

第1章 常用半导体器件

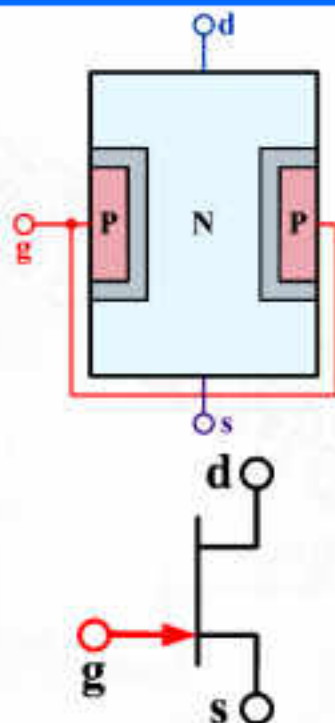
——王文俊

山西农业大学

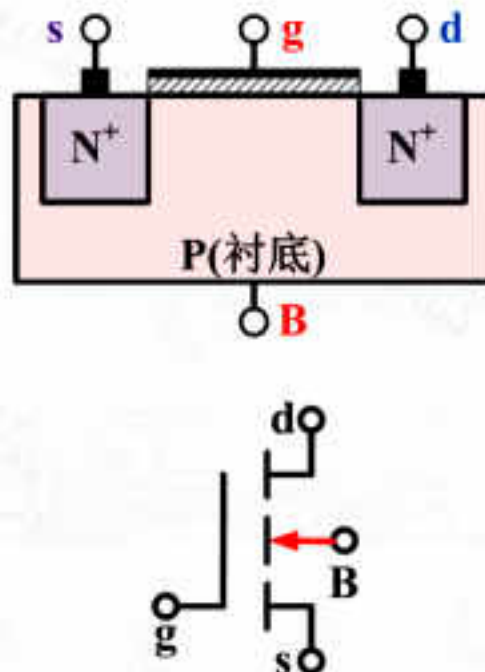
二十一、N沟道场效应管总结

• 1、N沟道场效应管的类型

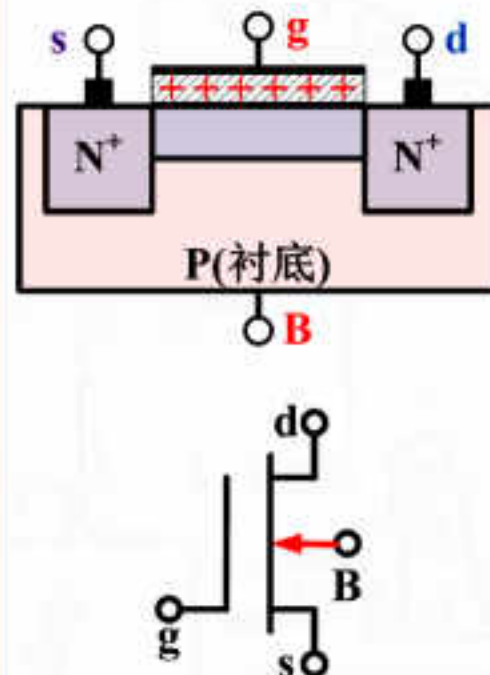
N沟道
结型场效应管



N沟道
增强型MOS管

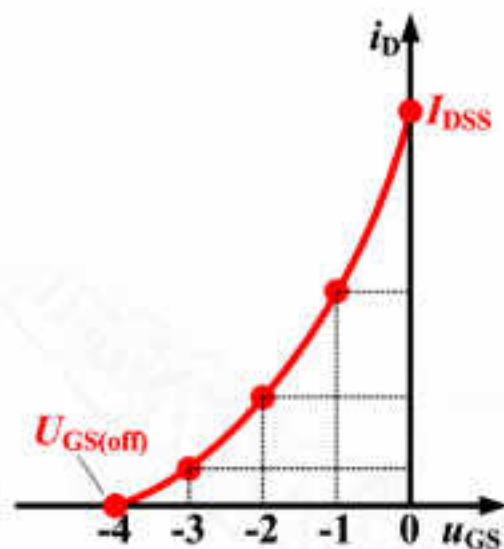


N沟道
耗尽型MOS管



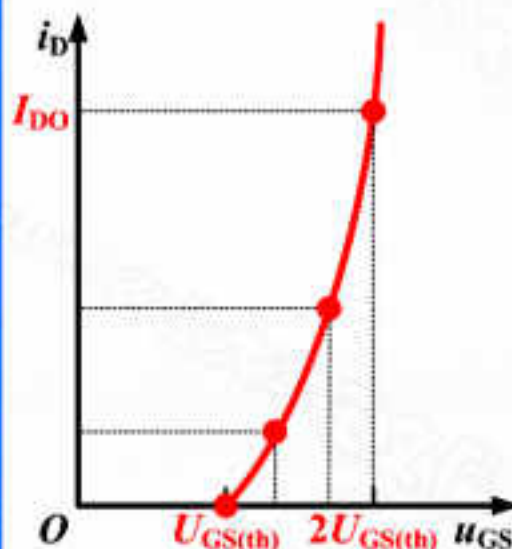
• 2、三类N沟道场效应管的转移特性曲线

N沟道
结型场效应管



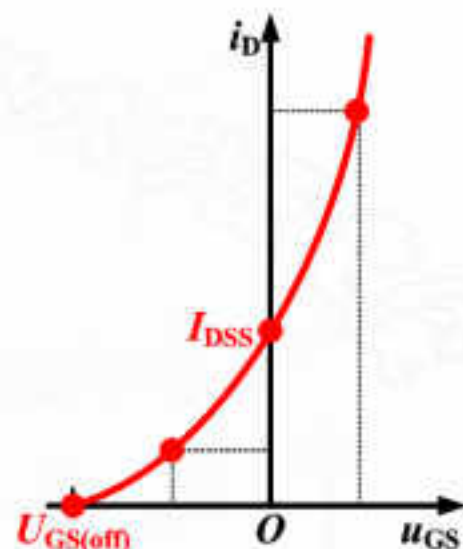
- $u_{GS}=0$ 时有导电沟道
- 夹断电压 $U_{GS(off)} < 0$
- 导通时 u_{GS} 只能为负

N沟道
增强型MOS管



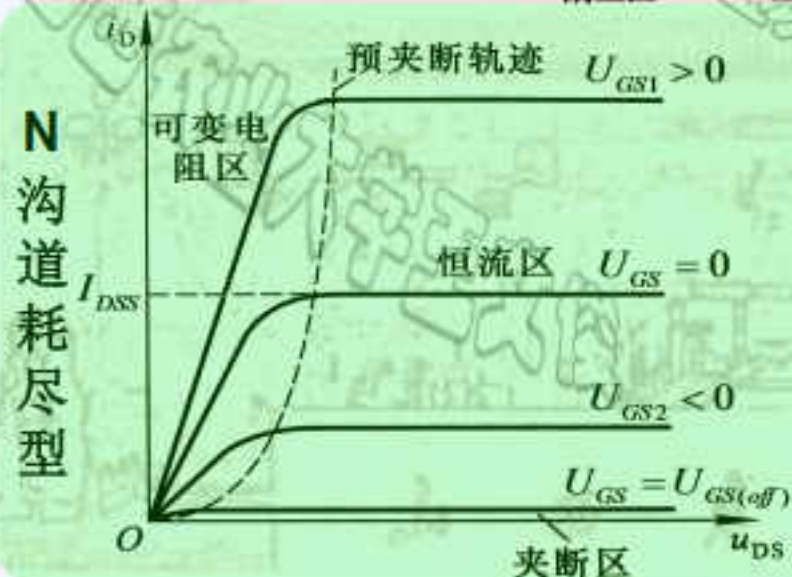
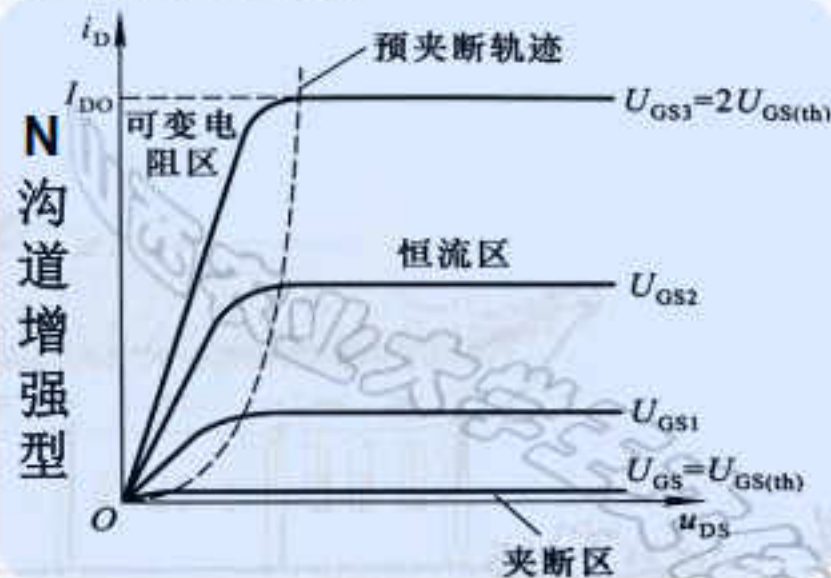
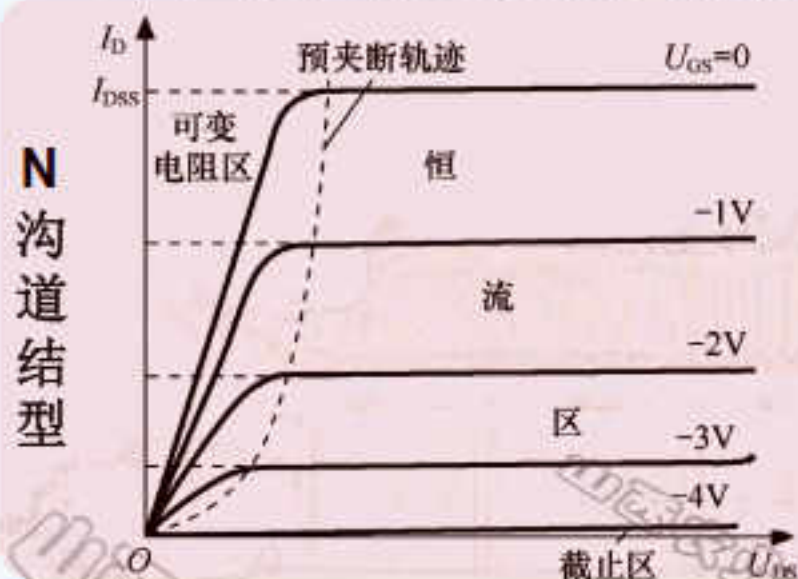
- $u_{GS}=0$ 时无导电沟道
- 开启电压 $U_{GS(th)} > 0$
- 导通时 u_{GS} 只能为正

N沟道
耗尽型MOS管



- $u_{GS}=0$ 时有导电沟道
- 夹断电压 $U_{GS(off)} < 0$
- 导通时 u_{GS} 可正可负

3、三类N沟道场效应管的输出特性曲线



- 漏-源电压 u_{DS} 均为正, 漏极电流 i_D 均为正, 输出特性曲线均在第一象限。
- 输出特性曲线均有三区一线: 可变电阻区、恒流区、截止区(夹断区)及预夹断轨迹线。

3、三类N沟道场效应管的输出特性曲线

截止区

两断截止

- 条件：均为 u_{GS} 小于关键电压(开启 $U_{GS(th)}$ / 夹断 $U_{GS(off)}$)。
 - 结型场效应管： $u_{GS} < U_{GS(off)}$
 - 增强型MOS管： $u_{GS} < U_{GS(th)}$
 - 耗尽型MOS管： $u_{GS} < U_{GS(off)}$
- 因为 u_{DS} 大于 0，所以 u_{GS} 小于关键电压时， u_{GD} 必然小于关键电压。

预夹断轨迹

- 条件：均为 u_{GD} 等于关键电压(开启 $U_{GS(th)}$ / 夹断 $U_{GS(off)}$)。
- 结型场效应管： $u_{GS} > U_{GS(off)}$ $u_{GD} = U_{GS(off)}$ $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(off)}$
- 增强型MOS管： $u_{GS} > U_{GS(th)}$ $u_{GD} = U_{GS(th)}$ $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)}$
- 耗尽型MOS管： $u_{GS} > U_{GS(off)}$ $u_{GD} = U_{GS(off)}$ $u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(off)}$

• 3、三类N沟道场效应管的输出特性曲线

可变电阻区

两通阻

- 条件：均为 u_{GD} 大于关键电压(开启 $U_{GS(th)}$ / 夹断 $U_{GS(off)}$)。
- 结型场效应管： $u_{GS} > U_{GS(off)}$ $u_{GD} > U_{GS(off)}$ $u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(off)}$
- 增强型MOS管： $u_{GS} > U_{GS(th)}$ $u_{GD} > U_{GS(th)}$ $u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(th)}$
- 耗尽型MOS管： $u_{GS} > U_{GS(off)}$ $u_{GD} > U_{GS(off)}$ $u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(off)}$

恒流区

一通一断是恒流

- 条件：均为 u_{GD} 小于关键电压(开启 $U_{GS(th)}$ / 夹断 $U_{GS(off)}$)。
- 结型场效应管： $u_{GS} > U_{GS(off)}$ $u_{GD} < U_{GS(off)}$ $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(off)}$
- 增强型MOS管： $u_{GS} > U_{GS(th)}$ $u_{GD} < U_{GS(th)}$ $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$
- 耗尽型MOS管： $u_{GS} > U_{GS(off)}$ $u_{GD} < U_{GS(off)}$ $u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(off)}$

• 4、N沟道场效应管工作状态的判断

① 管子类型及关键电压

- N沟道结型、N沟道耗尽型为夹断电压 $U_{GS(off)} < 0$ 。
- N沟道增强型为开启电压 $U_{GS(th)} > 0$ 。

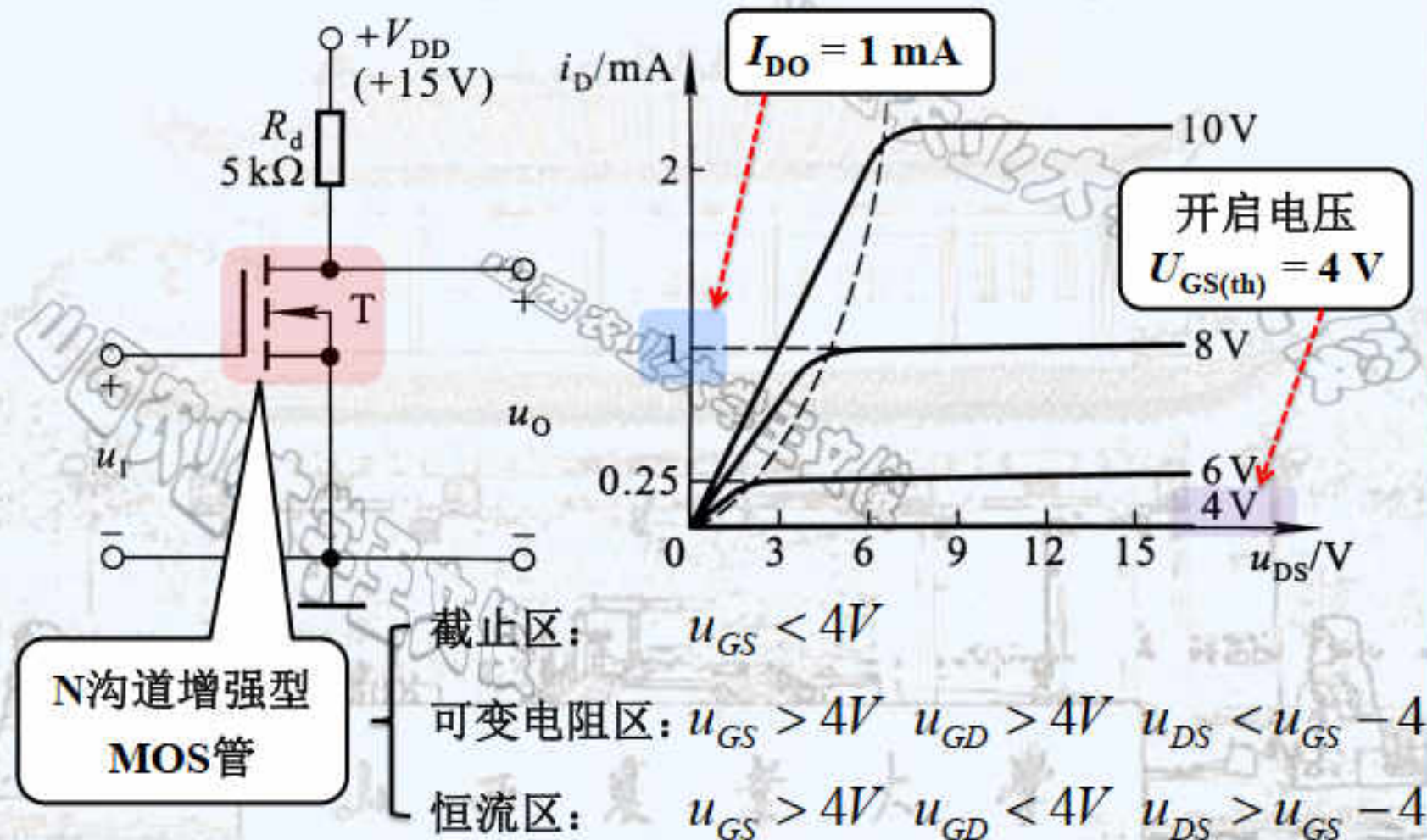
② 导通 or 截止

- 判断 u_{GS} 与关键电压的大小关系：
 - 若 $u_{GS} < \text{关键电压}$ ，则场效应管截止，状态判断结束；
 - 若 $u_{GS} > \text{关键电压}$ ，则场效应管导通，进行第③步判断；

