

第一章 常用半导体器件(2)

第一章 常用半导体器件

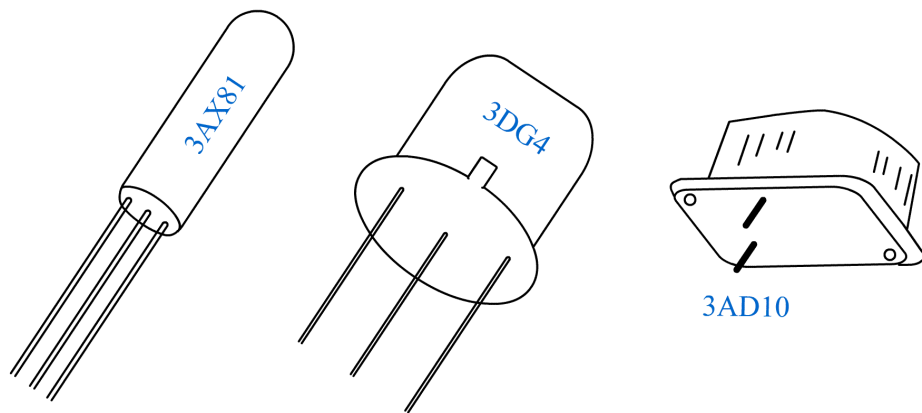
- 1.1 半导体基础知识
 - 1.2 二极管
 - 1.3 二极管的基本应用电路
 - 1.4 稳压管
 - 1.5 其他类型的二极管
 - 1.6 三极管
 - 1.7 场效应管
-

1.6 三极管

- ❖ 1.6.1 晶体管的结构及类型
 - ❖ 1.6.2 三极管的电流放大作用
 - ❖ 1.6.3 三极管的共射特性曲线
 - ❖ 1.6.4 三极管的主要参数
-

1.6 三极管

又称半导体三极管、晶体三极管，或简称晶体管。



X: 低频小功率管

D: 低频大功率管

G: 高频小功率管

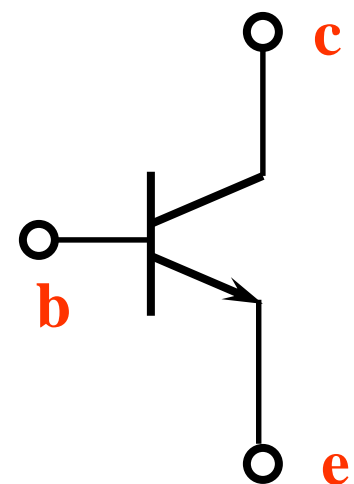
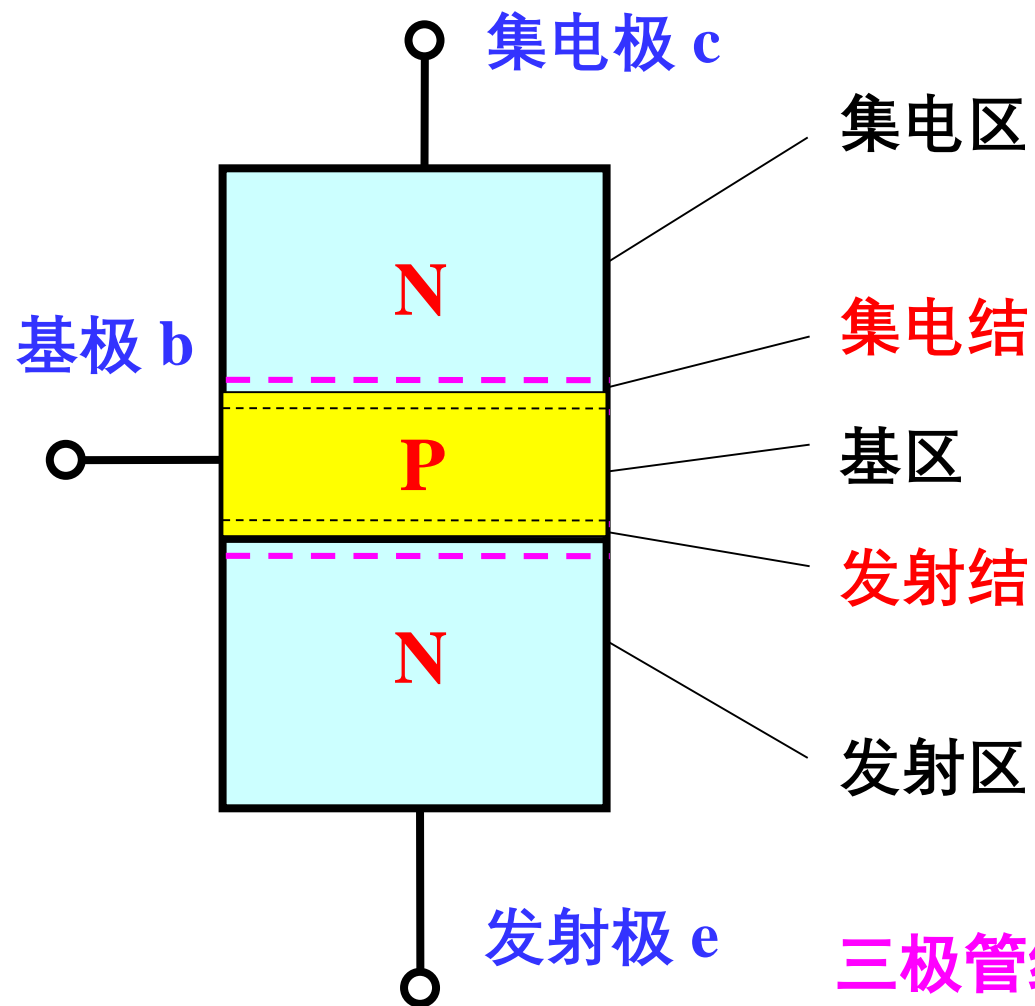
A: 高频大功率管

图 1.6.1 三极管的外形

三极管有两种导电类型：**NPN** 型和 **PNP** 型。

主要以 **NPN** 型为例进行讨论。

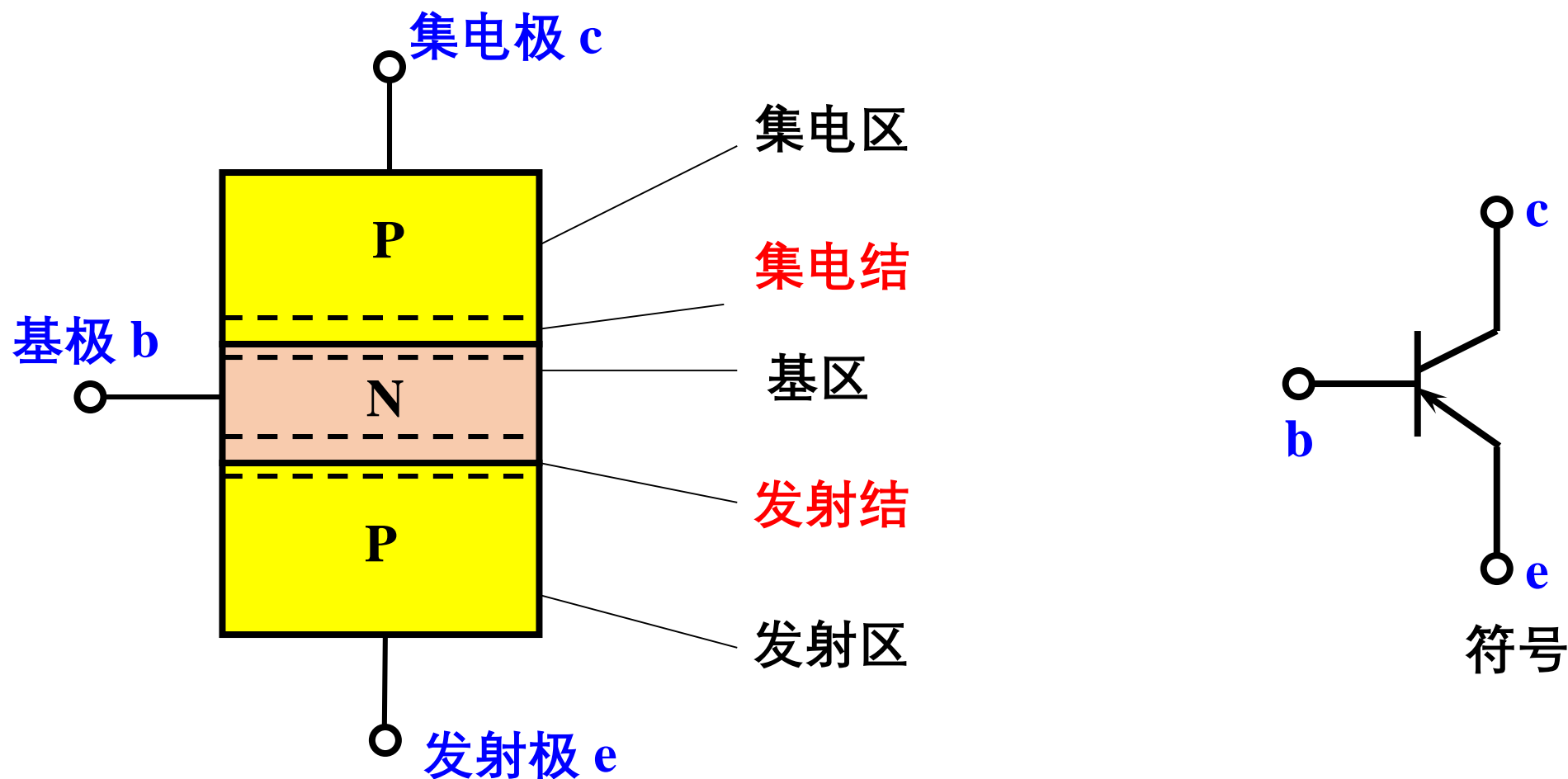
1.6.1 三极管的结构及类型



符号

三极管结构示意图和符号(NPN 型)

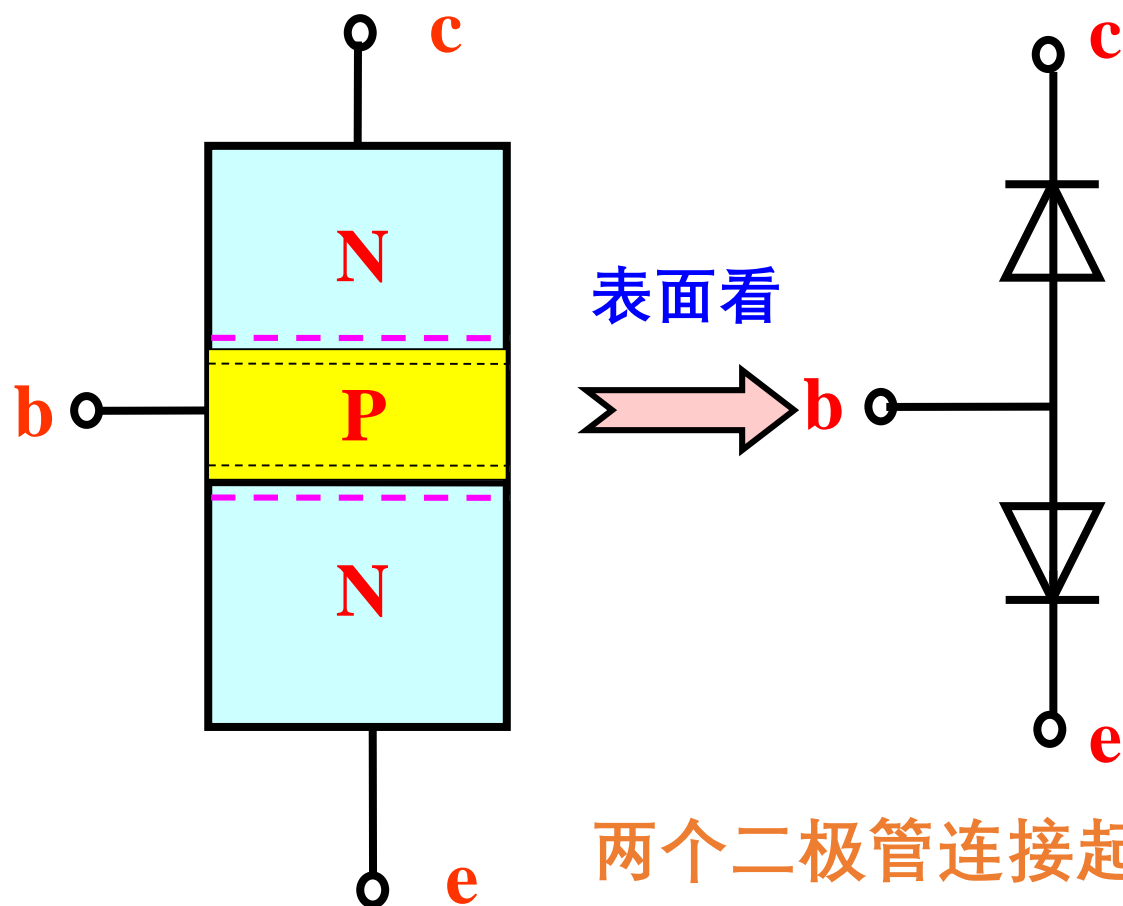
1.6.1 三极管的结构及类型



三极管结构示意图和符号(PNP 型)

1.6.2 三极管的电流放大作用

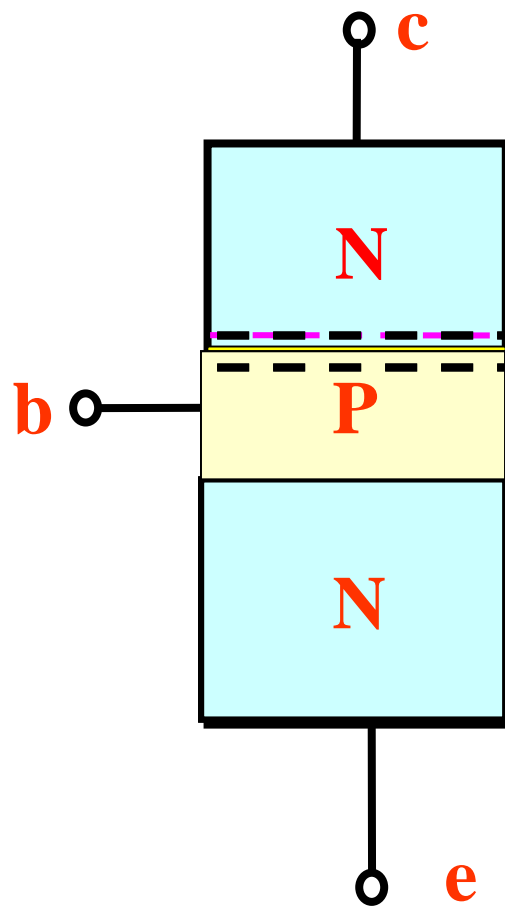
以 NPN 型三极管为例讨论



三极管若实现放大，
必须从三极管内部
结构和外部所加电
源的极性来保证。

两个二极管连接起来就是三极管吗？

1.6.2 三极管的电流放大作用



三极管内部结构要求：

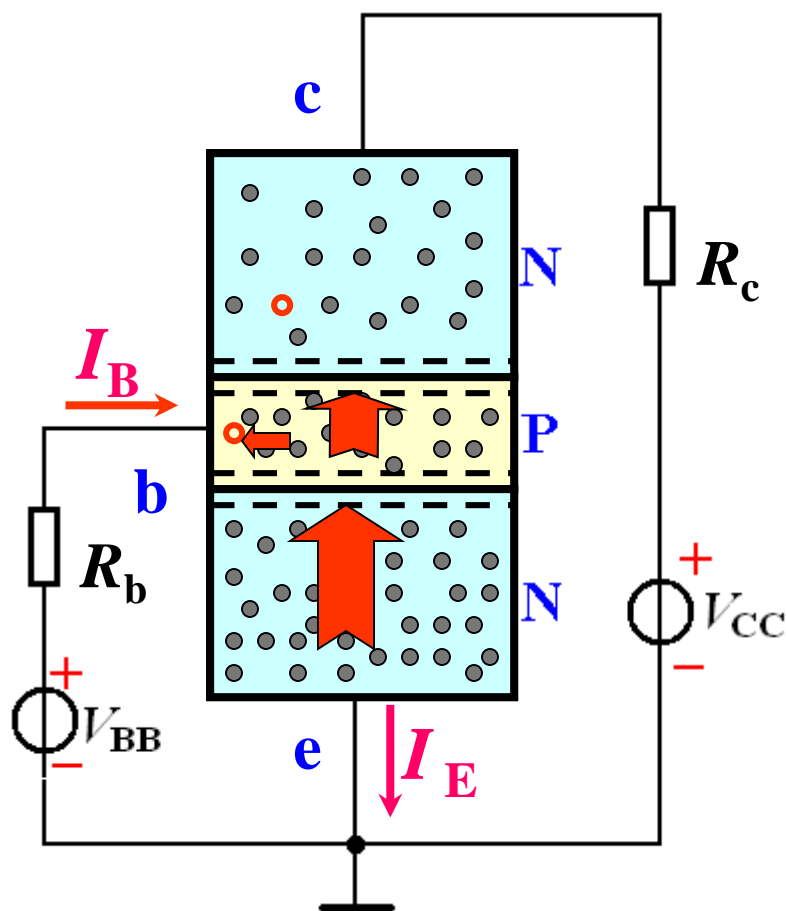
1. 发射区高掺杂
2. 基区做得很薄，通常只有几微米到几十微米。而且掺杂较少。
3. 集电结面积大

