



## 5-4 场效应晶体管

---

### 主要内容

1. 场效应管的结构、符号与工作原理
2. 场效应管的工作状态和特性曲线
3. 场效应管的基本特性
4. 场效应管的电路模型



# 场效应晶体管概述

---

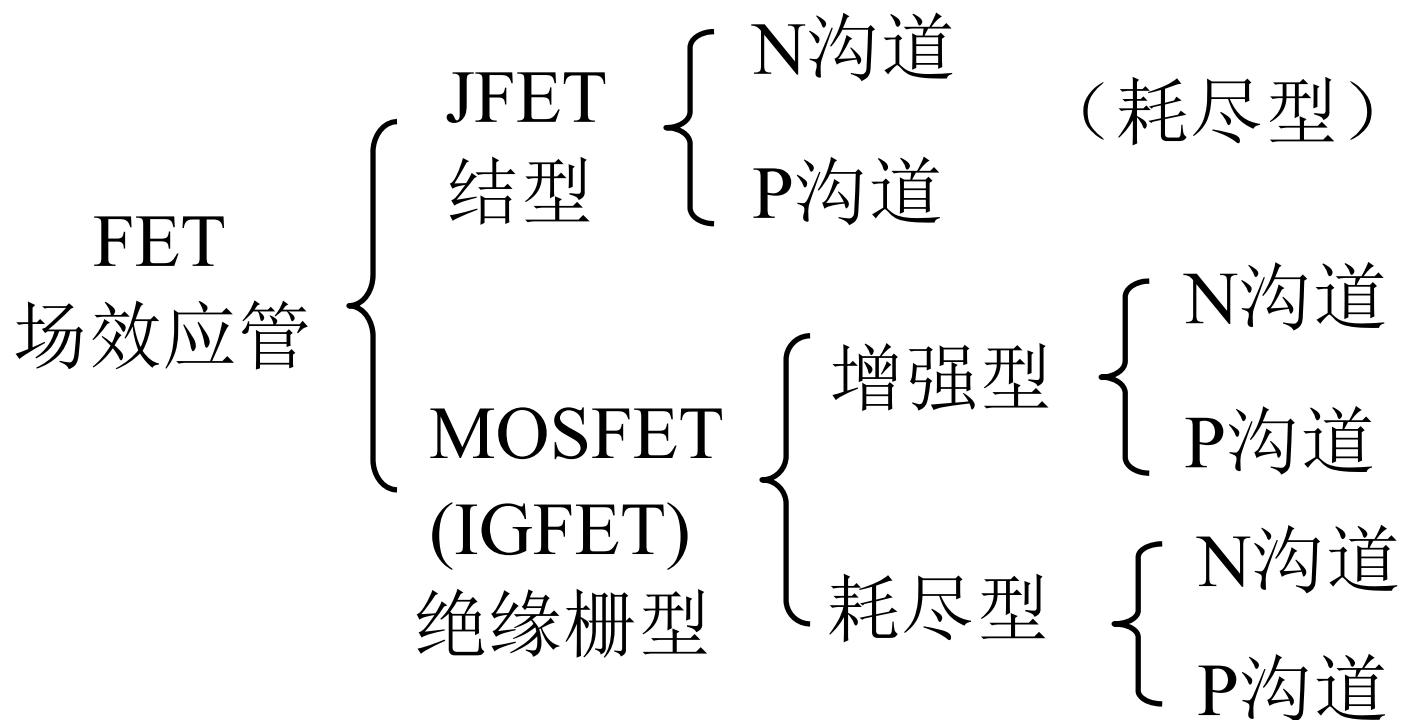
场效应管，简称FET (Field Effect Transistor )，主要特点：

- (a) 输入电阻高，可达 $10^7 \sim 10^{15} \Omega$ 。
- (b) 起导电作用的是多数（一种）载流子，又称为单极型晶体管。
- (c) 体积小、重量轻、耗电省。
- (d) 噪声低、热稳定性好、抗辐射能力强和制造工艺简单。
- (e) 在大规模集成电路制造中得到了广泛的应用。



