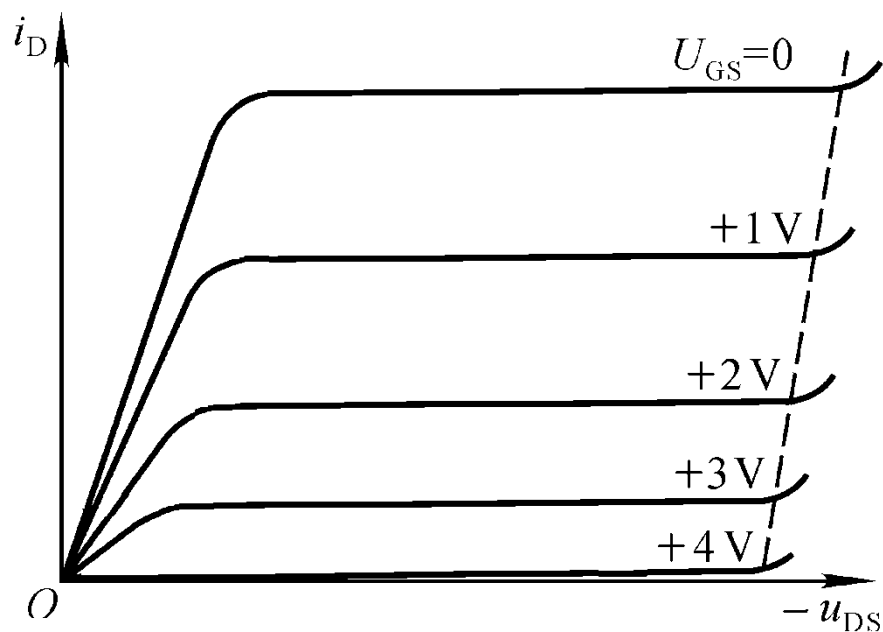
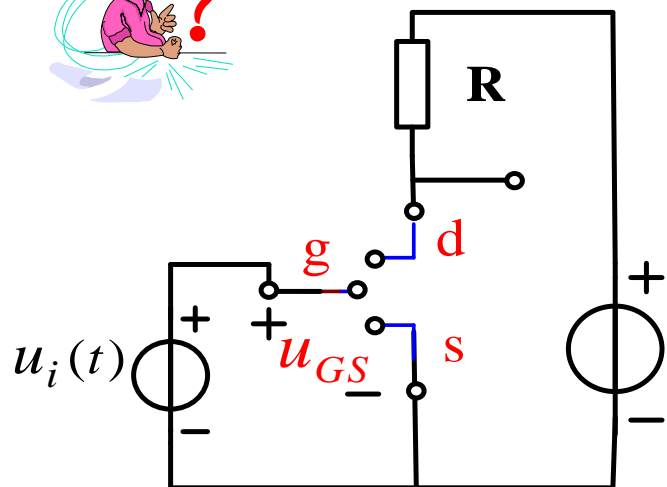
外特性 (1)



外特性 (2)



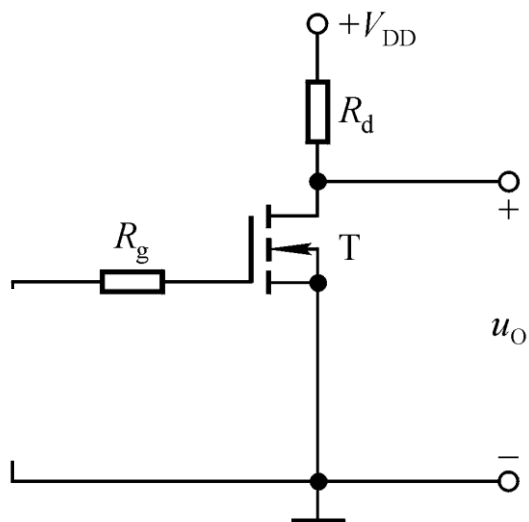




四、场效应管静态分析

例1. 基本偏置电路

根据场效应管工作在恒流区的条件，在g-s、d-s间加极性合适的电源以获得静态工作点。

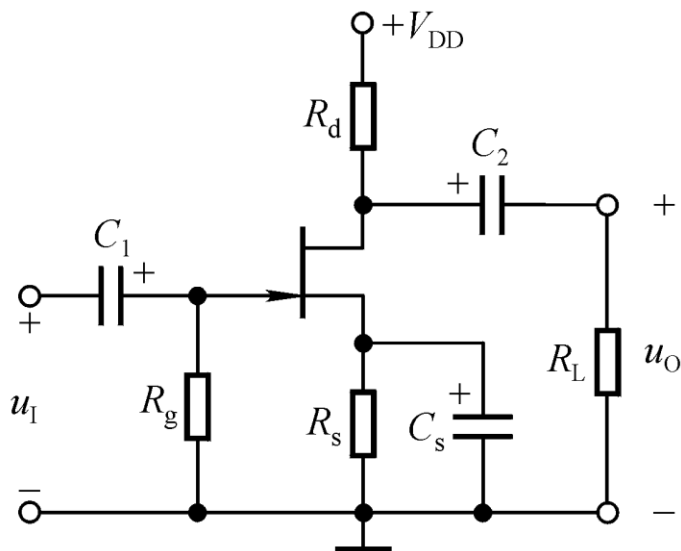


$$U_{GSQ} = V_{GG}$$

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

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

例2. 自给偏压电路



$$U_{GQ} = 0, \quad U_{SQ} = I_{DQ} R_s$$
$$U_{GSQ} = U_{GQ} - U_{SQ} = -I_{DQ} R_s$$

