

第1章 常用半导体器件

半导体器件是构成**电子电路**的基本元件，常用的半导体器件有**二极管**、**晶体管**、**场效应管**和**晶闸管**等等。

本章要求：

- 一、了解半导体的基础知识及PN结的工作原理；
- 二、熟悉二极管的单向导电性，稳压管的稳压作用，晶体管与绝缘栅型场效应管的放大作用及三个工作区域；
- 三、掌握二极管、稳压管、晶体管和绝缘栅型场效应管的工作原理、外特性和主要参数，并会分析相应电路；
- 四、了解选用器件的原则。

目 录

1.1 半导体基础知识

1.2 半导体二极管

1.3 晶体三极管

1.4 场效应管

1.5 集成电路中的元件

1.1 半导体基础知识

半导体：导电性能介于导体和绝缘体之间的物质。

其导电特性：

热敏特性

光敏特性

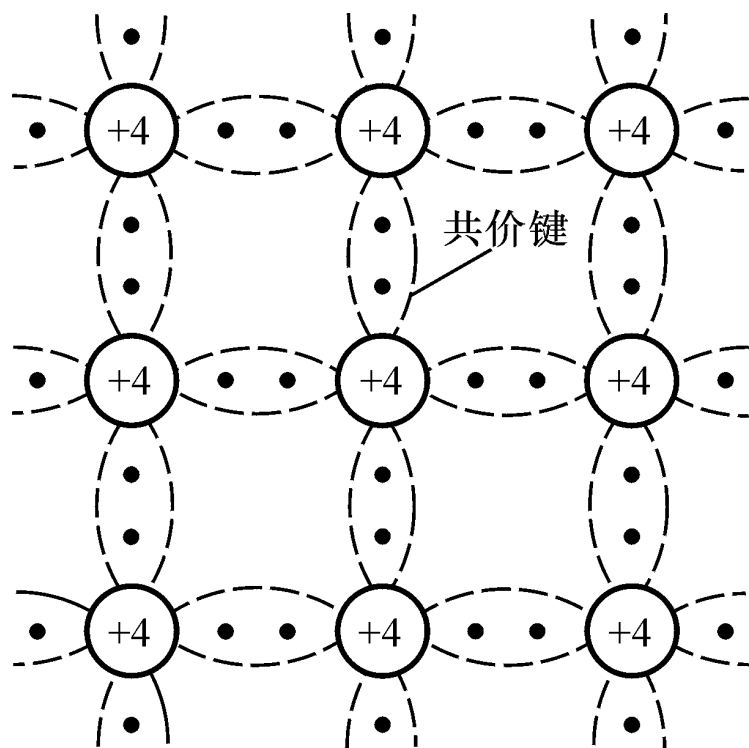
掺杂特性

常用的半导体材料硅Si和锗Ge，均为四价元素，即有四个价电子。

1.1.1 本征半导体

纯净的具有晶体结构的半导体。

一、本征半导体的晶体结构



价电子

在获得一定能量后，
形成：