三极管放大的外部条件：

发射结正偏，集电结反偏

1.6.2 三极管的电流放大作用

一、晶体管内部载流子的运动



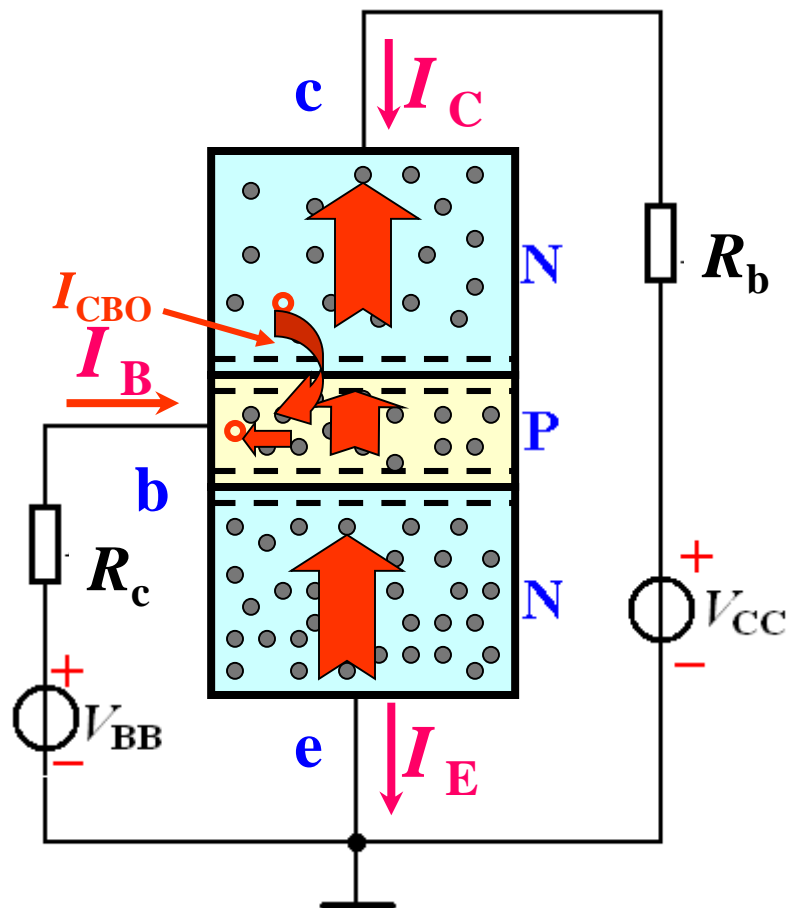
1.发射结加正向电压，扩散运动形成发射极电流
发射区的电子越过发射结扩散到基区，基区的空穴扩散到发射区—形成发射极电流 I_E （基区多数载流子数目较少，空穴电流可忽略）。

2.扩散到基区的自由电子与空穴的复合运动形成基极电流

电子到达基区，少数与空穴复合形成基极电流 I_B ，复合掉的空穴由 V_{BB} 补充。

多数电子在基区继续扩散，到达集电结的一侧。

1.6.2 三极管的电流放大作用



晶体管内部载流子的运动

3.集电结加反向电压，漂移运动形成集电极电流 I_C

集电结反偏，有利于收集基区扩散过来的电子而形成集电极电流 I_C 。

其能量来自外接电源 V_{CC} 。

另外，集电区和基区的少子在外电场的作用下将进行漂移运动而形成反向饱和电流，用 I_{CBO} 表示。

1.6.2 三极管的电流放大作用

二、晶体管的电流分配关系

$$I_C = I_{Cn} + I_{CBO}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

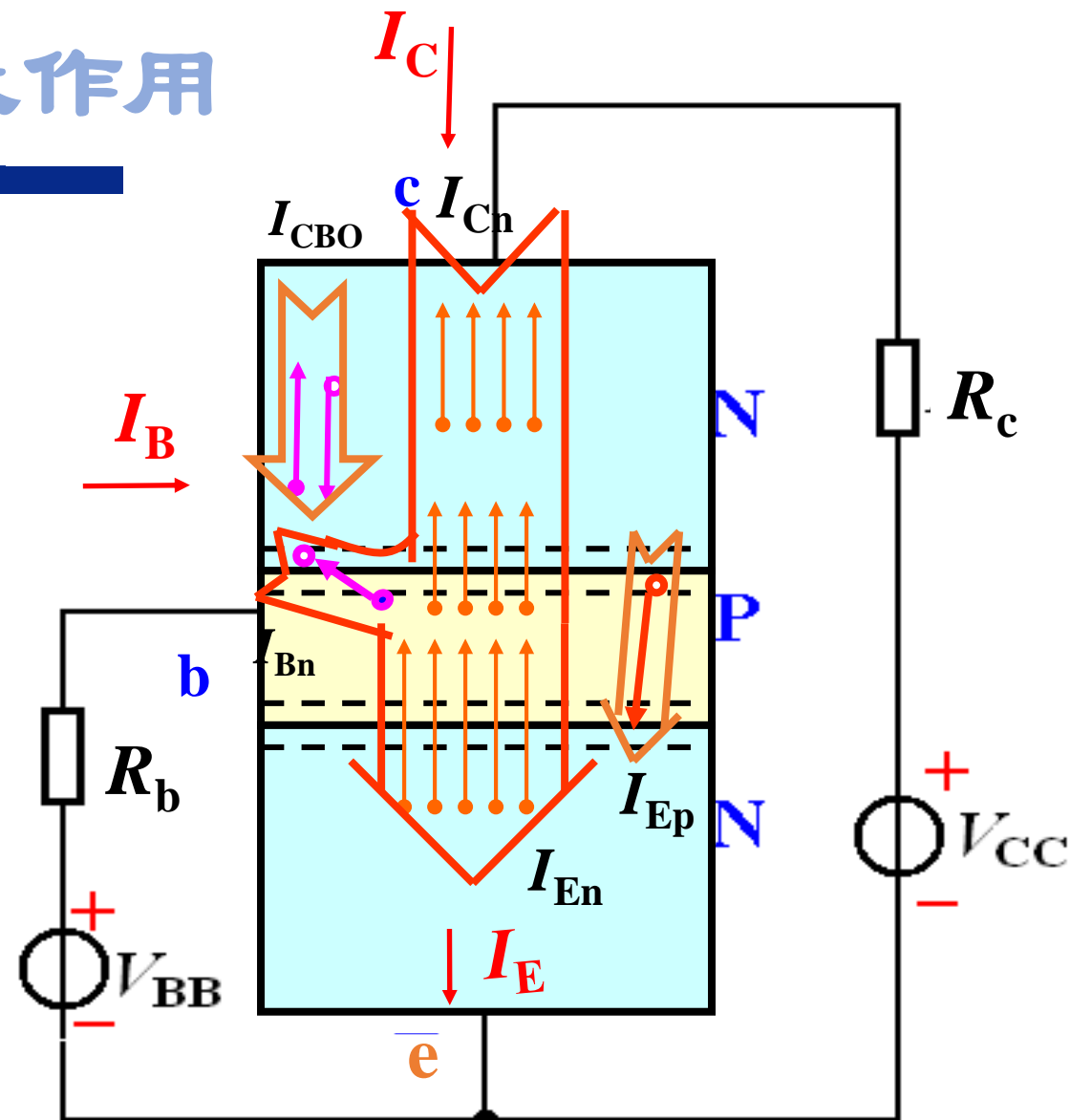


图1.6.4晶体管内部载流子的运动与外部电流

1.6.2 三极管的电流放大作用

三、晶体管的共射电流放大系数

1、共射直流电流放大系数

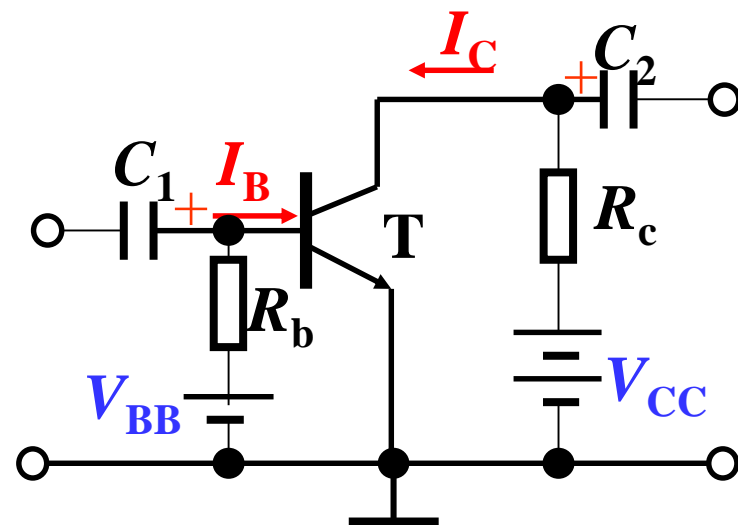
$$\bar{\beta} \approx \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}}$$

整理可得：

$$I_C = \bar{\beta} I_B + (1 + \bar{\beta}) I_{CBO} = \bar{\beta} I_B + I_{CEO}$$

$$I_C \approx \bar{\beta} I_B$$

$$I_E \approx (1 + \beta) I_B$$



共发射极接法

I_{CBO} 称反向饱和电流

I_{CEO} 称穿透电流

1.6.2 三极管的电流放大作用

2、共射交流电流放大系数

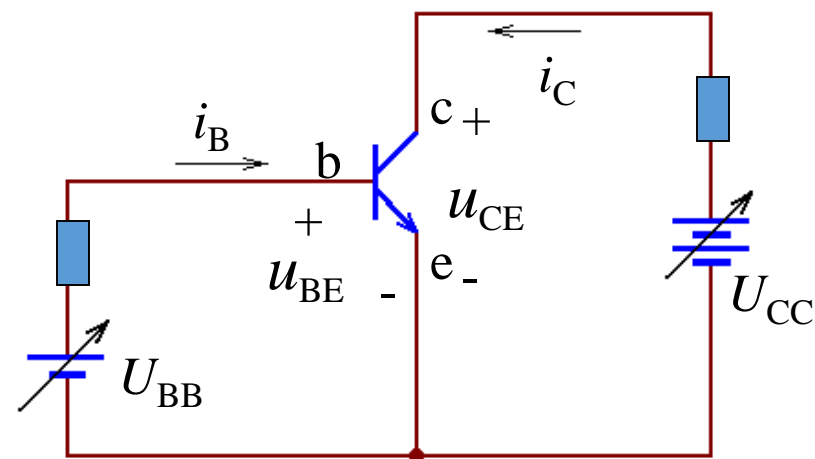
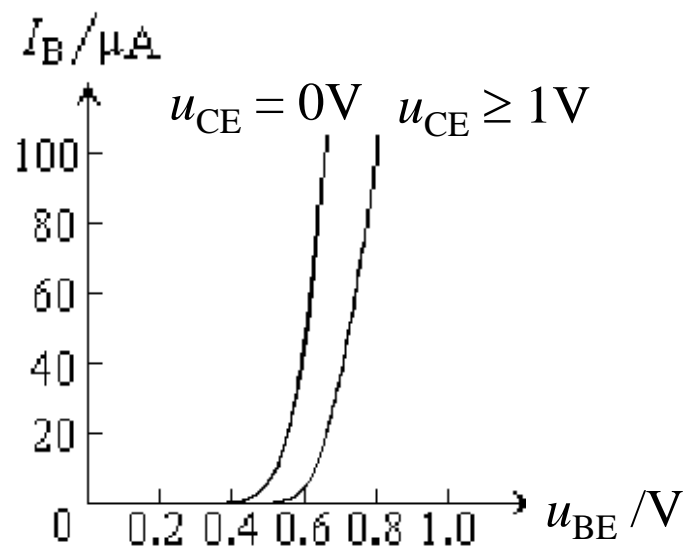
$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_B} \quad \beta \approx \bar{\beta}$$

直流参数 $\bar{\beta}$ 与交流参数 β 的含义是不同的，但是，对于大多数三极管来说，直流和交流的数值却差别不大，计算中，可不将它们严格区分。

1.6.3 三极管的共射特性曲线

一. 输入特性曲线 $i_B = f(u_{BE}) \mid U_{CE} = \text{const}$

- (1) 当 $u_{CE} = 0V$ 时，相当于发射结的正向伏安特性曲线。
- (2) 当 $u_{CE} \geq 1V$ 时， $u_{CB} = u_{CE} - u_{BE} > 0$ ，集电结已进入反偏状态开始收集电子，基区复合减少，在同样的 u_{BE} 下 I_B 减小，特性曲线右移。



共射极放大电路

1.6.3 三极管的共射特性曲线

二、输出特性曲线

$$i_C = f(u_{CE}) \mid I_B = \text{const}$$

输出特性曲线的三个区域:

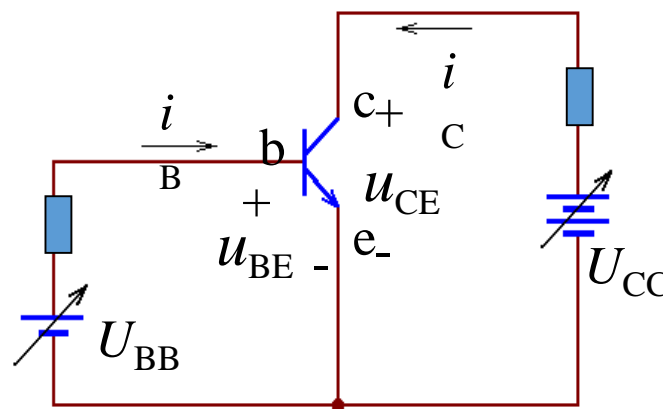
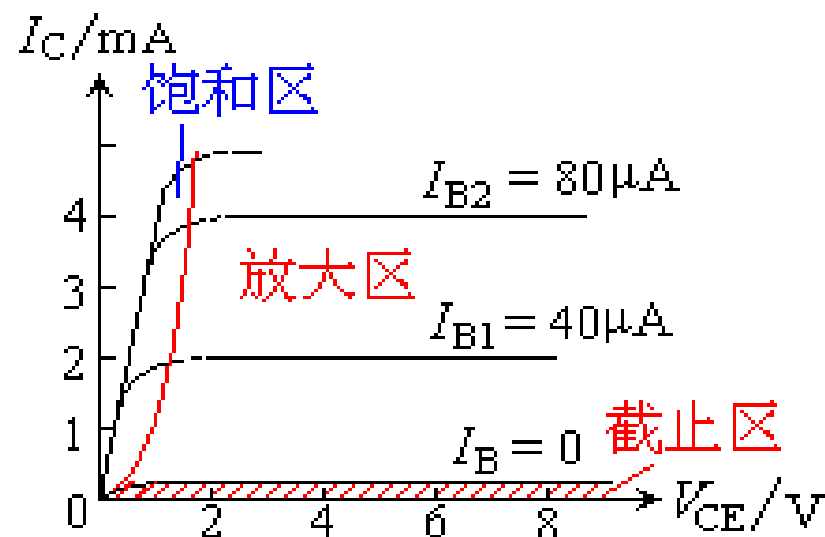
1. 截止区

条件: 发射结反偏 (不导通),

集电结反偏

特点: i_C 电流趋近于0。

等效模型: 相当于开关断开



共射极放大电路

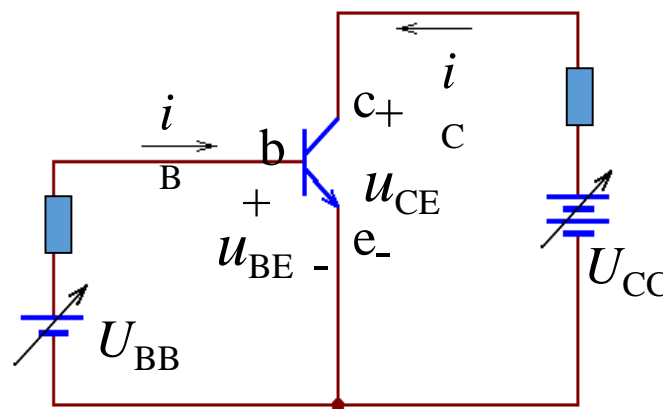
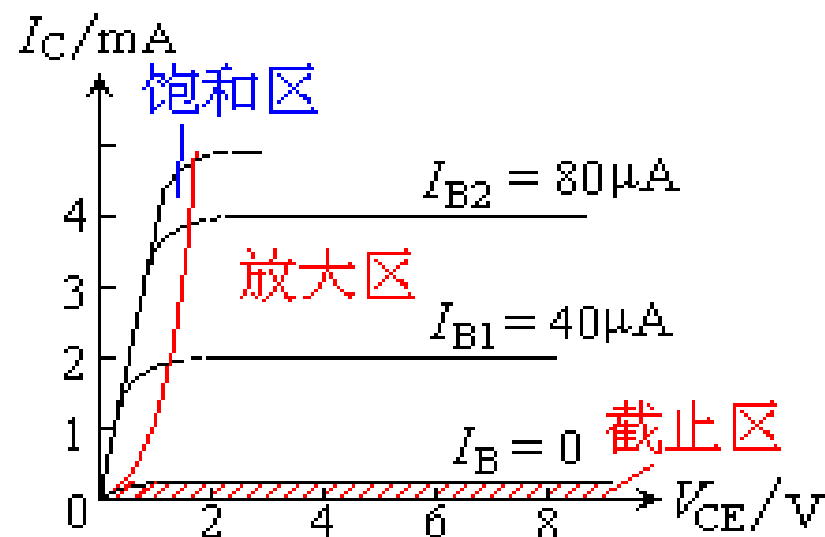
1.6.3 三极管的共射特性曲线

输出特性曲线的三个区域:

2. 放大区

条件: 发射结正偏, 集电结反偏

特点: i_C 的大小不受 u_{CE} 的影响,
只受 I_B 的控制。



共射极放大电路

1.6.3 三极管的共射特性曲线

输出特性曲线的三个区域:

3. 饱和区

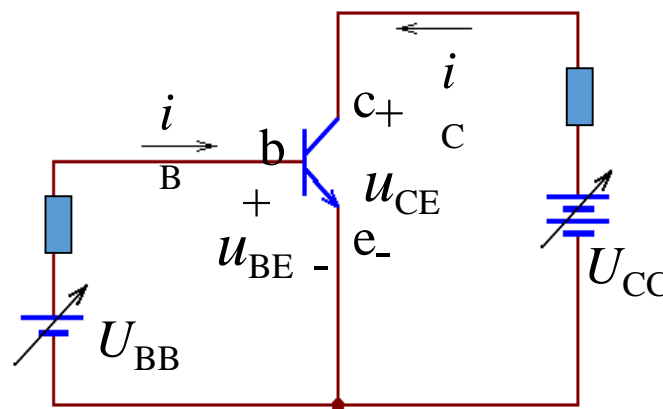
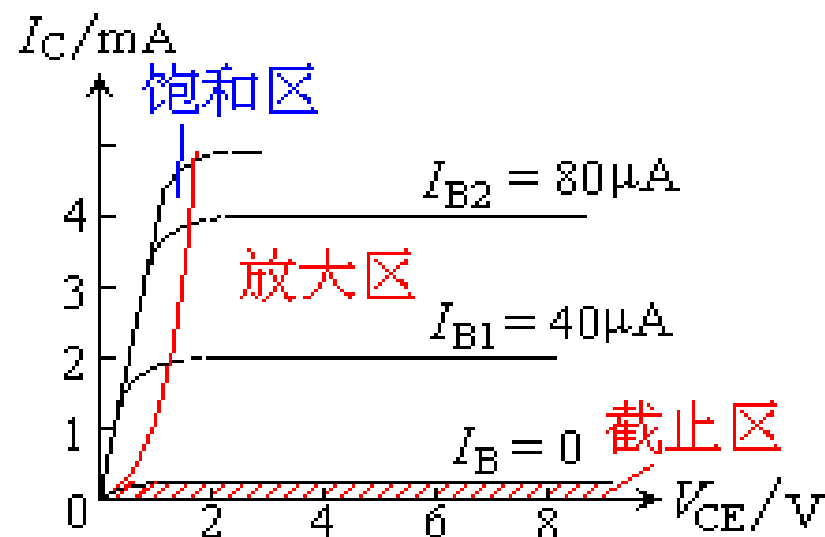
条件: 发射结正偏, 集电结正偏

特点: i_B 、 i_C 大到一定数值后

三极管进入该区域, $u_{CE}(= U_{CC} -$

$i_C R)$ 电压的数值较小。

临界饱和: $u_{CE} = u_{BE}$



共射极放大电路

1.6.4 三极管的主要参数

三极管的参数分为三大类:直流参数、交流参数、极限参数

一、直流参数

1. 共发射极直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = (I_C - I_{CEO}) / I_B \approx I_C / I_B \quad | \quad v_{CE} = \text{const}$$

2. 集电极基极间反向饱和电流 I_{CBO}

穿透电流 I_{CEO} $I_{CEO} = (1 + \bar{\beta}) I_{CBO}$

1.6.4 三极管的主要参数

二、交流参数

1.共发射极交流电流放大系数 β

$$\beta = \Delta i_C / \Delta i_B \Big|_{U_{CE} = \text{const}}$$

2.特征频率 f_T

β 值下降到1的信号频率

1.6.4 三极管的主要参数

三、极限参数

1.最大集电极耗散功率 P_{CM}

$$P_{CM} = i_C u_{CE}$$

2.最大集电极电流 I_{CM}

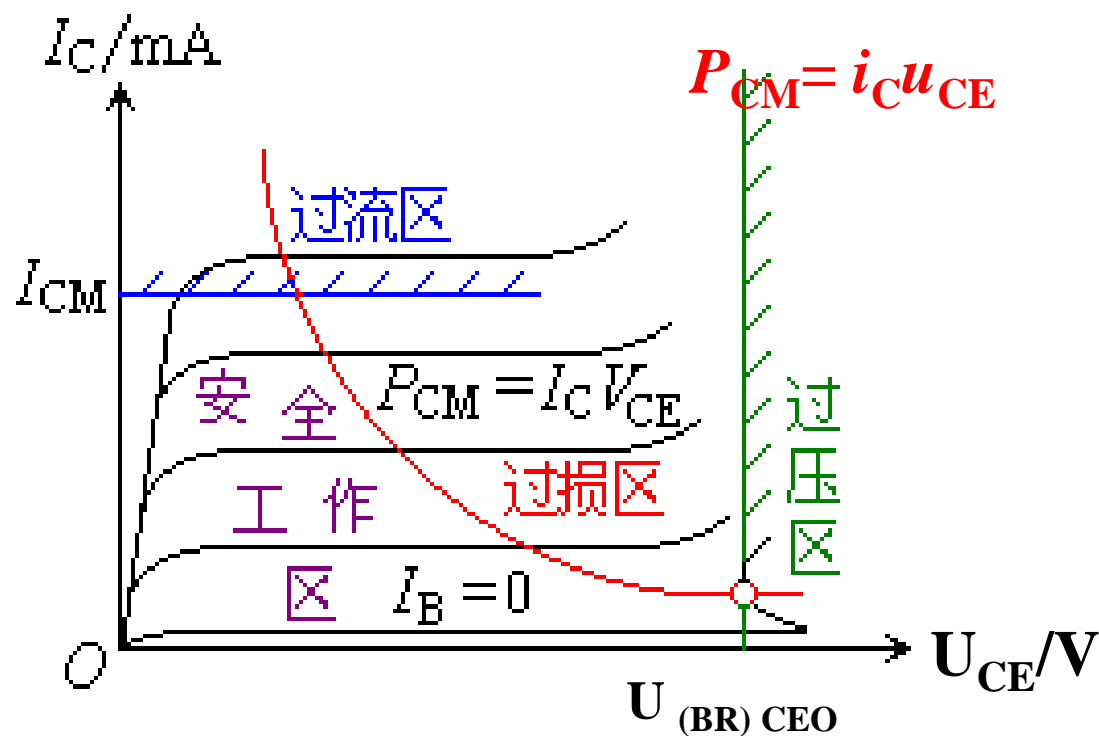
3. 反向击穿电压

- U_{CBO} ——发射极开路时的集电结反向击穿电压。
- U_{CEO} ——基极开路时集电极和发射极间的击穿电压。
- U_{EBO} ——集电极开路时发射结的向击穿电压。

几个击穿电压有如下关系 $U_{CBO} > U_{CEO} > U_{EBO}$

1.6.4 三极管的主要参数

由 P_{CM} 、 I_{CM} 和 U_{CEO} 在输出特性曲线上可以确定过损耗区、过电流区和击穿区。



输出特性曲线上的过损耗区和击穿区

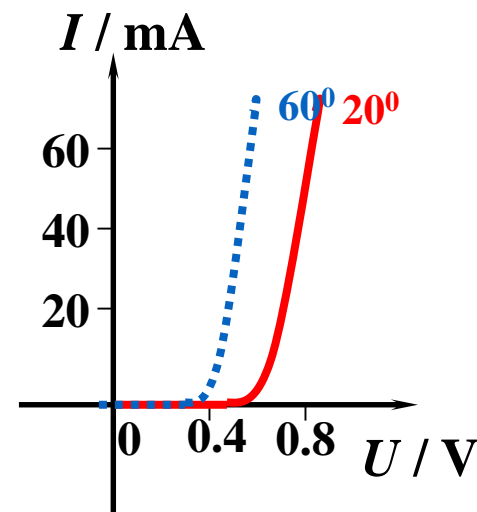
1.6.5 温度对晶体管特性及参数的影响

一、温度对 I_{CBO} 的影响

温度每升高 10°C ， I_{CBO} 增加约一倍。

反之，当温度降低时 I_{CBO} 减少。

硅管的 I_{CBO} 比锗管的小得多。



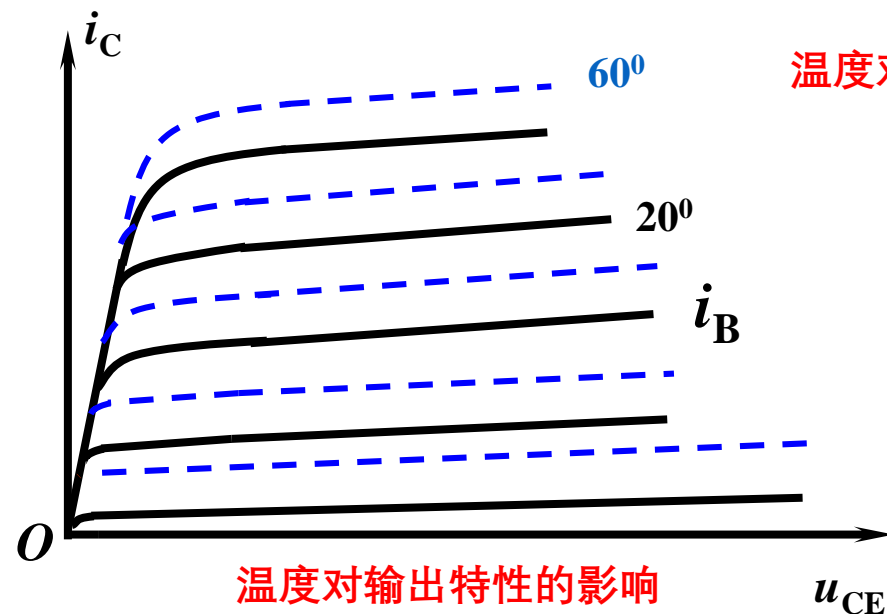
温度对输入特性的影响

二、温度对输入特性的影响

温度升高时正向特性左移，
反之右移

三、温度对输出特性的影响

温度升高将导致 I_C 增大



温度对输出特性的影响

三极管工作状态的判断

[例1]: 测量某NPN型BJT各电极对地的电压值如下，试判别管子工作在什么区域？

(1) $V_C = 6V$ $V_B = 0.7V$ $V_E = 0V$

(2) $V_C = 6V$ $V_B = 4V$ $V_E = 3.6V$

(3) $V_C = 3.6V$ $V_B = 4V$ $V_E = 3.4V$

	截止	放大	饱和
发射结	反偏	正偏	正偏
集电结	反偏	反偏	正偏

对NPN管而言，放大时 $V_C > V_B > V_E$

对PNP管而言，放大时 $V_C < V_B < V_E$

(1) 放大区

(2) 截止区

(3) 饱和区

[例2] 某放大电路中BJT三个电极的电流如图所示。

$I_A = -2\text{mA}, I_B = -0.04\text{mA}, I_C = +2.04\text{mA}$, 试判断管脚、管型。

解：电流判断法。

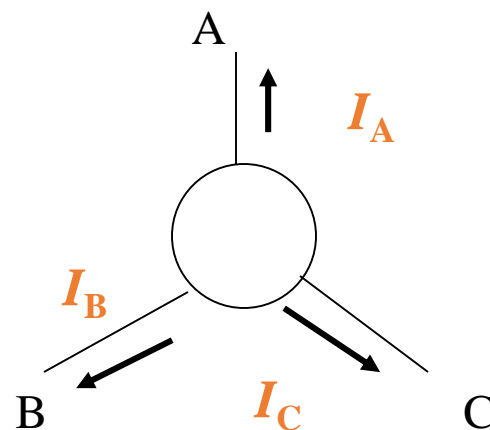
电流的正方向和KCL。 $I_E = I_B + I_C$

C为发射极

B为基极

A为集电极

管型为NPN管



例[3]测得工作在**放大电路中**几个晶体管三个电极的电位 U_1 、 U_2 、 U_3 分别为：

(1) $U_1=3.5V$ 、 $U_2=2.8V$ 、 $U_3=12V$

(2) $U_1=3V$ 、 $U_2=2.8V$ 、 $U_3=12V$

(3) $U_1=6V$ 、 $U_2=11.3V$ 、 $U_3=12V$

(4) $U_1=6V$ 、 $U_2=11.8V$ 、 $U_3=12V$

判断它们是**NPN型**还是**PNP型**？是**硅管**还是**锗管**？并确定**e、b、c**。

解：先求 U_{BE} ，若等于**0.6-0.7V**，为**硅管**；若等于**0.2-0.3V**，为**锗管**。

放大：发射结正偏，集电结反偏。

NPN管 $U_{BE} > 0$ ， $U_{BC} < 0$ ，即 $U_C > U_B > U_E$

PNP管 $U_{BE} < 0$ ， $U_{BC} > 0$ ，即 $U_C < U_B < U_E$

(1) U_1 b、 U_2 e、 U_3 c **NPN 硅**

(2) U_1 b、 U_2 e、 U_3 c **NPN 锗**

(3) U_1 c、 U_2 b、 U_3 e **PNP 硅**

(4) U_1 c、 U_2 b、 U_3 e **PNP 锗**

1.6.6 光电三极管

一、等效电路、符号

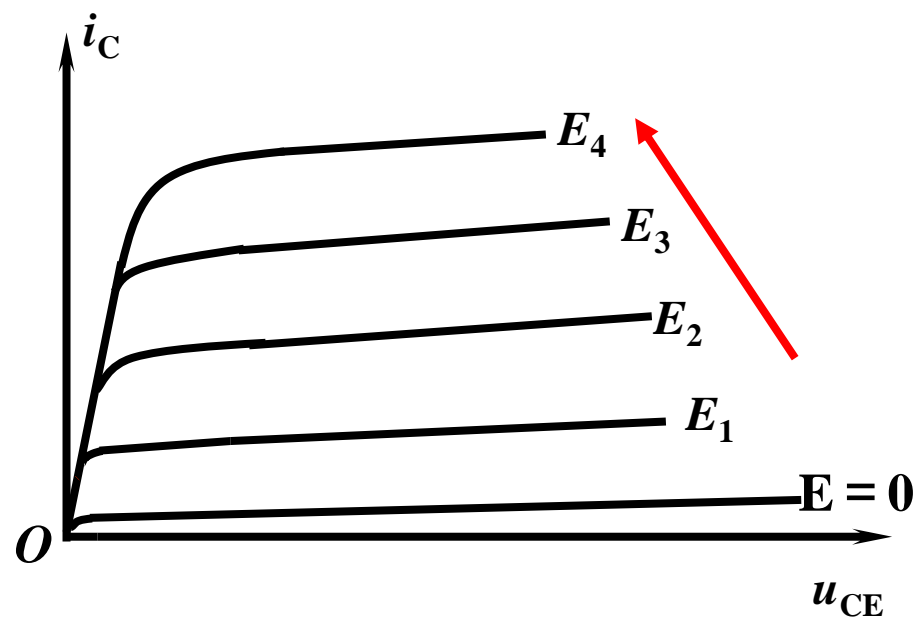
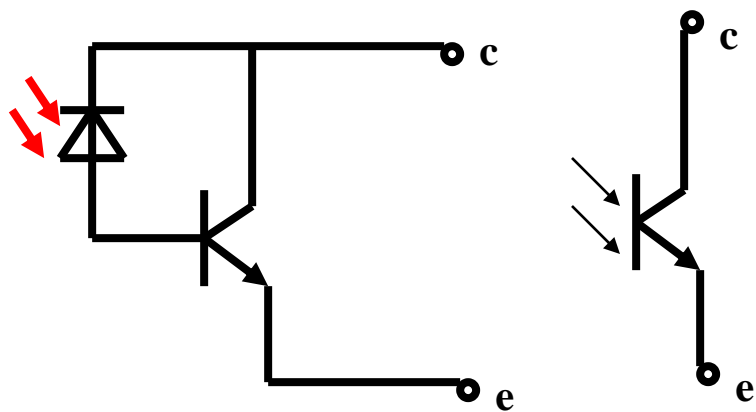


图1.6.11光电三极管的输出特性

二、光电三极管的输出特性曲线

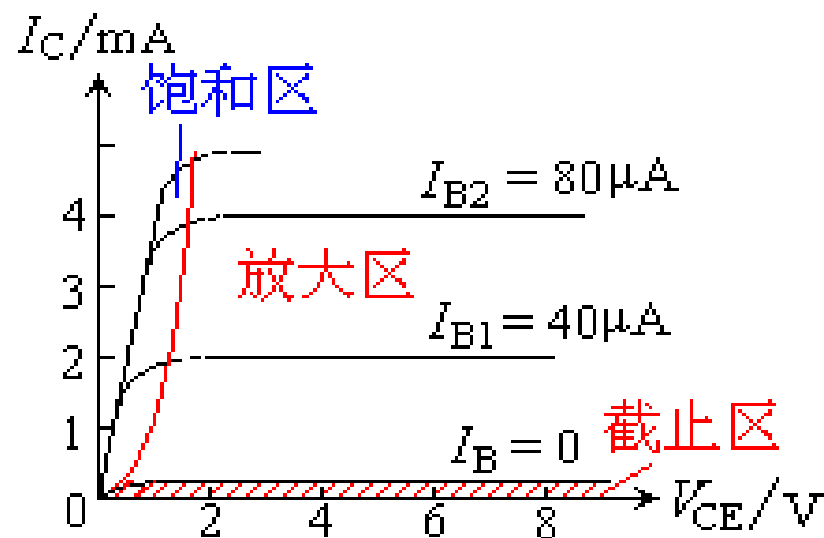
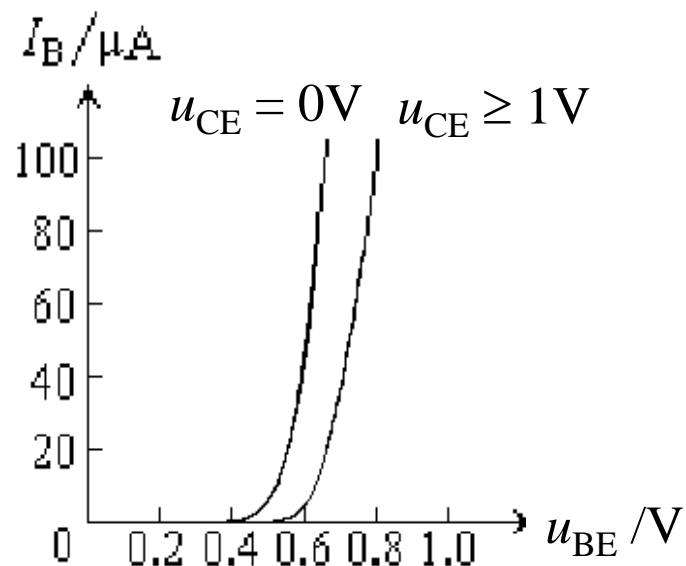
复习

