

# 请扫码登记



无线网名称：BUAA\_SME3， 无线网密码：sme41sme



扫码登记



课程微信群



核心专业课  
B3I493220

# 微电子器件实验

彭守仲

北京航空航天大学 微电子学院

第一馆203办公室 [shouzhong.peng@buaa.edu.cn](mailto:shouzhong.peng@buaa.edu.cn)

2020年11月2日

# 回顾



## ■ 直流特性实验内容

- 1、二极管的直流特性测量与分析
- 2、双极型晶体管的直流特性测量与分析
- 3、场效应晶体管的直流特性测量与分析

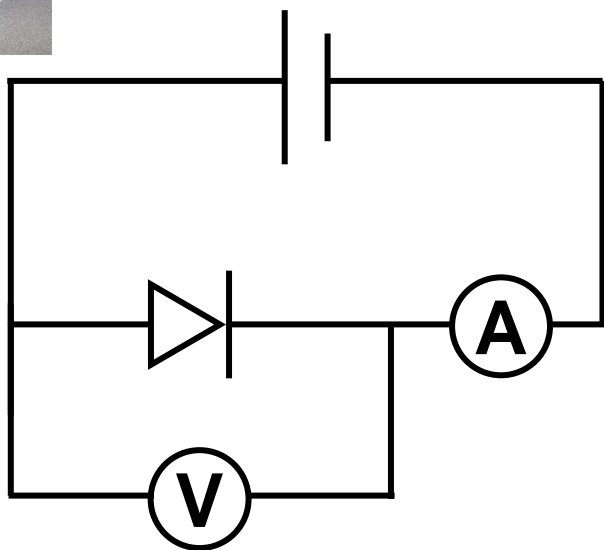
## ■ 频率特性实验内容

- 1、双极型晶体管的频率特性测量与分析
- 2、场效应晶体管的频率特性测量与分析

# 回顾



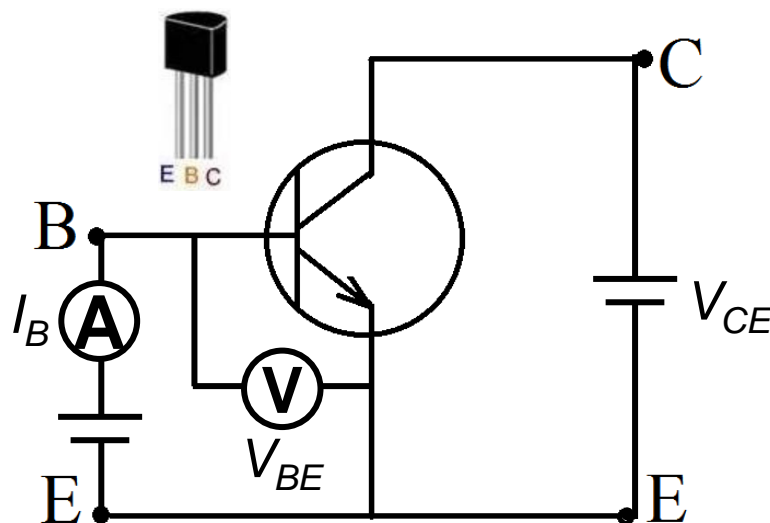
## 实验一、二极管直流特性



### ■ 注意事项

1. 请测量发光二极管（小心烫手）
2. 反向击穿电压大于30V

## 实验二、双极型晶体管输入特性



( $V_{CE}=0V$ (短路)或 $V_{CE}=0.5V$ )

### 注意事项：

1.  $V_{CE}=0V$ 时CE端不需要连接电压源，只需用导线连接
2.  $V_{CE}$ 太大会烧毁器件（小心烫手），建议 $V_{CE}=0.5V$
3. 反向击穿电压约为-12.5V

# 回顾



## ■ 输出特性曲线

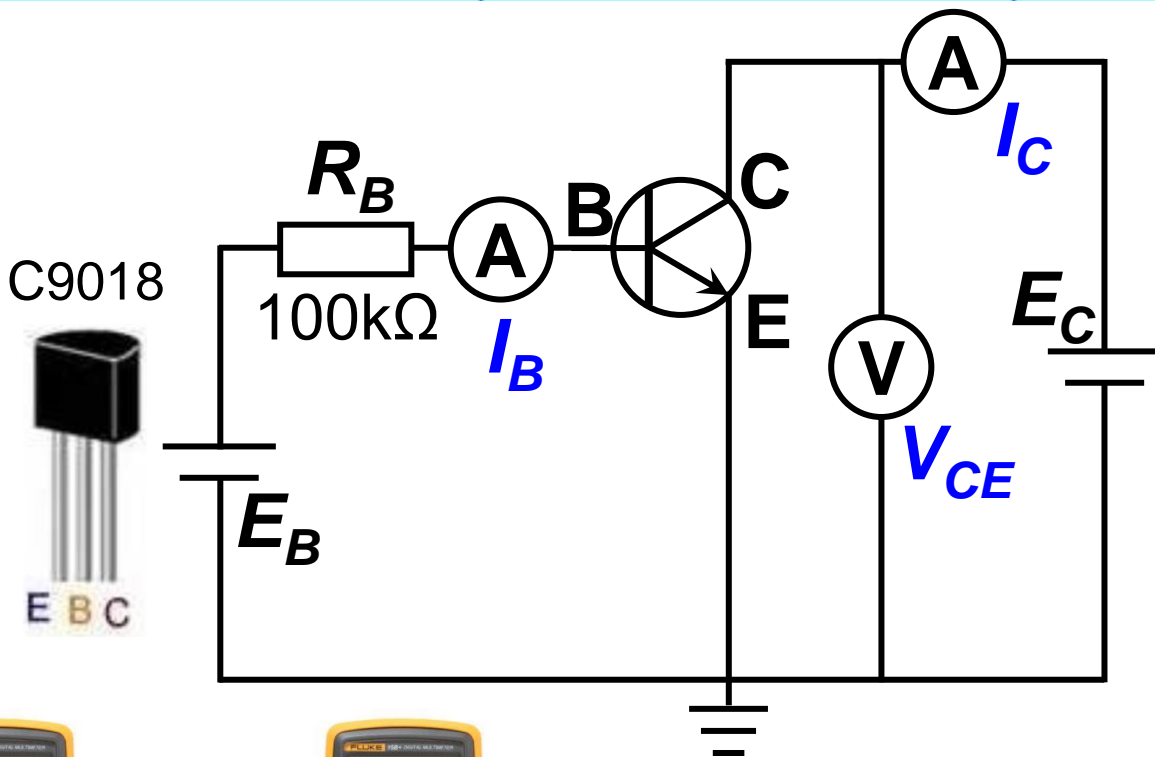
1. 调节  $E_B$  使

$$I_B = 20/40/60/80/100 \mu A$$

2. 调节  $E_C$  使

$$E_C = 0.1-1V \text{ 以及 } 1-10V$$

3. 测量  $V_{CE}$  和  $I_C$  并画图



电压源  
产生电压  $E_B$  和  $E_C$



手持式万用表1  
测量电压  $V_{CE}$



手持式万用表2  
测量电流  $I_C$



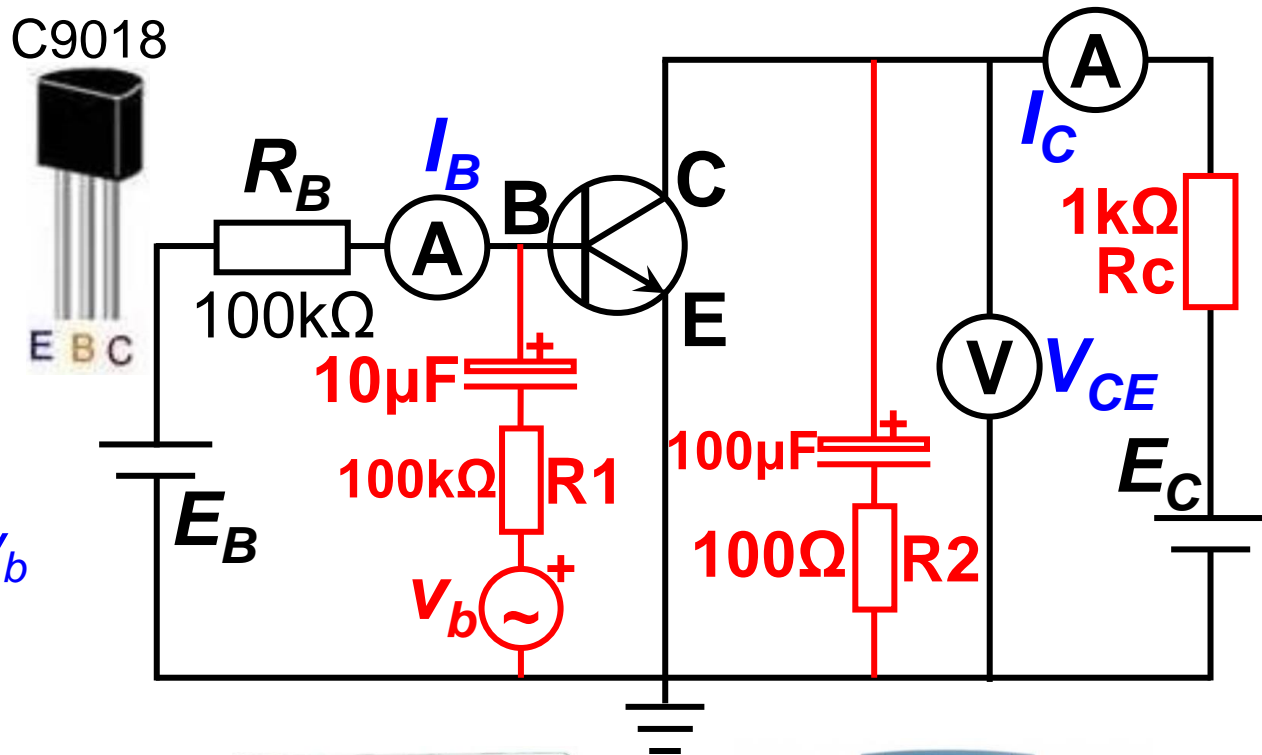
台式万用表  
测量电流  $I_B$

# 回顾



## ■ 放大特性测量

1. 使  $I_B = 60\mu A$ ,  $E_C = 15V$
2. 任意波形发生器输出  
1KHz、1V(2.5V, 5V,  
7.5V, 10V, 15V) 信号  $v_b$
3. 用示波器分别测量  
R1和R2的电压波形
4. 计算电流放大系数  $i_c/i_b$