两种载流子

(自由) 电子与空穴

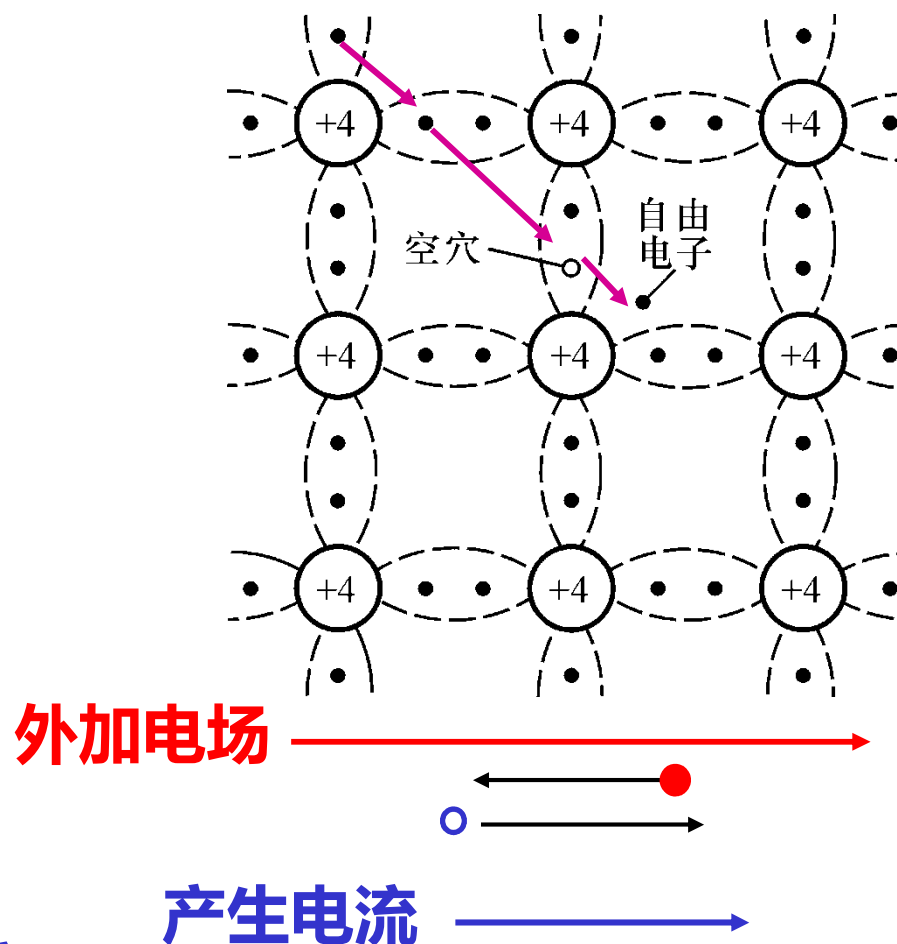
两种运动

电子运动与空穴运动

外加电场后，
形成：

两种电流

电子电流与空穴电流



二、本征半导体导电特点

两种载流子：电子与空穴

成对**本征激发**和**复合**；在一定温度下，载流子的浓度是一定的，达到**动态平衡**；环境温度升高时，载流子的浓度升高，导电性能也增强，所以半导体器件的**温度稳定性差**。

两种导电方式：电子导电与空穴导电

这是半导体导电的特殊性质。

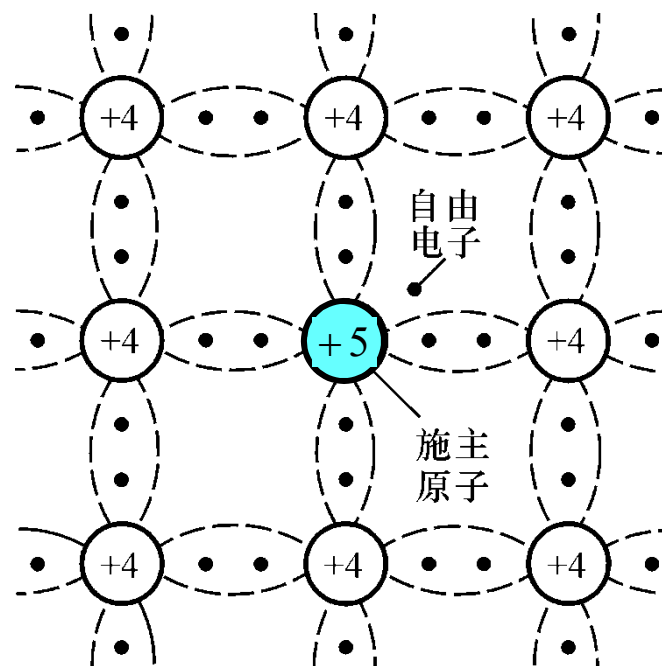
本征半导体的载流子浓度很低，所以导电性能很差

1.1.2 杂质半导体

一、N型半导体(Negative)

在硅或锗晶体中掺入少量的**五价元素**（如磷P）。

自由电子是多数载流子，**空穴**是少数载流子。

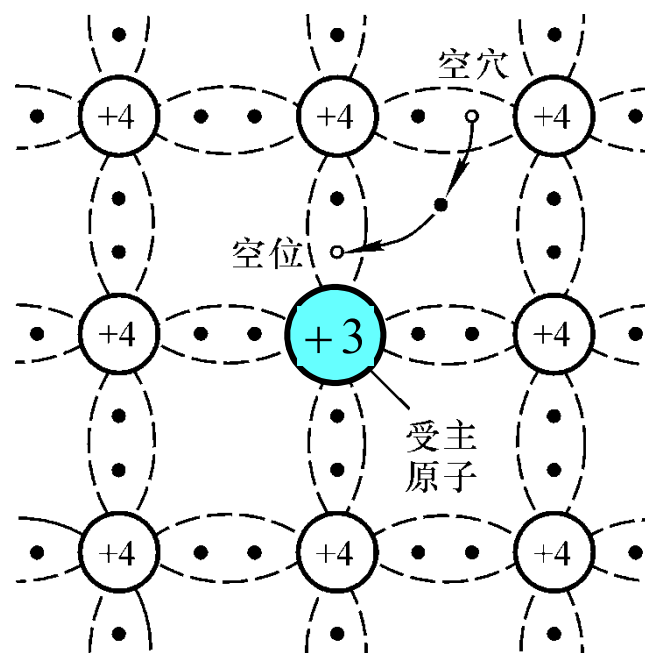


主要是**电子导电**，又称**电子半导体**。

二、P型半导体(Positive)