1.BJT放大电路三个电流关系？

2.BJT的输入、输出特性曲线？

3.BJT工作状态如何判断？

$$\begin{cases} I_E = I_C + I_B \\ I_C \approx \bar{\beta} I_B \\ I_E \approx (1 + \beta) I_B \end{cases}$$



1.7 场效应管

利用输入回路电场的效应来控制输出回路电流变化的半导体器件。

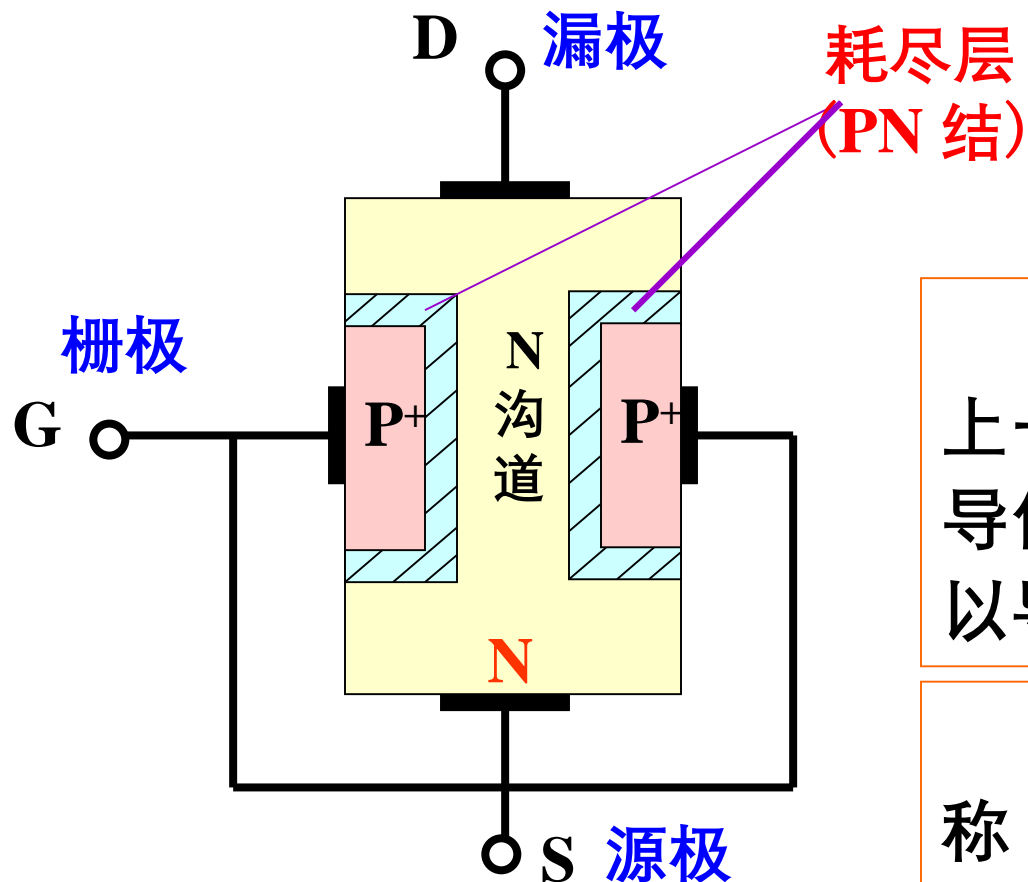
1.7.1 结型场效应管的类型和构造

1.7.2 绝缘栅型场效应管的类型和构造

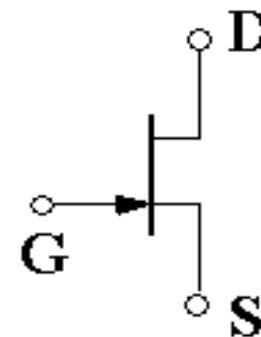
1.7.3 场效应管主要参数

1.7.1 结型场效应管

结构



符号



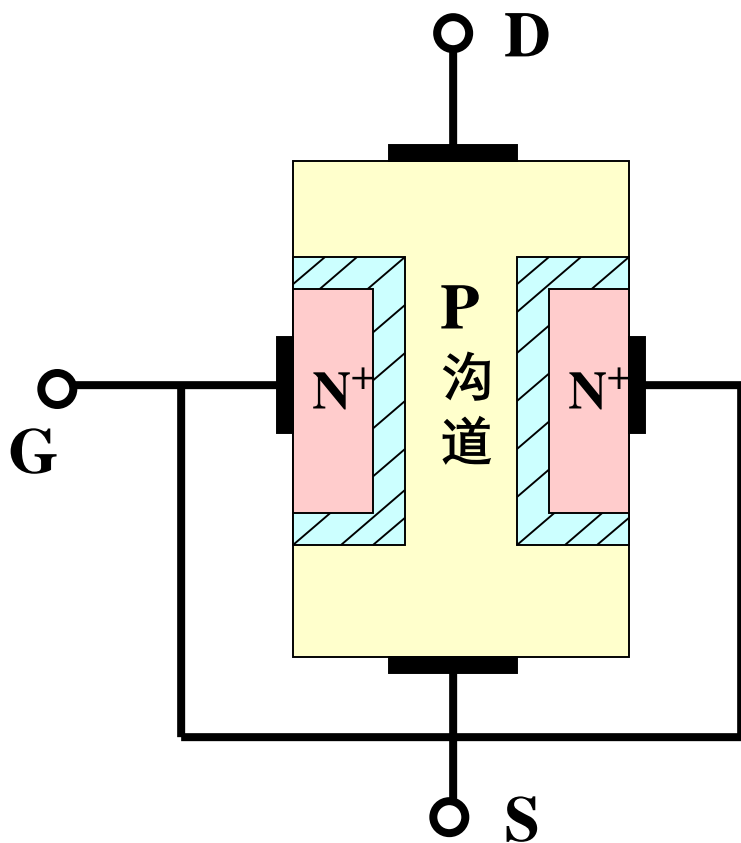
在漏极和源极之间加上一个正向电压，N 型半导体中多数载流子电子可以导电。

导电沟道是 N 型的，称 N 沟道结型场效应管。

图 1.7.1 N 沟道结型场效应管结构图

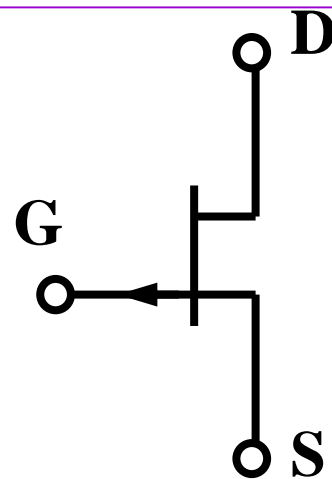
1.7.1 结型场效应管

P 沟道场效应管



P 沟道结型场效应管结构图

P 沟道场效应管是在同一块P 型半导体的两侧做成高掺杂的 N 型区(N⁺), 导电沟道为 P 型, 多数载流子为空穴。

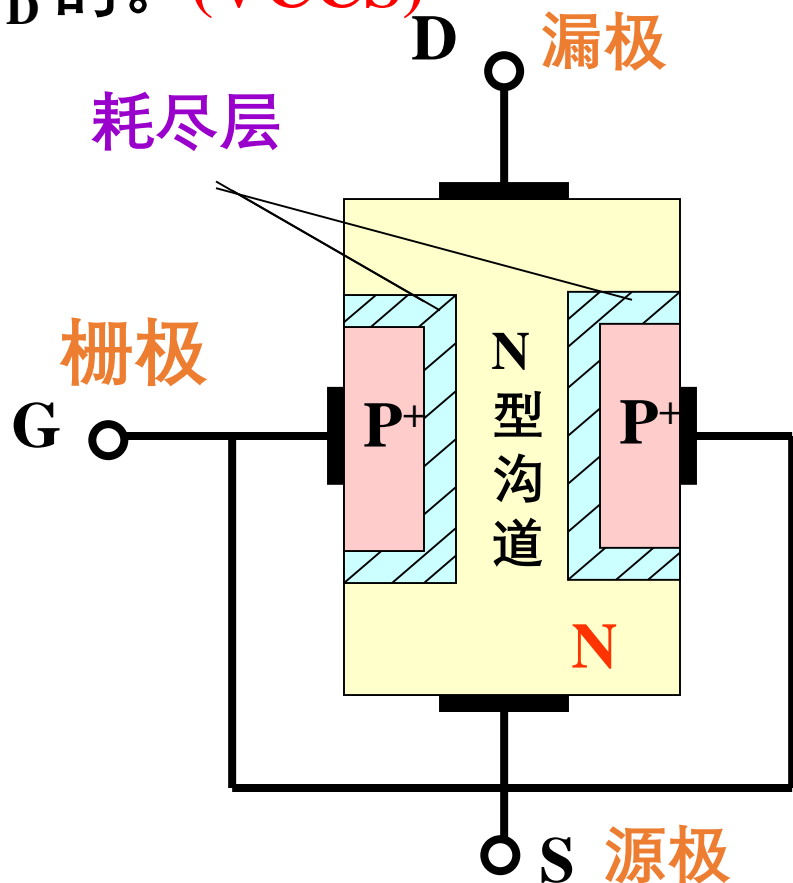


符号

1.7.1 结型场效应管

一、结型场效应管工作原理

N 沟道结型场效应管用改变 U_{GS} 大小来控制漏极电流 I_D 的。(VCCS)



*在栅极和源极之间加反向电压，耗尽层会变宽，导电沟道宽度减小，使沟道本身的电阻值增大，漏极电流 I_D 减小，反之，漏极 I_D 电流将增加。

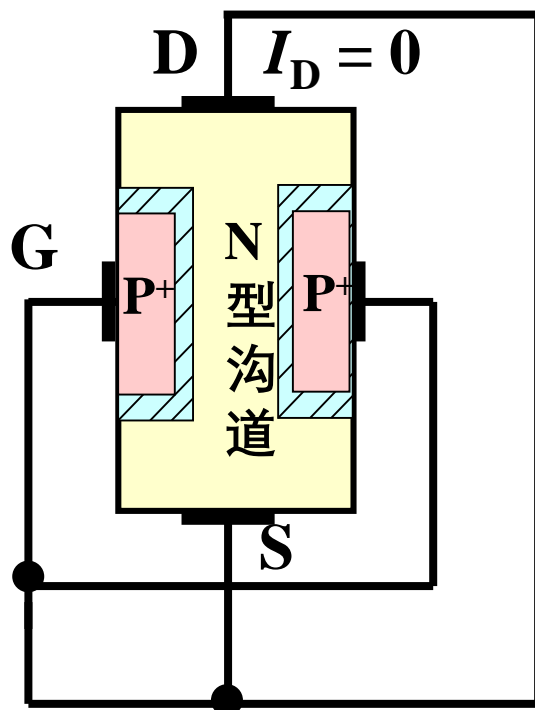
*耗尽层的宽度改变主要在沟道区。

1.7.1 结型场效应管

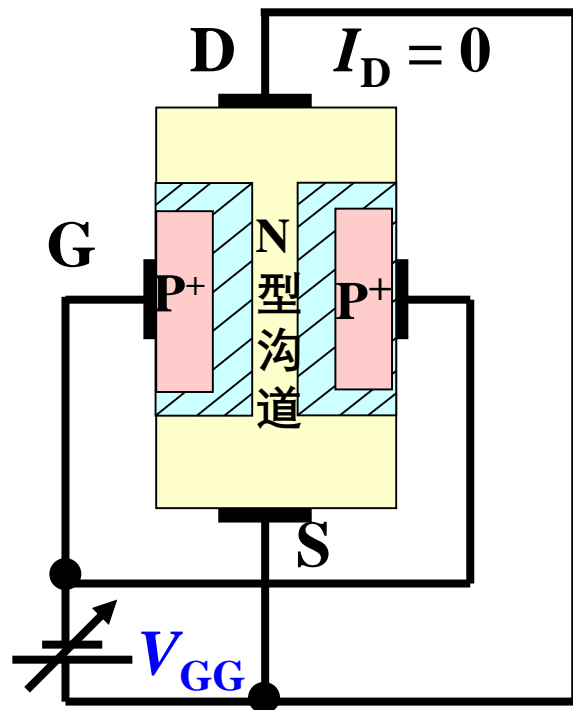
1. 当 $U_{DS} = 0$ 时, u_{GS} 对导电沟道的控制作用

$U_{GS(off)}$ 为夹断电压, 为负值。 $U_{GS(off)}$ 也可用 U_P 表示

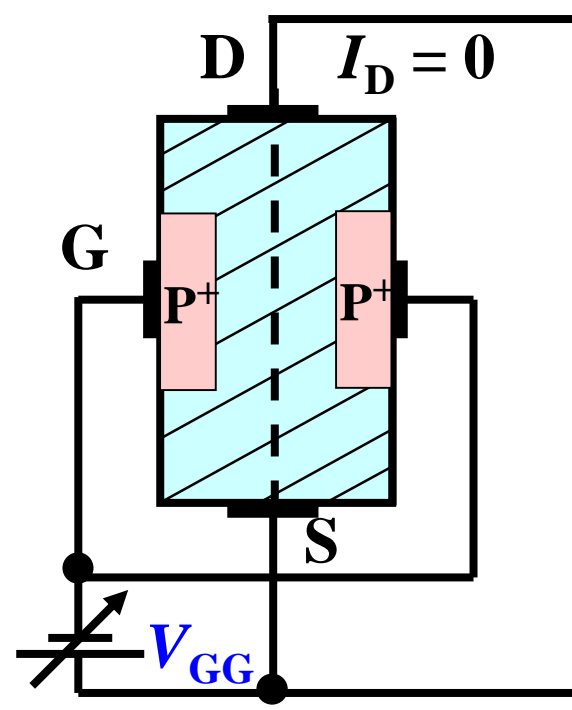
$U_{GS} = 0$ 时, 耗尽层比较窄, 导电沟比较宽



U_{GS} 由零逐渐减小, 耗尽层逐渐加宽, 导电沟相应变窄。



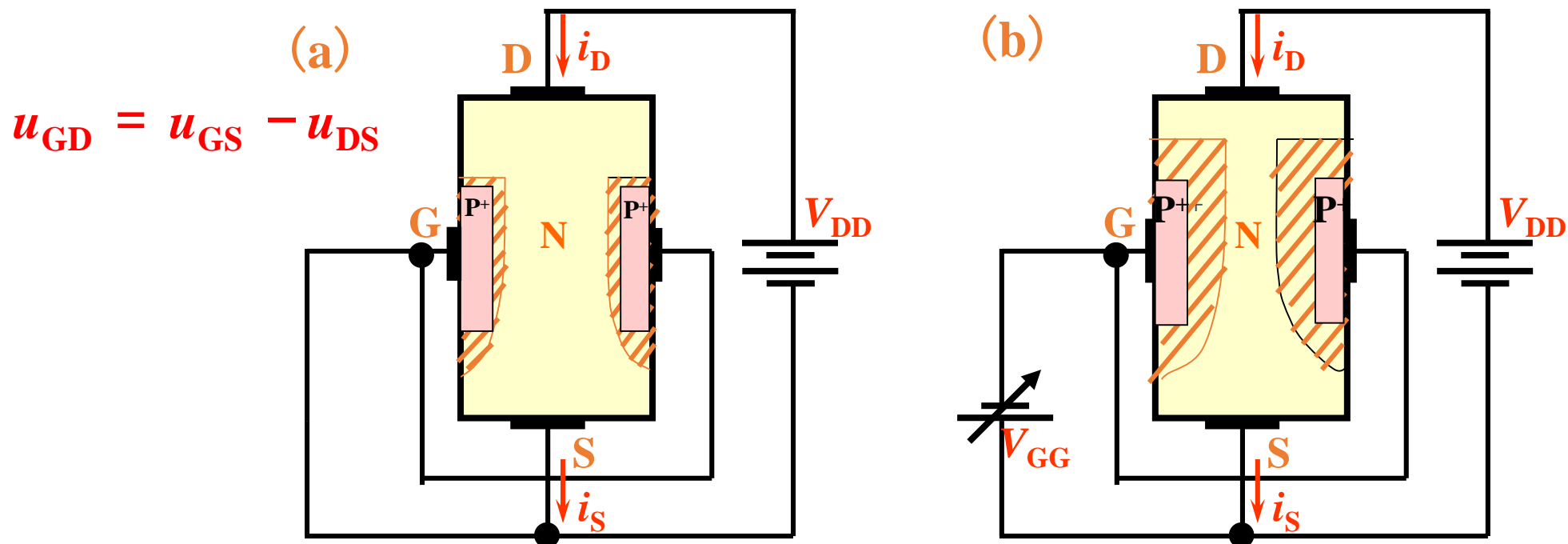
当 $U_{GS} = U_{GS(off)}$, 耗尽层合拢, 导电沟被夹断。