任意波形发生器  
产生交流信号  $v_b$



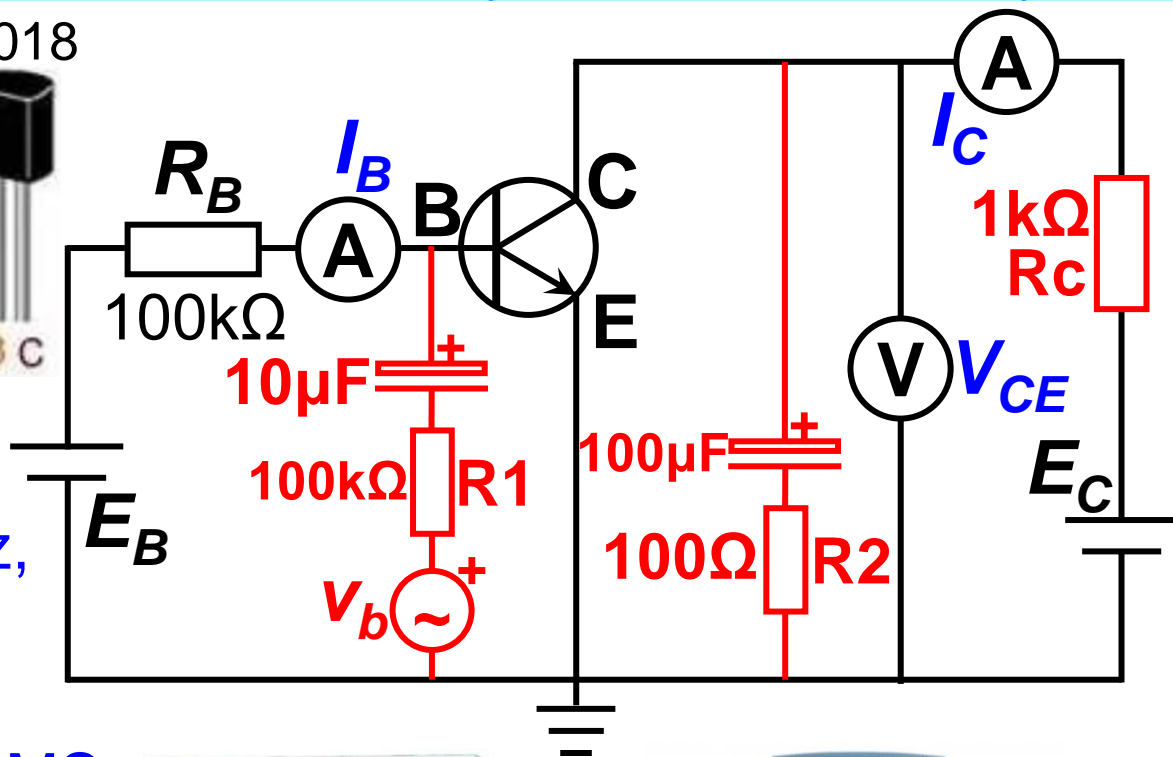
数字示波器  
测量R1和R2电压波形

# 回顾



## ■ 频率特性测量

C9018



任意波形发生器  
产生交流信号  $v_b$



数字示波器  
测量R1和R2电压波形

1. 使  $I_B = 60\mu A$ ,  $E_C = 15V$ ,  
 $v_b$  峰峰值 10V

2. 改变  $v_b$  的频率 (1KHz,  
10KHz, 100KHz, 250KHz,  
1MHz, 2MHz, 3MHz 等)

测量R2的电压波形和RMS

3. 计算电流放大系数  $h_{fe} = i_c / i_b$

4.  $h_{fe}$  下降为 0.7 为截止频率  $f_\beta$

5. 特征频率  $f_T = h_{fe} \times f_\beta$



# 直流和频率特性测量与分析



## ■ 直流特性实验内容

- 1、二极管的直流特性测量与分析
- 2、双极型晶体管的直流特性测量与分析
- 3、场效应晶体管的直流特性测量与分析

## ■ 频率特性实验内容

- 1、双极型晶体管的频率特性测量与分析
- 2、场效应晶体管的频率特性测量与分析

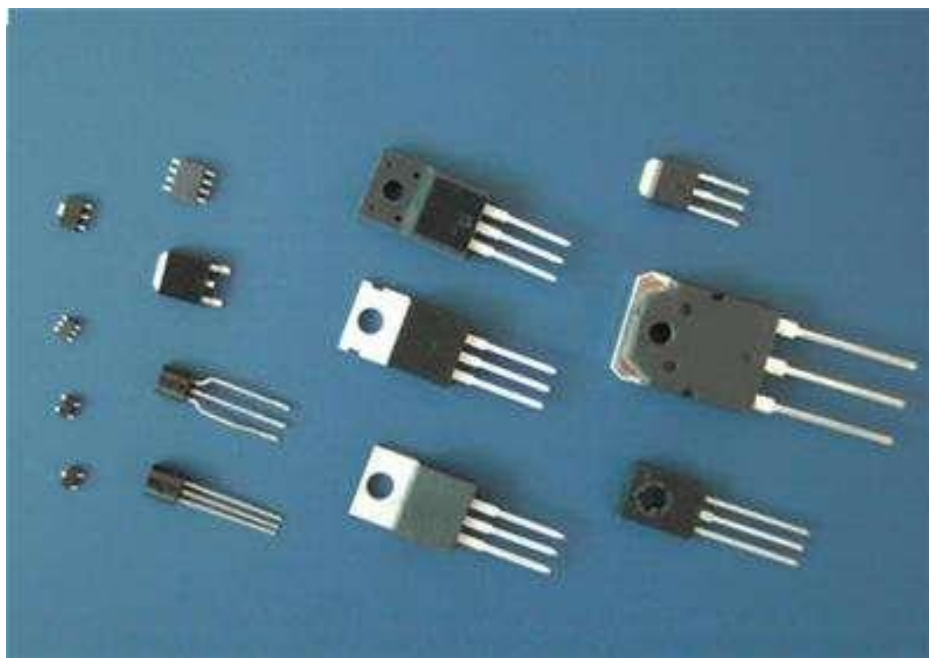


# 场效应管 (FET)



## ■ 场效应管 (Field Effect Transistor, FET)

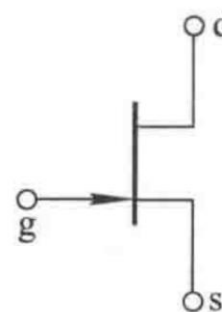
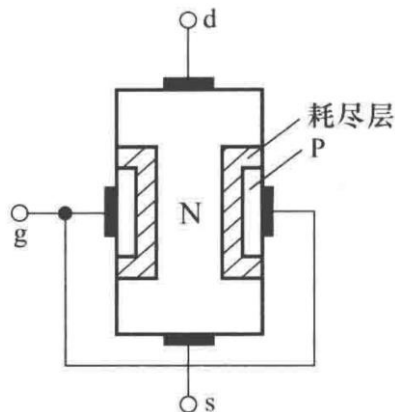
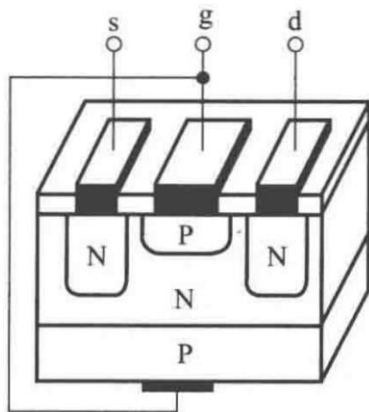
- 利用输入回路的电场效应来控制输出回路的电流的半导体器件
- 仅靠半导体中的多数载流子导电，又称单极型晶体管
- 体积小、重量轻、寿命长、噪音低、热稳定性好、耗电低...
- 场效应管是现代超大规模数字集成电路的基础器件



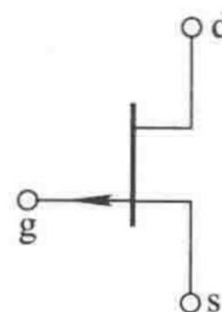
# 场效应管 (FET)



## ■ 结型场效应管 (Junction Field Effect Transistor, JFET)



N沟道管

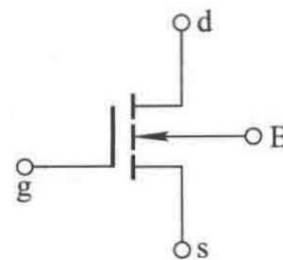
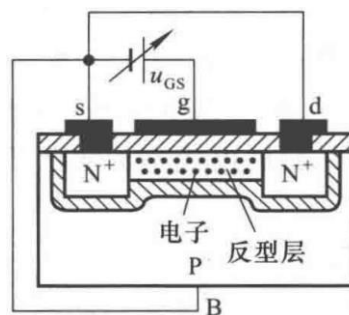
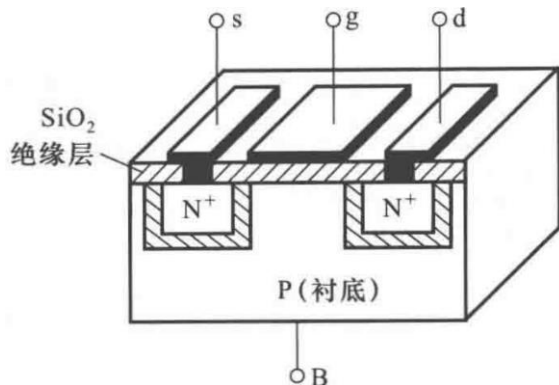