在硅或锗晶体中掺入少量的**三价元素**（如硼B）。

空穴是**多数载流子**，自由电子是**少数载流子**。



主要是**空穴导电**，又称**空穴半导体**。



N型半导体带负电，P型半导体带正电？

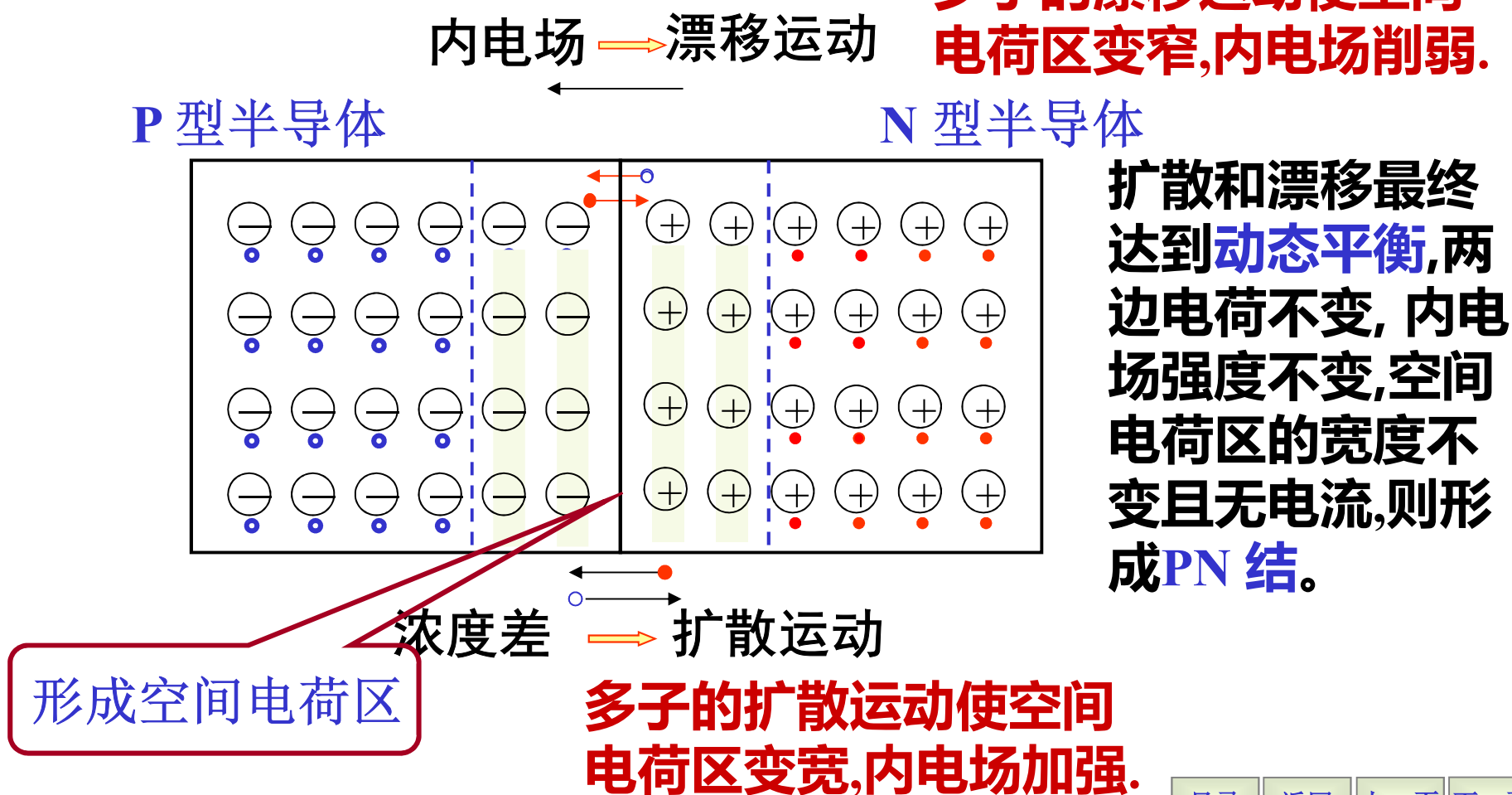
不论N型半导体还是P型半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但是整个晶体仍然是**不带电的**。