# 场效应管的类型

场效应管按结构可分为：结型场效应管（JFET）和绝缘栅型场效应管（MOSFET）；按工作原理可分为增强型和耗尽型。



# 场效应管的电路符号



## MOSFET符号

### 耗尽型

$U_{GS}=0$ 时，有漏极电流，

需要加负的夹断电压 $U_{GS(off)}$ 才能关闭，高于夹断电压 $U_{GS(off)}$ 则导通

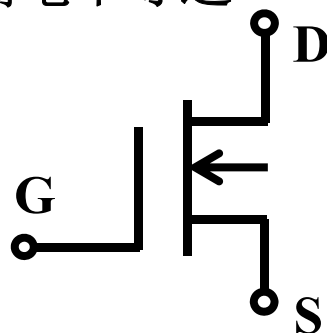
### 增强型

$U_{GS}=0$ 时，没有漏极电流，

而只在 $U_{GS}>0$ 时，能导通，低于开启电压 $U_{GS(th)}$ 截止

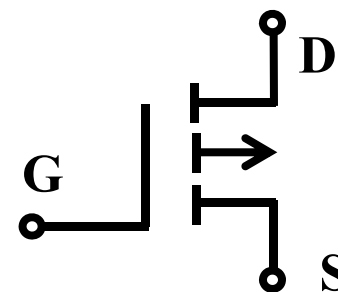
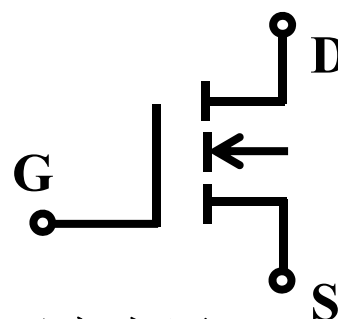
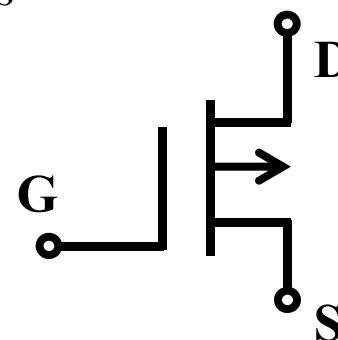
### N沟道