P沟道管

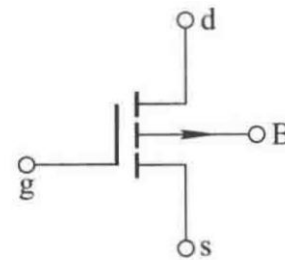
## ■ 绝缘栅型场效应管 (Insulated Gate Effect Transistor, IGFET)

### ■ MOS管 (Metal-Oxide-Semiconductor, MOS)

■ 栅-源间电阻更大 ( $10^{10}\Omega$ )、温度稳定性好、集成工艺简单

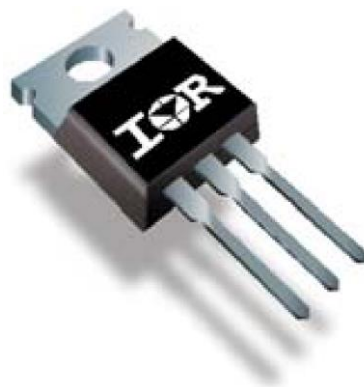
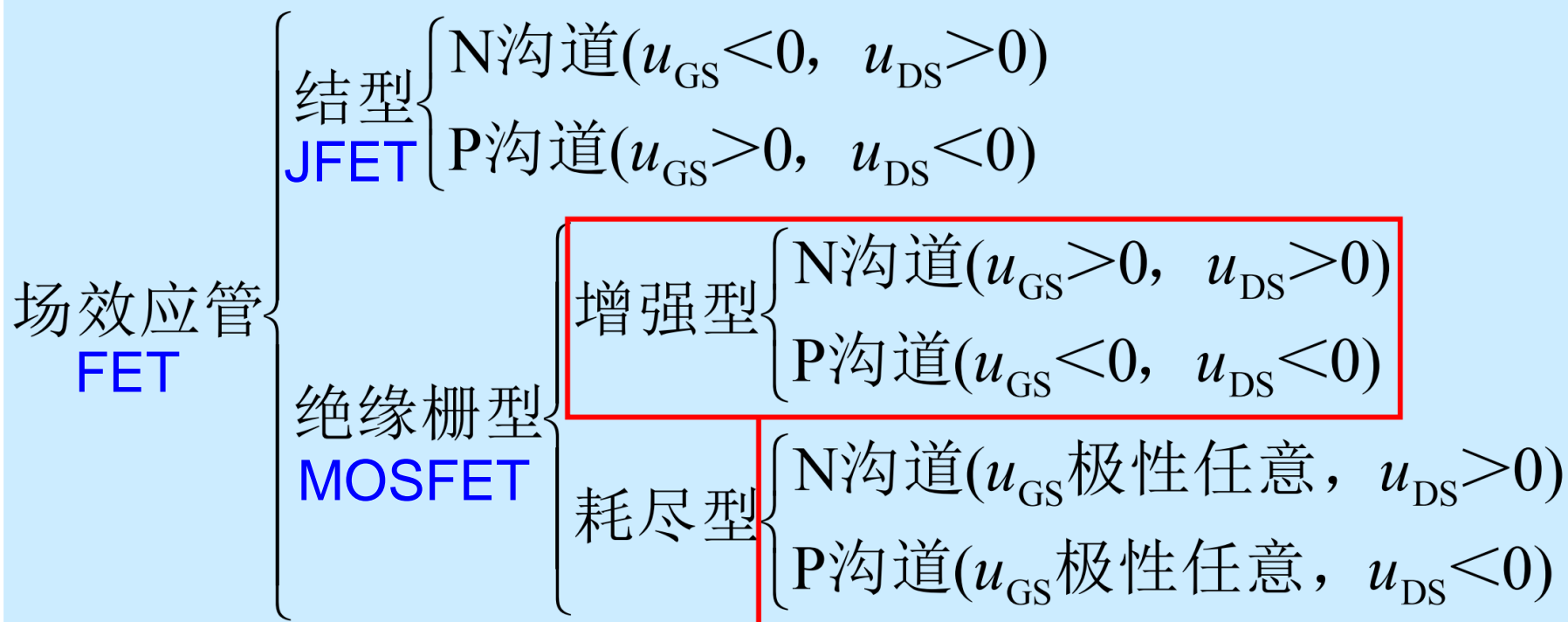
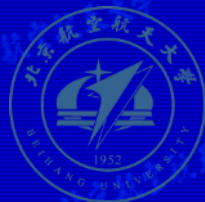


N沟道



P沟道

# 场效应管 (FET)



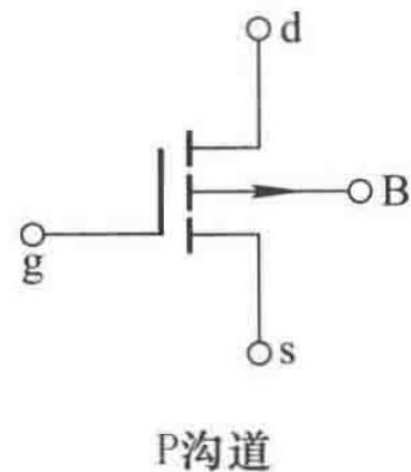
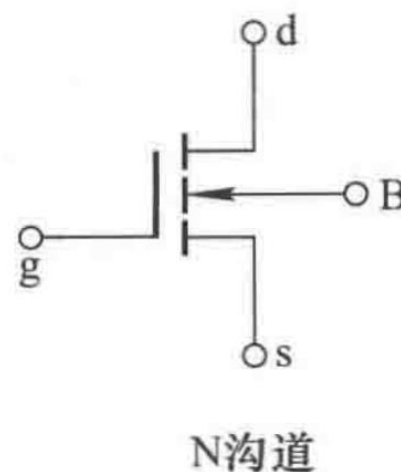
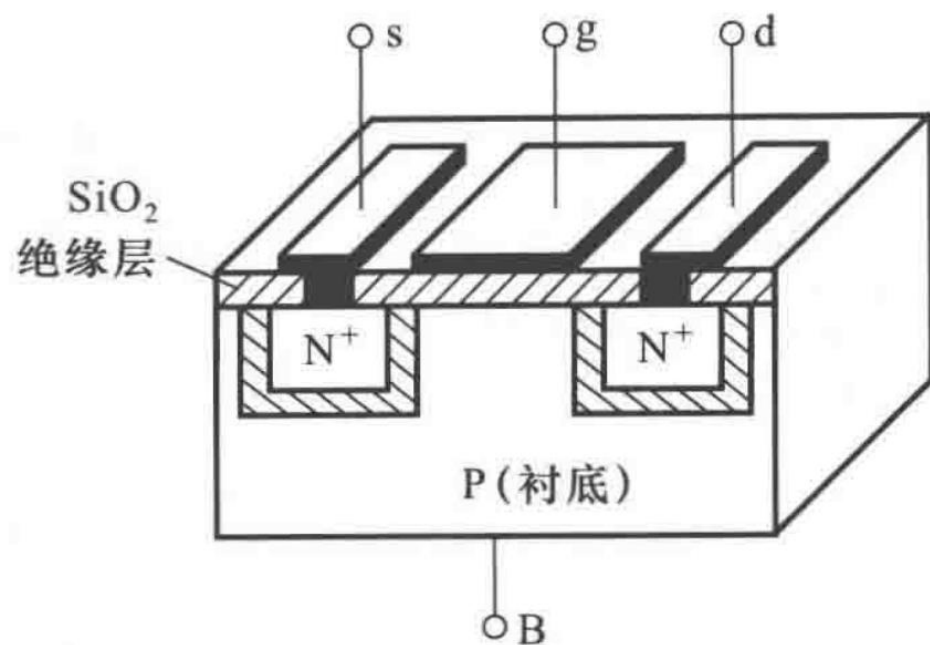
N沟道MOS管：  
IRF3205

# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管

- 一个低掺杂的P型硅片为衬底
- 两个高掺杂的N<sup>+</sup>区引出电极作为源极Source和漏极Drain
- 覆盖一层SiO<sub>2</sub>绝缘层
- 覆盖一层金属铝引出电极作为栅极Gate