多子浓度和少子浓度主要由什么决定？

多子浓度决定于**掺杂浓度**，掺杂多则多子多，导电性越强，从而使杂质半导体的导电性能具有**可控性**。少子浓度很低，主要受**温度**影响，温度高则少子多。

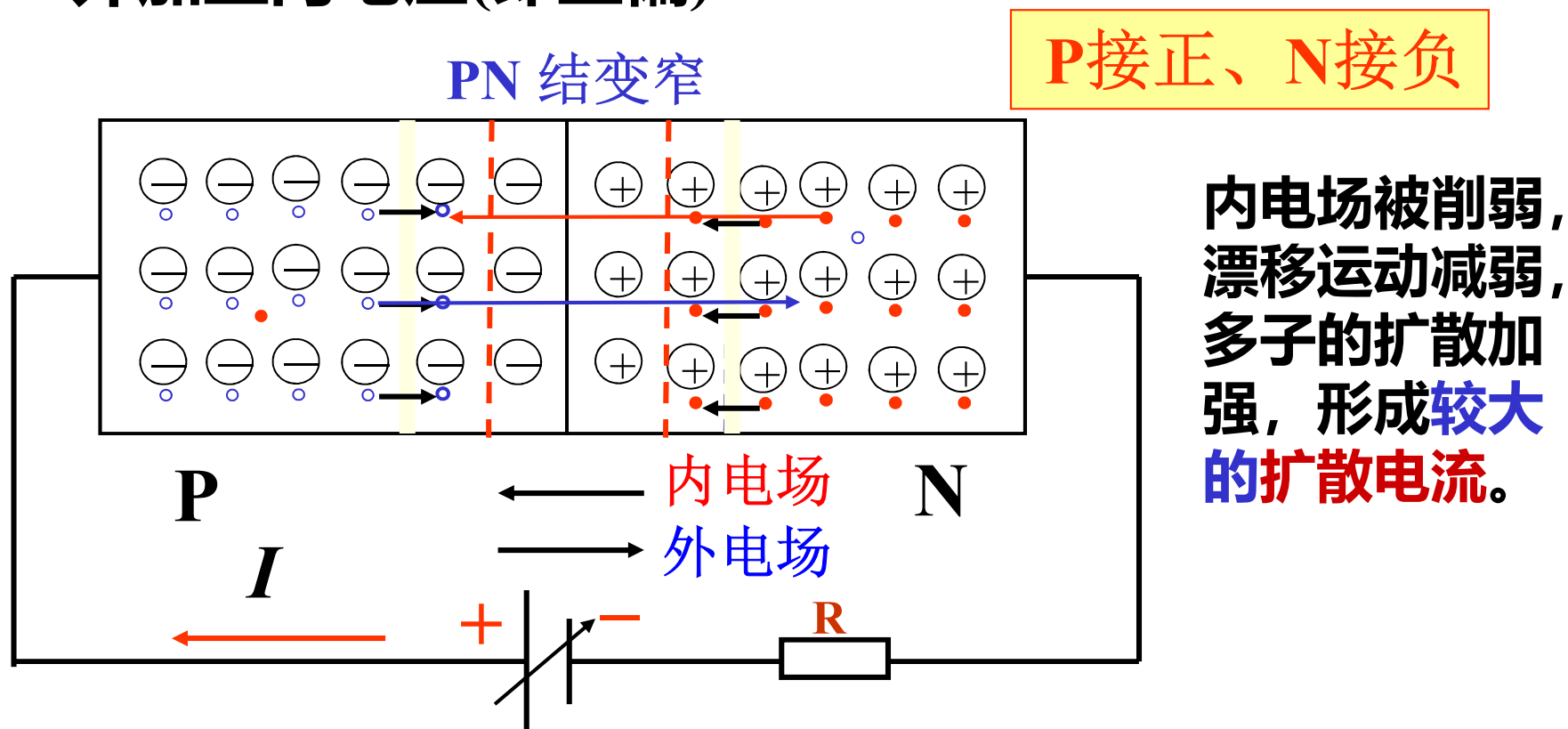
1.1.3 PN结

一、PN结的形成



二、PN结的单向导电性

1. 外加正向电压(即正偏)