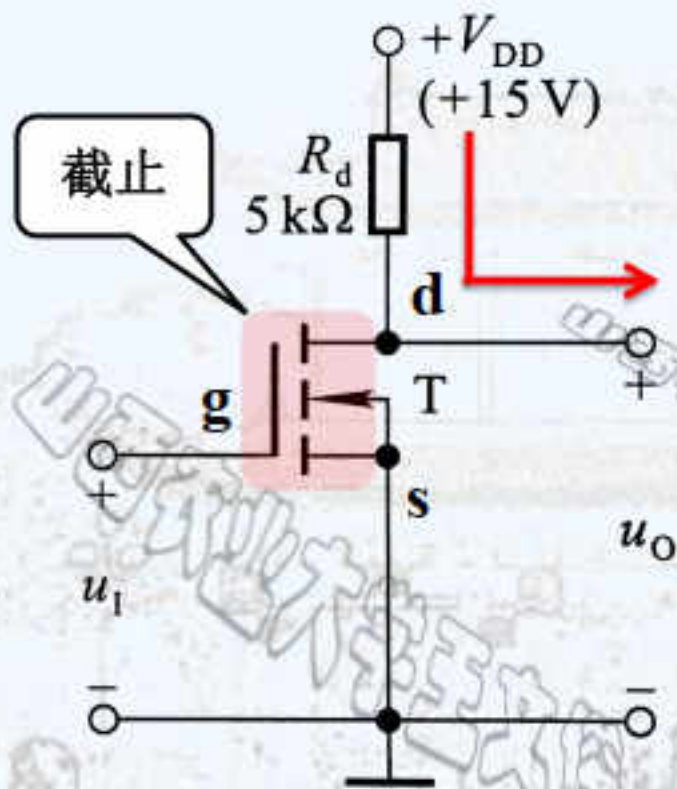
③ 可变电阻区 or 恒流区

- 假设验证法：先假设工作在恒流区，按照恒流区公式计算 u_{GD} （或 u_{DS} ），看是否符合恒流区的电压要求。
 - 若符合要求，假设成立，工作在恒流区；
 - 若不符合要求，假设不成立，工作在可变电阻区。

- 例4：电路及管子T的输出特性曲线如图所示。试问：
 - （1）场效应管的开启电压 $U_{GS(th)}$ 和 I_{DO} 各为多少。
 - （2）试分析当 u_I 分别为 0 V、8 V、10 V 时， u_O 各为多少？



- ① $u_I = 0\text{ V}$



计算 g-s 间电压 u_{GS} :

$$u_{GS} = u_I = 0 < U_{GS(th)} = 4\text{ V}$$

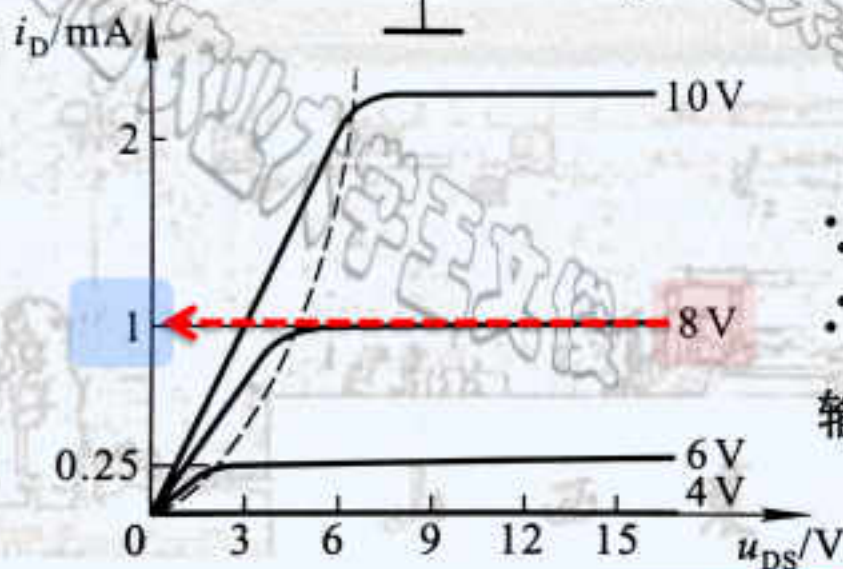
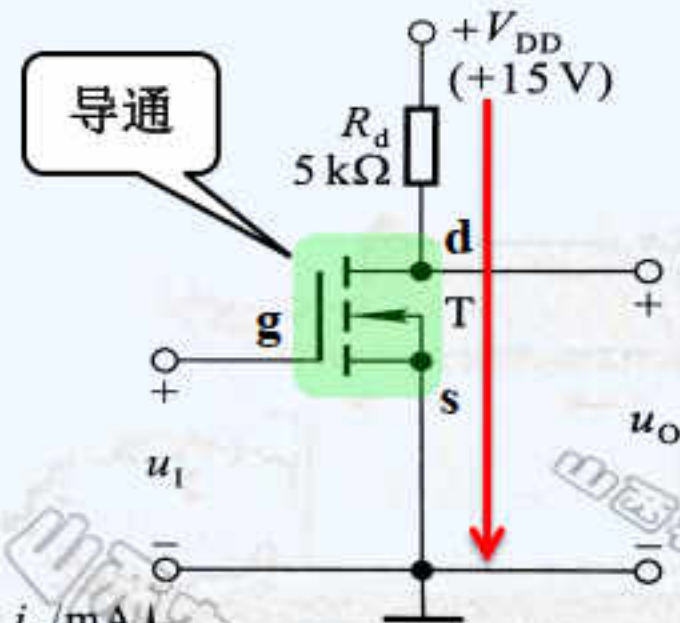
因此, MOS管截止。

输出电压:

$$u_O = V_{DD} = 15\text{ V}$$

山西农业大学

• ② $u_I = 8\text{ V}$



计算 g-s 间电压 u_{GS} :

$$u_{GS} = u_I = 8\text{ V} > U_{GS(th)} = 4\text{ V}$$

因此, MOS管导通。

假设: MOS管工作在恒流区。

∴ 栅-源电压 $u_{GS} = 8\text{ V}$,

∴ 漏极电流 i_D 为: $i_D = 1\text{ mA}$

漏-源电压:

$$\begin{aligned} u_{DS} &= V_{DD} - i_D R_d \\ &= 15 - 5 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-3} = 10\text{ V} \end{aligned}$$

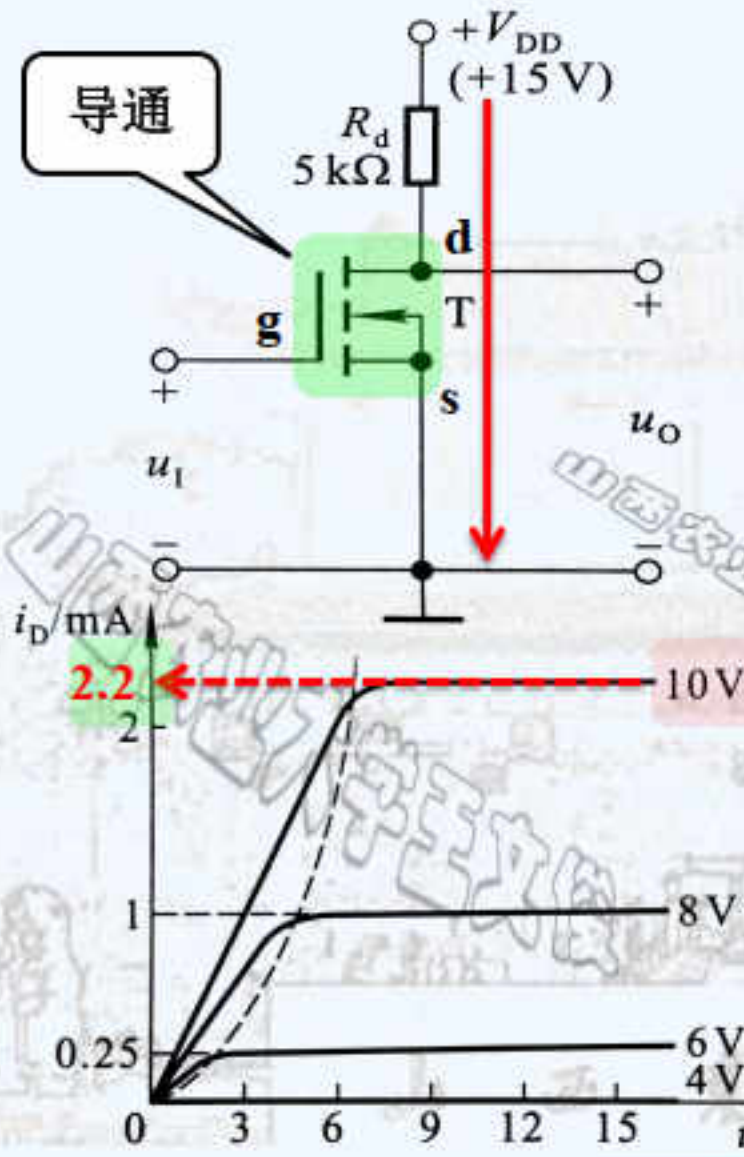
∴ $u_{DS} = 10\text{ V} > u_{GS} - 4 = 4\text{ V}$

∴ **假设正确**, MOS管工作在恒流区。

输出电压:

$$u_O = u_{DS} = 10\text{ V}$$

• ③ $u_I = 10\text{ V}$



计算 g-s 间电压 u_{GS} :

$$u_{GS} = u_I = 10\text{ V} > U_{GS(th)} = 4\text{ V}$$

因此, MOS管导通。

假设: MOS管工作在恒流区。

\therefore 栅-源电压 $u_{GS} = 10\text{ V}$,

\therefore 漏极电流 i_D 为: $i_D \approx 2.2\text{ mA}$

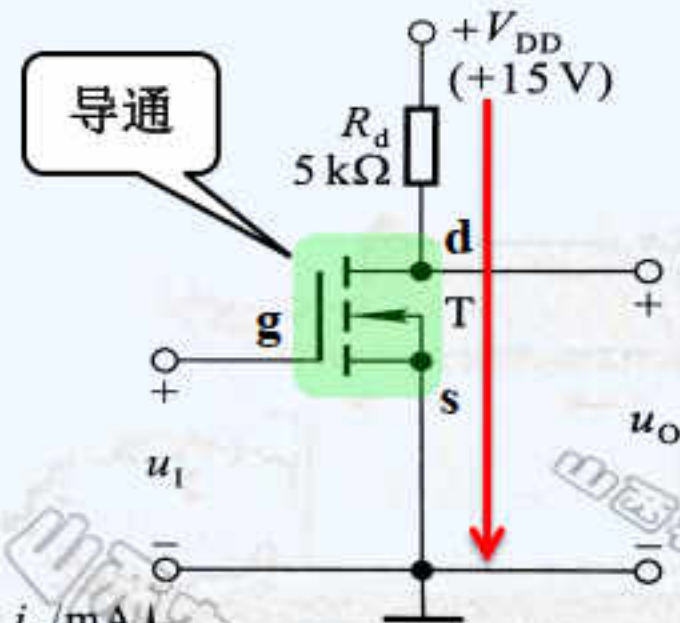
漏-源电压:

$$\begin{aligned} u_{DS} &= V_{DD} - i_D R_d \\ &= 15 - 5 \times 10^3 \times 2.2 \times 10^{-3} = 4\text{ V} \end{aligned}$$

$\therefore u_{DS} = 4\text{ V} < u_{GS} - 4 = 6\text{ V}$

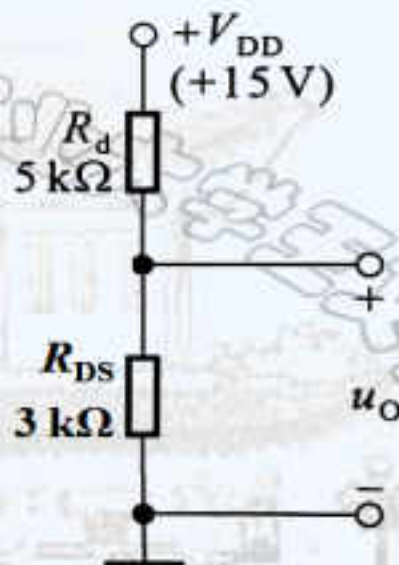
\therefore **假设错误**, MOS管不是工作在恒流区, 而是工作在可变电阻区。

• ③ $u_I = 10\text{ V}$



d-s 间等效电阻 R_{DS} :

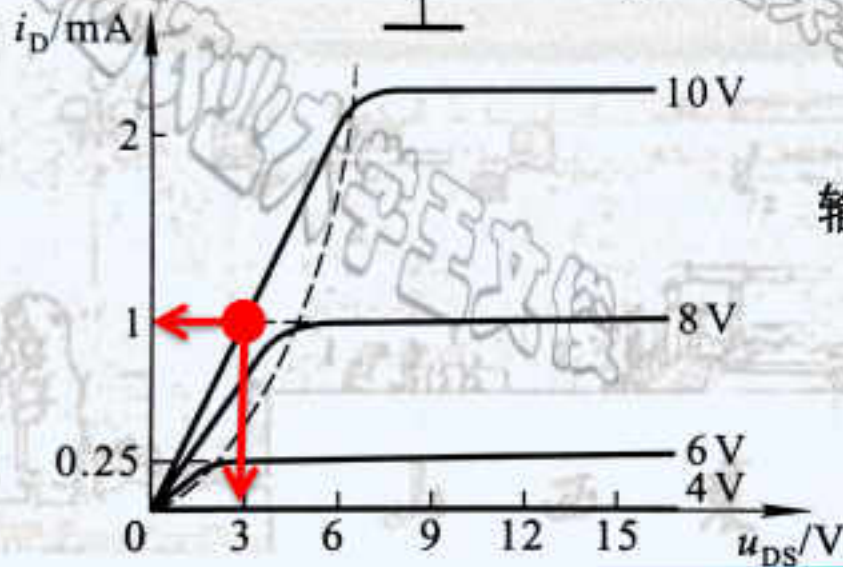
$$R_{DS} = \frac{U_{DS}}{I_D} \approx \frac{3}{1 \times 10^{-3}} = 3 \times 10^3 \Omega$$