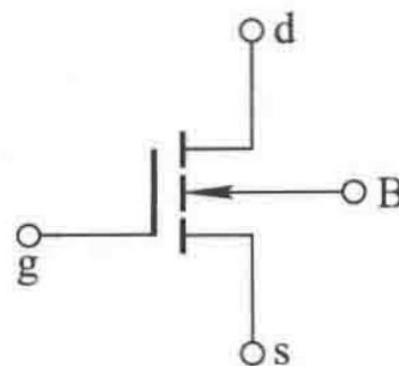
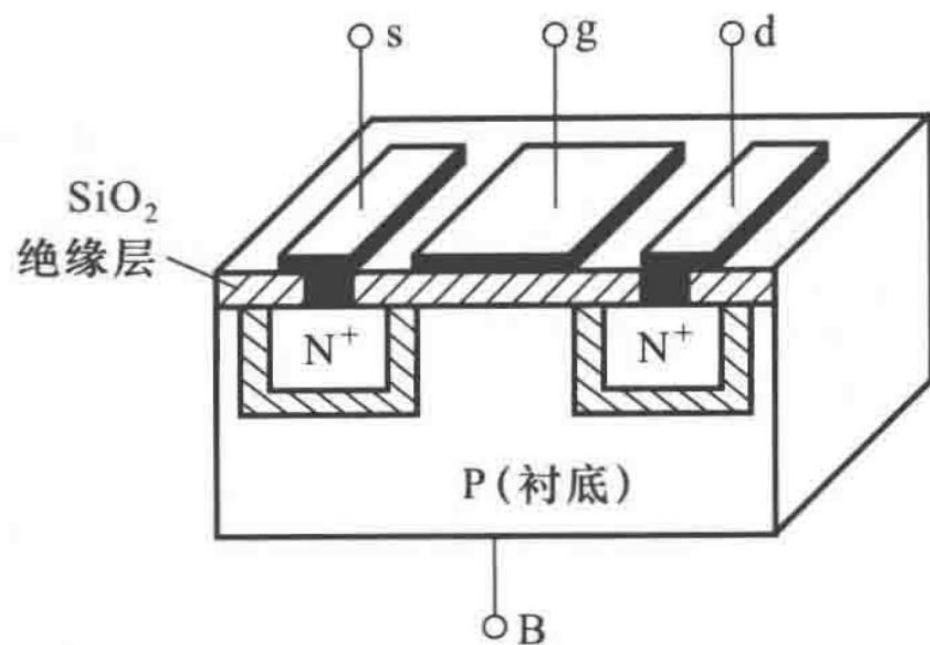


# 场效应管 (FET)

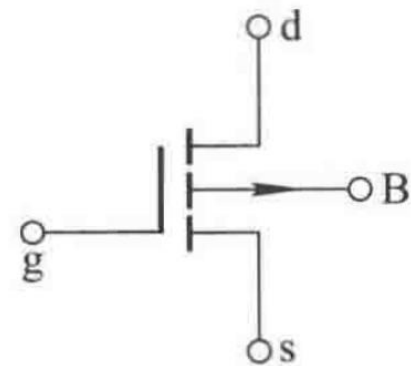


## ■ N沟道增强型MOS管工作原理1 ( $u_{GS}=0$ )

- 当栅-源之间不加电压 ( $u_{GS}=0$ ) 时，漏-源之间是两只背向的PN结，不存在导电沟道，因此即使漏-源之间加电压，也不会有漏极电流



N沟道



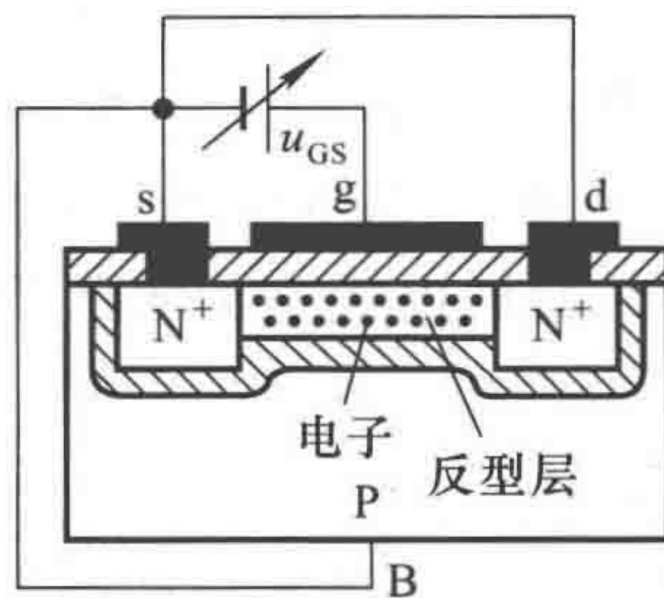
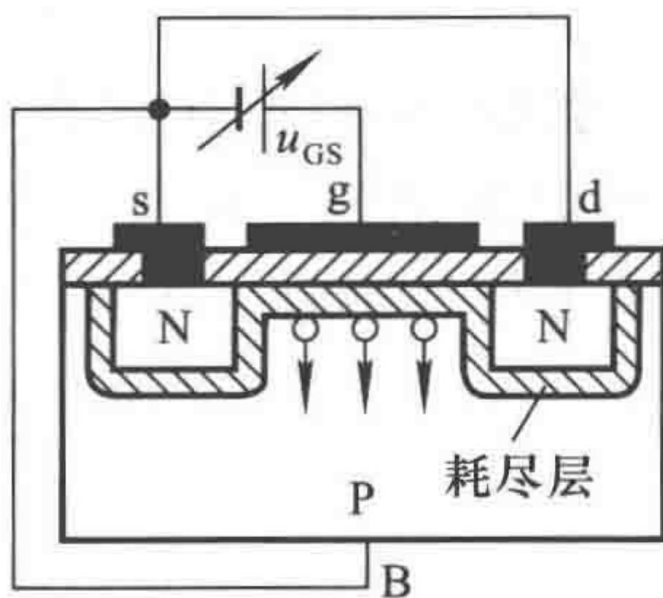
P沟道

# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管工作原理2 ( $u_{GS} > 0$ )

- 当栅-源之间施加电压 ( $u_{GS} > 0$ ) 且  $u_{DS} = 0$  时, 由于有  $\text{SiO}_2$  绝缘层存在, 栅极电流仍然为零
- 但是栅极金属层将排斥空穴, 留下负离子, 形成耗尽层
- 漏极与源极之间没有载流子 (空穴被排斥了, 负离子不能移动), 所以没有电流



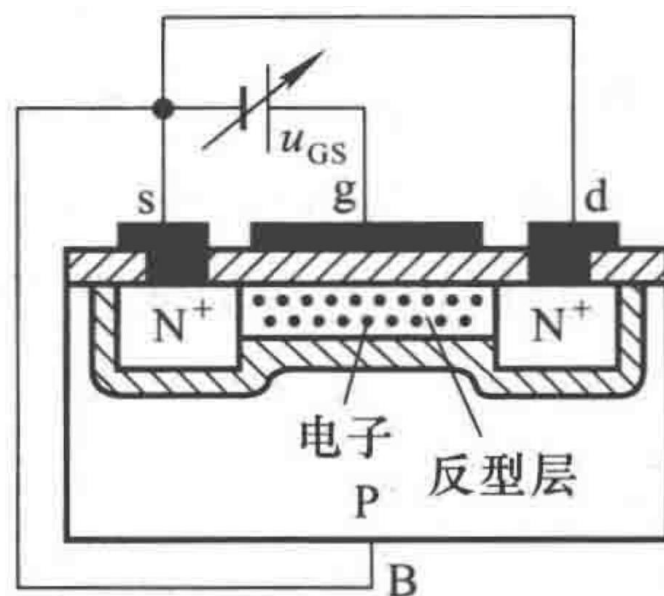
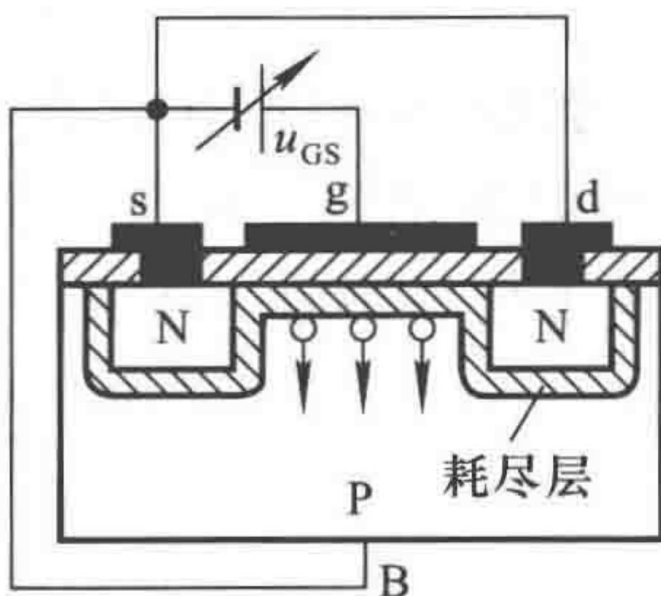


# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管工作原理2 ( $u_{GS} > 0$ )

- 当 $u_{GS} > 0$ 增大时，一方面耗尽层增宽；另一方面氧化物-硅界面处的电位增高，衬底的电子逐渐被吸引到栅极氧化物下方，形成一个N型薄层，称为反型层，从而构成漏-源之间的导电沟道。
- 产生反型层所需的临界电压被称为开启电压 $U_{GS(th)}$



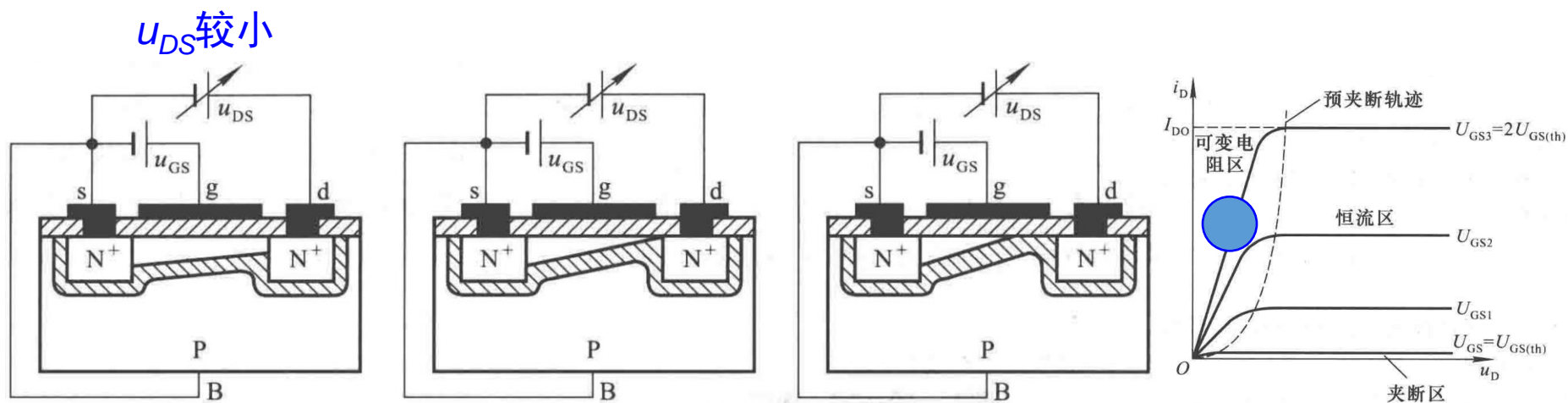


# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管工作原理3 ( $u_{GS} > U_{GS(th)}$ )