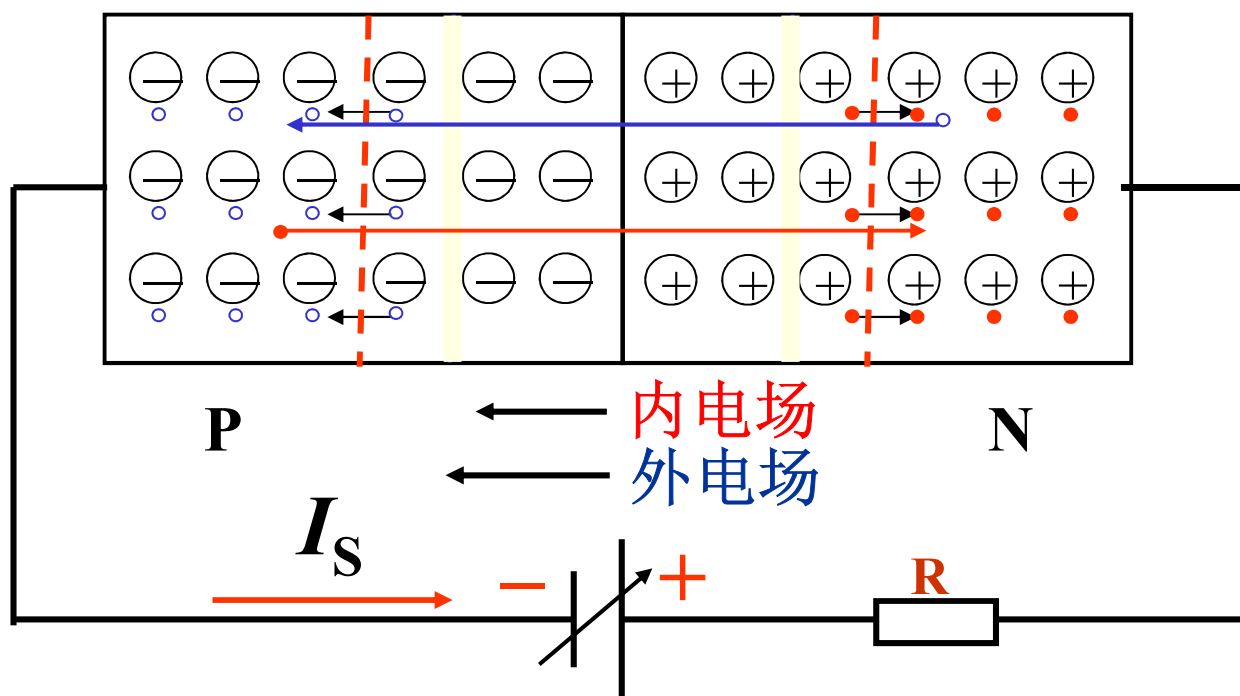


此时,正向电流较大,PN结处于低阻导通状态。正向电流在一定范围内随外加电压的加强而增大。

2. 外加反向电压(即反偏)

PN 结变宽

P接负、N接正



内电场被加强，
扩散运动减弱，
少子的漂移加强，
由于少子数量很少，
形成很小的漂移电流。

此时，反向电流较小，PN结处于高阻截止状态。
反向电流受温度影响大，在一定范围内基本不受外加电压的影响。

结 论 PN结具有单向导电性

三、PN结的电流方程

PN结所加端电压 u 与流过它的电流 i 的关系为

$$i = I_S \left(e^{\frac{qu}{kT}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{u}{U_T}} - 1 \right)$$

其中: I_S 为反向饱和电流;

q 为电子的电量, k 为玻尔兹曼常数,

T 为热力学温度;

温度的电压当量 $U_T = kT / q$

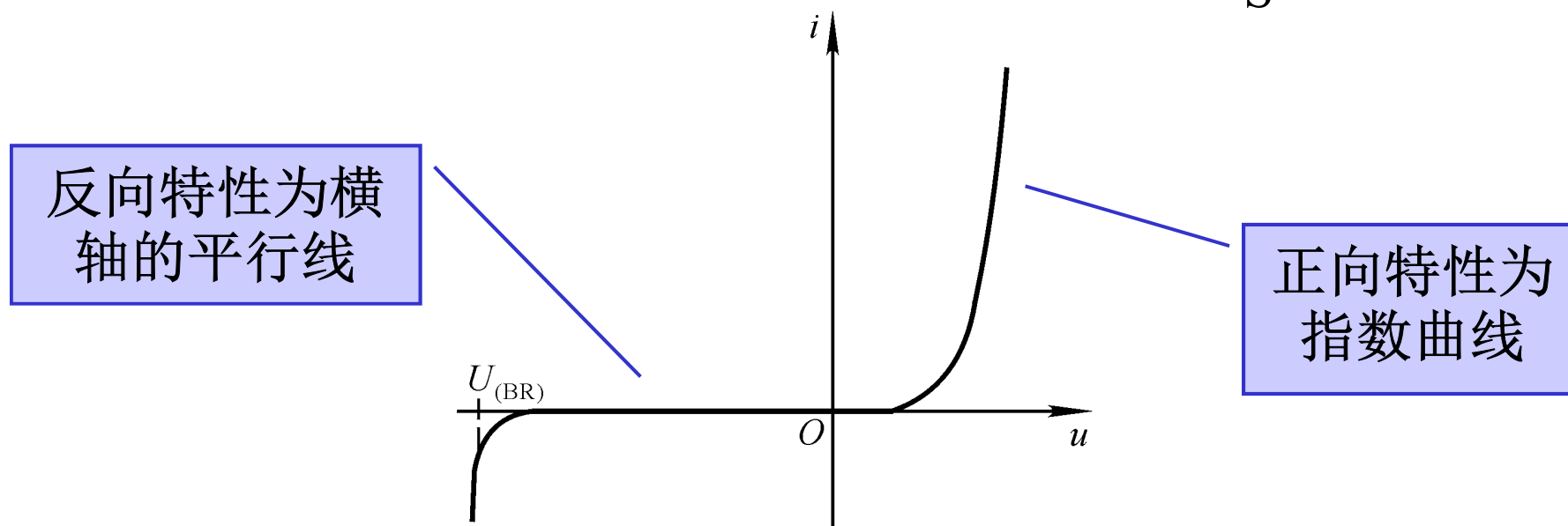
常温下, 即 $T=300\text{K}$ (开)时, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