$U_{GS}$ 高电平导通



### P沟道

$U_{GS}$ 低电平导通





# 5-4-1 场效应管结构、符号与工作原理

## 1.场效应管基本结构

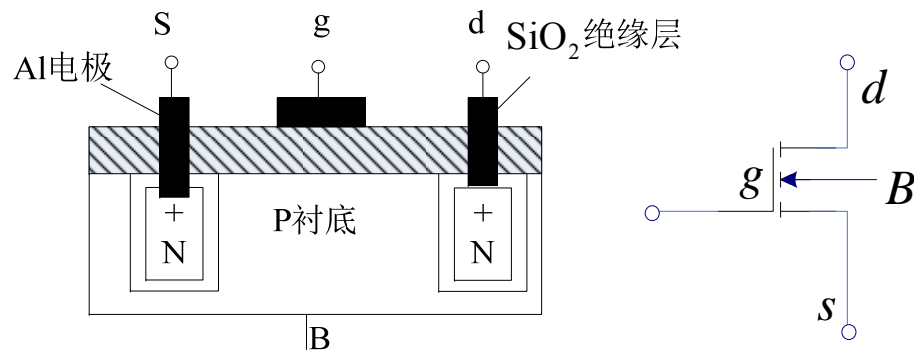


图5-4-1 N沟道绝缘栅型场效应管的基本结构与电路符号

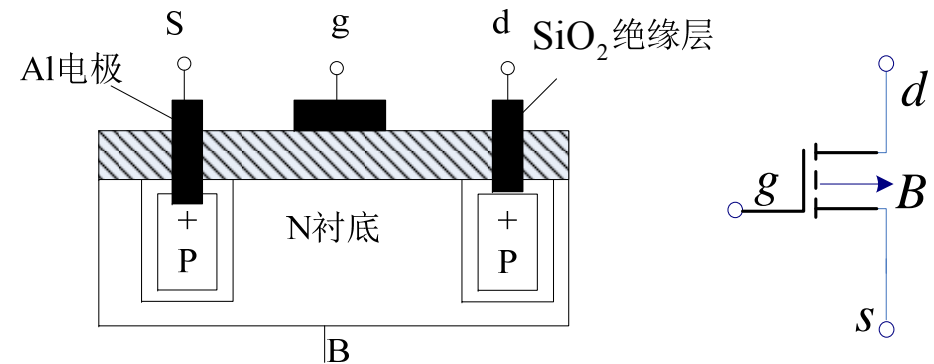


图5-4-2 P沟道绝缘栅型场效应管的基本结构与电路符号

场效应管与三极管的三个电极的对应关系：

栅极g—基极b      源极s—发射极e      漏极d—集电极c

夹在两个PN结中间的区域称为导电沟道（简称沟道）。

$V_{GS}=0$ 时是否存在导电沟道是增强型和耗尽型的基本区别。