- 当  $u_{GS} > U_{GS(th)}$  时，漏-源之间电压  $u_{DS}$  可以产生漏极电流  $i_D$
- 当  $u_{DS}$  较小时，沟道沿源-漏方向逐渐变窄但未出现夹断，此时  $i_D$  随  $u_{DS}$  线性增大（可变电阻区）
- 此时的输出特性曲线近似为直线，直线斜率的倒数就是 d-s 之间的等效电阻，并可以通过改变  $u_{GS}$  的大小（压控）改变 d-s 电阻

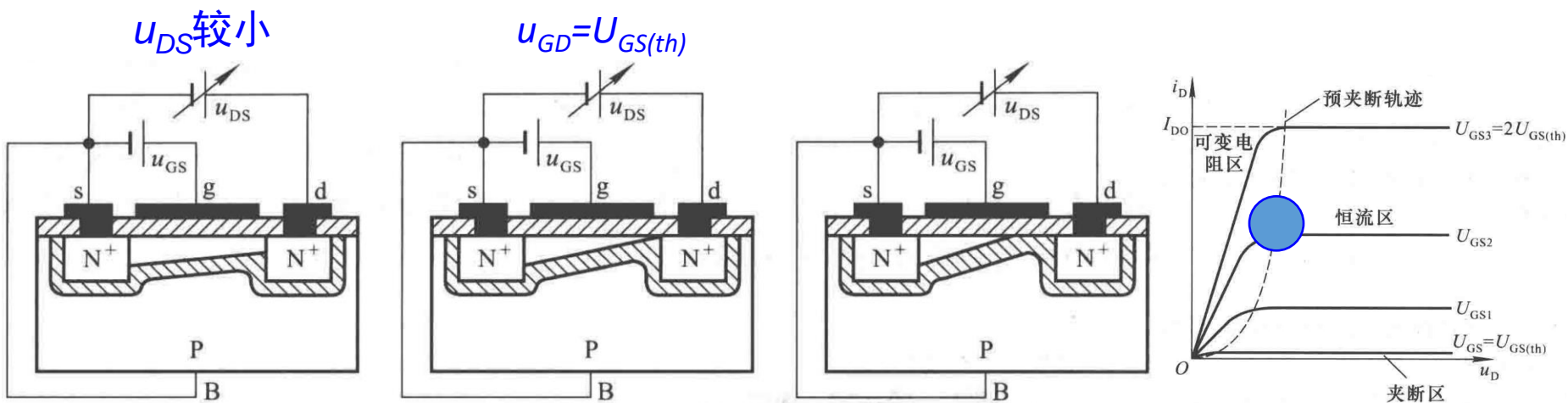


# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管工作原理3 ( $u_{GS} > U_{GS(th)}$ )

- 当  $u_{GS} > U_{GS(th)}$  时, 漏-源之间电压  $u_{DS}$  可以产生漏极电流  $i_D$
- 当  $u_{DS}$  增大到使  $u_{GD} = U_{GS(th)}$  时, 沟道在漏极一侧出现夹断点, 称为预夹断。
- 把不同  $u_{GS}$  下的预夹断点连起来就是预夹断轨迹

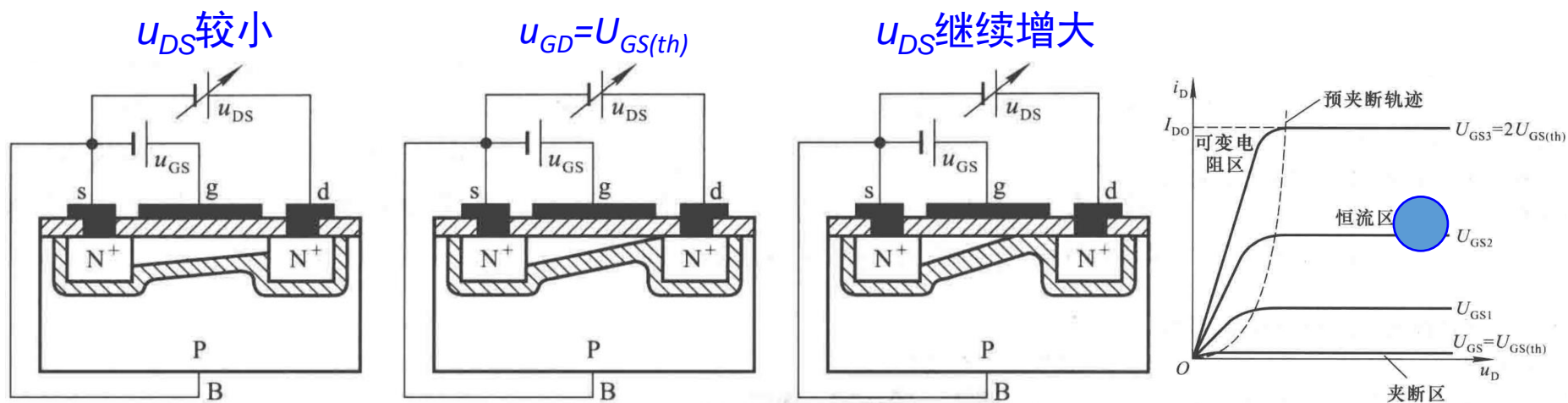


# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管工作原理3 ( $u_{GS} > U_{GS(th)}$ )

- 当  $u_{GS} > U_{GS(th)}$  时，漏-源之间电压  $u_{DS}$  可以产生漏极电流  $i_D$
- 当  $u_{DS}$  继续增大时，夹断区延长，此时  $u_{DS}$  增大的部分几乎全部用来克服夹断区对漏极电流  $i_D$  的阻力。
- 因此，此时  $i_D$  几乎不随  $u_{DS}$  的增大而变化，即为恒流区
- 恒流区的电流  $i_D$  几乎仅取决于  $u_{GS}$  的，此时可以把  $i_D$  看作为电压  $u_{GS}$  控制的电流源



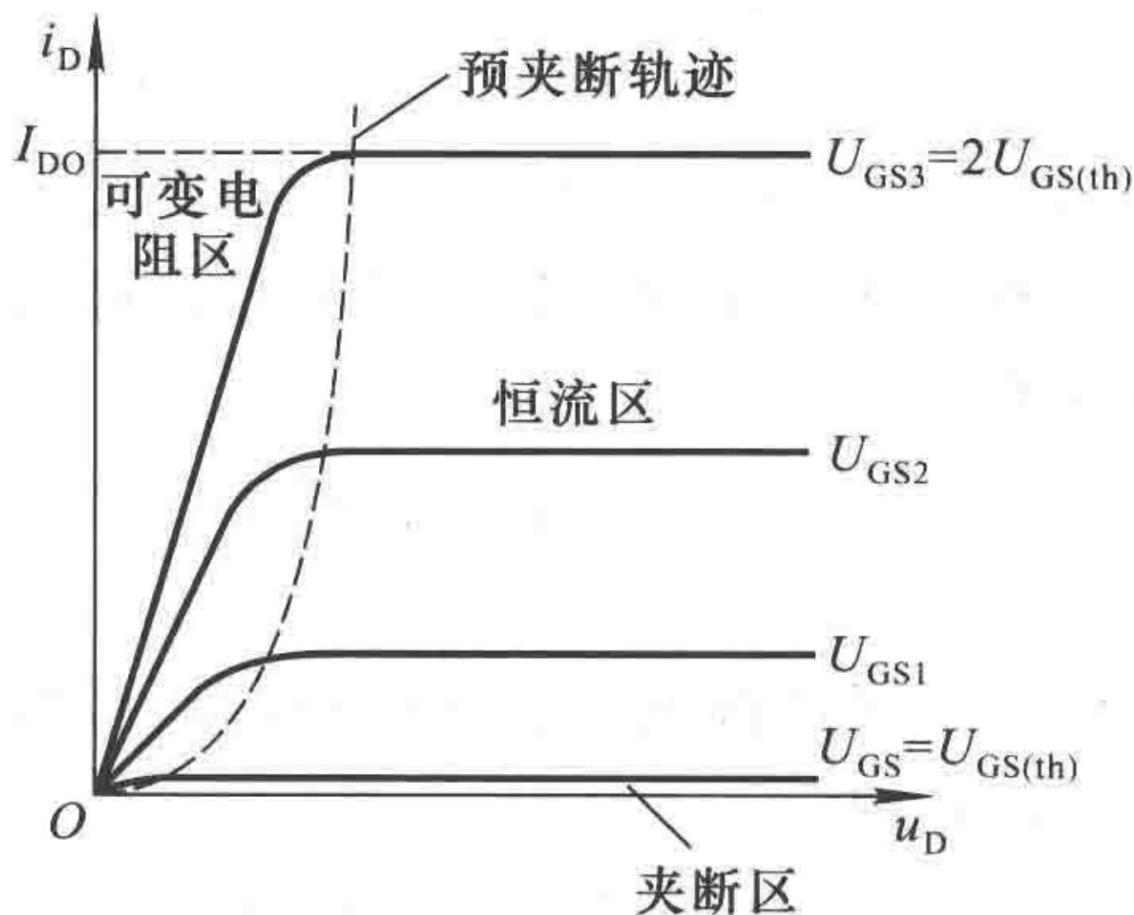
# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管输出特性曲线