输出电压:

$$u_O = u_{DS} = \frac{R_{DS}}{R_d + R_{DS}} V_{DD}$$

$$= \frac{3}{5 + 3} \times 15 = 5.625\text{ V}$$



二十二、P沟道场效应管

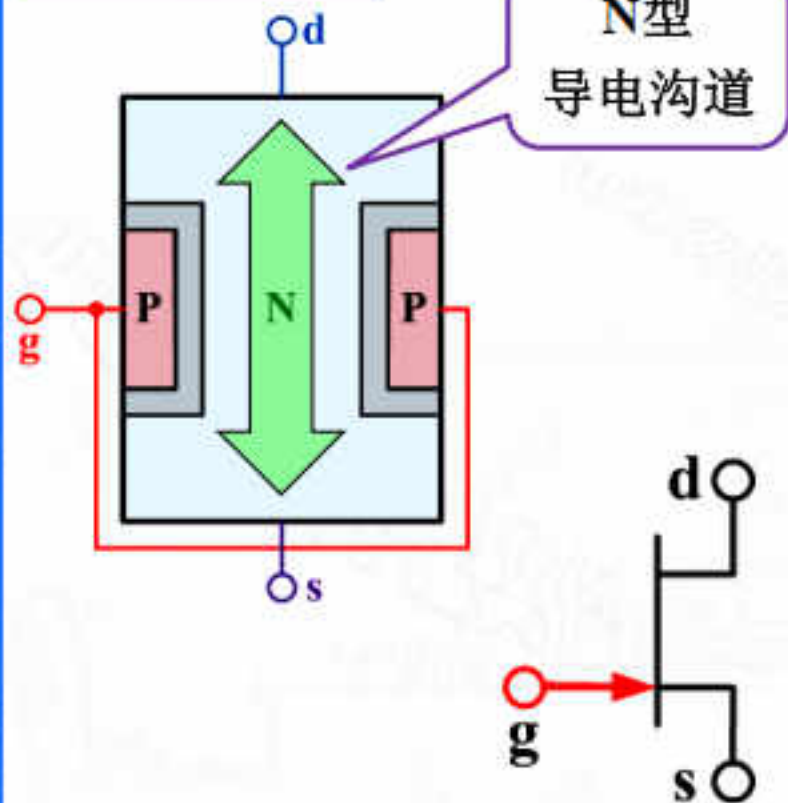
• 1、场效应管的类型



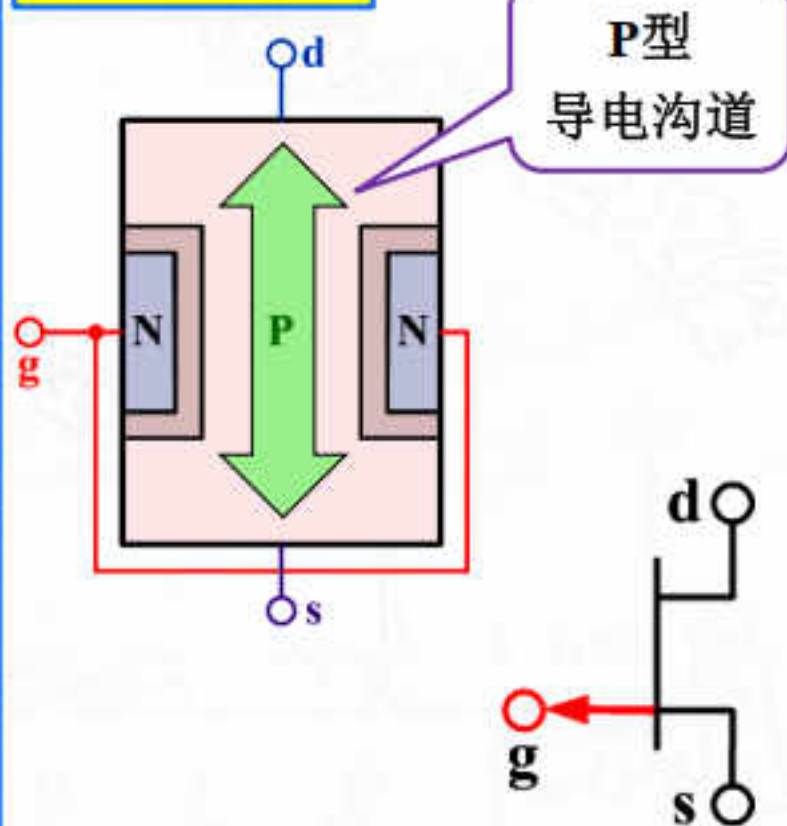
• 2、N沟道和P沟道结型场效应管

根据结构的不同，可以将结型场效应管分为N沟道和P沟道两类。

N沟道结型

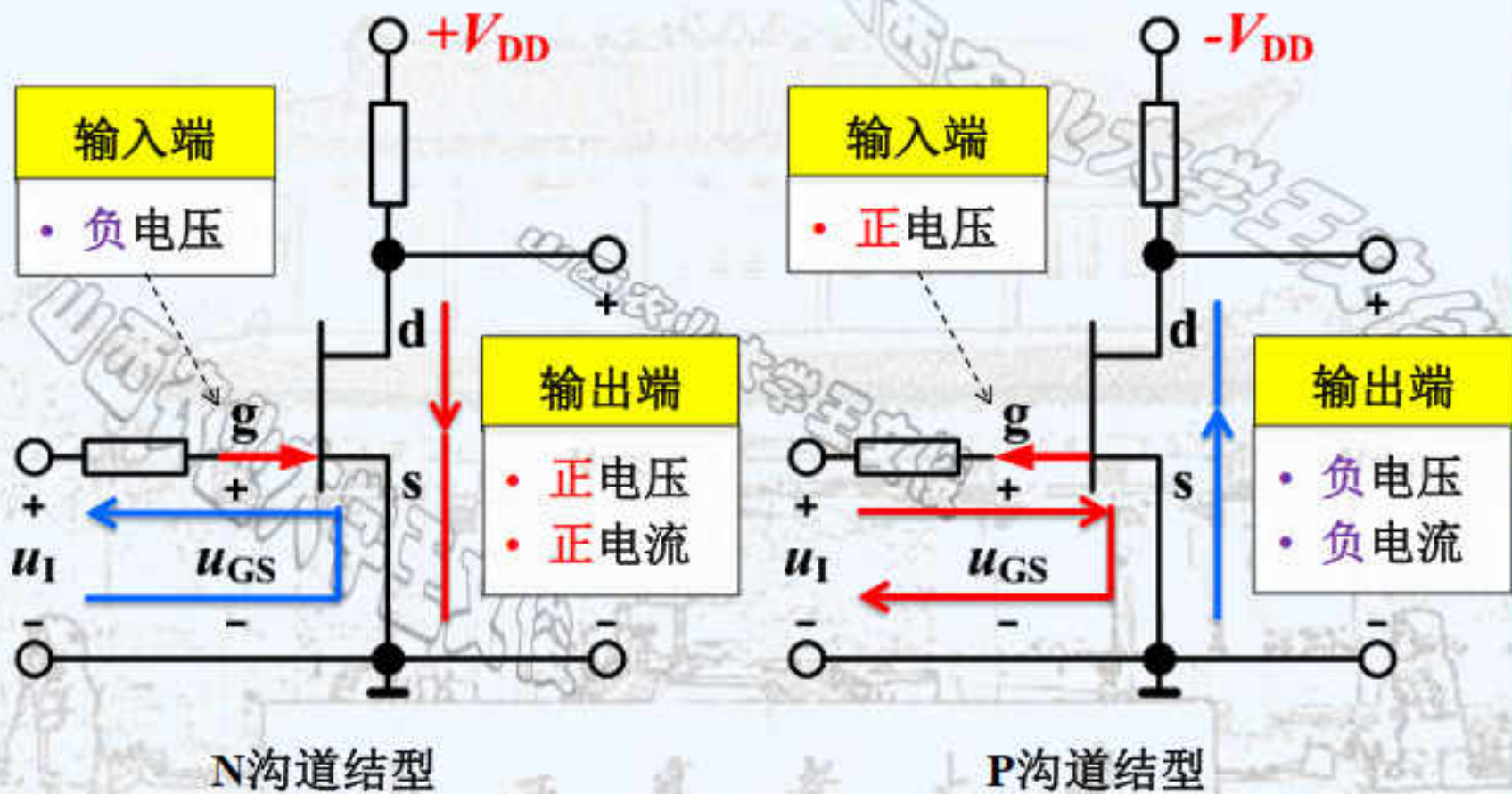


P沟道结型



• 2、N沟道和P沟道结型场效应管

由于结构相反，共源放大电路的电源、电流、电压也相反。

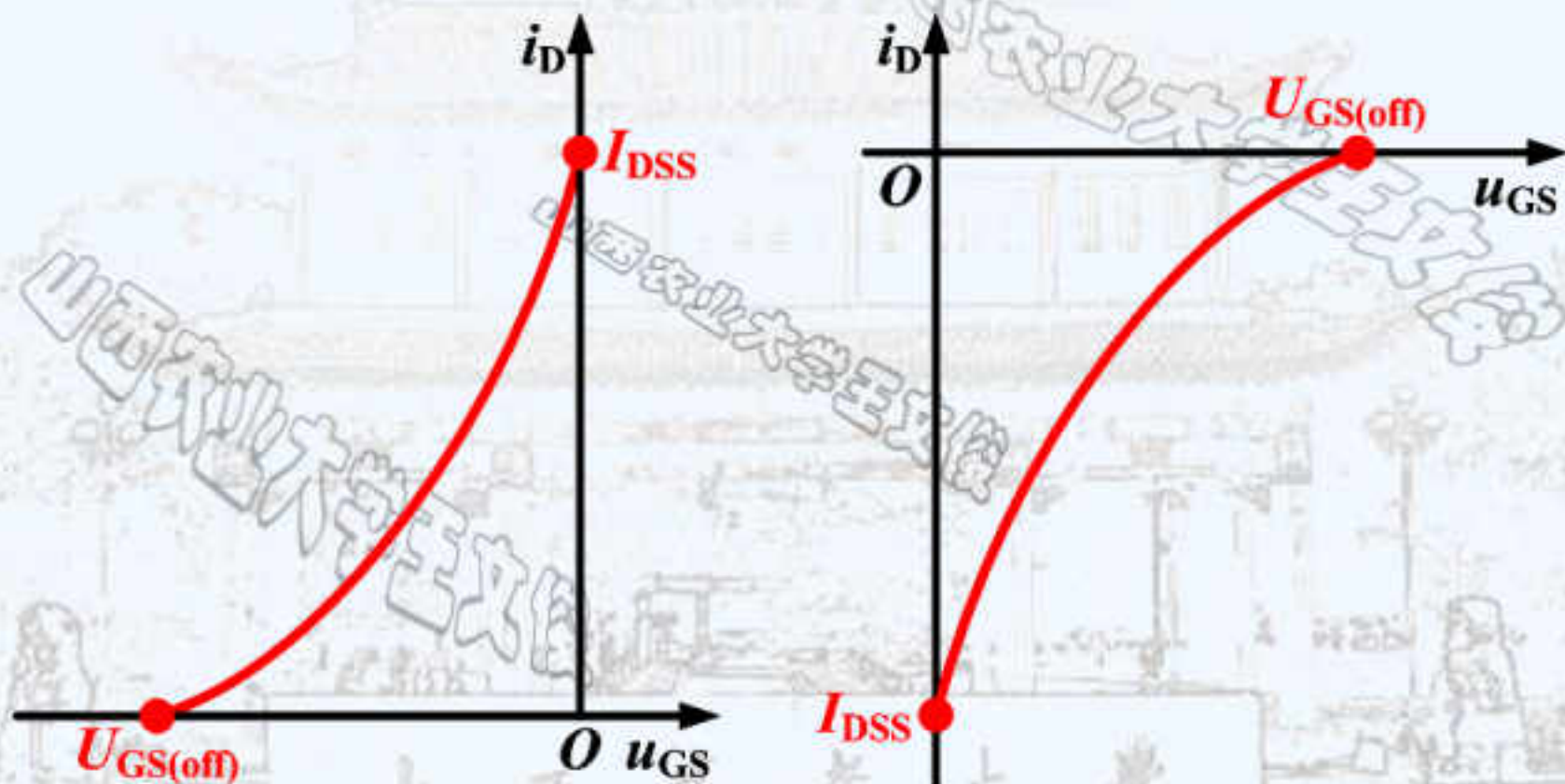


• 2、N沟道和P沟道结型场效应管

N沟道结型
转移特性曲线

电流、电压同时取反

P沟道结型
转移特性曲线

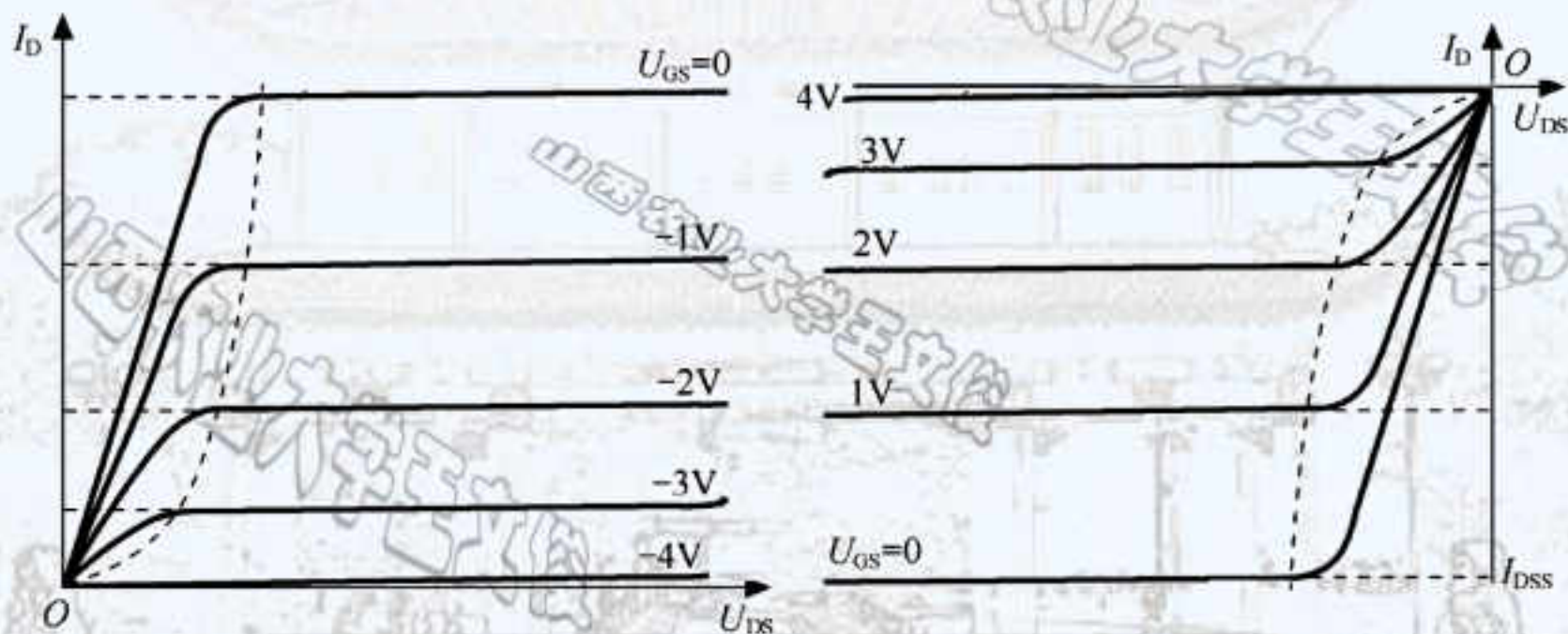


• 2、N沟道和P沟道结型场效应管

N沟道结型
输出特性曲线

电流、电压同时取反

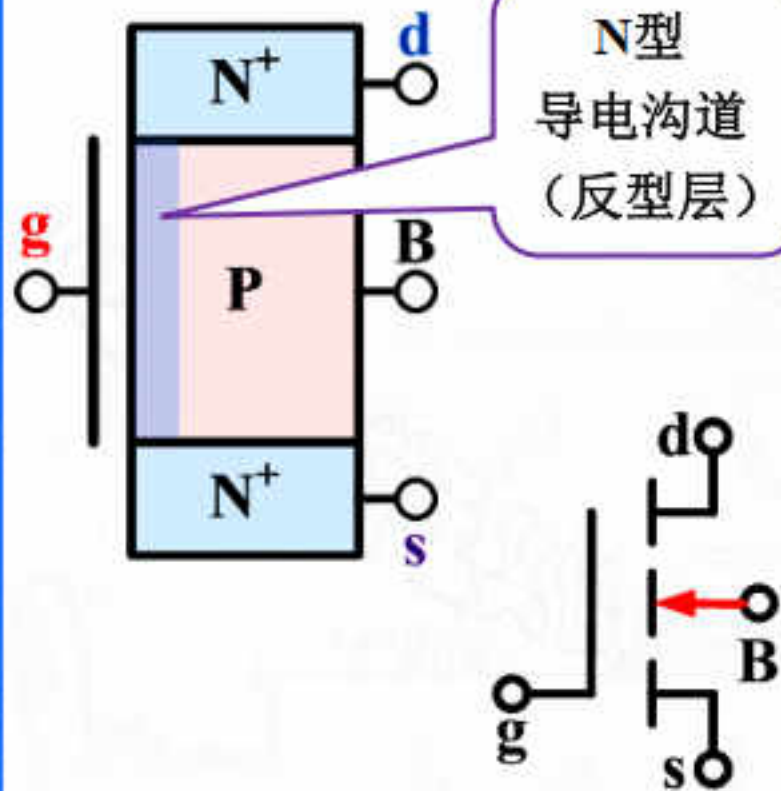
P沟道结型
输出特性曲线



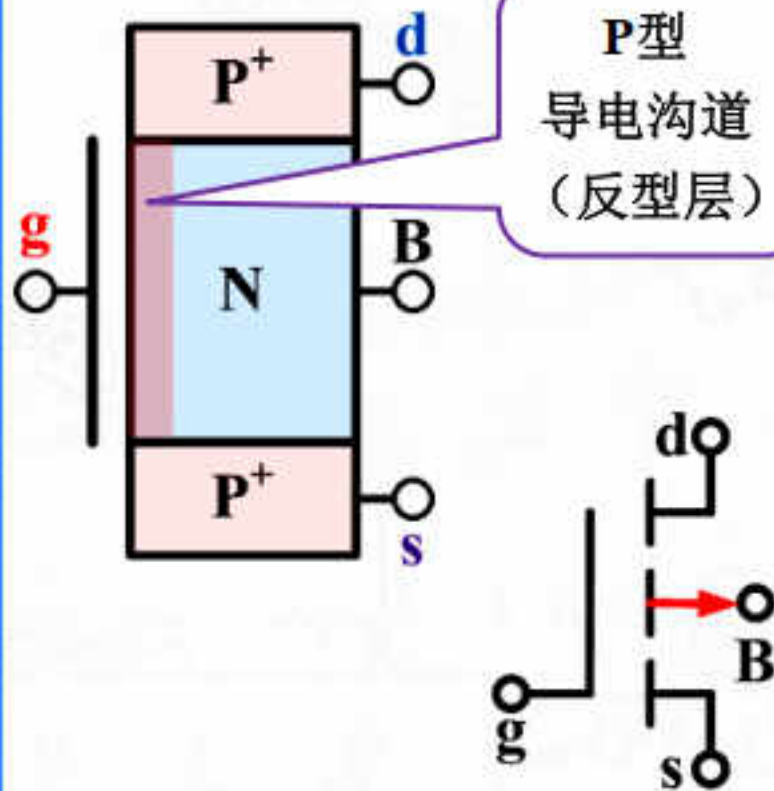
• 3、N沟道和P沟道增强型MOS管

根据结构的不同，可以将增强型MOS管分为N沟道和P沟道两类。

N沟道增强型

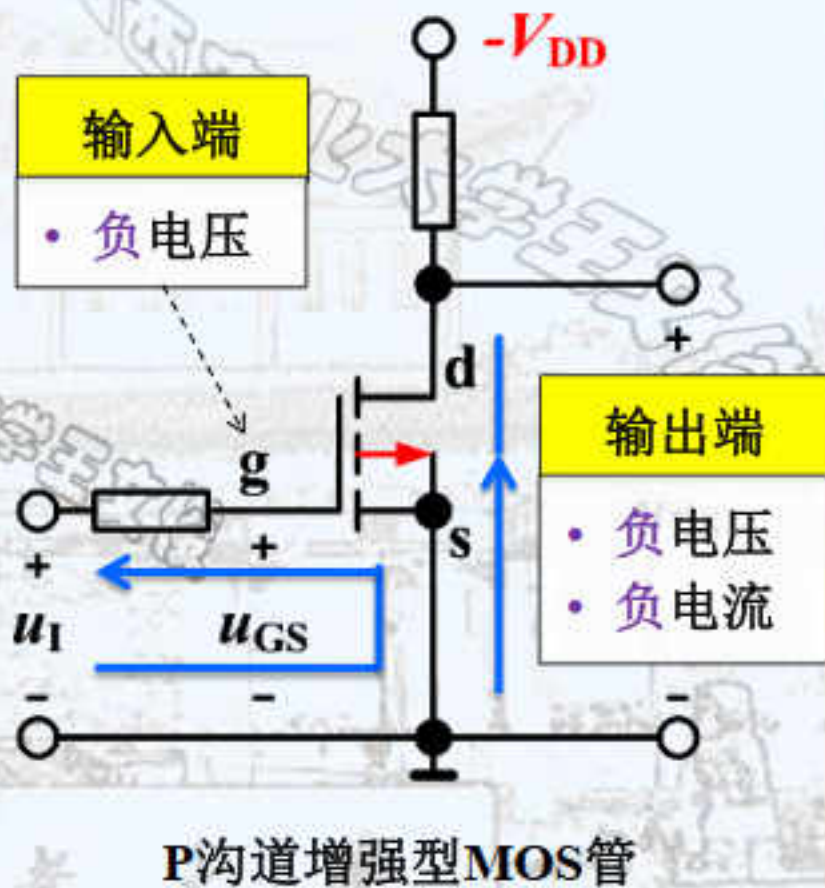
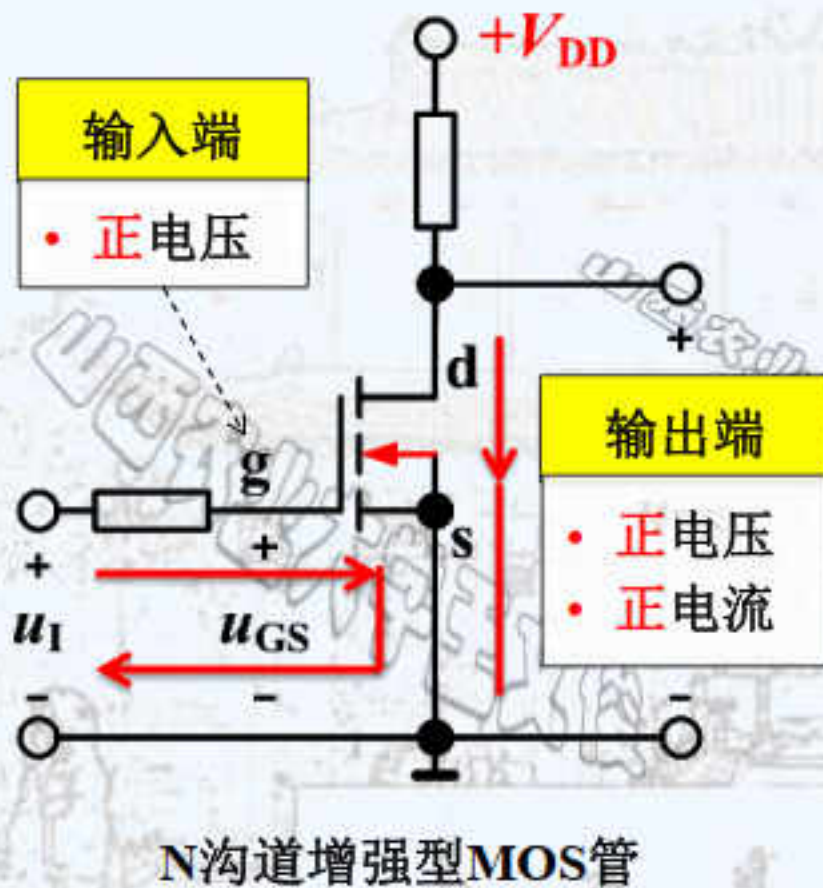