## 例5-10



在Multisim中用IV分析仪测试理想绝缘栅型场效应管如图5-4-3所示，改变 $V_{GS}$ ，观察电压 $V_{DS}$ 与 $i_D$ 之间的关系。

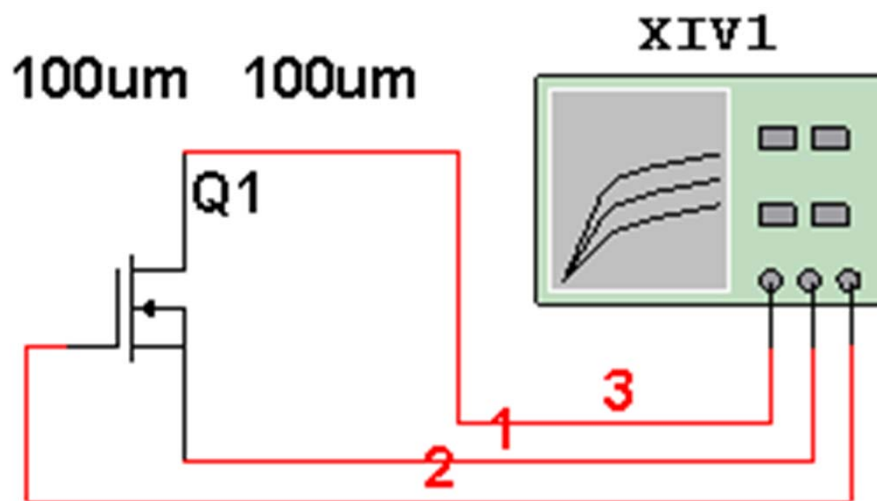


图5-4-3 场效应管观测电路

# 解：



1. Multisim中选择理想绝缘栅型场效应管，选择按图5-4-3连接好电路。
2. 设置IV分析仪的仿真参数，如右图所示：
3. 结果如下图所示，与三极管输出曲线相似， $V_{DS}$ 与 $i_D$ 之间也存在着非线性关系。

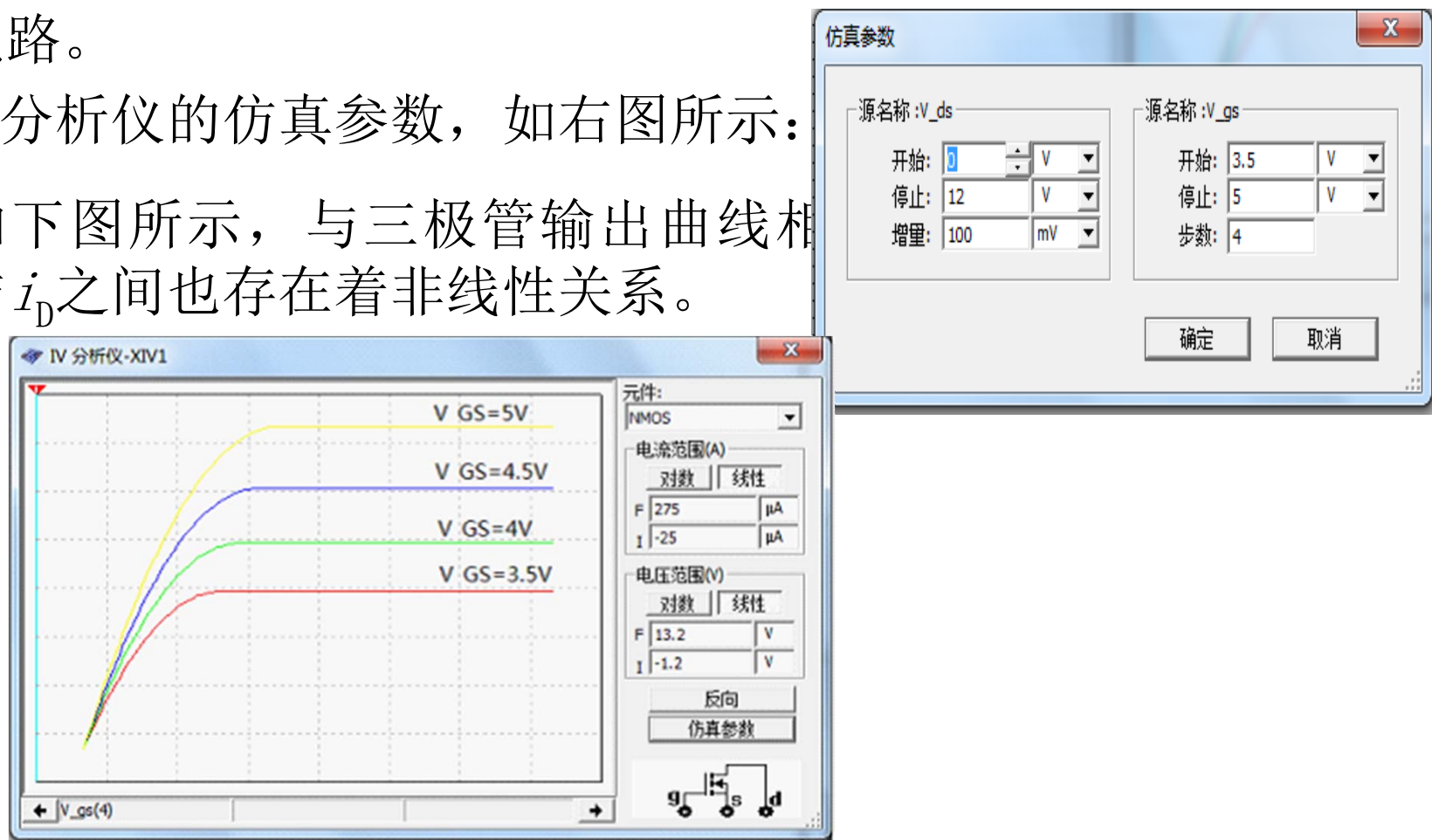


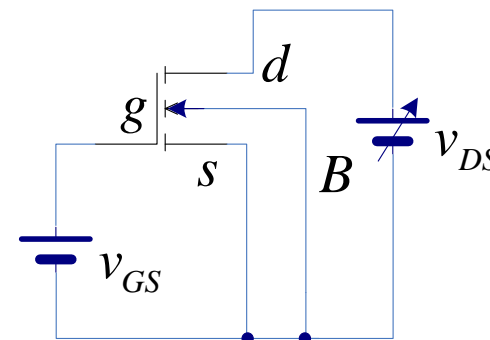
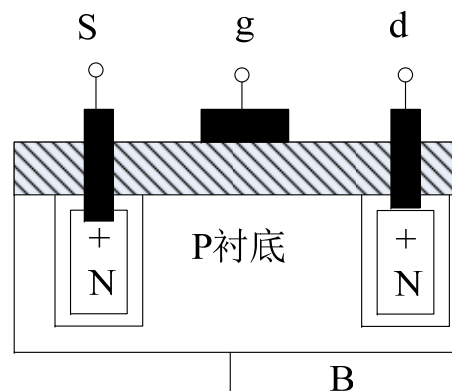
图5-4-5 MOS管的电流特性和输出特性