### ■ 可变电阻区、恒流区、夹断区

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



# 场效应管 (FET)

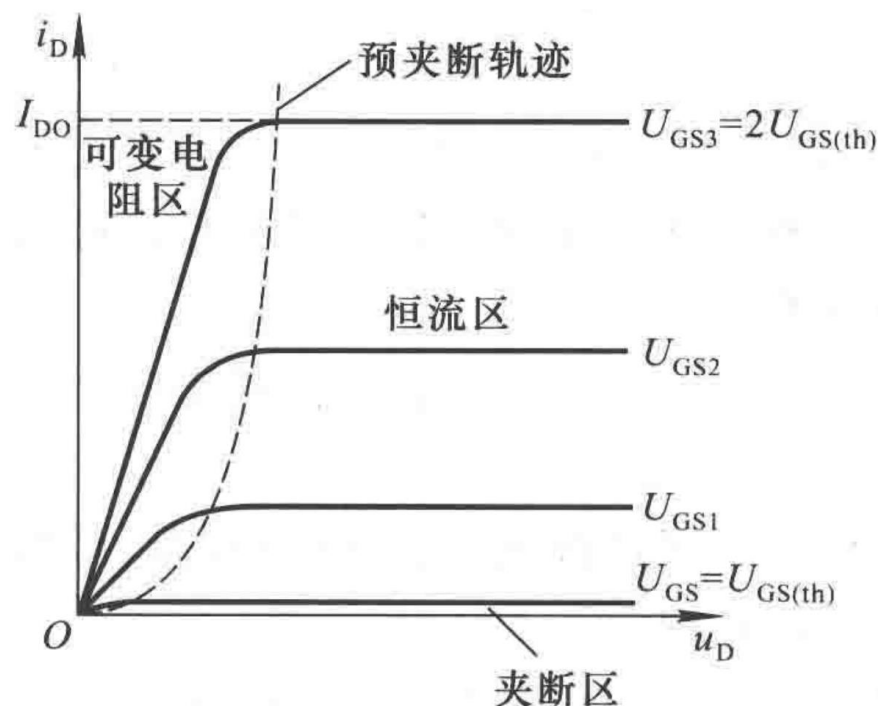


## ■ N沟道增强型MOS管输出特性曲线

- 低频跨导是漏-源电压一定时，栅极电压增量与由此产生的漏电流增量之比的倒数，即

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

- 跨导表征栅电压对漏电流的控制能力，是衡量场效应管放大作用的重要参数，类似于双极型晶体管的电流放大系数

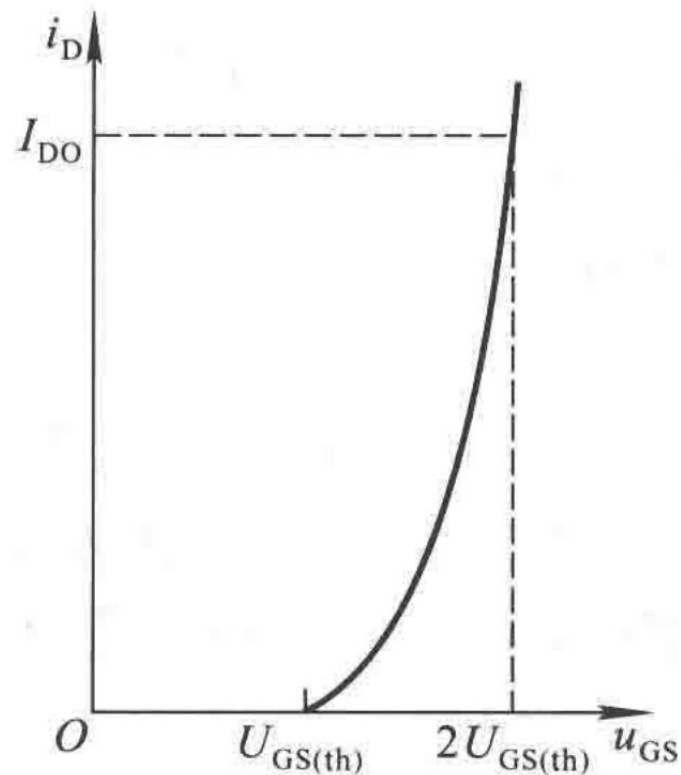
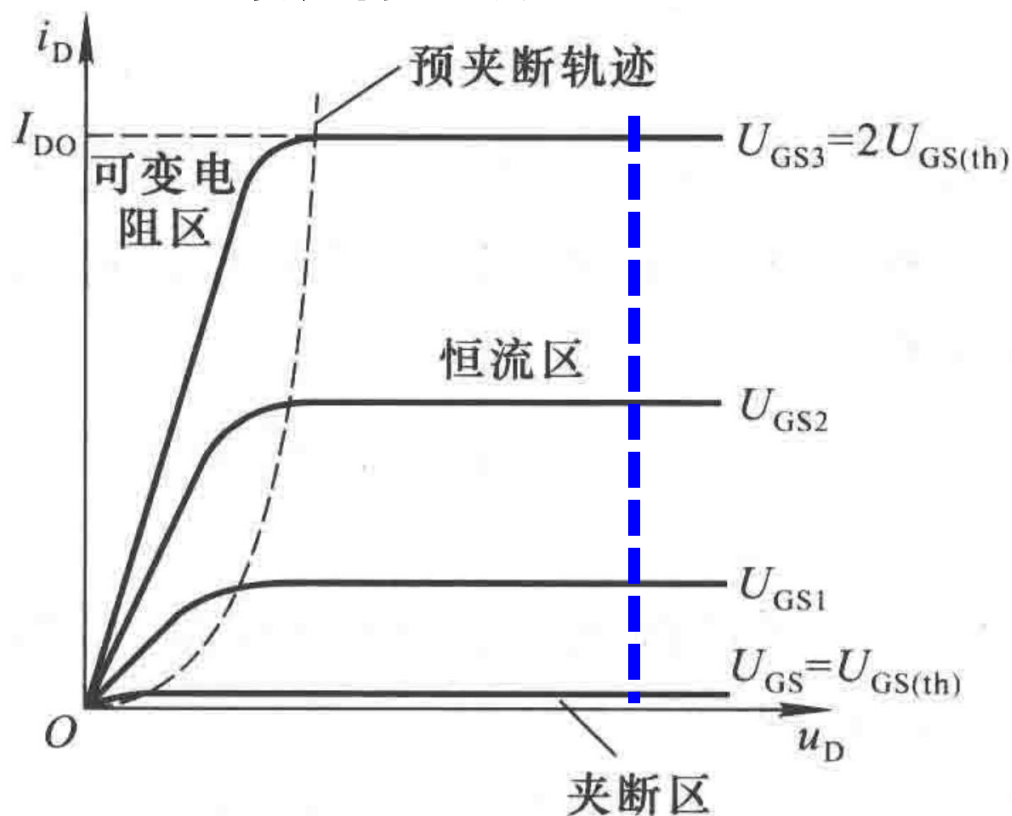