1.7.1 结型场效应管

2. 当 u_{GS} 为 $U_{GS (off)} \sim 0$ 中一固定值时, u_{DS} 对漏极电流 i_D 的影响。

当 u_{GS} 取值为 $U_{GS (off)} \sim 0$ 时, 场效应管内存在由 u_{GS} 确定的导电沟道。

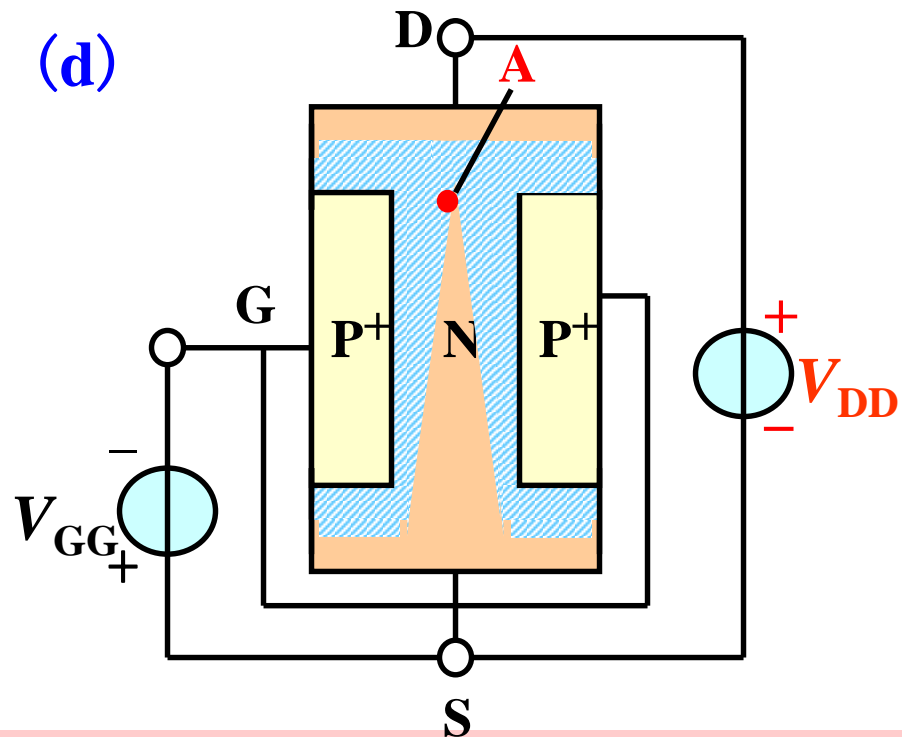
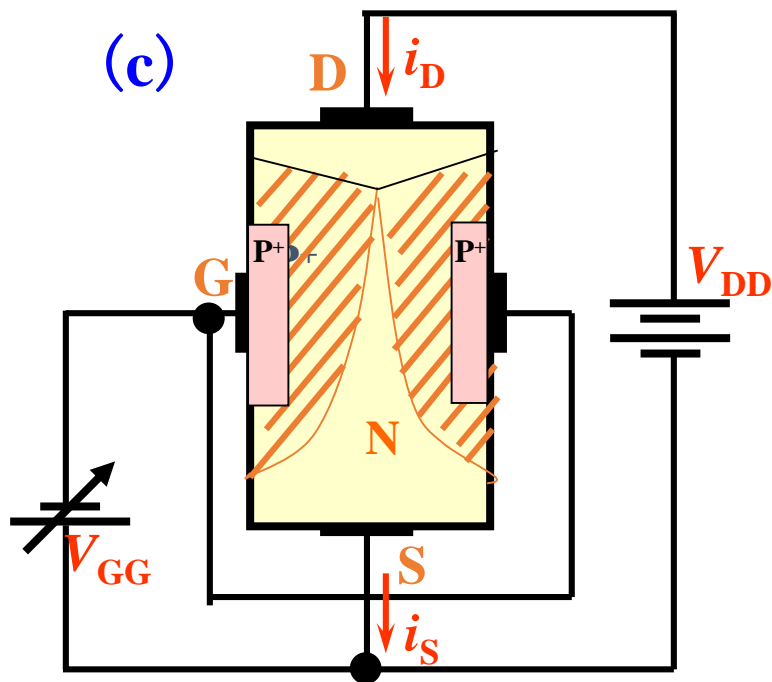


$u_{GS} = 0$, $u_{GD} > U_{GS (off)}$, i_D 较大。

$u_{GS} < 0$, $u_{GD} > U_{GS (off)}$, i_D 更小。

注意：当 $u_{DS} > 0$ 时, 耗尽层呈现楔形。

1.7.1 结型场效应管



$u_{GS} < 0, u_{GD} = U_{GS(off)}$, 沟道变窄预夹断 $u_{GS} < 0, u_{GD} < u_{GS(off)}$, 夹断, i_D 几乎不变

- (1) 改变 u_{GS} , 改变了 PN 结中电场, 控制了 i_D , 故称场效应管;
- (2) 结型场效应管栅源之间加反向偏置电压, 使 PN 反偏, 栅极基本不取电流, 因此, 场效应管输入电阻很高。

1.7.1 结型场效应管

3. 当 $u_{GD} < u_{GS(off)}$ 时, u_{GS} 对漏极电流 i_D 的控制作用

$u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} < u_{GS(off)}$, 即: 出现了预夹断之后

u_{DS} 为一常量时, 对应于确定的 u_{GS} , 就有确定的 i_D 。

场效应管为电压控制元件(VCCS)。

场效应管用低频跨导 g_m 的大小描述栅源电压对漏极电流的控制作用。

$$g_m = \Delta i_D / \Delta u_{GS} \quad (\text{单位 mS})$$

1.7.1 结型场效应管

小结

- (1) 在 $u_{GD} = u_{GS} - u_{DS} > u_{GS(off)}$ 情况下, 即当 $u_{DS} < u_{GS} - u_{GS(off)}$ 对应于不同的 u_{GS} , d-s 间等效成不同阻值的电阻。
- (2) 当 u_{DS} 使 $u_{GD} = u_{GS(off)}$ 时, d-s 之间预夹断
- (3) 当 u_{DS} 使 $u_{GD} < u_{GS(off)}$ 时, 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。

1.7.1 结型场效应管

二、结型场效应管的特性曲线

1. 输出特性曲线

当栅源之间的电压 U_{GS} 不变时，漏极电流 i_D 与漏源之间电压 u_{DS} 的关系，即

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

1.7.1 结型场效应管

输出特性曲线

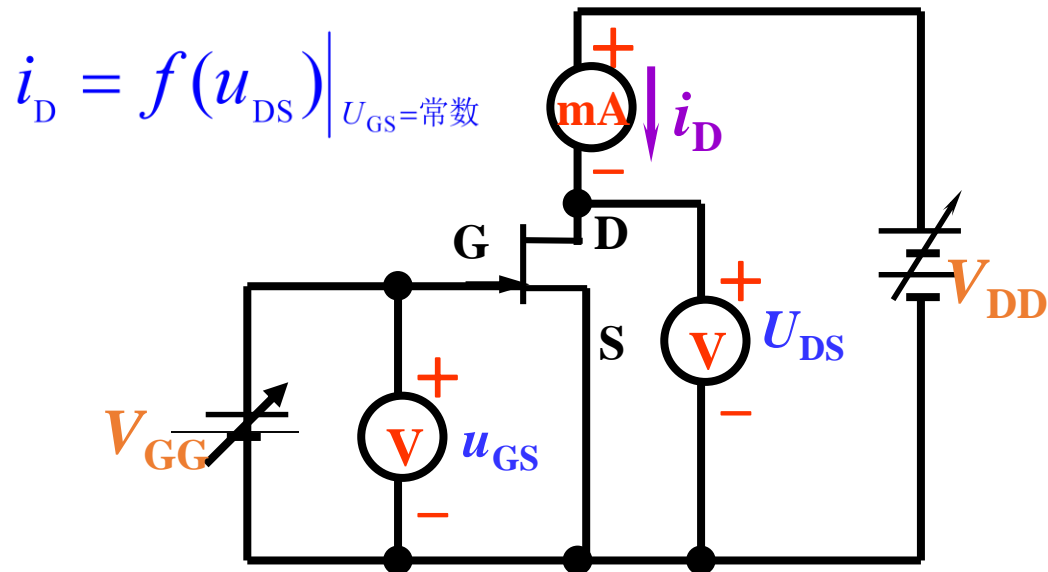


图 1.7.5(a) 特性曲线测试电路

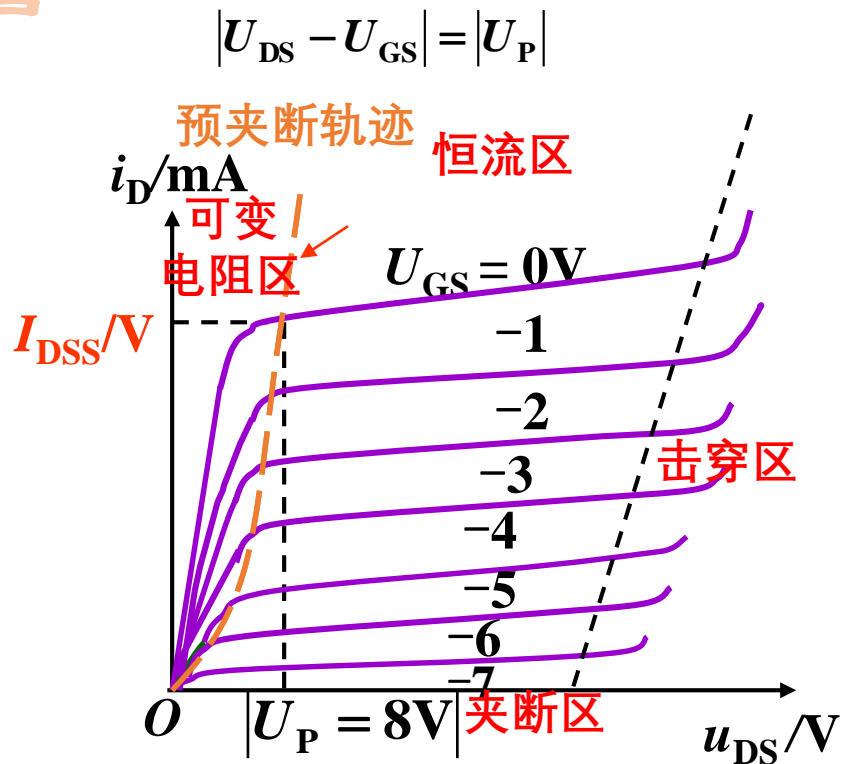
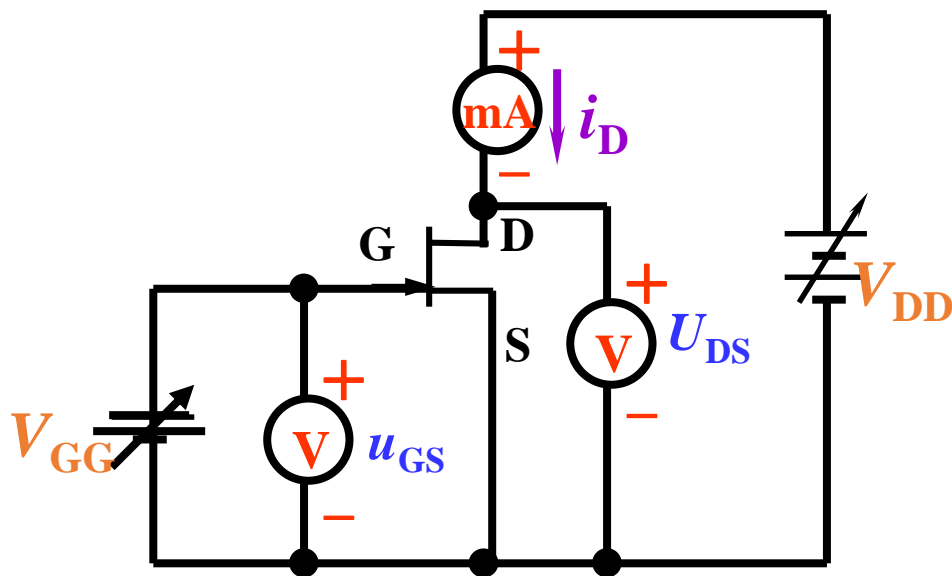


图 1.7.5(b) 输出特性曲线

漏极特性也有三个区：可变电阻区、恒流区和夹断区。

1.7.1 结型场效应管

2. 转移特性 (N 沟道结型场效应管为例)



特性曲线测试电路

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

$u_{GS} = 0$, i_D 最大;
 u_{GS} 愈负, i_D 愈小;
 $u_{GS} = U_{GS(\text{off})}$, $i_D \approx 0$ 。

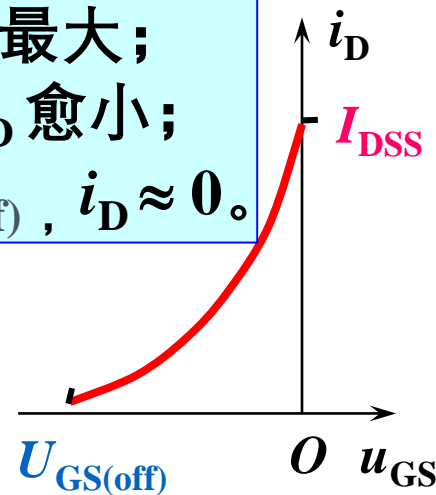


图 1.7.6 转移特性

两个重要参数 { 夹断电压 $U_{GS(\text{off})}$ ($I_D = 0$ 时的 U_{GS})
饱和漏极电流 I_{DSS} ($U_{GS} = 0$ 时的 I_D)

1.7.1 结型场效应管

转移特性

结型场效应管转移特性曲线的近似公式：

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$
$$(U_{GS(off)} \leq u_{GS} \leq 0)$$

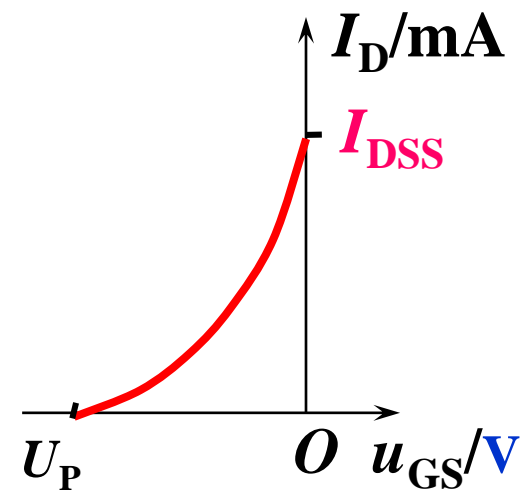
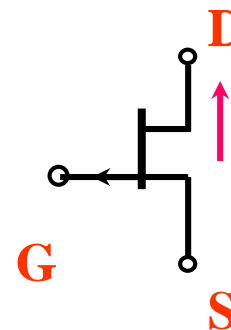