## 2.场效应管的基本工作原理

以绝缘栅型场效应管的工作原理为例说明场效应管的工作原理。

利用栅源电压 $v_{GS}$ 的大小，来改变半导体表面感生电荷的多少，从而控制漏极电流 $i_D$ 的大小。



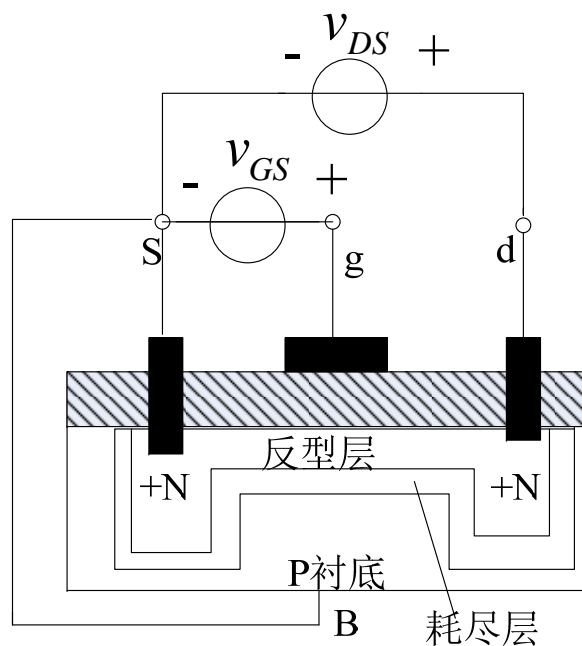
- **分析:** 主要讨论  $v_{GS}$  对  $i_D$  的控制作用。
  - (1) 当  $v_{GS} = 0$  时，不论所加电压  $v_{DS}$  的极性如何，其中总有一个 PN 结是反向偏置的，反向电阻很高，则漏极电流  $i_D \approx 0$ 。
  - (2) 当栅源极之间加**正向电压** $v_{GS}$ ，在  $v_{GS}$  的作用下，产生了垂直于衬底表面的电场，P 型硅中少数载流子(自由电子)被吸到表面层填补空穴形成负离子的耗尽层。





## 2.场效应管的基本工作原理

(3) 当栅极与源极之间加正向电压  $V_{GS} \geq V_{GS(th)}$  时，被吸到表面层中的自由电子较多，填补空穴后还有剩余，在表面层中形成一个N型层，通常称为反型层；它就是沟通源区和漏区的N型导电沟道。形成导电沟道后，在漏极电源  $V_{DS}$  的作用下，将产生漏极电流  $i_D$