P沟道增强型



• 3、N沟道和P沟道增强型MOS管

由于结构相反，共源放大电路的电源、电流、电压也相反。

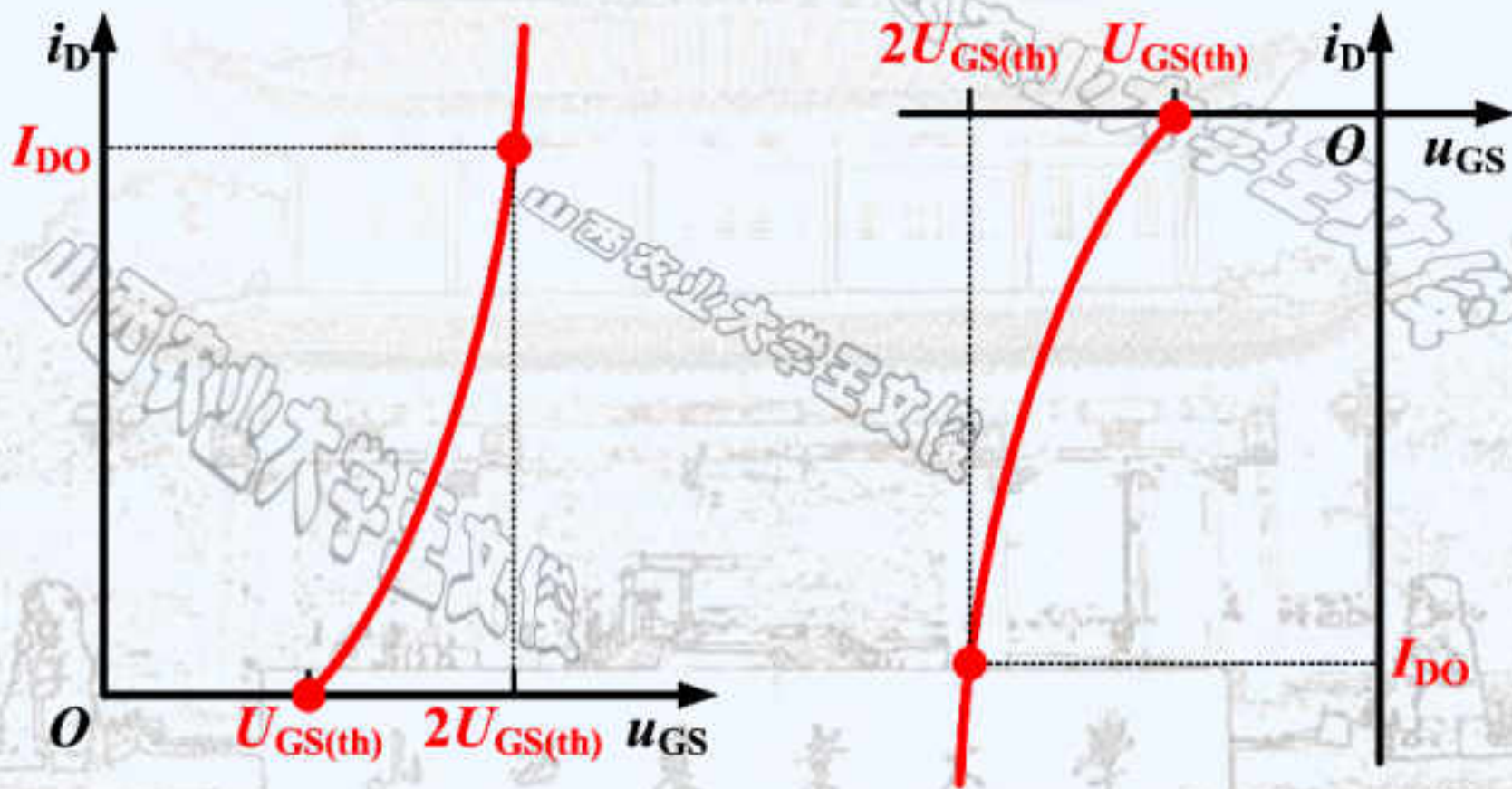


3、N沟道和P沟道增强型MOS管

N沟道增强型
转移特性曲线

电流、电压同时取反

P沟道增强型
转移特性曲线

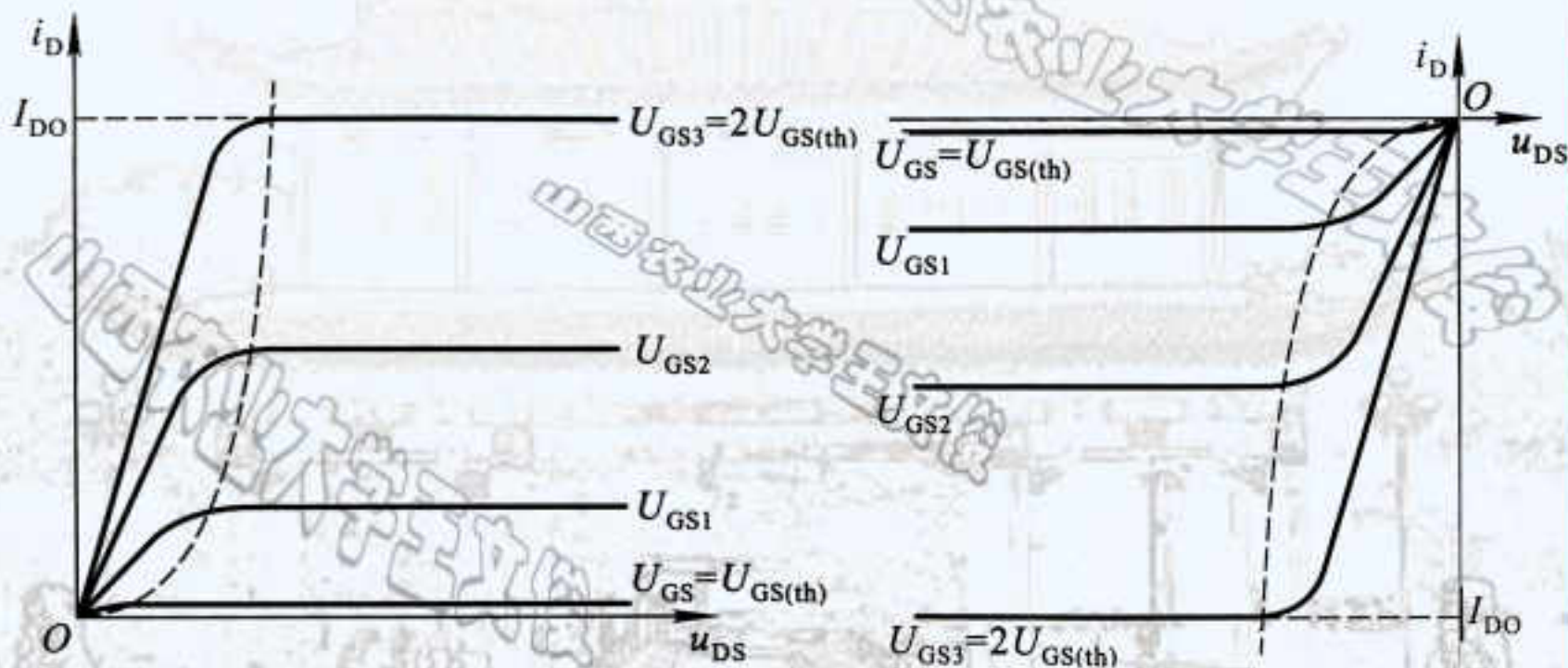


3、N沟道和P沟道增强型MOS管

N沟道增强型
输出特性曲线

电流、电压同时取反

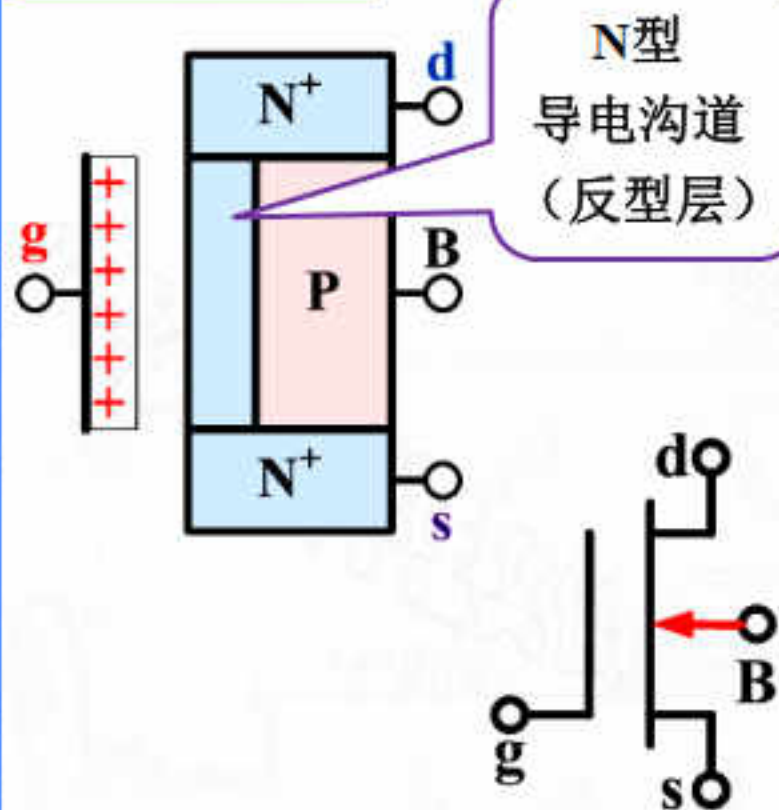
P沟道增强型
输出特性曲线



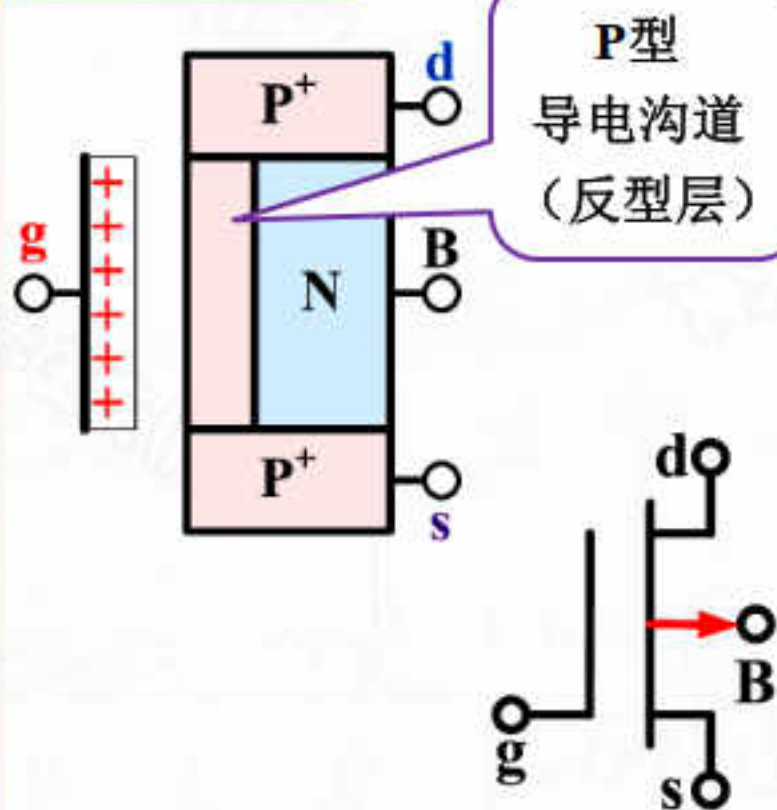
• 4、N沟道和P沟道耗尽型MOS管

根据结构的不同，可以将耗尽型MOS管分为N沟道和P沟道两类。

N沟道耗尽型

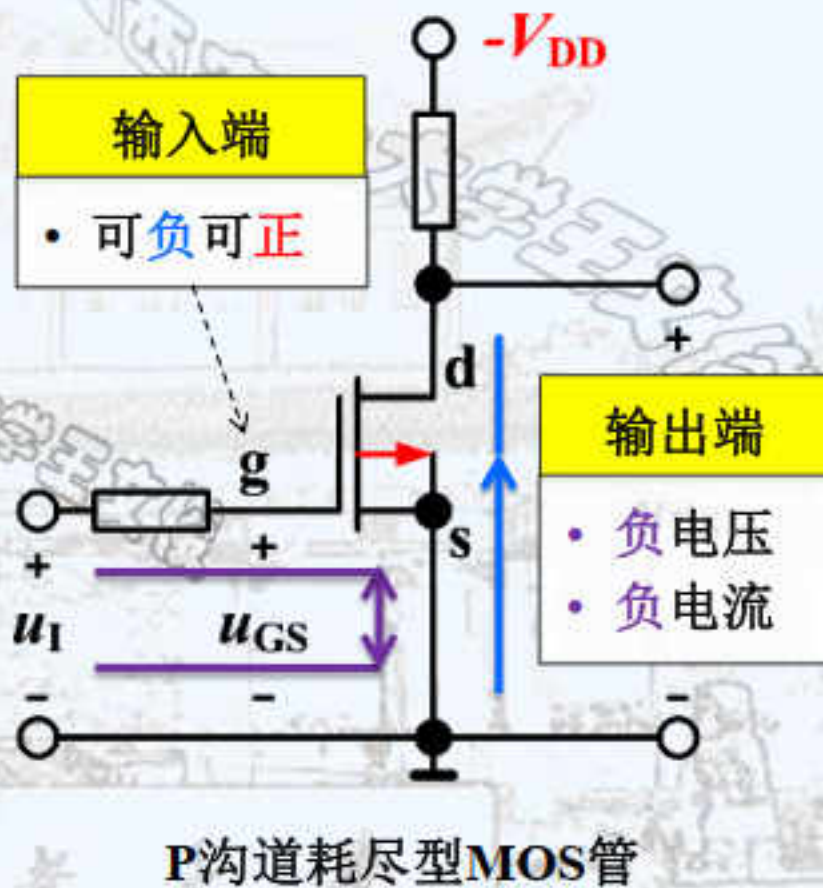
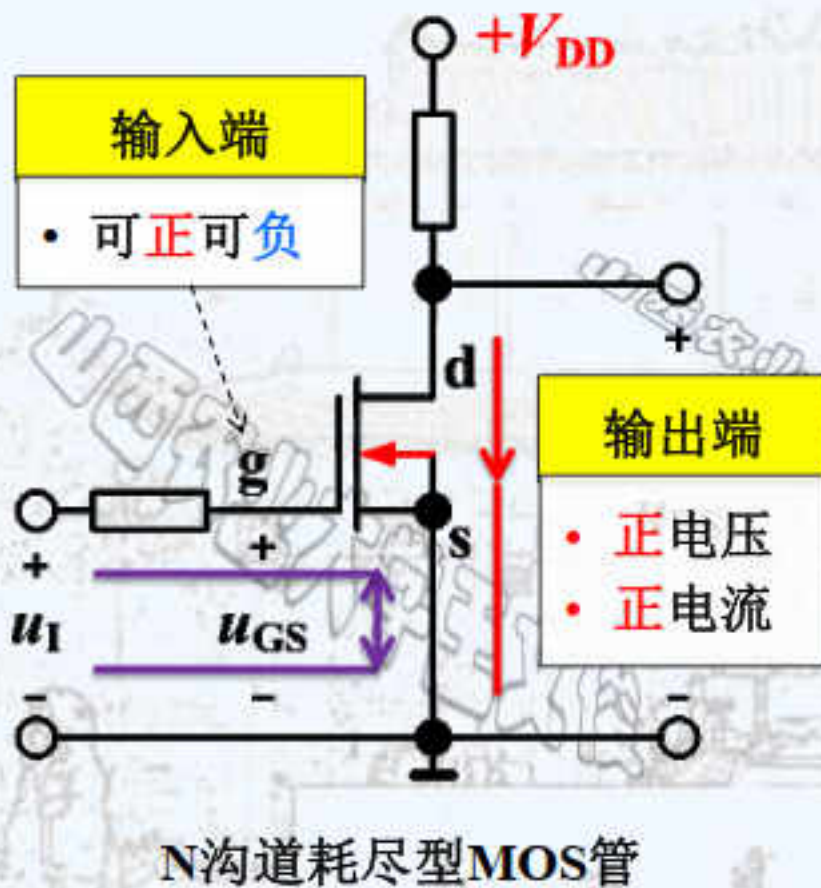


P沟道耗尽型



• 4、N沟道和P沟道耗尽型MOS管

由于结构相反，共源放大电路的电源、电流、电压也相反。

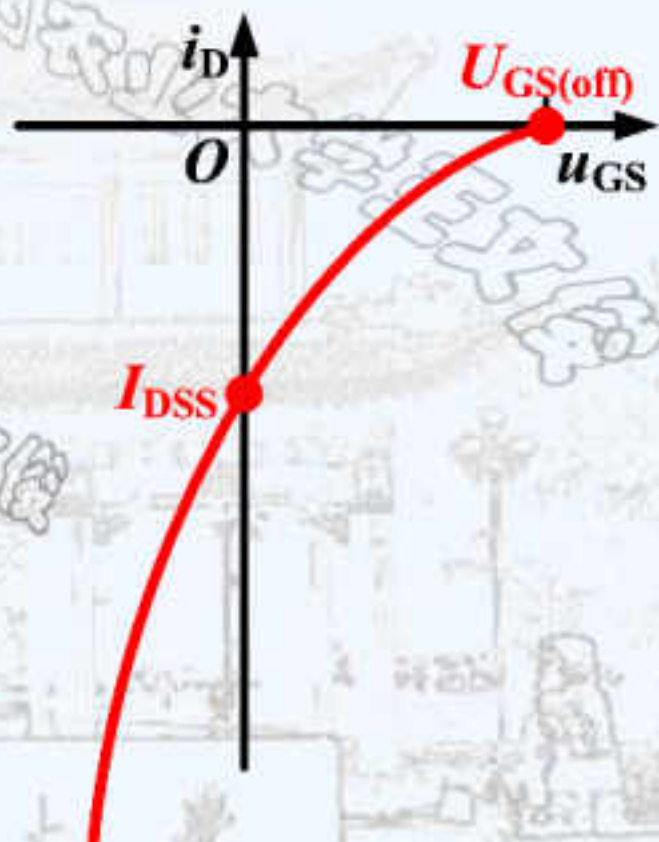
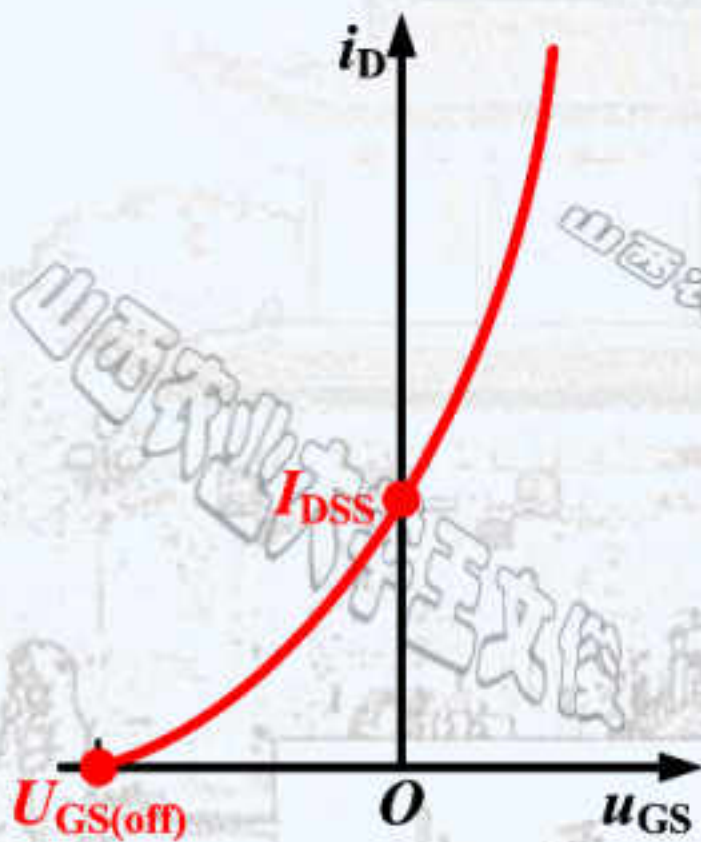


• 4、N沟道和P沟道耗尽型MOS管

N沟道耗尽型
转移特性曲线

电流、电压同时取反

P沟道耗尽型
转移特性曲线

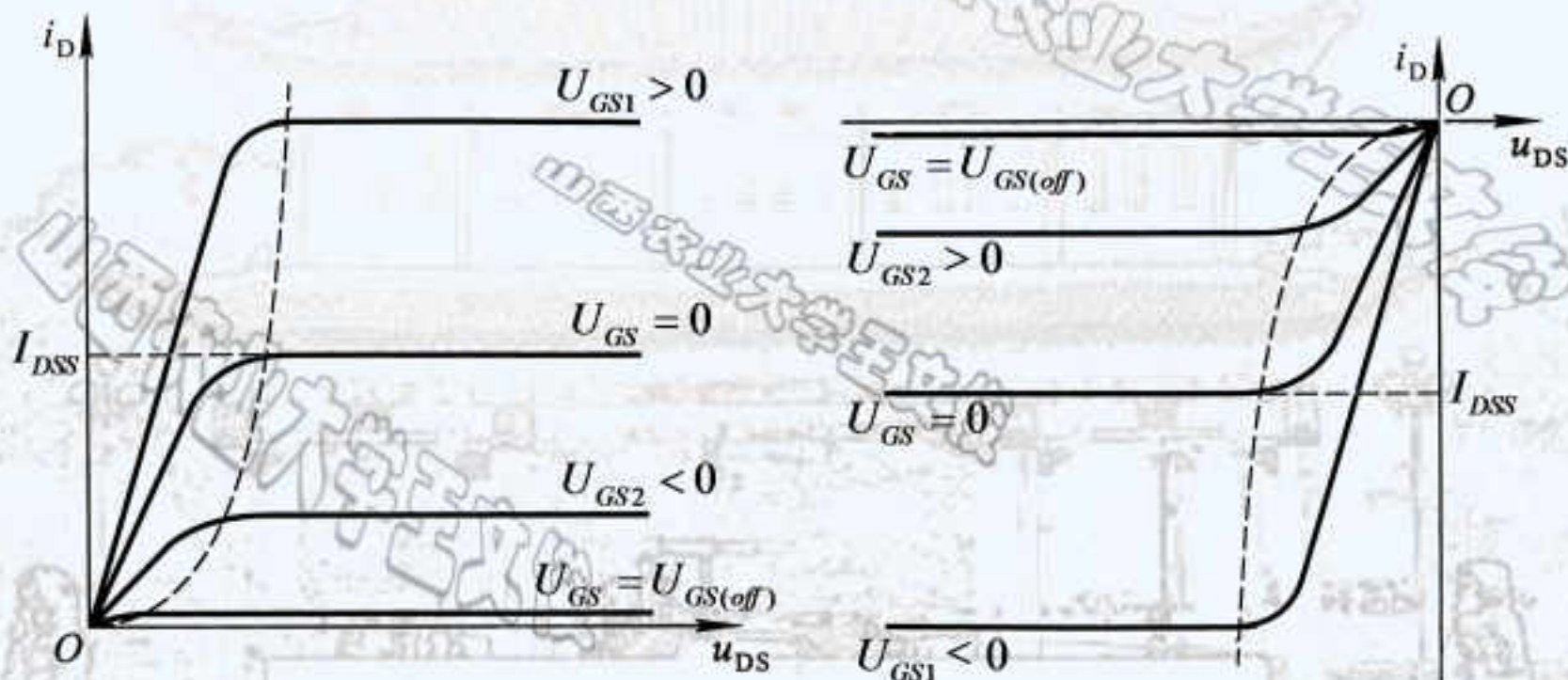


4、N沟道和P沟道耗尽型MOS管

N沟道耗尽型
输出特性曲线

电流、电压同时取反

P沟道耗尽型
输出特性曲线



二十三、场效应管的主要参数

- 1、三类主要参数



• 2、直流参数

① 开启电压 $U_{GS(th)}$

- U_{DS} 为常量时, 使 i_D 大于零($5\ \mu A$)所需的最小 $|u_{GS}|$ 值。
- $U_{GS(th)}$ 是增强型MOS管的参数。

② 夹断电压 $U_{GS(off)}$

- U_{DS} 为常量时, 使 i_D 为规定的微小电流($5\ \mu A$)时的 u_{GS} 值。
- $U_{GS(off)}$ 是结型场效应管和耗尽型MOS管的参数。