由正电源获得负偏压
称为自给偏压

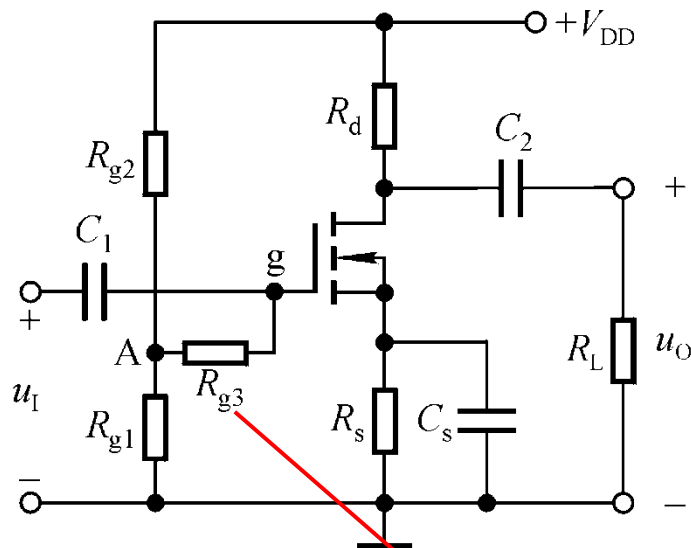
$$I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

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

哪种场效应管能够采用这种电路形式设置 Q 点？

3. 分压式偏置电路

即典型的 Q 点稳定电路



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

$$U_{SQ} = I_{DQ} R_s$$

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

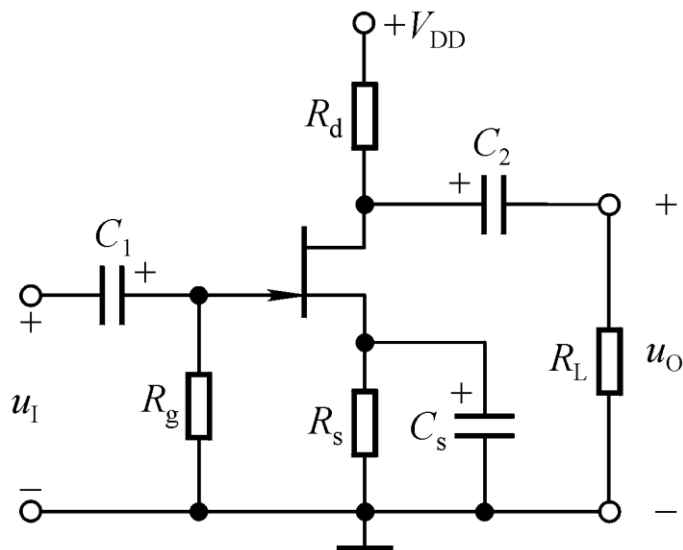
$$U_{DSQ} = V_{DD} - I_{DQ} (R_d + R_s)$$

为什么加 R_{g3} ?其数值应大些小些?

哪种场效应管能够采用这种电路形式设置 Q 点?

例：比较下述偏置电路

哪种场效应管能够采用这种电路形式设置Q点？



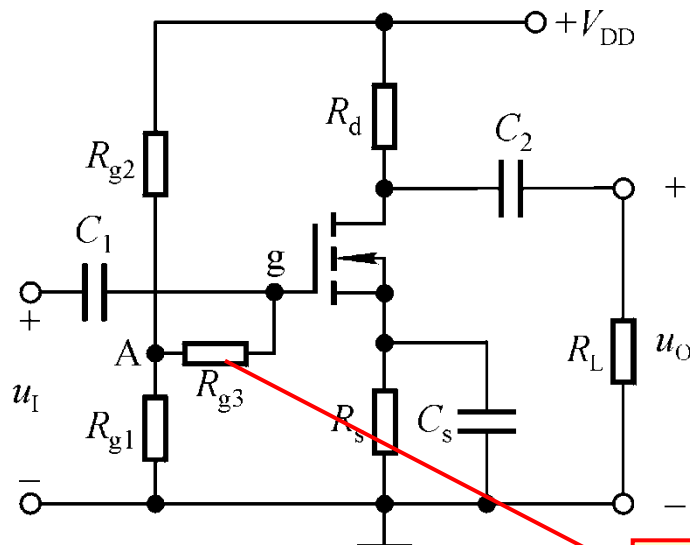
自给偏压：由正电源获得负偏压

$$U_{GQ} = 0, \quad U_{SQ} = I_{DQ} R_s$$

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

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

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



分压式偏置：Q点稳定电路

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

$$U_{SQ} = I_{DQ} R_s$$

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

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

为什么加 R_{g3} ？
其数值应大些
小些？

作业

- 3.1, 2, 5, 6 二极管
- 3.9, 10, 11 稳压管
- 3.12, 13, 14, 15, 16 三极管工作状态
- 3.17, 18, 19, 22, 23 场效应管
- 3.29, 30, 31, 32 运算放大器
- 3.36, 37, 39 (6, 7) 数电基础