## 2.场效应管的基本工作原理

---

(4) 形成反型层的导电沟道后， $u_{GS}$ 正值愈高，导电沟道愈宽，即

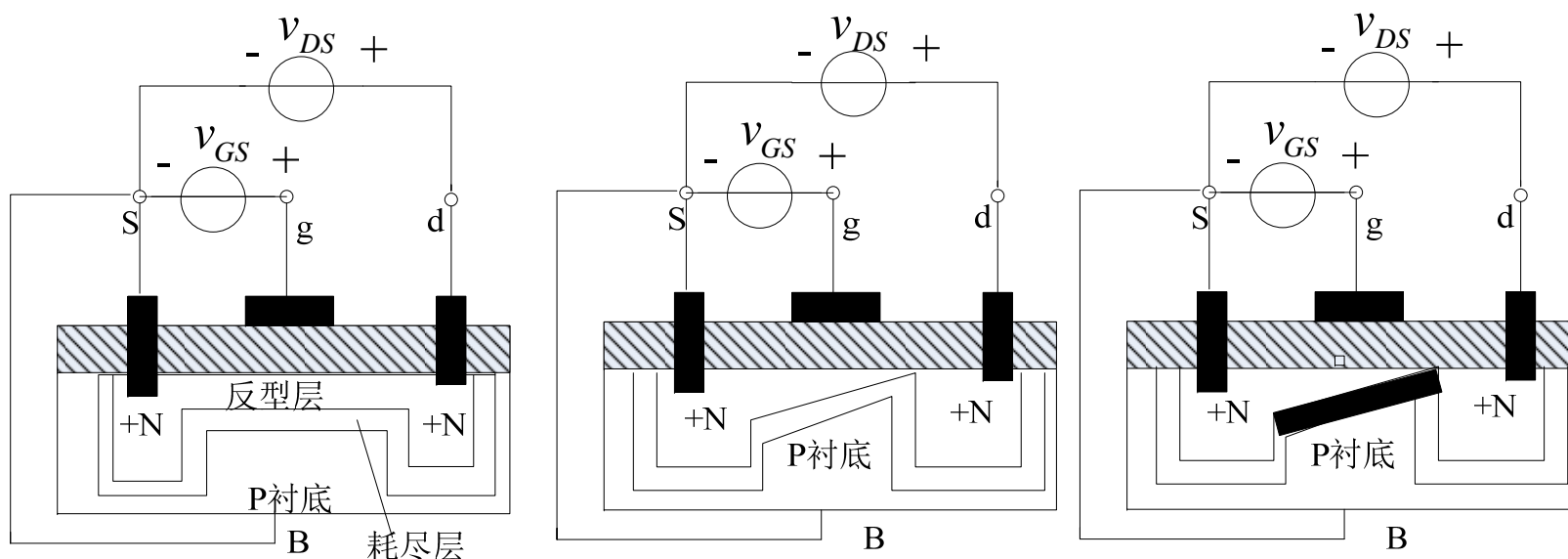
改变 $u_{GS}$ → 改变沟道宽度→改变 $i_D$

$u_{GS}\uparrow\downarrow \rightarrow$  沟道宽度 $\uparrow\downarrow \rightarrow i_D\uparrow\downarrow$

综述：当 $0 < u_{GS} < U_T$  时，漏、源极间沟道尚未联通， $i_D \approx 0$ ；当 $u_{GS} \geq U_T$ 时，随 $u_{GS}$ 变化  $i_D$ 随之变化。达到 $u_{GS}$  对 $i_D$  的控制，故称MOS管为电压控制元件。



## 2.场效应管的基本工作原理

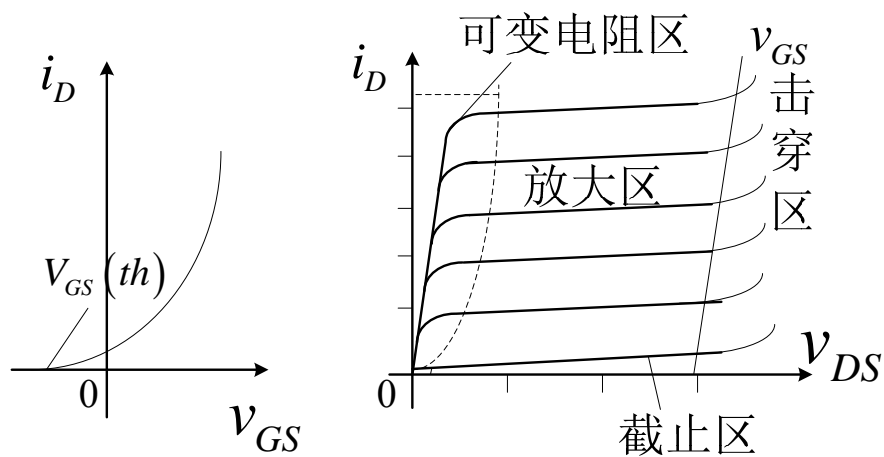


当  $v_{GS}$  不变且大于形成反型层的最小电压值  $V_{GS(th)}$  的情况下:

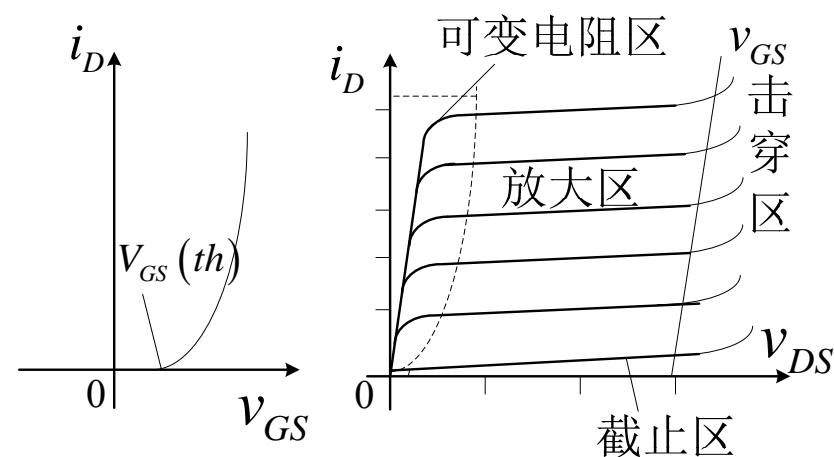
- 当  $v_{DS} < (v_{GS} - V_{GS(th)})$  时, 导电沟道存在, 处于导通状态由于半导体电阻的原因, 形成了大小与  $v_{DS}$  成正比的电流  $i_D$
- 当加大  $v_{DS}$ , 使  $v_{DS} = (v_{GS} - V_{GS(th)})$  时, MOS 处于预夹断状态, 电流  $i_D$  不再随  $v_{DS}$  的增加而增加
- 当  $v_{DS} > (v_{GS} - V_{GS(th)})$  时, MOS 管处于夹断状态,  $i_D$  的值与预夹断时的值基本相同, 不会随  $v_{DS}$  的增加而增加