四、PN结的伏安特性

$$i = I_S \left(e^{\frac{u}{U_T}} - 1 \right)$$

正向特性：当 $u > 0$ ，且 $u \gg U_T$ 时， $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$

反向特性：当 $u < 0$ ，且 $|u| \gg U_T$ 时， $i \approx -I_S$



**反向击穿分为齐纳击穿
和雪崩击穿**

五、PN结的电容效应

1. 势垒电容

PN结外加电压变化时，空间电荷区的宽度将发生变化，有电荷的积累和释放的过程，与电容的充放电过程相同。空间电荷区宽窄变化所等效的电容称为势垒电容 C_b 。

2. 扩散电容

PN结外加的正向电压变化时，在扩散过程中载流子的浓度及浓度梯度均有变化，电荷的积累和释放过程与电容的充放电过程相同，其等效电容称为扩散电容 C_d 。

结电容：

$$C_j = C_b + C_d$$

结电容不是常量；对于低频信号呈现出很大的容抗，其作用可以忽略不计；只有在信号频率较高时才考虑结电容的作用。

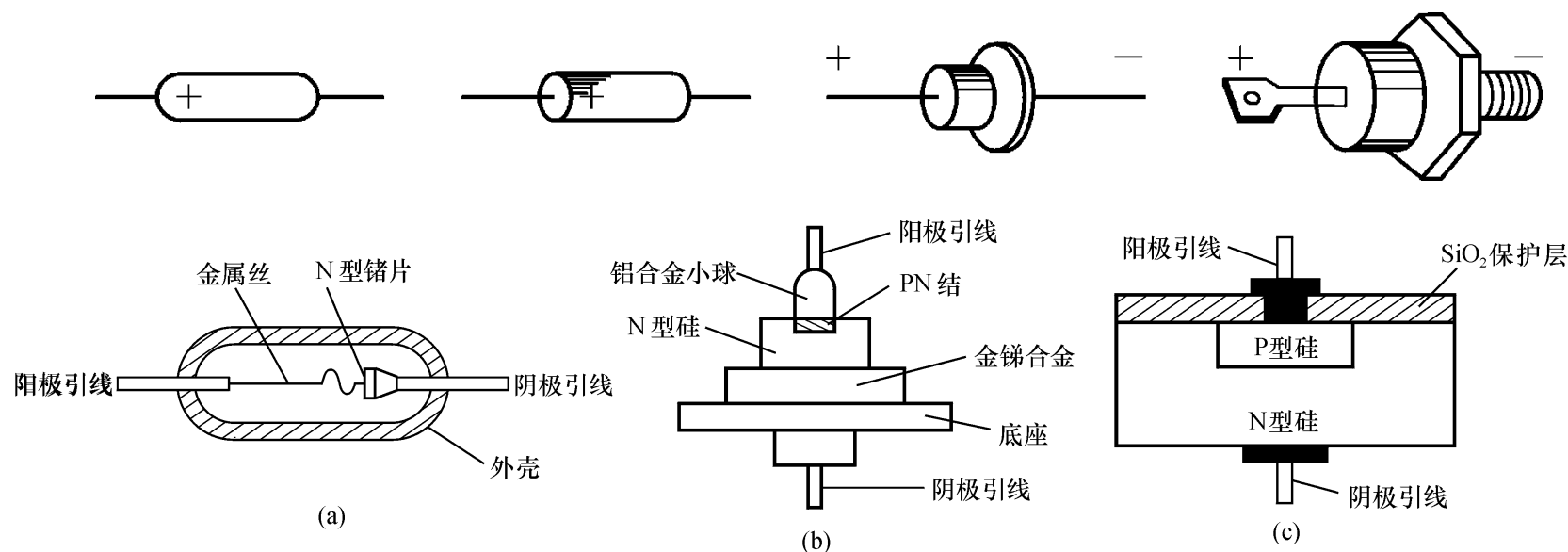


PN结的宽度和掺杂浓度有什么关系？

齐纳击穿和雪崩击穿有什么区别，哪一种的击穿电压较低？

1.2 半导体二极管(Diode)