图 1.7.6 转移特性

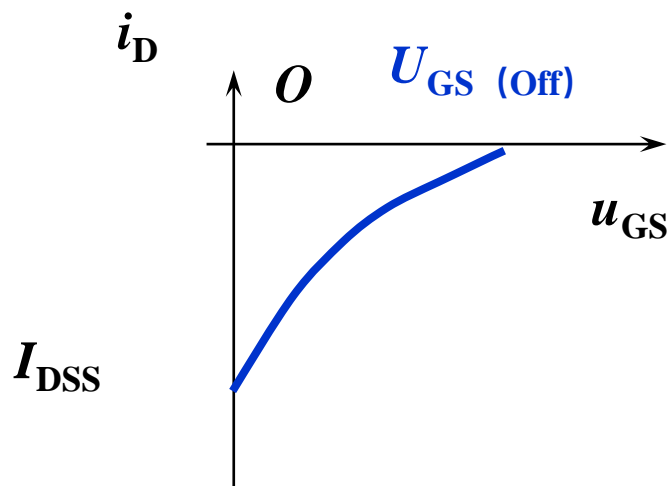
1.7.1 结型场效应管

* 结型P沟道的特性曲线

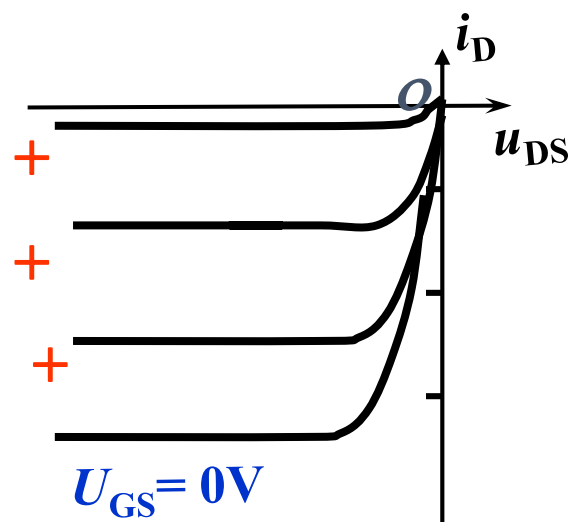
栅源加正偏电压，(PN结反偏)
漏源加反偏电压。



转移特性曲线



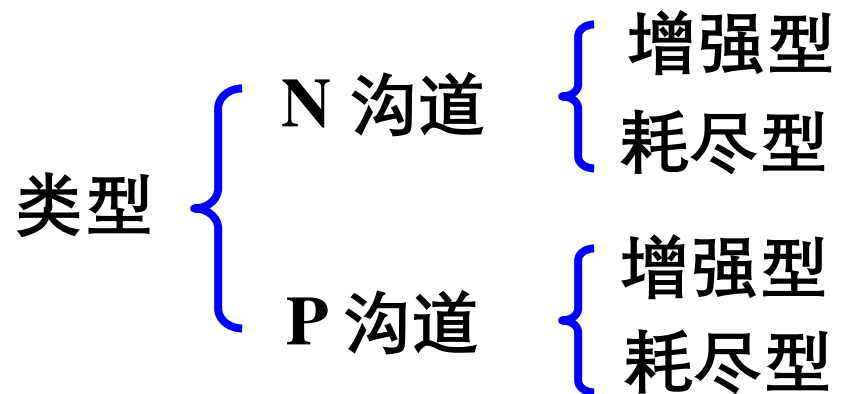
输出特性曲线



1.7.2 绝缘栅型场效应管

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**MOS 场效应管**。

特点：输入电阻可达 $10^{10} \Omega$ 以上。



$U_{GS} = 0$ 时漏源间存在导电沟道称**耗尽型场效应管**；

$U_{GS} = 0$ 时漏源间不存在导电沟道称**增强型场效应管**。

1.7.2 绝缘栅型场效应管

一、N 沟道增强型 MOS 场效应管

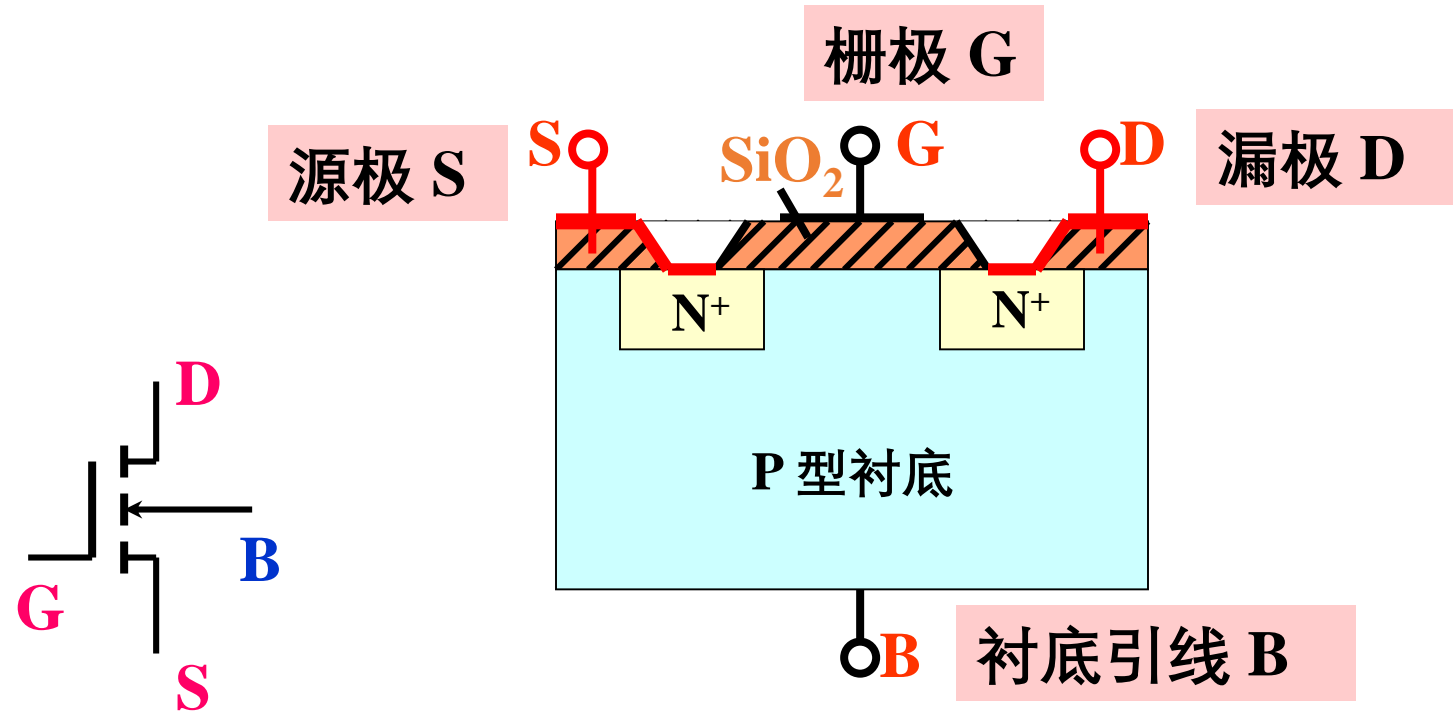


图 1.7.7 N 沟道增强型 MOS 场效应管的结构示意图

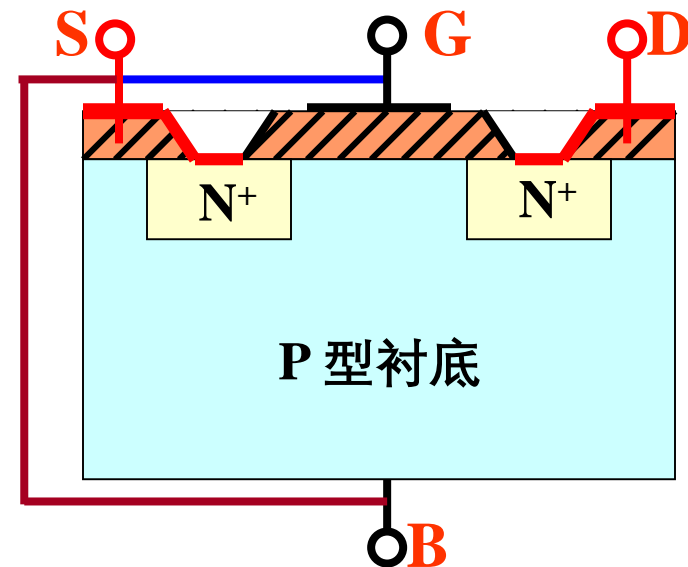
1.7.2 绝缘栅型场效应管

1. 工作原理

绝缘栅场效应管利用 U_{GS} 来控制“感应电荷”的多少，改变由这些“感应电荷”形成的导电沟道的状况，以控制漏极电流 I_D 。

(1) $U_{GS} = 0$

漏源之间相当于两个背靠背的 PN 结，无论漏源之间加何种极性电压，**总是不导电**。



1.7.2 绝缘栅型场效应管

(2) $U_{DS} = 0$, $0 < U_{GS} < U_{GS(th)}$

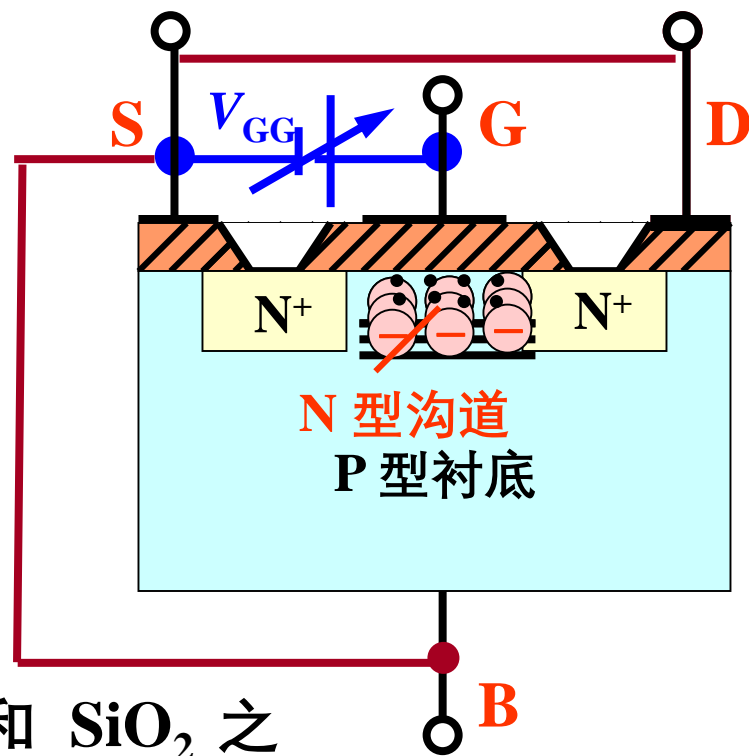
栅极金属层将聚集正电荷，它们排斥P型衬底靠近 SiO_2 一侧的空穴，形成由负离子组成的耗尽层。增大 U_{GS} 耗尽层变宽。

(3) $U_{DS} = 0$, $U_{GS} \geq U_{GS(th)}$

由于吸引了足够多P型衬底的电子，会在耗尽层和 SiO_2 之间形成可移动的表面电荷层——反型层、N型导电沟道。

U_{GS} 升高，N沟道变宽。因为 $U_{DS} = 0$ ，所以 $I_D = 0$ 。

$U_{GS(th)}$ 或 U_T 为开始形成反型层所需的 U_{GS} ，称开启电压。



1.7.2 绝缘栅型场效应管

(4) U_{DS} 对导电沟道的影响 ($U_{GS} > U_T$)

a. $U_{DS} < U_{GS} - U_T$, 即 $U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} > U_T$

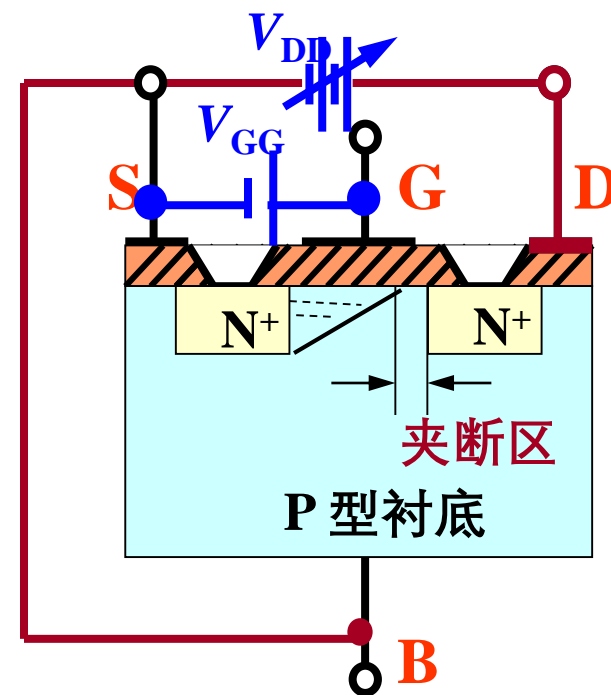
导电沟道呈现一个楔形。漏极形成电流 I_D 。

b. $U_{DS} = U_{GS} - U_T$, $U_{GD} = U_T$

靠近漏极沟道达到临界开启程度, 出现预夹断。

c. $U_{DS} > U_{GS} - U_T$, $U_{GD} < U_T$

由于夹断区的沟道电阻很大, U_{DS} 逐渐增大时, 导电沟道两端电压基本不变, i_D 因而基本不变。



1.7.2 绝缘栅型场效应管

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

此时，可以把 i_D 近似看成是 u_{GS} 控制的电流源。

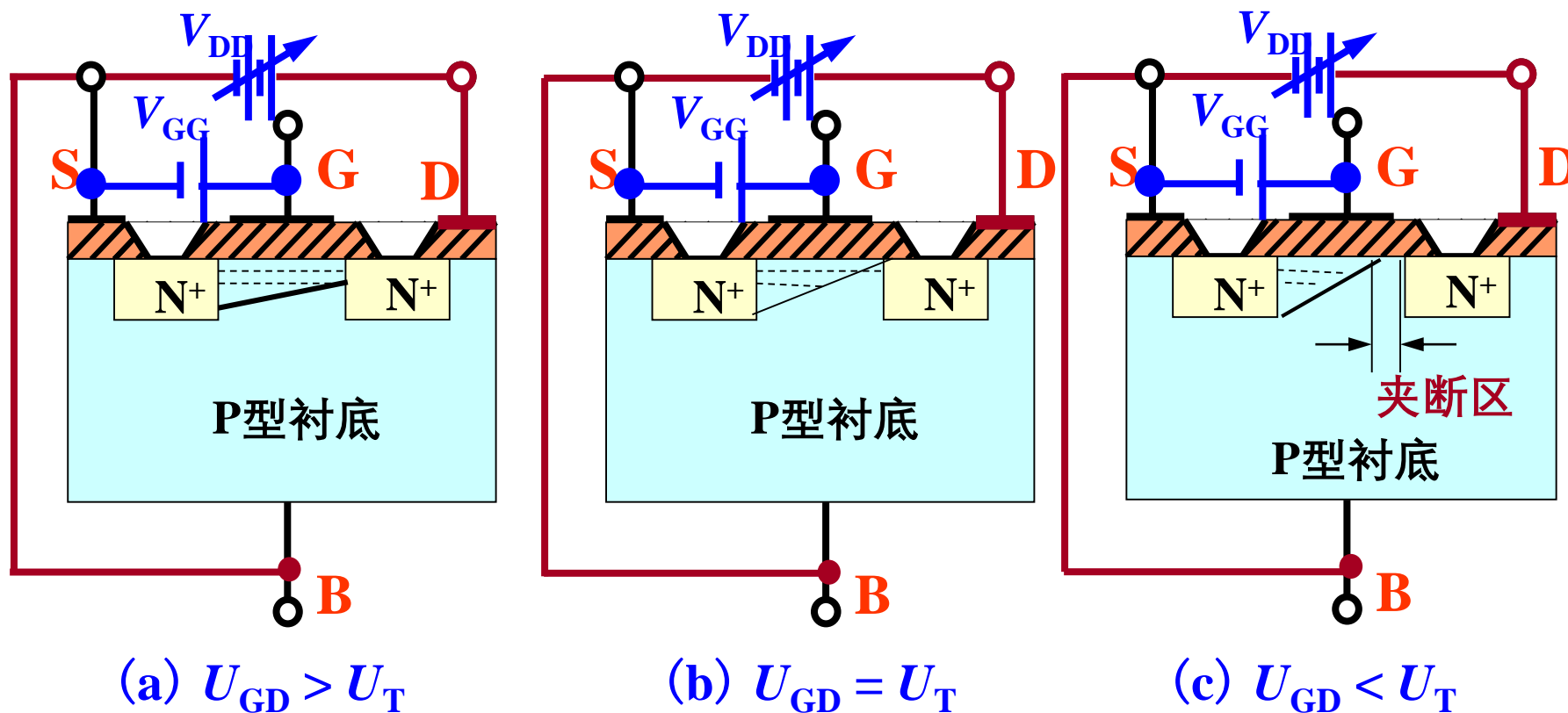


图 1.7.9 U_{DS} 对导电沟道的影响

1.7.2 绝缘栅型场效应管

2. 特性曲线与电流方程

(a) 转移特性

$$U_{GS} < U_T, i_D = 0;$$

$U_{GS} \geq U_T$, 形成导电沟道, 随着 U_{GS} 的增加, I_D 逐渐增大。

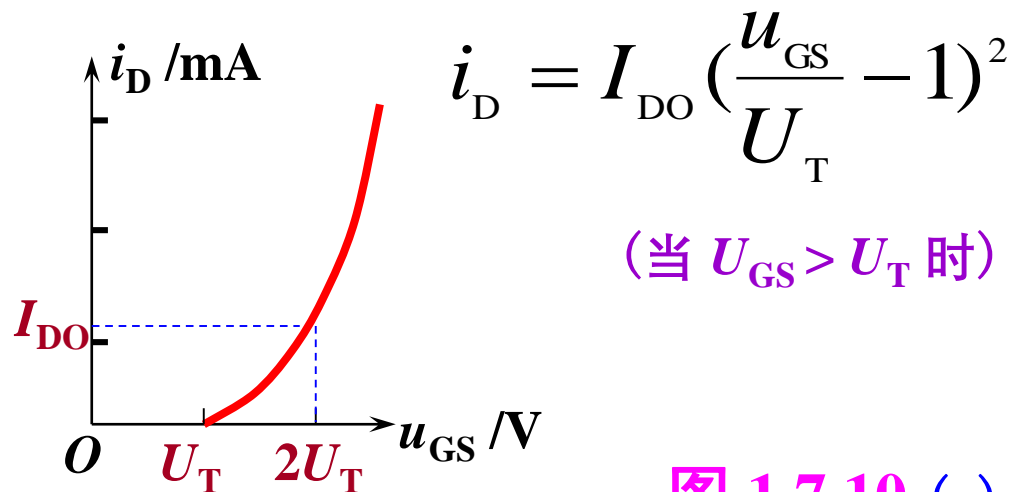


图 1.7.10 (a)

(b) 输出特性

三个区：可变电阻区、恒流区（或饱和区）、夹断区。

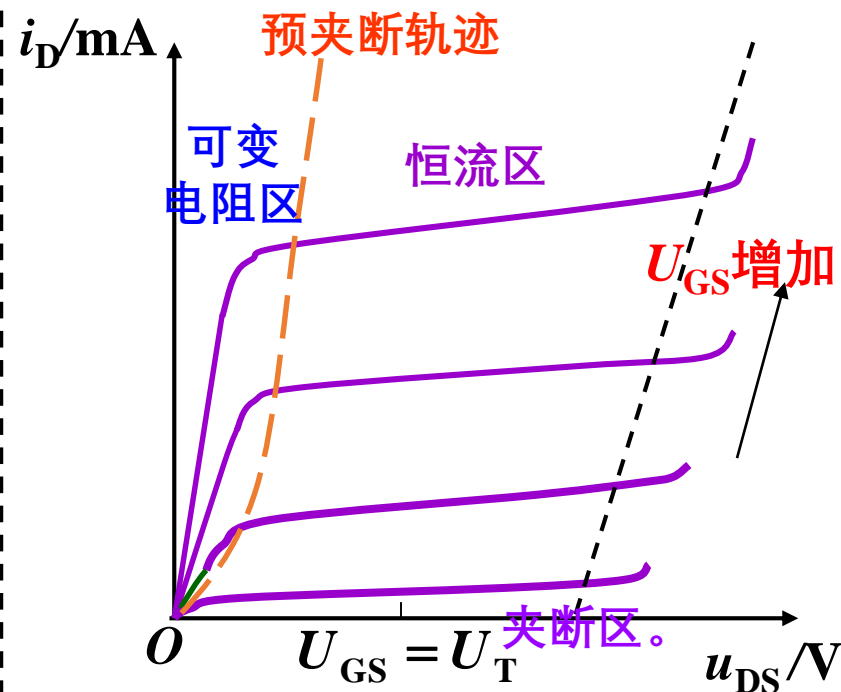


图 1.7.10 (b)