## 5-4-2 场效应管的工作状态与特性曲线



N沟道绝缘栅耗尽型



N沟道绝缘栅增强型

在实际应用中，最常用的是共源极电路连接方式。场效应管的共源极连接是把源极s作为公共端、栅极g作为输入端、漏极d作为输出端。

场效应管输出特性有可变电阻区（也叫夹断区）、饱和区（也叫放大区）、截止区和击穿区4个工作区



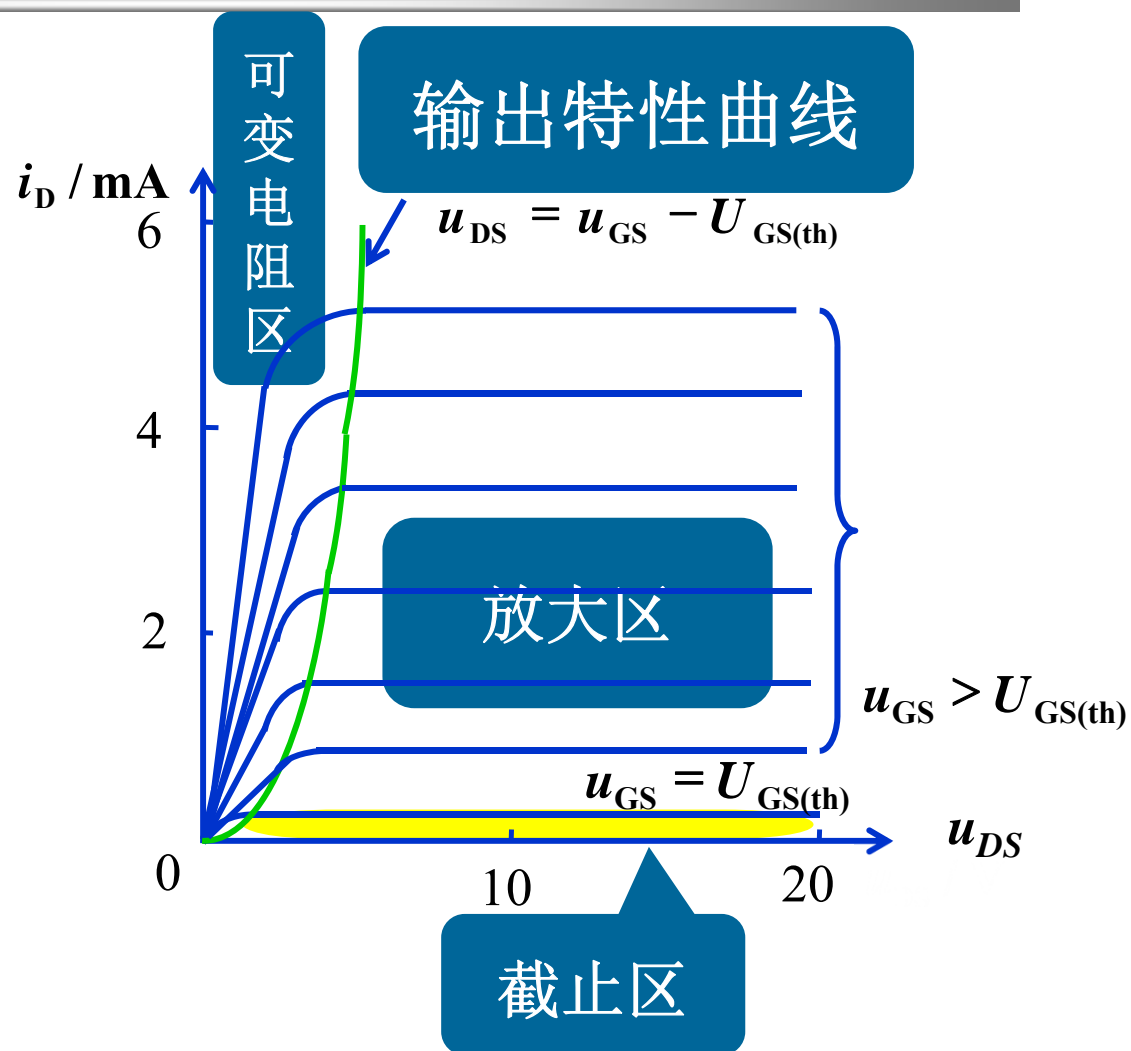
## 伏安特性与参数

### 输出特性

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

跨导  $g_m$ : 当  $U_{DS}$  一定时,

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





## 场效应管的特点（与双极型晶体管比较）

- 场效应管是一种电压控制器件，即通过 $u_{GS}$ 来控制 $i_D$ ，控制参数：跨导 $g_m$ ，较小；