1.2.1 基本结构 将PN结加上电极引线并用外壳封装而成



(a)点接触型:

结面积小, 结电容小
故允许通过的电流小
工作频率高
适于高频电路和小功率整流

(b)面接触型:

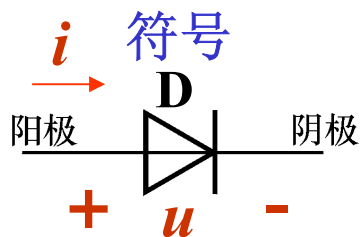
结面积大, 结电容大
故允许通过的电流大
工作频率低
一般仅作为整流管

(c)平面型:

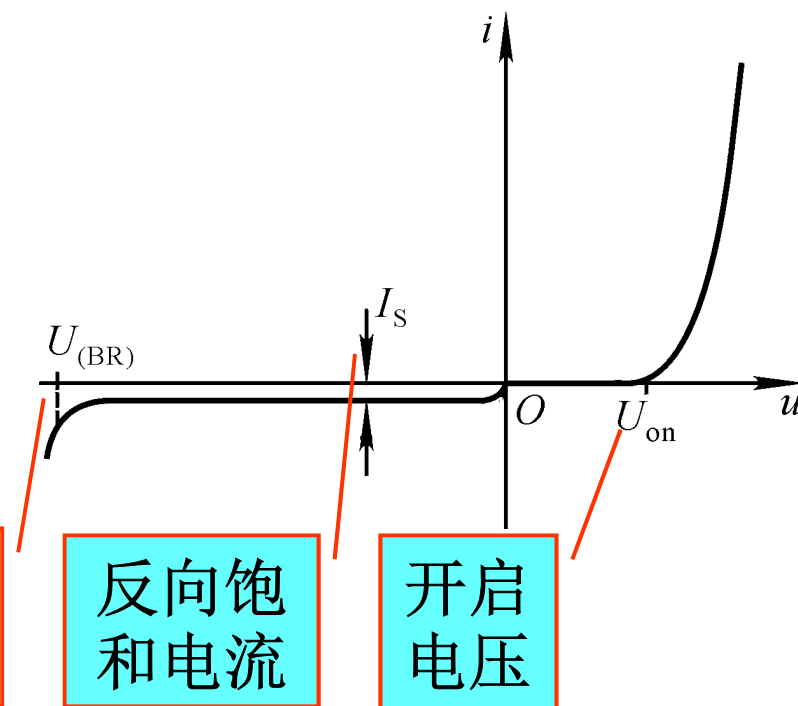
结面积可小可大
大的可用于大功率整流
小的可作为数字电路中的开关管

1.2.2 二极管的伏安特性

与PN结的伏安特性类似



$$i = I_S \left(e^{\frac{u}{U_T}} - 1 \right)$$



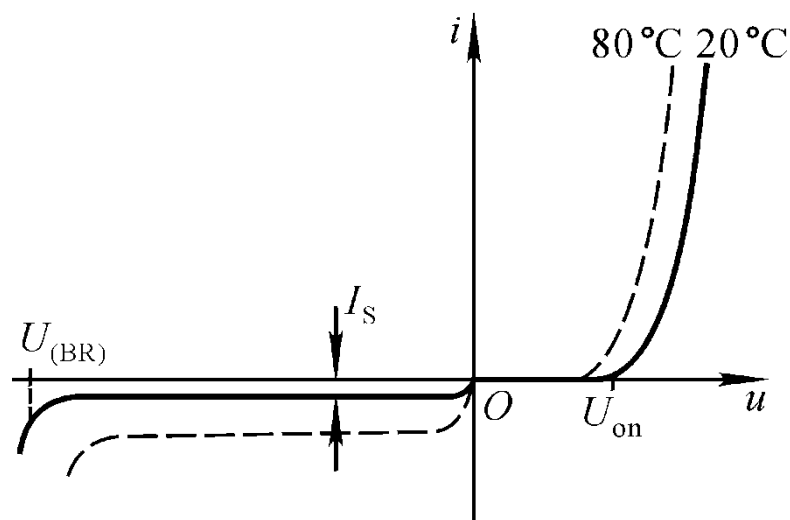
反向击穿电压

反向饱和电流

开启电压

材料	开启电压 U_{on}	导通电压 U_D	反向饱和电流 I_s
硅Si	0.5V	0.6~0.8V	0.1 μ A以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	几十 μ A

伏安特性易受温度影响



$T \uparrow \rightarrow$ 正向特性左移, 反向特性下移

$T \uparrow \rightarrow$ 开启电压 $U_{\text{on}} \downarrow$, 在电流不变情况下正向压降 $u \downarrow$