③ 饱和漏极电流 I_{DSS}

- 在 $u_{GS} = 0\ V$ 情况下产生预夹断时的漏极电流。
- I_{DSS} 是结型场效应管和耗尽型MOS管的参数。

④ 直流输入电阻 $R_{GS(DC)}$

- 栅-源电压与栅极电流之比。
- 结型管的 $R_{GS(DC)}$ 大于 $10^7\ \Omega$, MOS管的 $R_{GS(DC)}$ 大于 $10^{10}\ \Omega$ 。

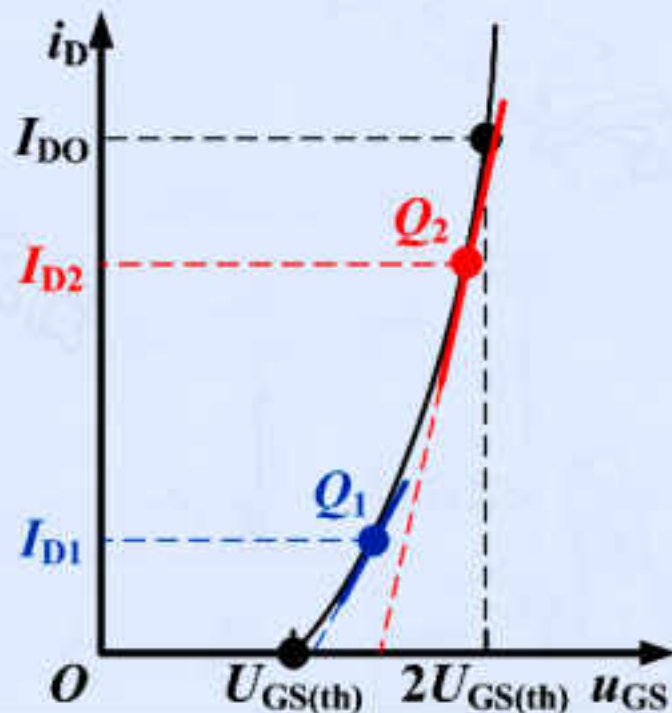
• 3、交流参数

① 低频跨导 g_m

- 作用： g_m 数值的大小表示 u_{GS} 对 i_D 控制作用的强弱。
- 定义：在管子工作在恒流区且 u_{DS} 为常量的条件下， i_D 的微小变化量 Δi_D 与引起它变化的 Δu_{GS} 之比。
- 单位：S(西门子)或 mS。

$$g_m = \left. \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{const}}$$

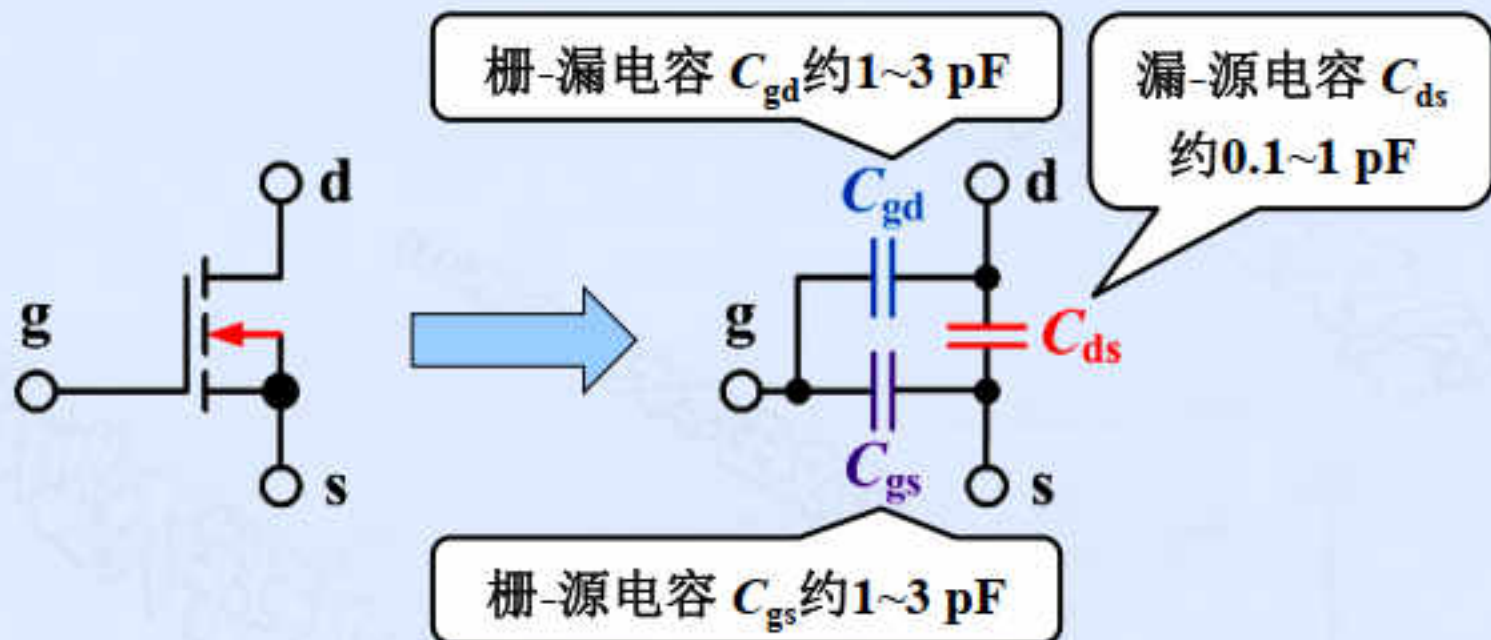
- g_m 是转移特性曲线上某一点的切线的斜率，可通过对转移特性曲线的方程求导获得。
- g_m 与切点位置密切相关， i_D 越大， g_m 也越大。



• 3、交流参数

② 极间电容

- 场效应管的三个极之间均存在极间电容。



- 由于极间电容的存在，高频信号时需考虑极间电容的影响。
- 最高工作频率 f_M 是综合考虑三个电容影响而确定的工作频率的上限值。超过该频率后，场效应管将失去放大能力。