# 场效应管 (FET)



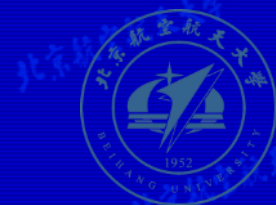
## ■ N沟道增强型MOS管转移特性曲线

- 当场效应管工作在恒流区时，由于输出特性曲线可近似看为一组平行线，所以可以用一条转移特性曲线来代替恒流区的所有曲线



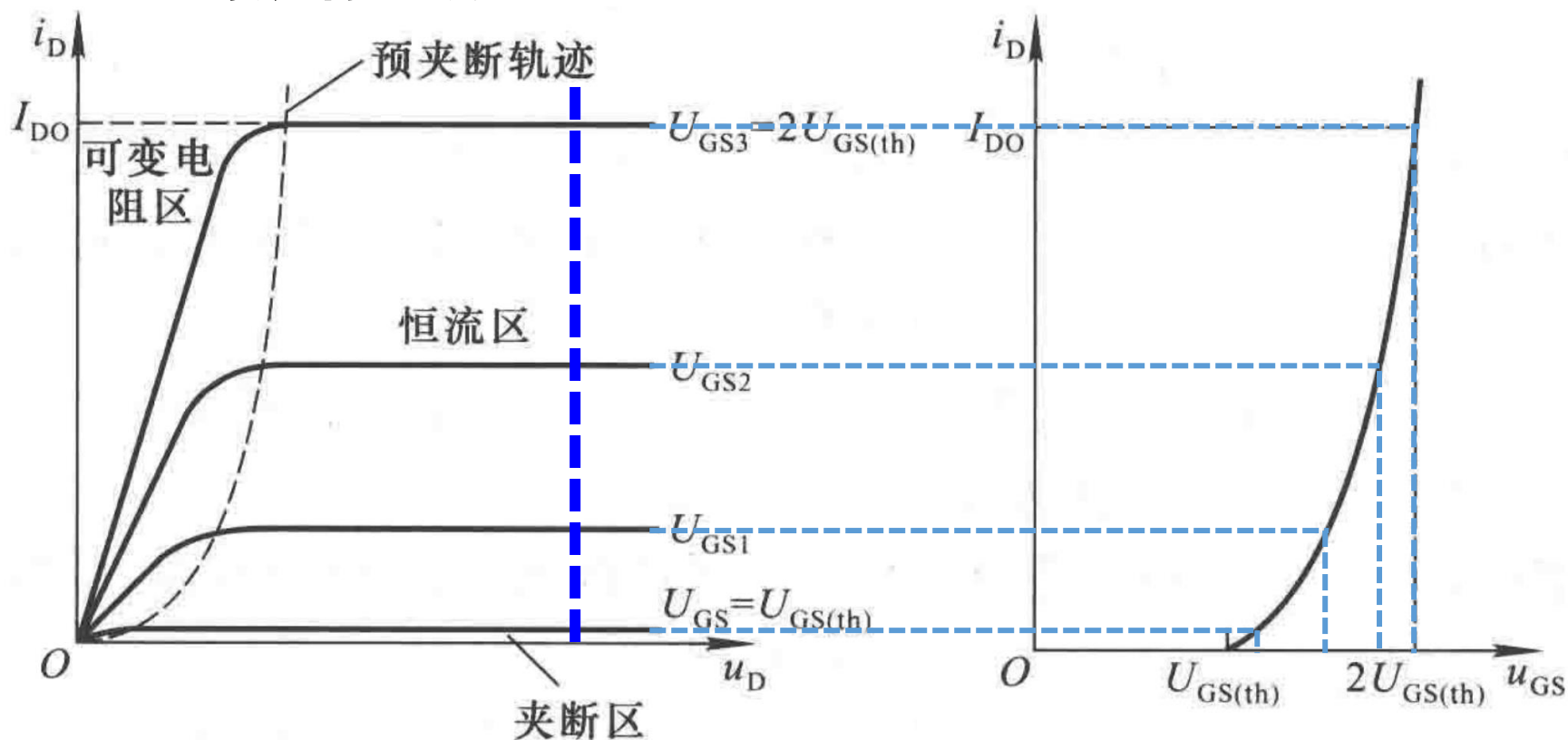


# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管转移特性曲线

- 当场效应管工作在恒流区时，由于输出特性曲线可近似看为一组平行线，所以可以用一条转移特性曲线来代替恒流区的所有曲线



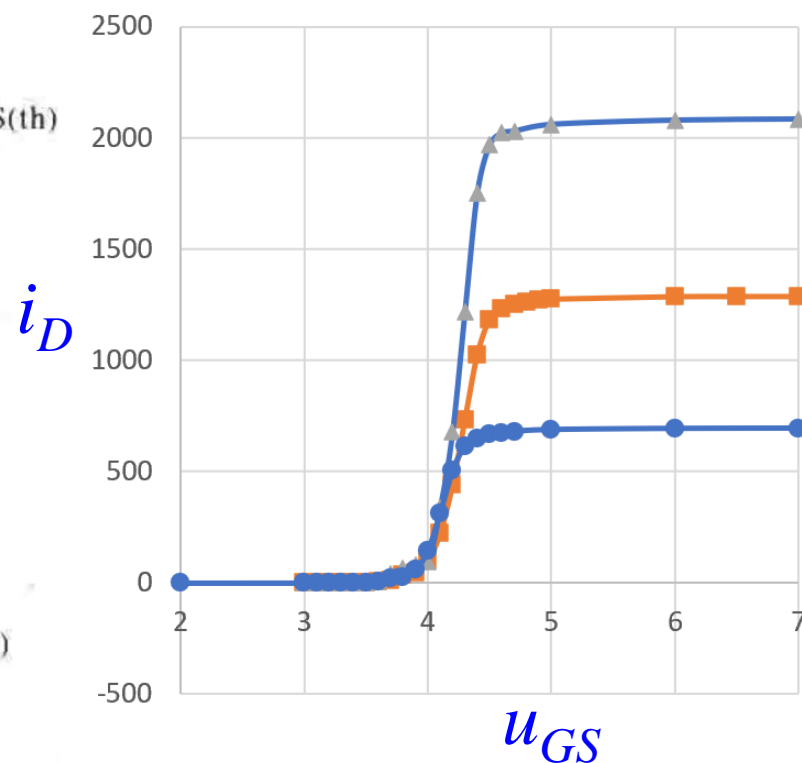
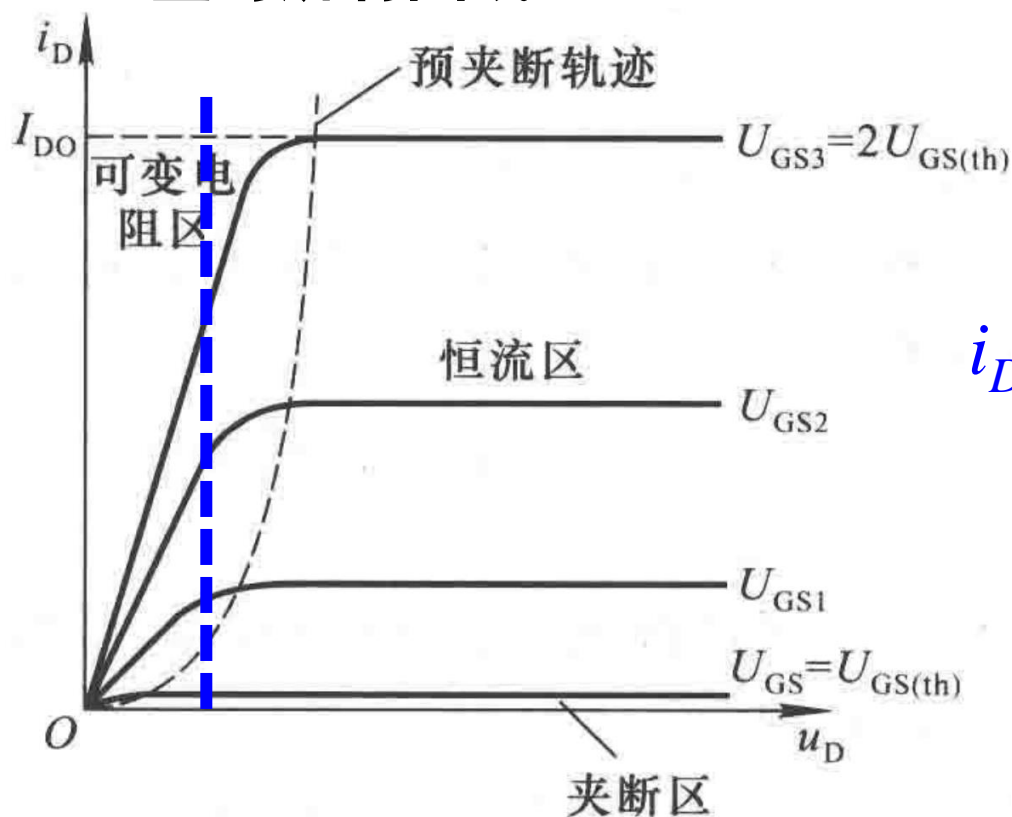


# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管转移特性曲线

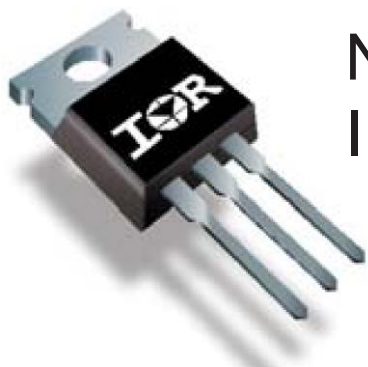
- 当场效应管工作在恒流区时，由于输出特性曲线可近似看为一组平行线，所以可以用一条转移特性曲线来代替恒流区的所有曲线



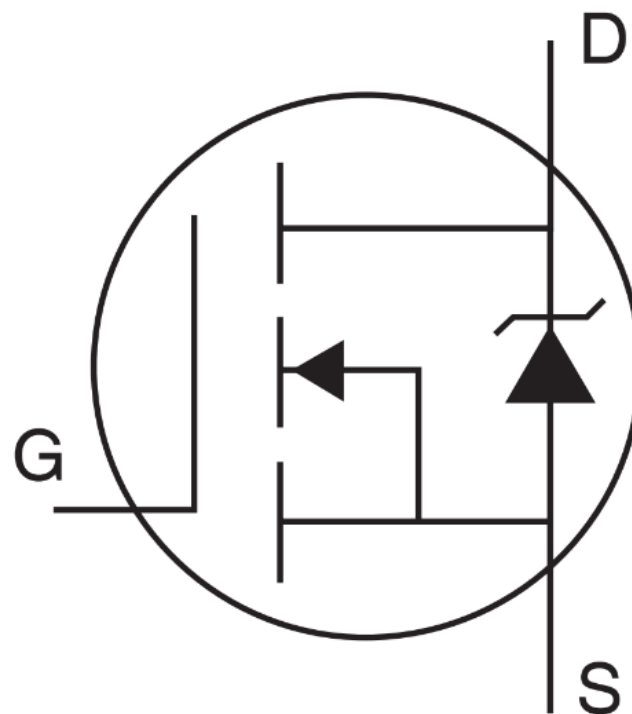
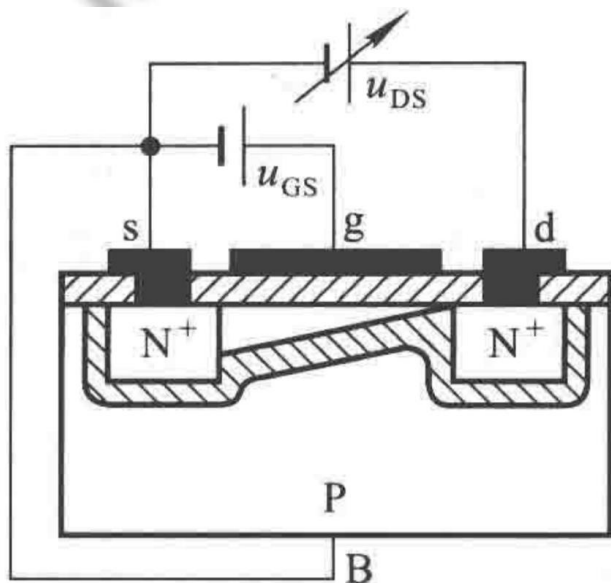
# 场效应管 (FET)