相对应，双极型晶体管是一种电流控制器件，即通过 $i_B$ 来控制 $i_C$ ，控制参数：放大倍数 $\beta$ ，较大。

- 场效应管栅极绝缘，输入端电流几乎为零，输入电阻非常高；

相对应，双极型晶体管的发射结始终处于正向偏置，有一定的输入电流，基极与发射极间的输入电阻较小。

## 5-4-3 场效应管的基本特性

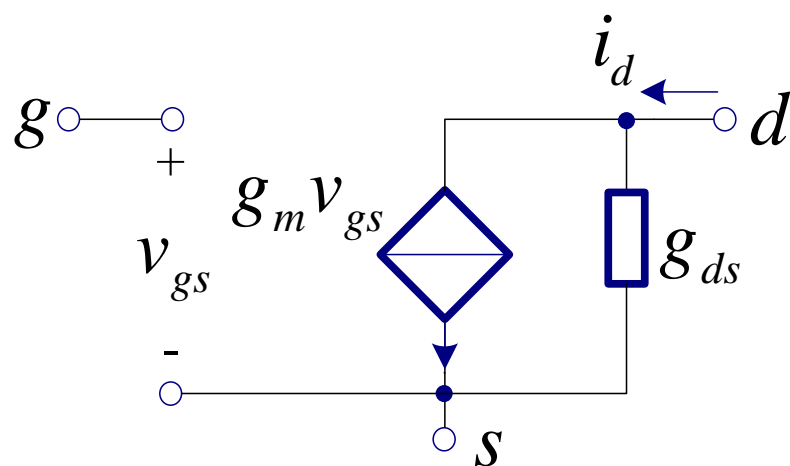


1. 最高工作频率：使场效应管开始失去电流放大能力的信号频率的一半
2. 温度特性：场效应管的漏极电流随管子温度升高而下降，具有负温度特性，与双极型三极管相反。
3. 噪声特性：是场效应管的一项重要技术性能指标，是指管子正常工作时所形成的噪声电流平均值

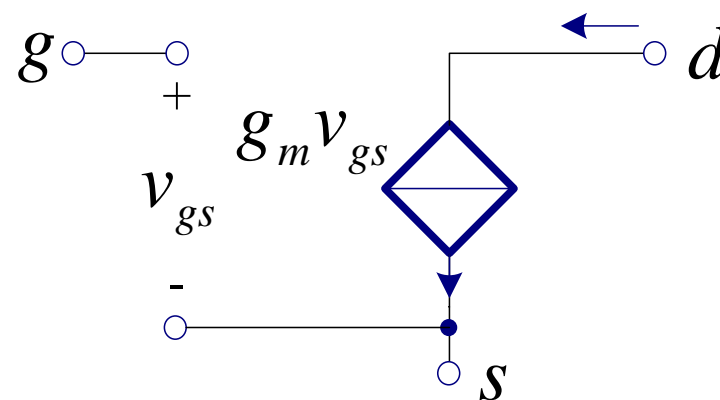
## 5-4-4 场效应管电路模型



1. 认为输入电阻无限大
2. 考虑  $g_{ds} \ll g_m$



(a) 考虑输出电阻的等效电路模型



(b) 忽略输出电阻的等效电路模型

图5-4-8 MOS管低频小信号模型（等效电路）