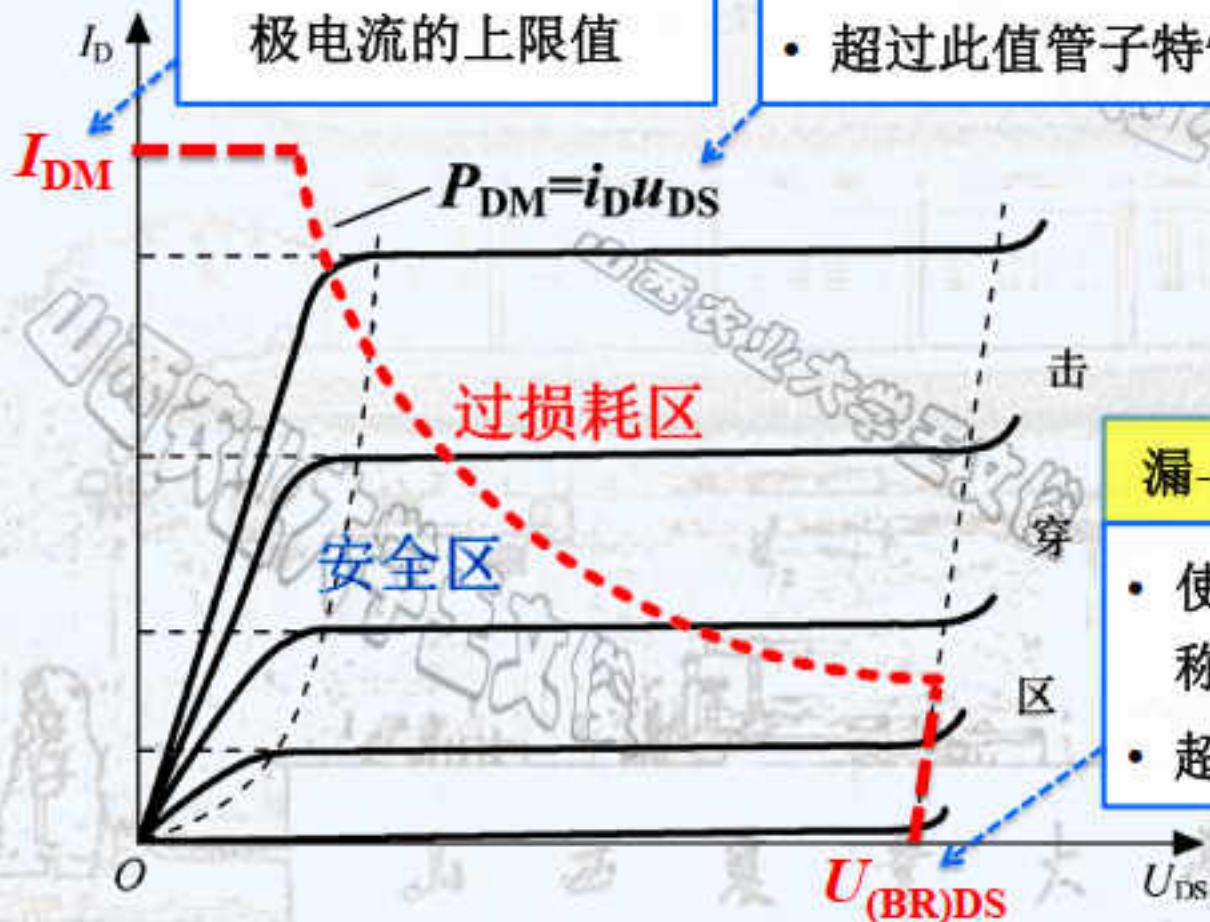
4、极限参数

最大漏极电流 I_{DM}

- 管子正常工作时漏极电流的上限值

最大耗散功率 P_{DM}

- P_{DM} 决定管子的温升。
- 超过此值管子特性变坏，甚至烧坏。



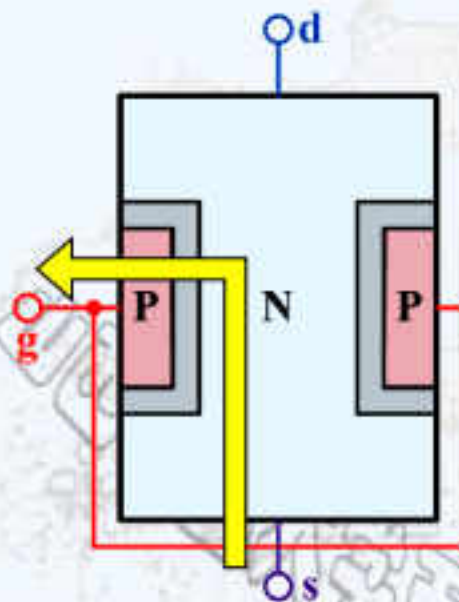
漏-源击穿电压 $U_{(BR)DS}$

- 使 i_D 骤然增大的 u_{DS} 称为漏-源击穿电压。
- 超过此值管子损坏。

4、极限参数

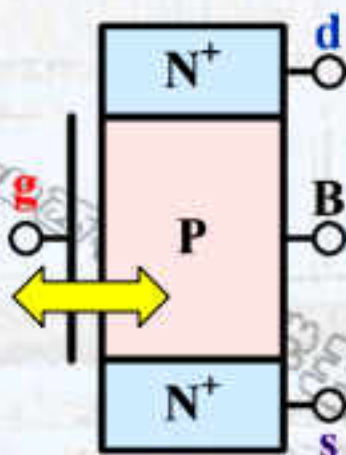
栅-源击穿电压 $U_{(BR)GS}$

不同的场效应管, $U_{(BR)GS}$ 的含义不同。



结型场效应管

使栅极与沟道间PN结反向击穿的 u_{GS}



MOS管

使绝缘层击穿的 u_{GS}

MOS管栅-衬之间电容很小, 只要有少量感应电荷就可产生很高的电压。

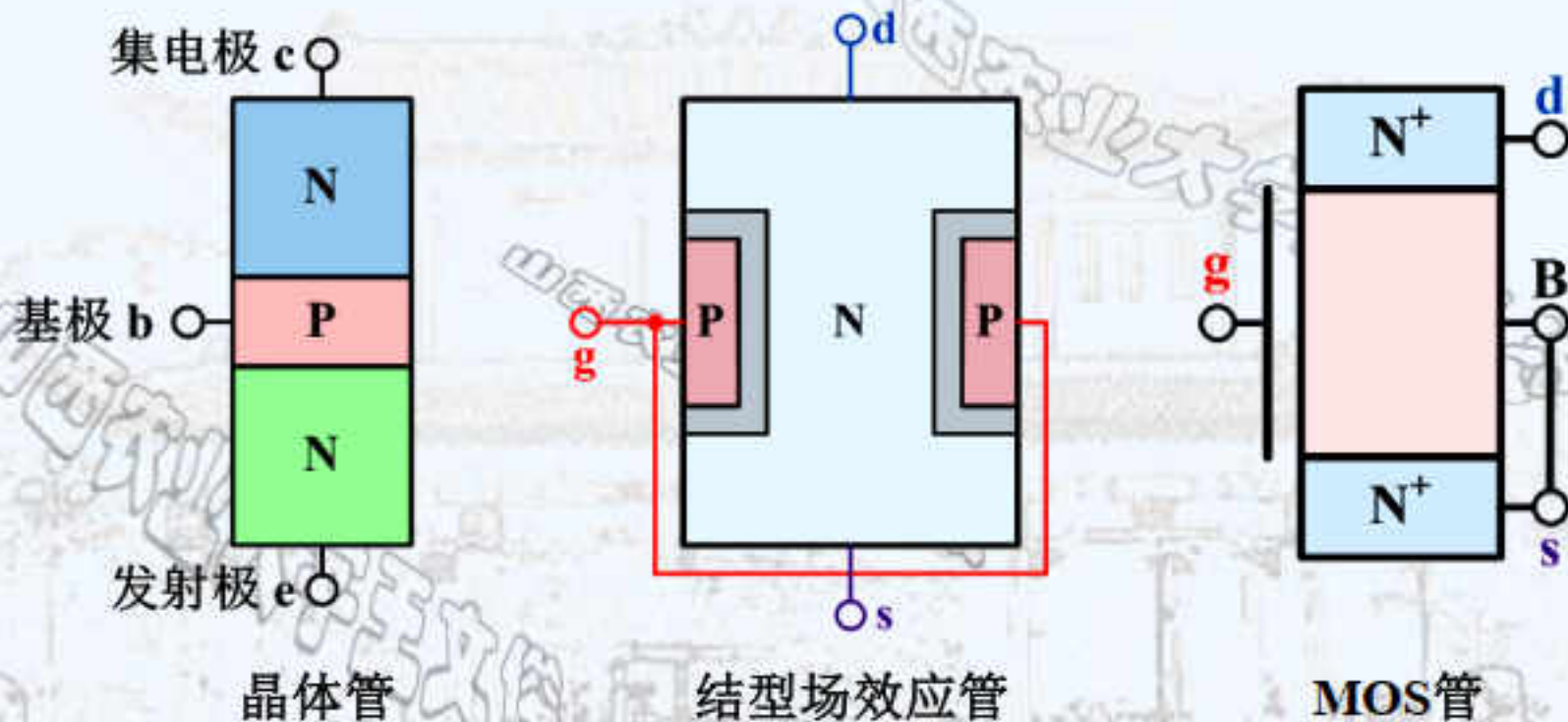
直流输入电阻 $R_{GS(DC)}$ 很大, 感应电荷难于释放。

感应电荷产生的高压会使绝缘层击穿, 造成管子损坏。

MOS管栅-源间必须提供直流通路, 避免栅极悬空。

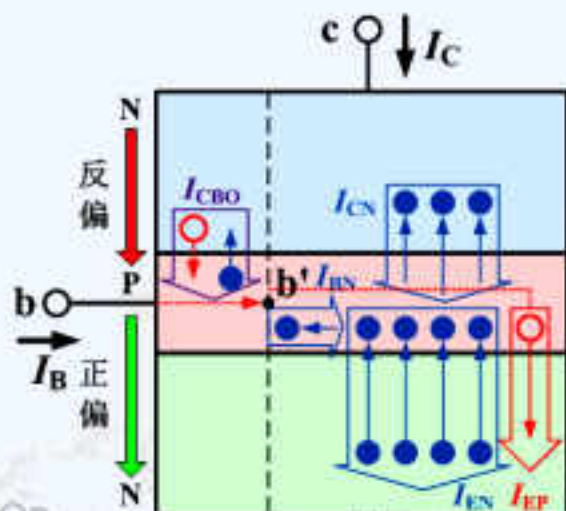
二十四、场效应管与晶体管的比较

• 1、导电特点



晶体管的基极 **b**、发射极 **e**、集电极 **c** 与场效应管的栅极 **g**、源极 **s**、漏极 **d** 相对应，它们的作用类似。

• 2、参与导电的载流子



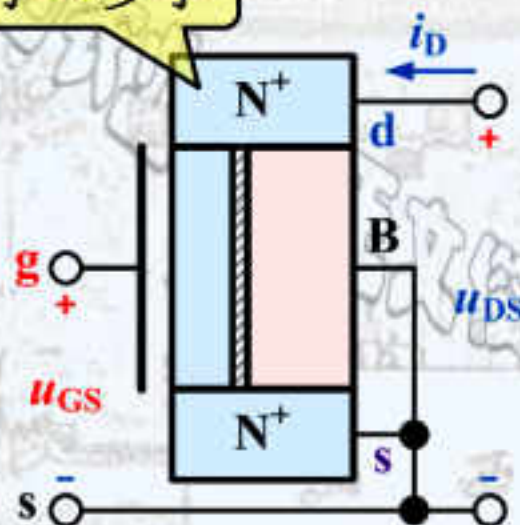
晶体管

- 多子和少子两种载流子同时参与导电。
- 由于有两种带不同极性电荷的载流子参与导电，因此称为双极型晶体管。

场效应管

- 少子极少可忽略，只有多子参与导电。
- 由于只依靠半导体中的多数载流子导电，因此称为单极型晶体管。

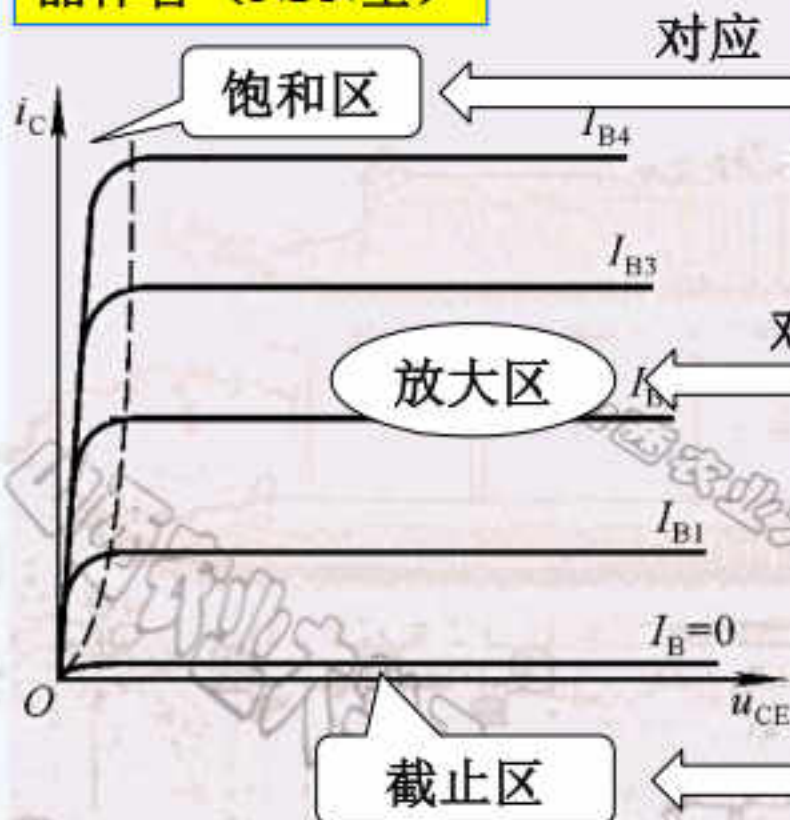
多子>>少子



由于少子数目受温度、辐射影响较大，因此场效应管比晶体管的温度稳定性好、抗辐射能力强。

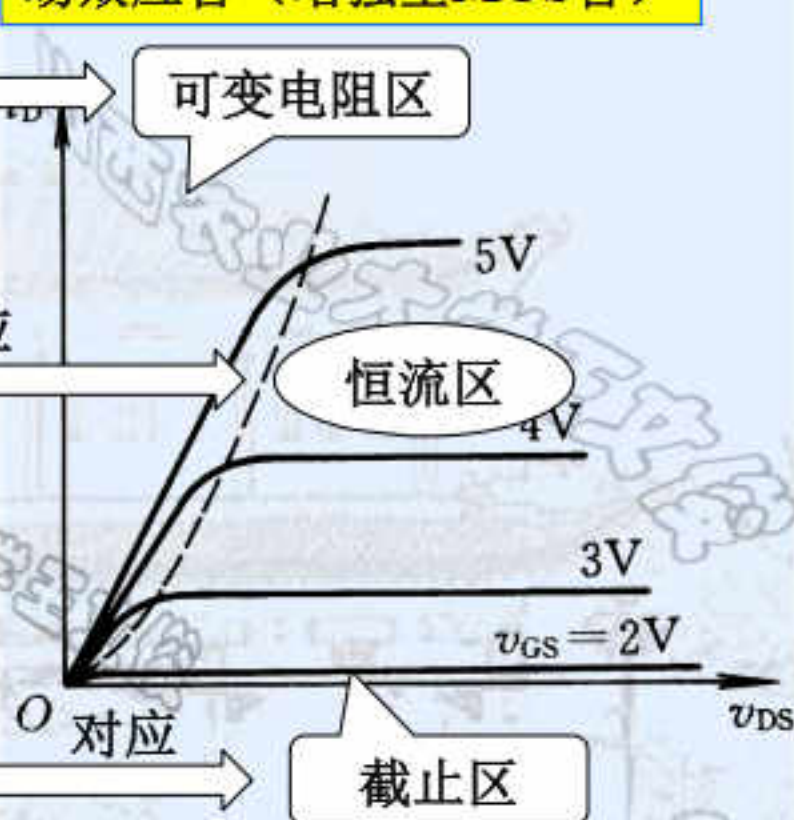
• 3、输出特性曲线

晶体管 (NPN型)



当 i_B 等差变化时，放大区的输出特性曲线是等间距的。
(即 i_C 的变化量是相等的)

场效应管 (增强型MOS管)



当 u_{GS} 等差变化时，恒流区的输出特性曲线不是等间距的。
(即 i_D 的变化量不相等)

• 4、输入对输出的控制作用