1.7.2 绝缘栅型场效应管

二、N 沟道耗尽型 MOS 场效应管

制造过程中预先在二氧化硅的绝缘层中掺入正离子，这些正离子电场在 P 型衬底中“感应”负电荷，形成“反型层”。即使 $U_{GS} = 0$ 也会形成 N 型导电沟道。

$U_{GS} = 0$ ， $U_{DS} > 0$ ，产生较大的漏极电流；

$U_{GS} < 0$ ，绝缘层中正离子感应的负电荷减少，导电沟道变窄， i_D 减小；

$U_{GS} = U_P$ ，感应电荷被“耗尽”， $i_D \approx 0$ 。

U_P 或 $U_{GS(off)}$ 称为夹断电压

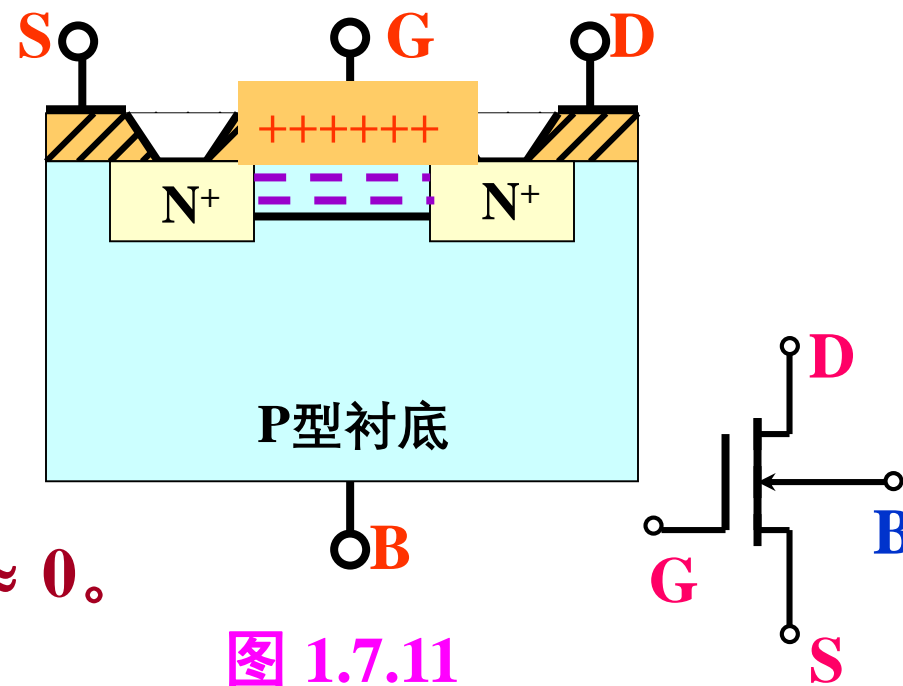


图 1.7.11

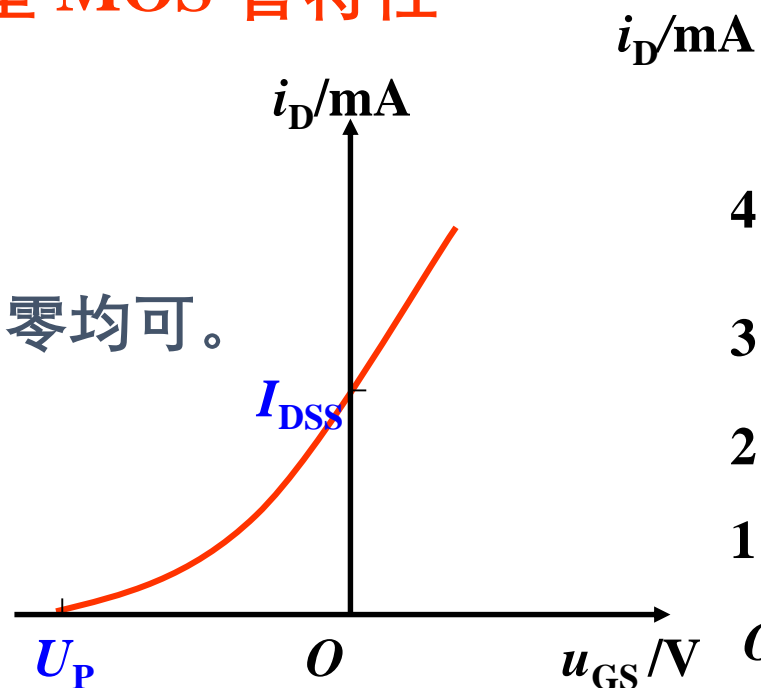
1.7.2 绝缘栅型场效应管

N 沟道耗尽型 MOS 管特性

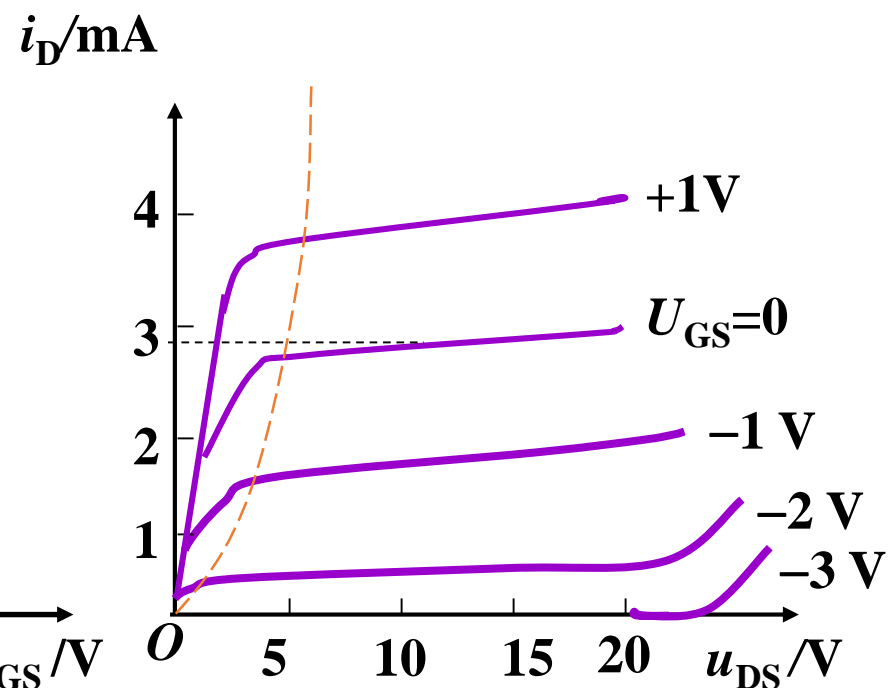
工作条件:

$U_{DS} > 0$;

U_{GS} 正、负、零均可。



(a) 转移特性



(b) 输出特性

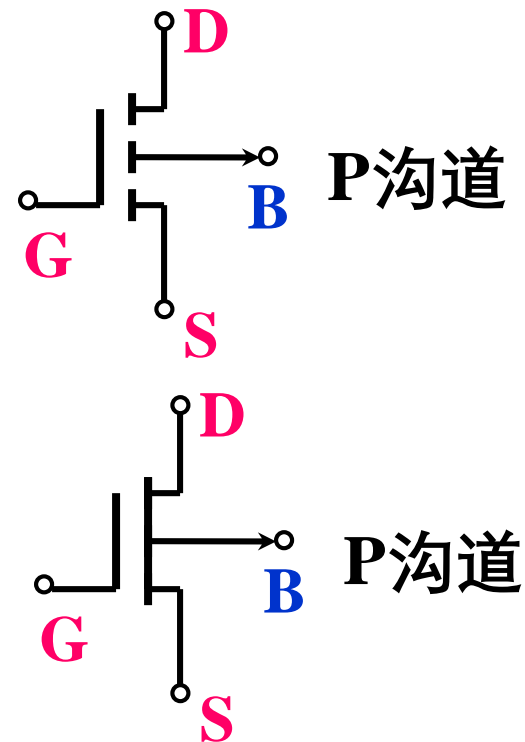
1.7.2 绝缘栅型场效应管

1. **P沟道增强型MOS管**的开启电压 $U_{GS(th)} < 0$
当 $U_{GS} < U_{GS(th)}$ ，漏-源之间应加负电源电压
管子才导通,空穴导电。

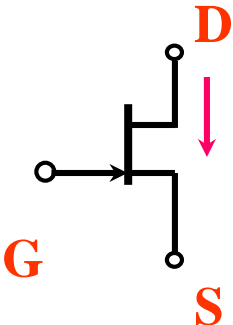
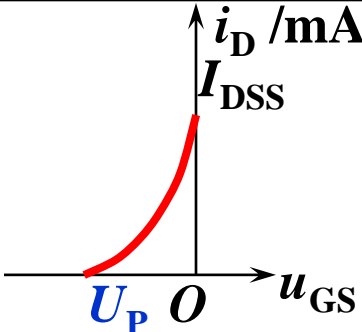
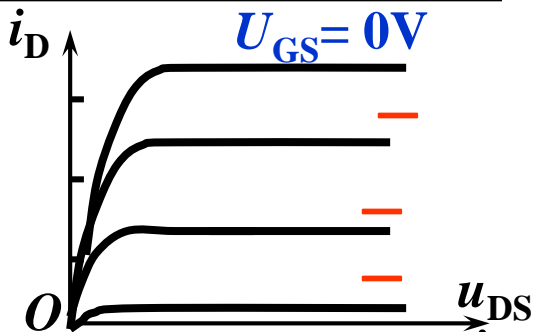
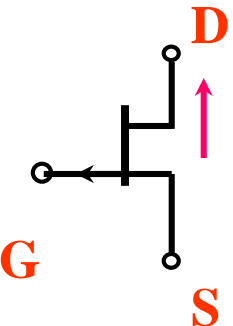
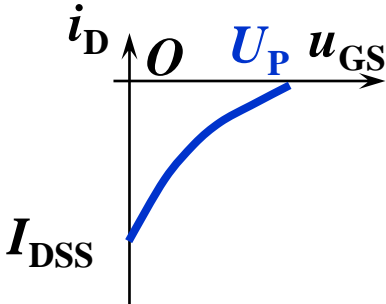
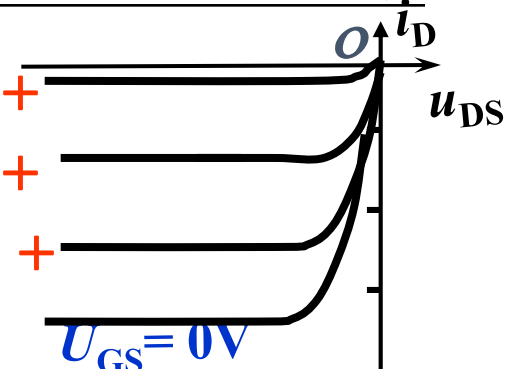
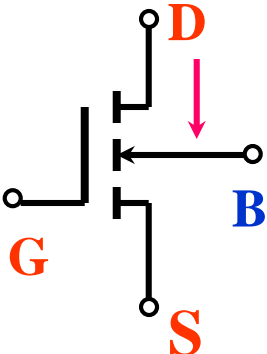
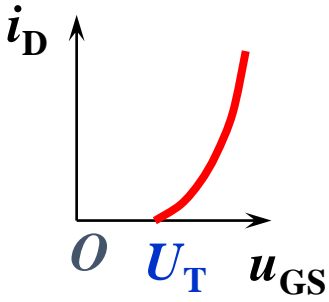
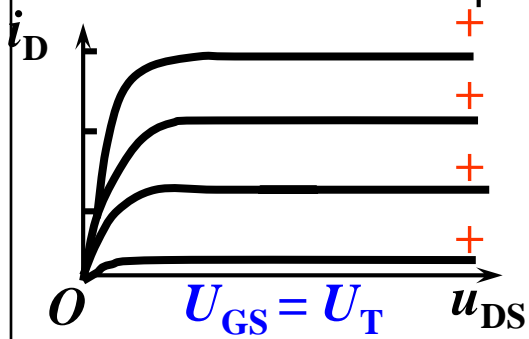
2. **P沟道耗尽型MOS管**的夹断电压 $U_{GS(off)} > 0$
 U_{GS} 可在正、负值的一定范围内实现对 i_D
的控制，漏-源之间应加负电源电压。

三、VMOS管

VMOS管漏区散热面积大，可制成大功率管。



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			

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
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			

1.7.3 场效应管的主要参数

一、直流参数

1. 饱和漏极电流 I_{DSS}

为耗尽型场效应管的一个重要参数。

2. 夹断电压 U_P 或 $U_{GS(off)}$

为耗尽型场效应管的一个重要参数。

3. 开启电压 U_T 或 $U_{GS(th)}$

为增强型场效应管的一个重要参数。

4. 直流输入电阻 R_{GS}

输入电阻很高。结型场效应管一般在 $10^7 \Omega$ 以上，绝缘栅场效应管更高，一般大于 $10^9 \Omega$ 。

1.7.3 场效应管的主要参数

二、交流参数

1. 低频跨导 g_m

用以描述栅源之间的电压 u_{GS} 对漏极电流 i_D 的控制作用。

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

单位： i_D 毫安 (mA)； u_{GS} 伏 (V)； g_m 毫西门子 (mS)

2. 极间电容

这是场效应管三个电极之间的等效电容，包括 C_{gs} 、 C_{gd} 、 C_{ds} 。
极间电容愈小，则管子的高频性能愈好。一般为几个皮法。

1.7.3 场效应管的主要参数

三、极限参数

1.最大漏极电流 I_{DM}

2.漏源击穿电压 $U_{(BR)DS}$

当漏极电流 I_D 急剧上升产生雪崩击穿时的 U_{DS} 。

3. 漏极最大允许耗散功率 P_{DM}

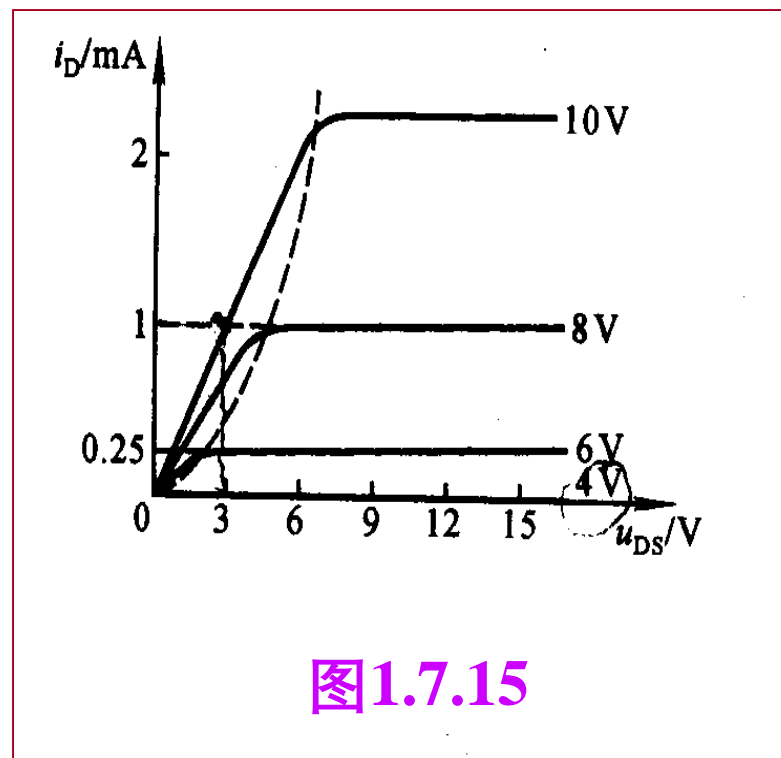
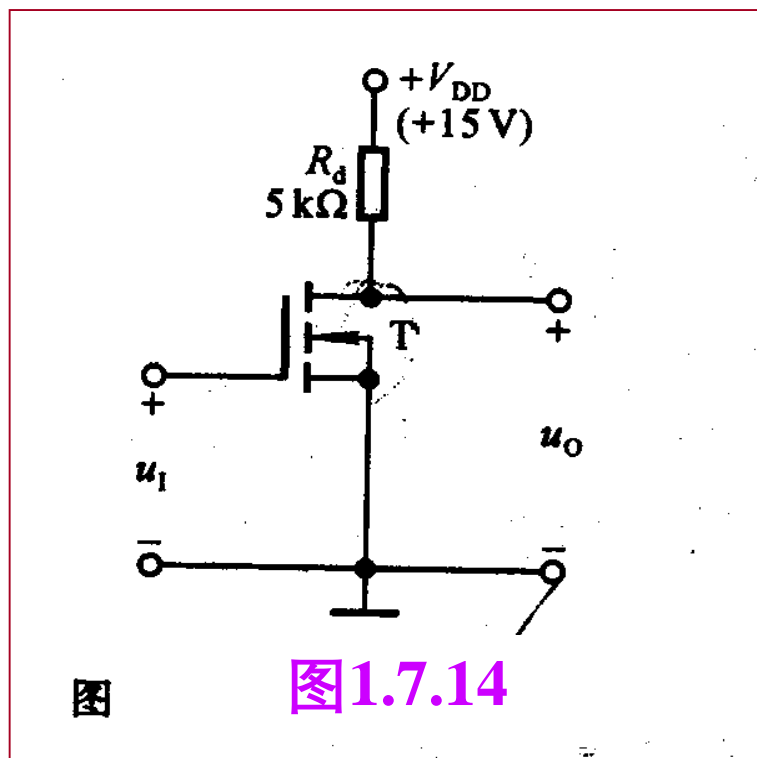
由场效应管允许的温升决定。漏极耗散功率转化为热能使管子温度升高。