## ■ N沟道增强型MOS管s-d二极管伏安特性曲线



N沟道MOS管：  
IRF3205



# MOS管的s-d伏安特性曲线

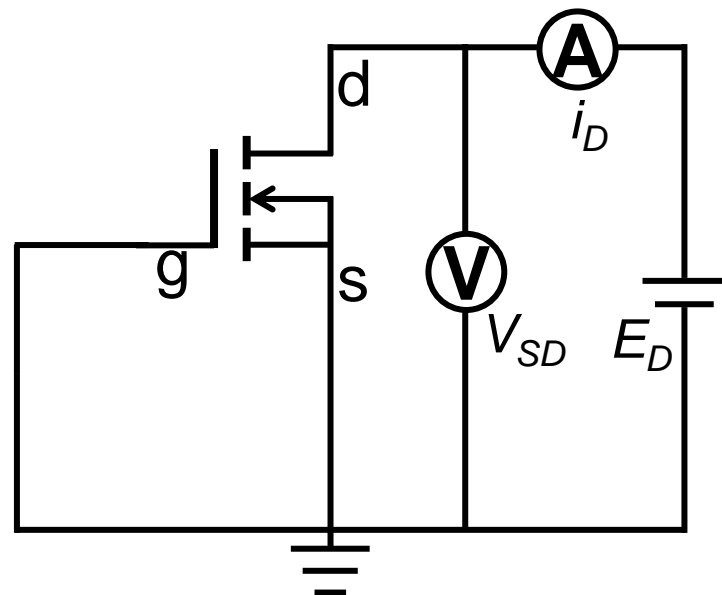


## 实验一：s-d伏安特性曲线

1. 调节  $E_D$  使

$$E_D = 0 - 1.5V$$

2. 测量  $V_{SD}$  和  $i_D$  并画图



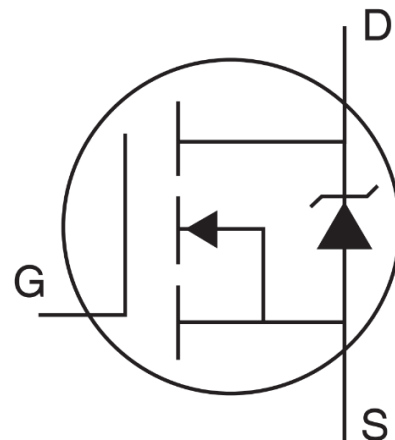
电压源  
产生电压  $E_D$



手持式万用表2  
测量电压  $V_{SD}$



台式万用表  
测量电流  $i_D$



# MOS管的转移特性曲线



## 实验一：转移特性曲线

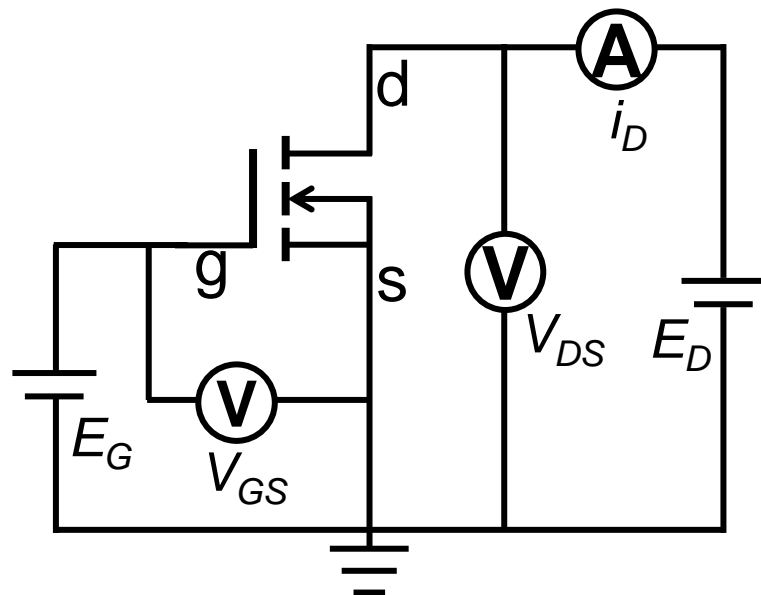
1. 调节  $E_D$  使

$$E_D = 0.5V / 1.0V / 1.5V$$

2. 调节  $E_G$  使

$$E_G = 0.1 - 7V \text{ (3-5V 多取点)}$$

3. 测量  $V_{GS}$  和  $i_D$  并画图



电压源  
产生电压  $E_G$  和  $E_D$



手持式万用表1  
测量电压  $V_{GS}$



手持式万用表2  
测量电压  $V_{DS}$



台式万用表  
测量电流  $i_D$

# 思考题



## ■思考题：

1. 请列举场效应管与双极型晶体管的几个不同点。
2. 请根据转移特性曲线图画出输出特性曲线中的恒流区曲线示意图。

# MOS管的s-d伏安特性曲线

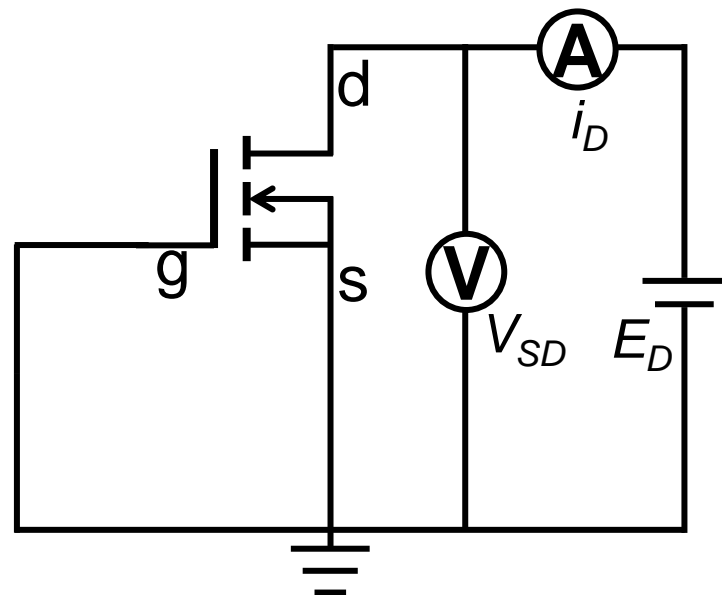


## 实验一：s-d伏安特性曲线

1. 调节  $E_D$  使

$$E_D = 0 - 1.5V$$

2. 测量  $V_{SD}$  和  $i_D$  并画图



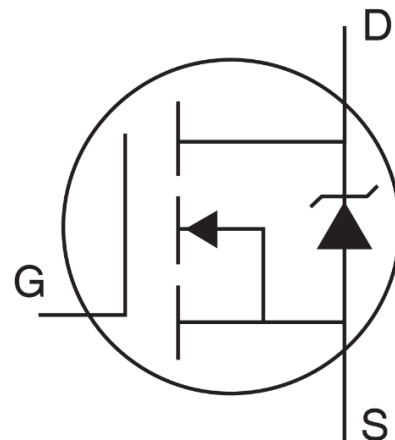
电压源  
产生电压  $E_D$



手持式万用表2  
测量电压  $V_{SD}$



台式万用表  
测量电流  $i_D$





# MOS管的转移特性曲线



## 实验一：转移特性曲线

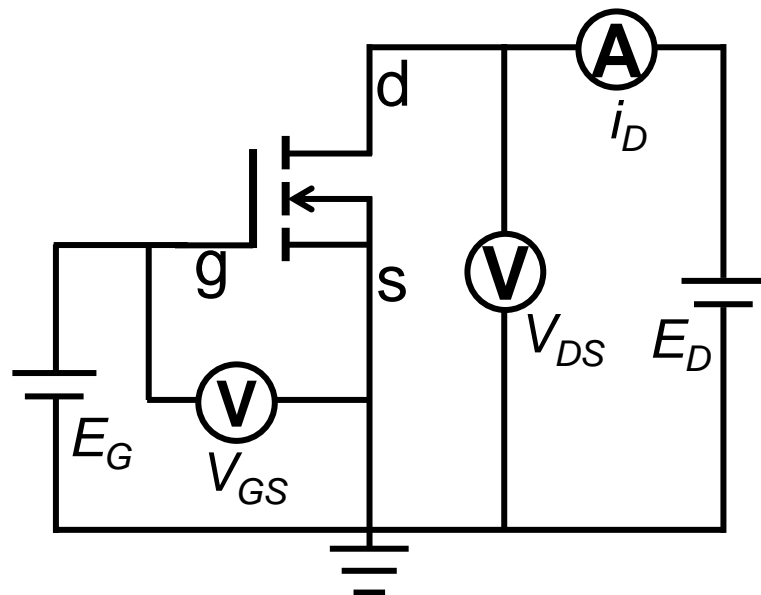
1. 调节  $E_D$  使

$$E_D = 0.5V / 1.0V / 1.5V$$

2. 调节  $E_G$  使

$$E_G = 0.1 - 7V \text{ (3-5V 多取点)}$$

3. 测量  $V_{GS}$  和  $i_D$  并画图



电压源  
产生电压  $E_G$  和  $E_D$



手持式万用表1  
测量电压  $V_{GS}$



手持式万用表2  
测量电压  $V_{DS}$



台式万用表  
测量电流  $i_D$



谢谢！