晶体管 (NPN型)

直流: $I_C \approx \beta I_B$

交流: $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$

总电流: $i_C \approx \beta(I_B + \Delta i_B) = \beta i_B$

• 晶体管通过基极电流 i_B 控制集电极电流 i_C ，因此称晶体管为电流控制元件。

• 实际上，晶体管既是电流控制元件，也是电压控制元件。

• 晶体管工作时基极总要索取一定的电流，输入电阻较小。若信号源能提供一定电流，则可选用晶体管。

场效应管 (增强型MOS管)

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

交流: $\Delta i_D = g_m \Delta u_{GS}$

总电流:

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

• 场效应管通过栅-源电压 u_{GS} 控制漏极电流 i_D ，因此称场效应管为电压控制元件。

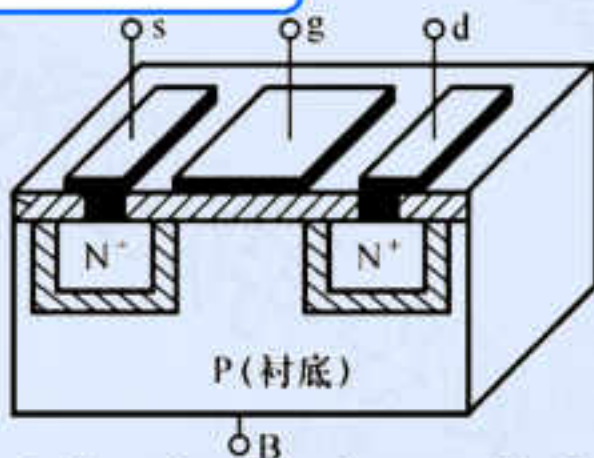
• 场效应管工作时栅极基本不取电流，输入电阻大。

• 5、其他

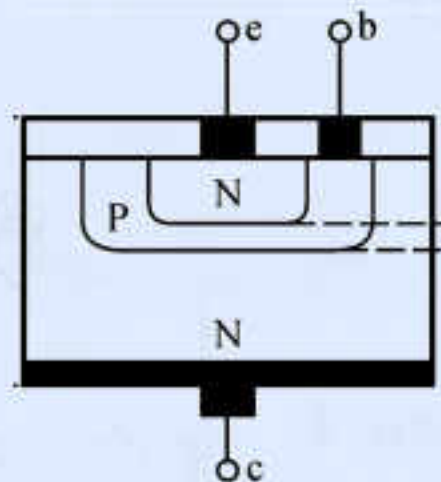
噪声系数

- 场效应管的噪声系数很小。
- 低噪声放大器的输入级及信噪比要求较高的电路应选用场效应管。也可选用特制的低噪声晶体管。

电极互换



场效应管漏极与源极可互换使用，互换后特性变化不大。



晶体管发射极与集电极不能互换，互换后特性差异很大。

• 5、其他

种类

- 场效应管的种类比晶体管多，特别是耗尽型**MOS**管，栅-源电压可正、可负、可零，均能控制漏极电流。
- 在组成电路时，场效应管比晶体管更加灵活。

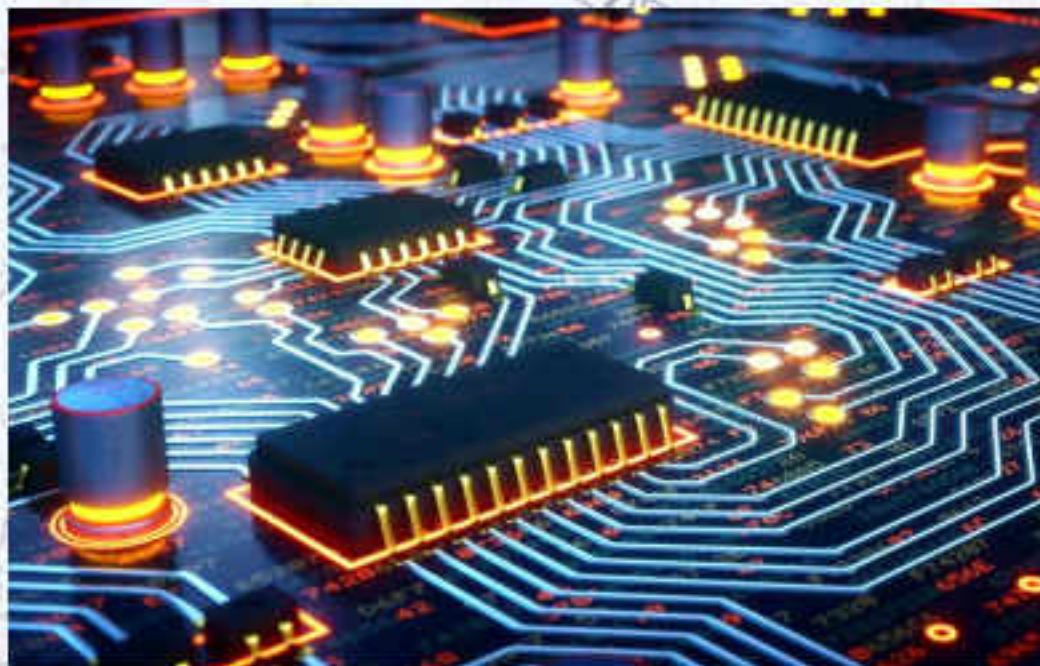
应用

- 场效应管和晶体管均可用于放大电路和开关电路，构成了品种繁多的集成电路。
- 场效应管集成工艺更简单，且具有耗电省、工作电源电压范围宽等优点，因此场效应管越来越多的应用于大规模和超大规模集成电路中。

二十五、集成电路中的元件

• 1、集成电路概述

集成电路就是采用一定的制造工艺，将晶体管、场效应管、二极管、电阻、电容等许多元件组成的具有完整功能的电路制作在同一块半导体基片上，然后加以封装所构成的半导体器件。

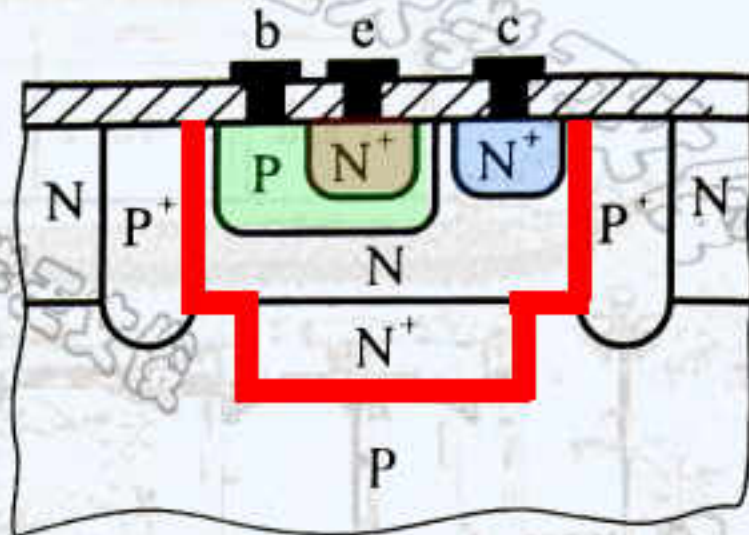
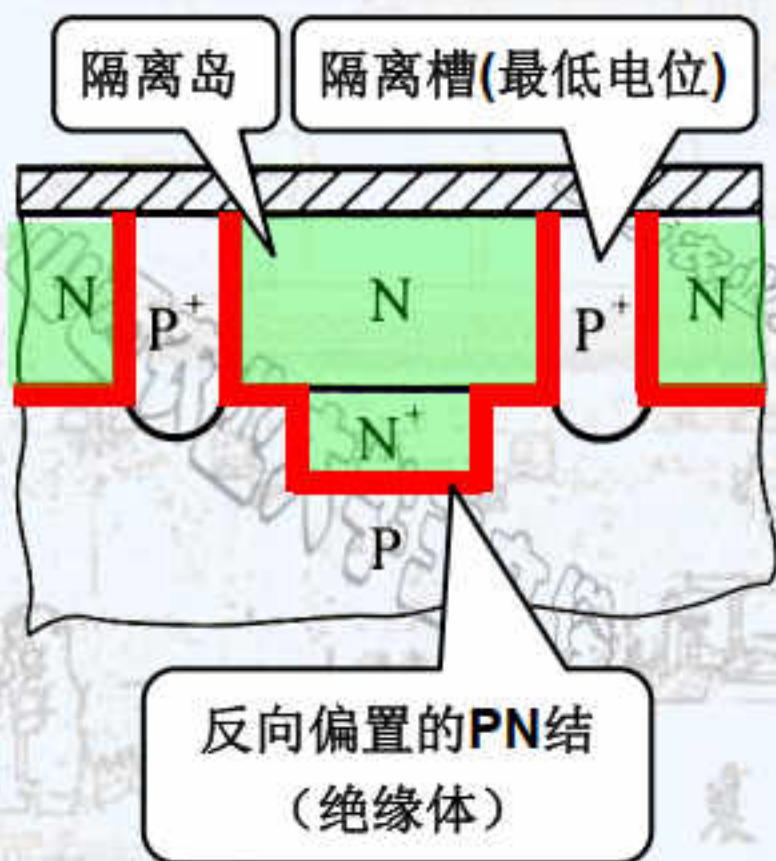