4. 栅源击穿电压 $U_{(BR)GS}$

场效应管工作时，栅源间 PN 结处于反偏状态，若 $U_{GS} > U_{(BR)GS}$ ，PN 将被击穿，这种击穿与电容击穿的情况类似，属于破坏性击穿。

1.7.3 场效应管的主要参数

例1.7.2 电路如图1.7.14所示，其中管子T的输出特性曲线如图1.7.15所示。试分析 u_i 为0V、8V和10V三种情况下 u_o 分别为多少伏？



分析：N沟道增强型MOS管，开启电压 $U_{GS(th)} = 4V$

1.7.3 场效应管的主要参数

(1) u_i 为 0V，即 $u_{GS} = u_i = 0$ ，管子处于夹断状态

$$u_0 = V_{DD} = 15V$$

(2) $u_{GS} = u_i = 8V$ 时，从输出特性曲线可知，管子工作在恒流区

$$i_D = 1mA, \quad u_0 = u_{DS} = V_{DD} - i_D R_D = 10V$$

(3) $u_{GS} = u_i = 10V$ 时，

若工作在恒流区， $i_D = 2.2mA$ 。因而 $u_0 = 15 - 2.2 * 5 = 4V$

但是， $u_{GS} = 10V$ 时的预夹断电压为

$$u_{DS} = u_{GS} - U_T = (10 - 4)V = 6V$$

可见，此时管子工作在可变电阻区

1.7.3 场效应管的主要参数

从输出特性曲线可得

$u_{GS} = 10V$ 时d-s之间的等效电阻

(D在可变电阻区，任选一点，如图)

$$R_{ds} = \frac{u_{ds}}{i_D} \approx \left(\frac{3}{1 \times 10^{-3}} \right) \Omega = 3K\Omega$$

所以输出电压为

$$u_0 = \frac{R_{ds}}{R_{ds} + R_d} \bullet V_{DD} \approx 5.6V$$

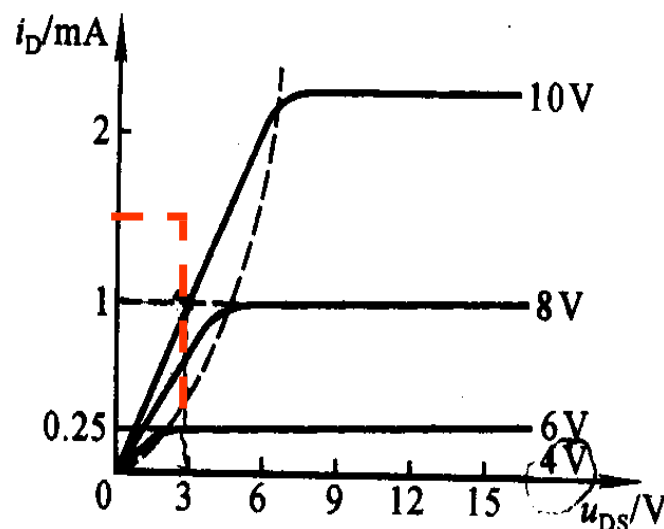


图 1.4.14 例 1.4.1 输出特性曲线

1.7.4 场效应管与晶体管的比较

晶体管

场效应管

结构

NPN型、PNP型

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

C与E一般不可倒置使用

D与S有的型号可倒置使用

载流子

多子扩散少子漂移

多子运动

输入量

电流输入

电压输入

控制

电流控制电流源
 $\text{CCCS}(\beta)$

电压控制电流源
 $\text{VCCS}(g_m)$

1.7.4 场效应管与晶体管的比较

	晶体管	场效应管
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
静电影响	不受静电影响	易受静电影响

第 1 章

小 结

第一章 小结

一、两种半导体和两种载流子

两 种
半导体 $\left\{ \begin{array}{l} \text{N 型} \\ \text{P 型} \end{array} \right.$

两种载流
子的运动 $\left\{ \begin{array}{l} \text{自由电子} \\ \text{空穴} \end{array} \right.$

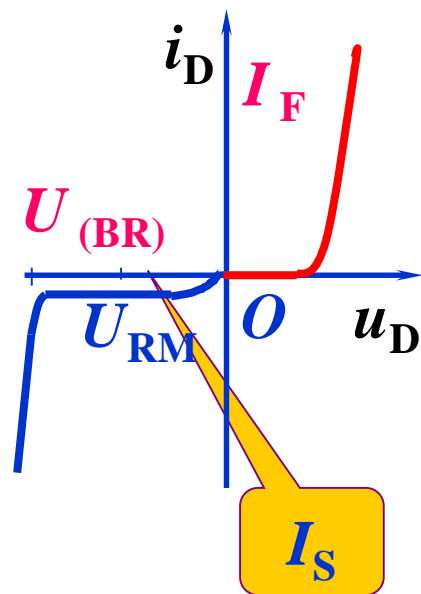
二、二极管

1. 特性 — 单向导电

正向电阻小(理想为 0)，反向电阻大(∞)。

$$i_D = I_S (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \left\{ \begin{array}{l} u_D > 0, \quad i_D = I_S (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1) \\ u_D < 0, \quad I = -I_S \approx 0 \end{array} \right.$$

第一章 小结



2. 主要参数

正向 — 最大平均电流 I_F

反向 — { 最大反向工作电压 $U_{(BR)}$ (超过则击穿)
反向饱和电流 I_R (I_S) (受温度影响)

第一章 小结

3. 二极管的等效模型

理想模型（大信号状态采用）

正偏导通 电压降为零 相当于理想开关闭合

反偏截止 电流为零 相当于理想开关断开

恒压降模型

正偏电压 $\geq U_{D(on)}$ 时导通 等效为恒压源 $U_{D(on)}$

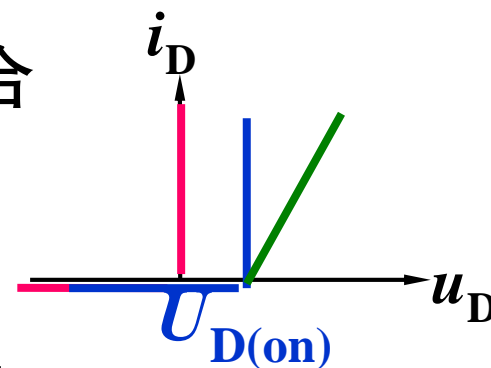
否则截止，相当于二极管支路断开

硅管： $U_{D(on)} = (0.6 \sim 0.8) \text{ V}$ 估算时取 0.7 V

锗管： $(0.1 \sim 0.3) \text{ V}$ 0.2 V

折线近似模型

相当于有内阻的恒压源 $U_{D(on)}$



第一章 小结

4. 二极管的分析方法

步骤

5. 特殊二极管

	工作条件	主要用途
稳压二极管	反 偏	稳 压
发光二极管	正 偏	发 光
光电二极管	反 偏	光电转换

第一章 小结

三、两种半导体放大器件

- 双极型半导体三极管 (晶体三极管 **BJT**)
 - 两种载流子导电
- 单极型半导体三极管 (场效应管 **FET**)
 - 多数载流子导电

晶体三极管

1. 形式与结构 $\begin{Bmatrix} \text{NPN} \\ \text{PNP} \end{Bmatrix}$ 三区、三极、两结

2. 特点

基极电流控制集电极电流并实现放大

第一章 小结

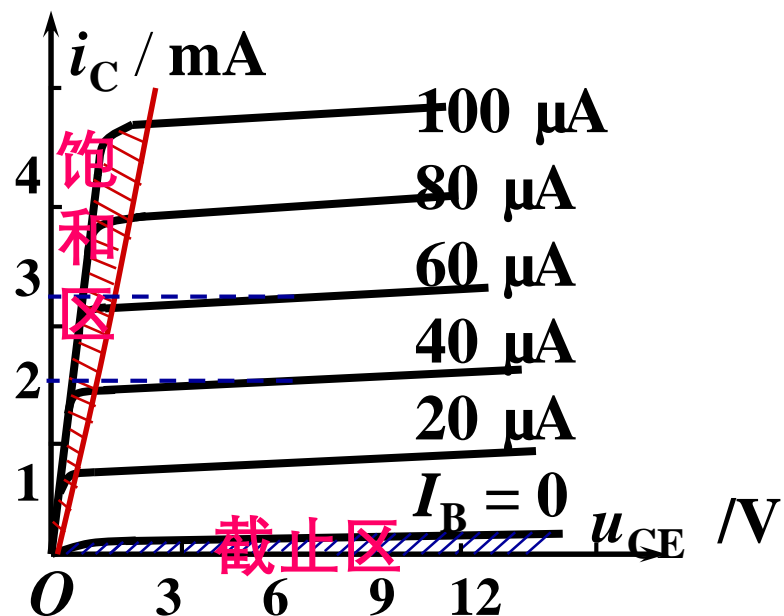
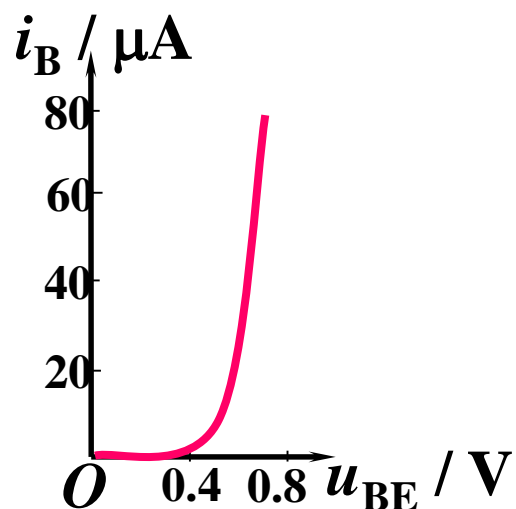
放大条件 { 内因：发射区载流子浓度高、
基区薄、集电区面积大
外因：发射结正偏、集电结反偏

3. 电流关系

$$\begin{cases} I_E = I_C + I_B \\ I_C = \beta I_B + I_{CEO} \\ I_E = (1 + \beta) I_B + I_{CEO} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} I_E = I_C + I_B \\ I_C = \beta I_B \\ I_E = (1 + \beta) I_B \end{cases}$$

第一章 小结

4. 特性



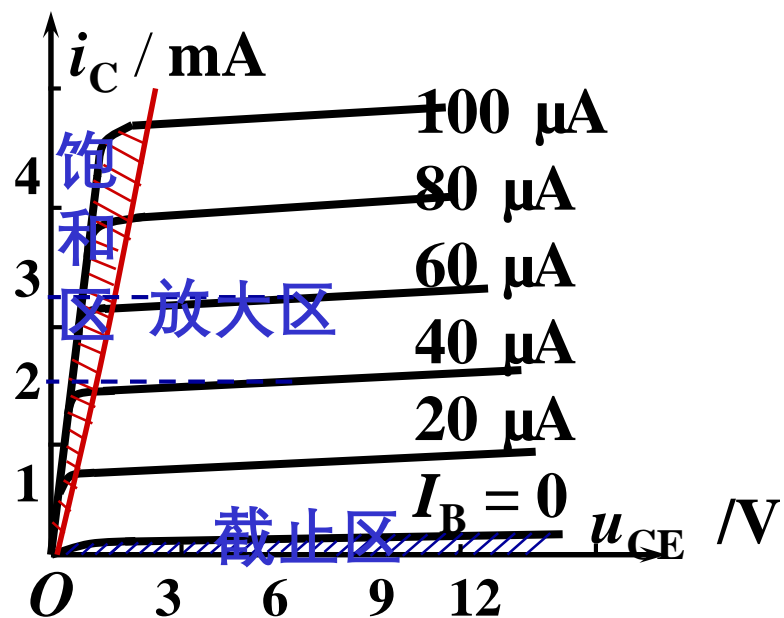
死区电压 (U_{th}) : **0.5 V** (硅管) **0.1 V** (锗管)

工作电压 ($U_{BE(on)}$) : **0.6 ~ 0.8 V** 取 **0.7 V** (硅管)

0.2 ~ 0.3 V 取 **0.3 V** (锗管)

第一章 小结

放大区特点：



1) i_B 决定 i_C

2) 曲线水平表示恒流

3) 曲线间隔表示受控

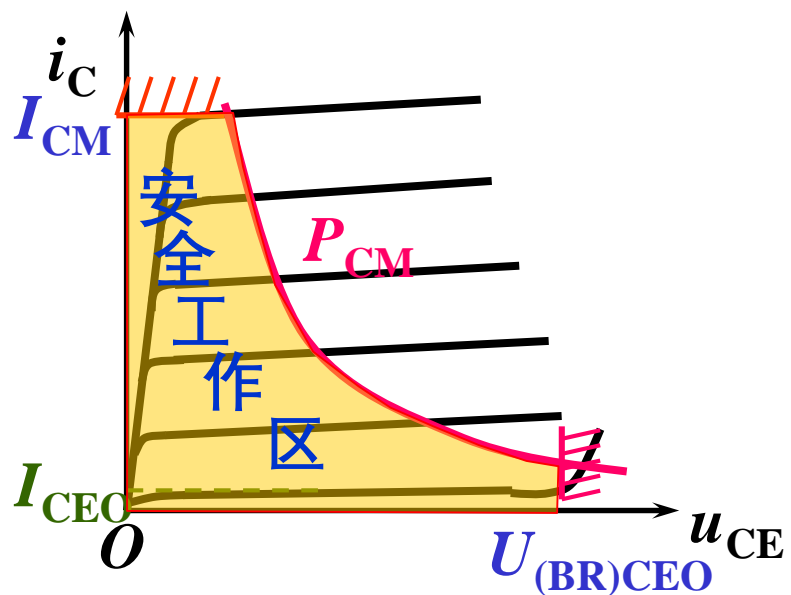
第一章 小结

5. 参数

特性参数

- 电流放大倍数 $\begin{cases} \beta & \beta = \alpha / (1 - \alpha) \\ \alpha & \alpha = \beta / (1 + \beta) \end{cases}$
- 极间反向电流 $\begin{cases} I_{\text{CBO}} \\ I_{\text{CEO}} = (1 + \beta) I_{\text{CBO}} \end{cases}$

极限参数 $\left\{ \begin{array}{l} I_{\text{CM}} \\ P_{\text{CM}} \\ U_{(\text{BR})\text{CEO}} \end{array} \right.$



第一章 小结

场效应管

1. 分类

按导电沟道分 { N 沟道
P 沟道

按结构分 { 绝缘栅型 { 增强型
(MOS) 耗尽型
结型 (耗尽型)

按特性分 { 增强型 $u_{GS} = 0$ 时, $i_D = 0$
耗尽型 $u_{GS} = 0$ 时, $i_D \neq 0$

第一章 小结

2. 特点

栅源电压改变沟道宽度从而控制漏极电流

输入电阻高，工艺简单，易集成

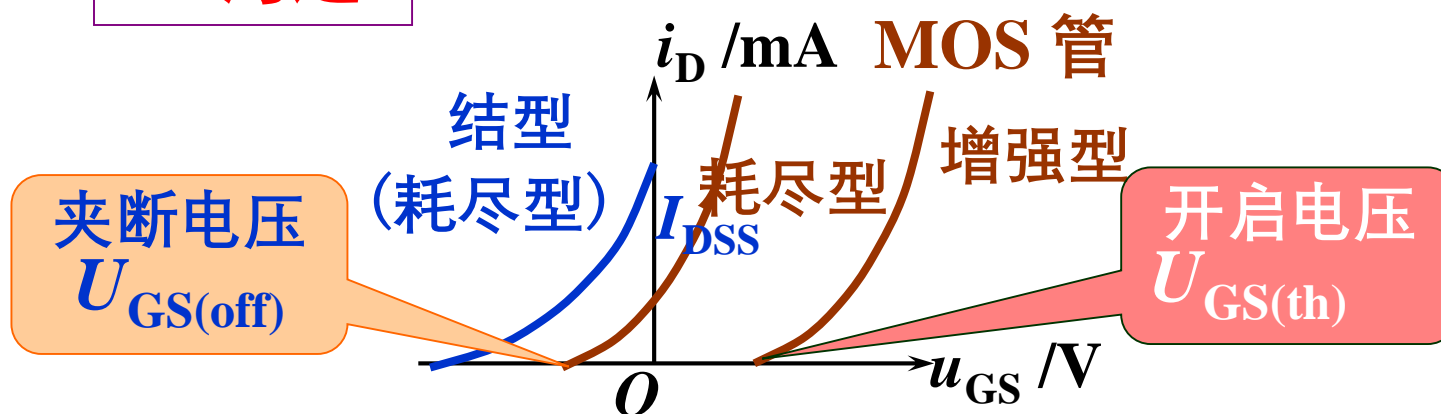
3. 特性

由于 FET 无栅极电流，故采用转移特性和输出特性描述

第一章 小结

不同类型 FET 转移特性比较

N 沟道



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

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

I_{DO} 是 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的 i_D 值

第一章 小结

四、晶体管电路的基本问题和分析方法

三种工作状态

判断导通还是截止：

以 NPN 为例： $U_{BE} > U_{(th)}$ 则导通

$U_{BE} < U_{(th)}$ 则截止

状态	电流关系	条 件
放大	$I_C = \beta I_B$	发射结正偏 集电结反偏
饱和 临界	$I_C \neq \beta I_B$ $I_{CS} = \beta I_{BS}$	两个结正偏 集电结零偏
截止	$I_B < 0, I_C = 0$	两个结反偏

第一章 小结

判断饱和还是放大：

1. 电位判别法

NPN 管

$$U_C > U_B > U_E \quad \text{放大}$$

$$U_E < U_C \leq U_B \quad \text{饱和}$$

PNP 管

$$U_C < U_B < U_E \quad \text{放大}$$

$$U_E > U_C \geq U_B \quad \text{饱和}$$

2. 电流判别法

$$I_B > I_{BS} \quad \text{则饱和} \qquad I_B < I_{BS} \quad \text{则放大}$$

$$I_{BS} = \frac{I_{CS}}{\beta} = \frac{V_{CC} - U_{CE(sat)}}{\beta(R_C + R_E)}$$