集成电路具有集成度高、体积小、功能强、功耗低、外部连线及焊点少等特点，从而大大提高了电子设备的可靠性与灵活性。

• 2、NPN型管

在制造集成电路时，需要将各个元件相互绝缘。

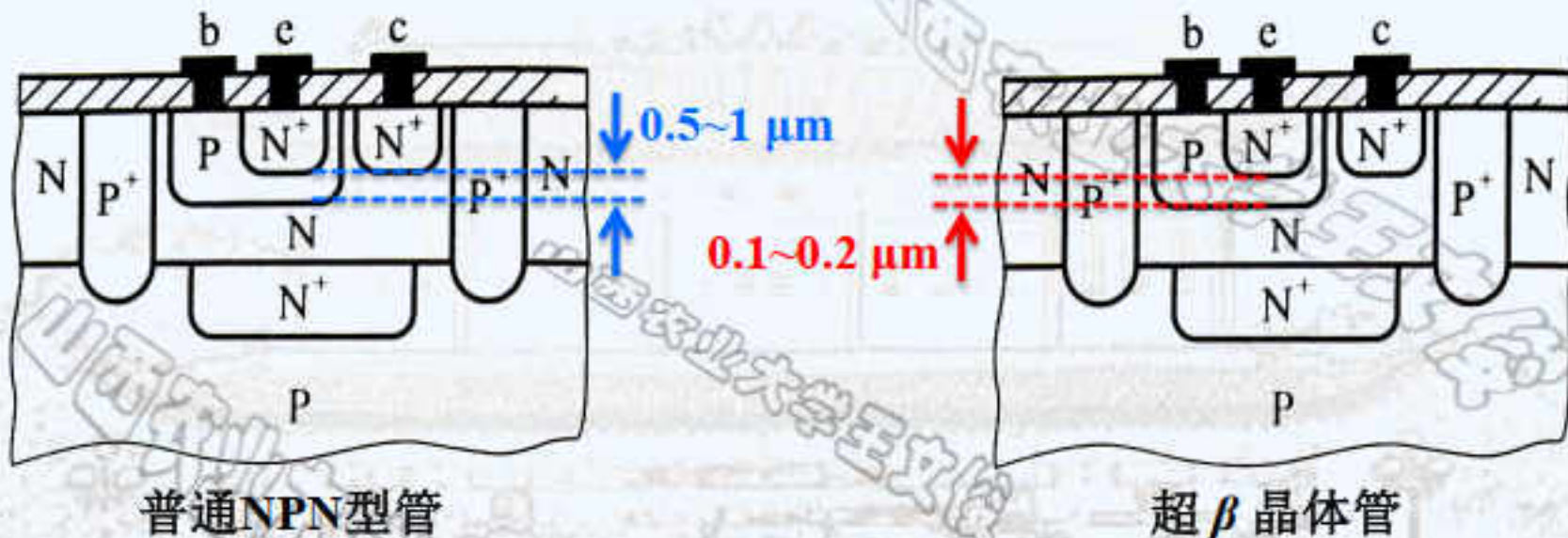
利用PN结反向偏置时电阻大的特点，将元件所在的N区或者P区四周用PN结包起来，便可使它们相互绝缘。



在隔离岛中先制造出基区，再制造出发射区和集电区，最后制造出各极引出窗口，就成为NPN型管。

• 3、超 β 晶体管

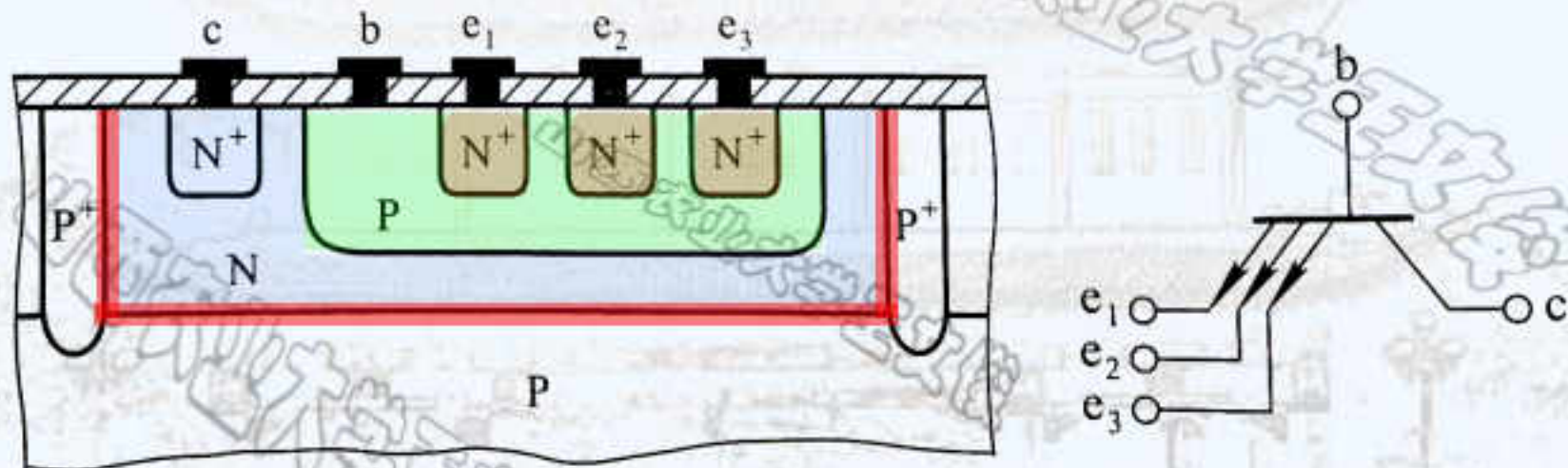
将普通NPN型管的基区做的很薄，就得到超 β 晶体管。



- 超 β 晶体管的基极电流很小（如小于10 nA）时， β 可高达千倍以上。
- 其反向击穿电压很低， $U_{(BR)CBO}$ 为 10 ~ 20 V， $U_{(BR)CEO}$ 为 5 ~ 10 V。
- 超 β 晶体管常用于高精度集成放大电路的输入级。

• 4、多发射极管

在制作NPN型管时，若制作多个发射区，则得到多发射极管。
多发射极管广泛应用于集成数字电路中。

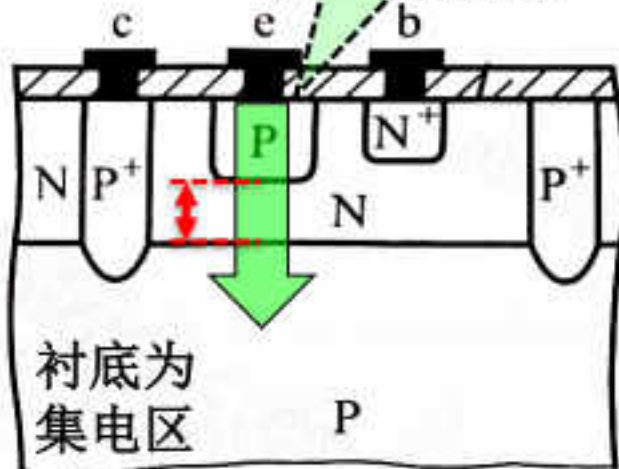


• 5、PNP型管

PNP型管有衬底（纵向）PNP管和横向PNP管两种。

衬底PNP管

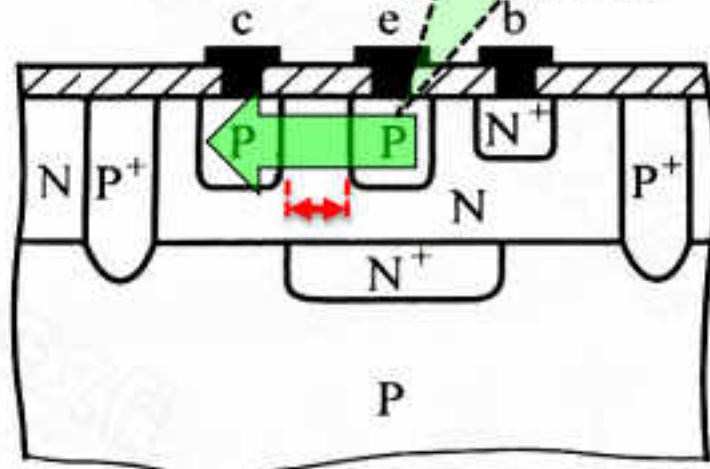
载流子
纵向运动



- 纵向管可以准确控制基区的厚度，因此 β 值较大。
- 隔离槽只能接在整个电路电位最低端，应用局限较大。

横向PNP管

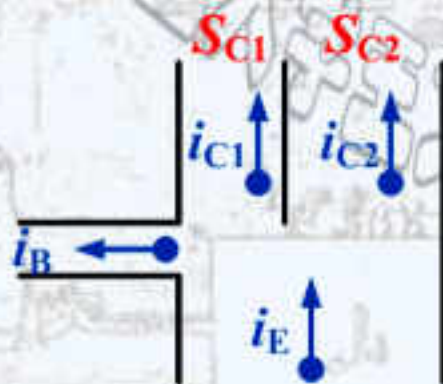
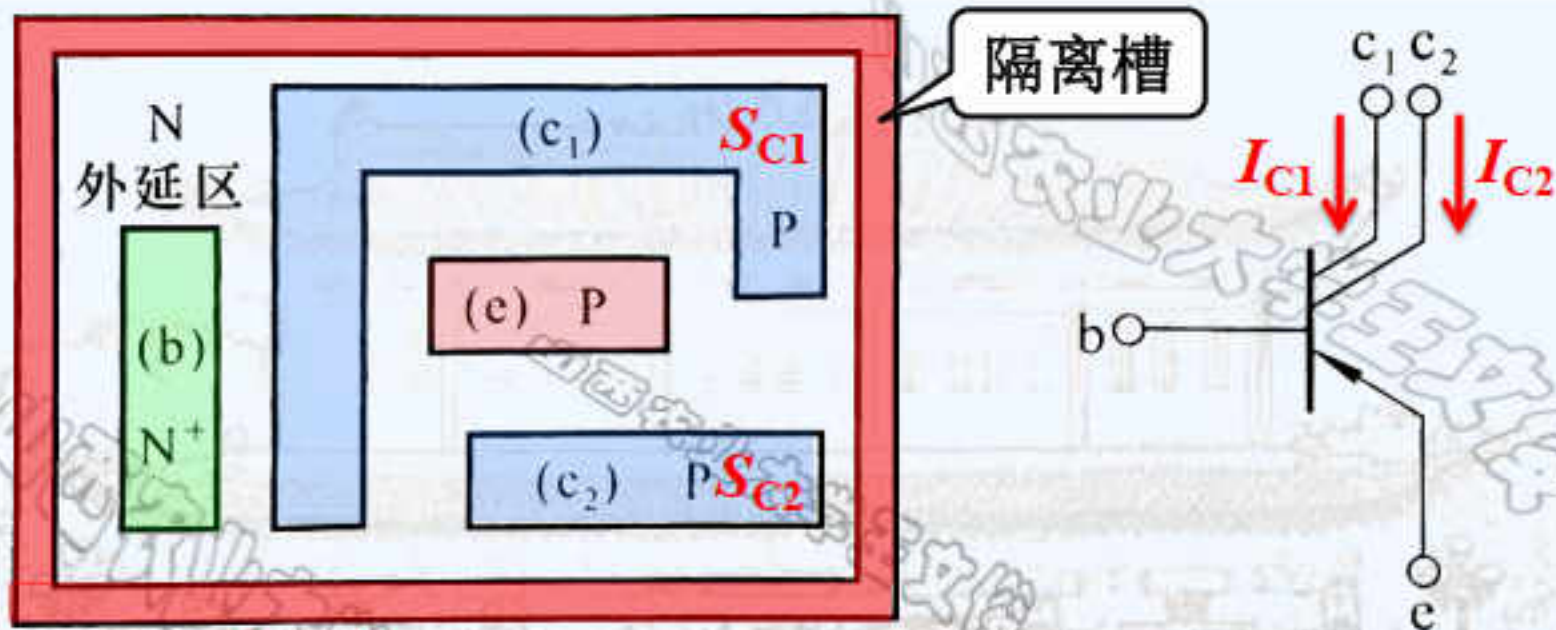
载流子
横向运动



- 由于工艺所限，横向管基区较厚，因此 β 值较小（2~20倍）。
- 发射结和集电结耐压较高，且连接方式不受任何限制。

• 6、多集电极管

在制作横向PNP型管时，若制作多个集电区，则得到多集电极管。



当基极电流一定时，各集电极电流之比等于对应的集电区面积之比。

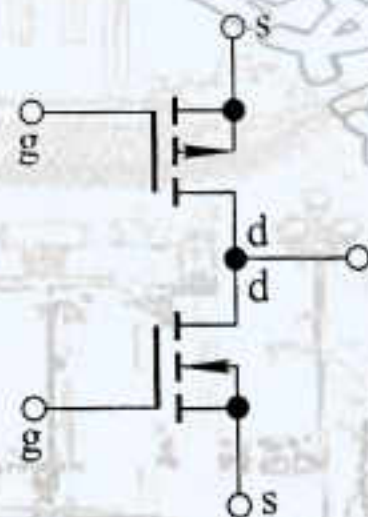
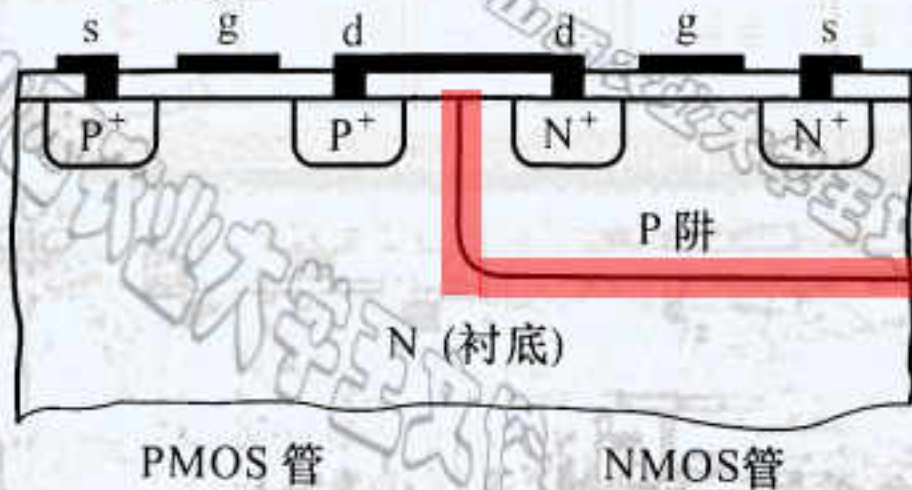
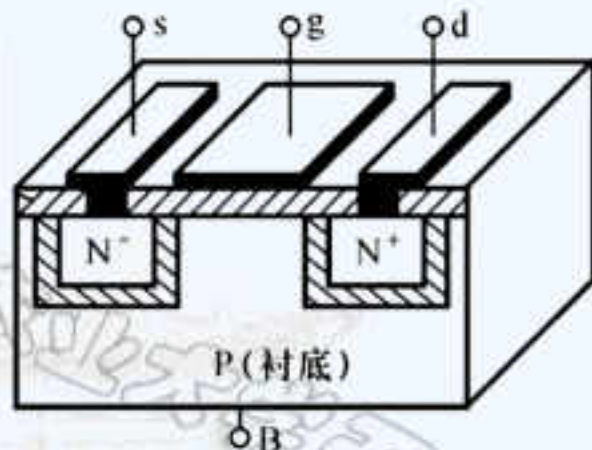
$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{S_{C1}}{S_{C2}}$$

多集电极管多用于集成放大电路中的电流源电路。

• 7、集成单极型管

集成 **MOS** 管的结构与分立元件 **MOS** 管的结构完全相同。

在集成 **MOS** 电路中，常采用 **N** 沟道 **MOS** 管与 **P** 沟道 **MOS** 管组成的互补电路，简称 **CMOS** 电路。



- **CMOS**电路功耗小、工作电源电压范围宽、输入电流非常小、连接方便，是目前应用广泛的集成电路之一。

• 8、集成电路中的无源元件

集成电路中各种无源元件的制造不需要特殊工艺。

二极管和稳压管

NPN 型管的发射结

电阻

NPN 型管的基区体电阻

电容

PN 结势垒电容

MOS 管栅极与沟道间等效电容

• 9、集成电路中元件的特点

① 具有良好的对称性

- 元件在同一硅片上用相同的工艺制造，它们性能比较一致。
- 元件密集使环境温度差别很小，同类元件温度对称性较好。

② 电阻和电容数值受限

- 电阻和电容要占用硅片面积，数值越大，占用面积越大。
- 集成电路不易制造大电容和大电阻。
- 电阻一般几十欧~几千欧，电容一般小于**100 pF**。

③ 纵向管和横向管

- 纵向晶体管 β 值大；横向晶体管 β 值小，但PN结耐压高。

④ 有源元件取代无源元件

- 纵向NPN型管占用面积小且性能好，电阻和电容占用面积大且取值范围窄。
- 集成电路中尽量多采用NPN型管，而少用电阻和电容。