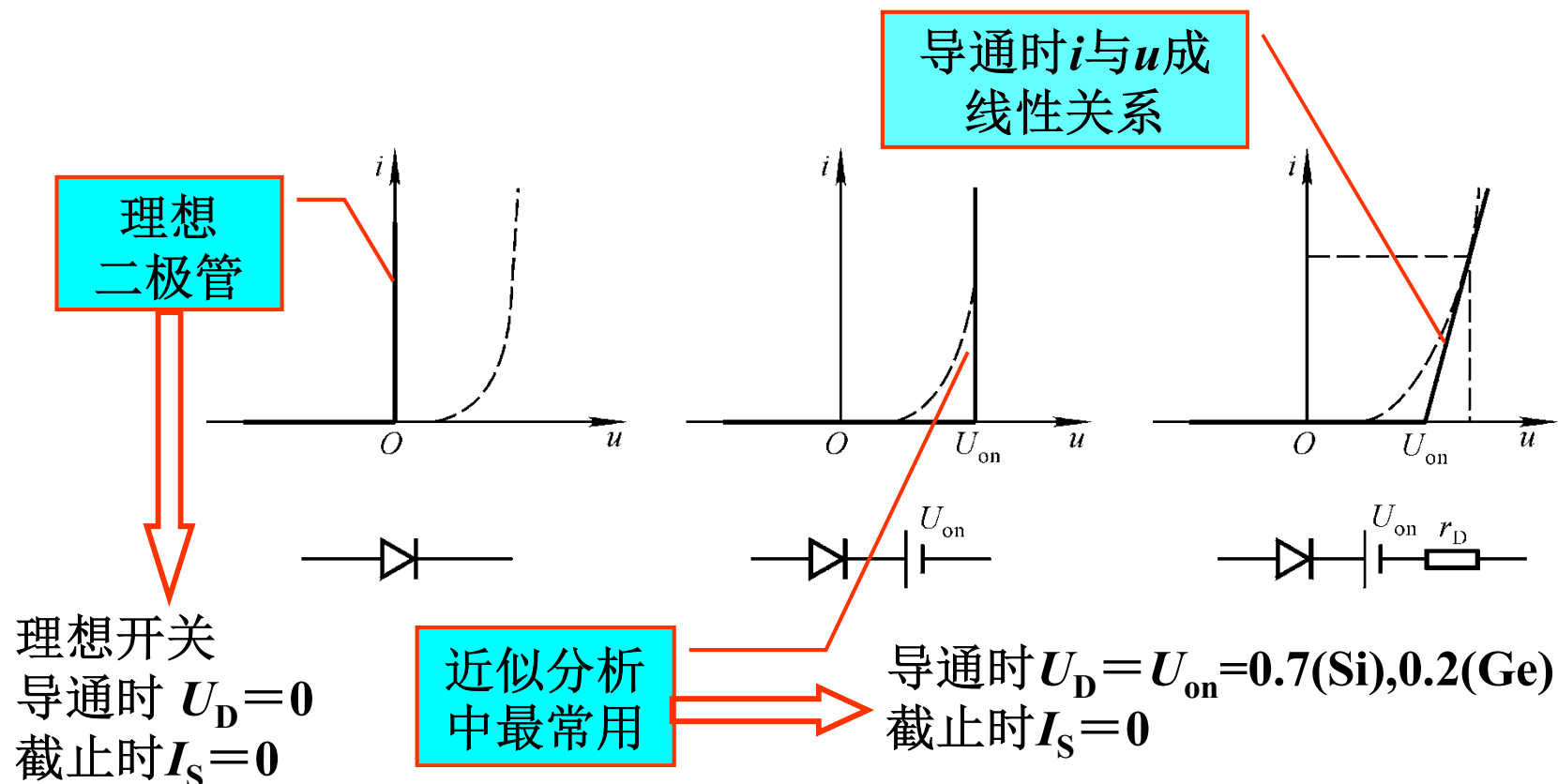
\rightarrow 反向饱和电流 $I_S \uparrow$, $U_{(\text{BR})} \downarrow$

1.2.3 二极管的主要参数

- **最大整流电流 I_F** ：长期运行时允许通过的最大正向平均电流，超过此值将因温度过高而**烧坏**
- **最高反向工作电压 U_R** ：允许外加的最大反向电压，超过此值**可能**因反向击穿而**损坏**
- **反向电流 I_R** ：未击穿时的反向电流，易受温度影响。**越小**则单向导电性**越好**，且温度稳定性越好
- **最高工作频率 f_M** ：工作时的**上限**截止频率，超过此值时，由于结电容的作用，二极管将不能体现单向导电性

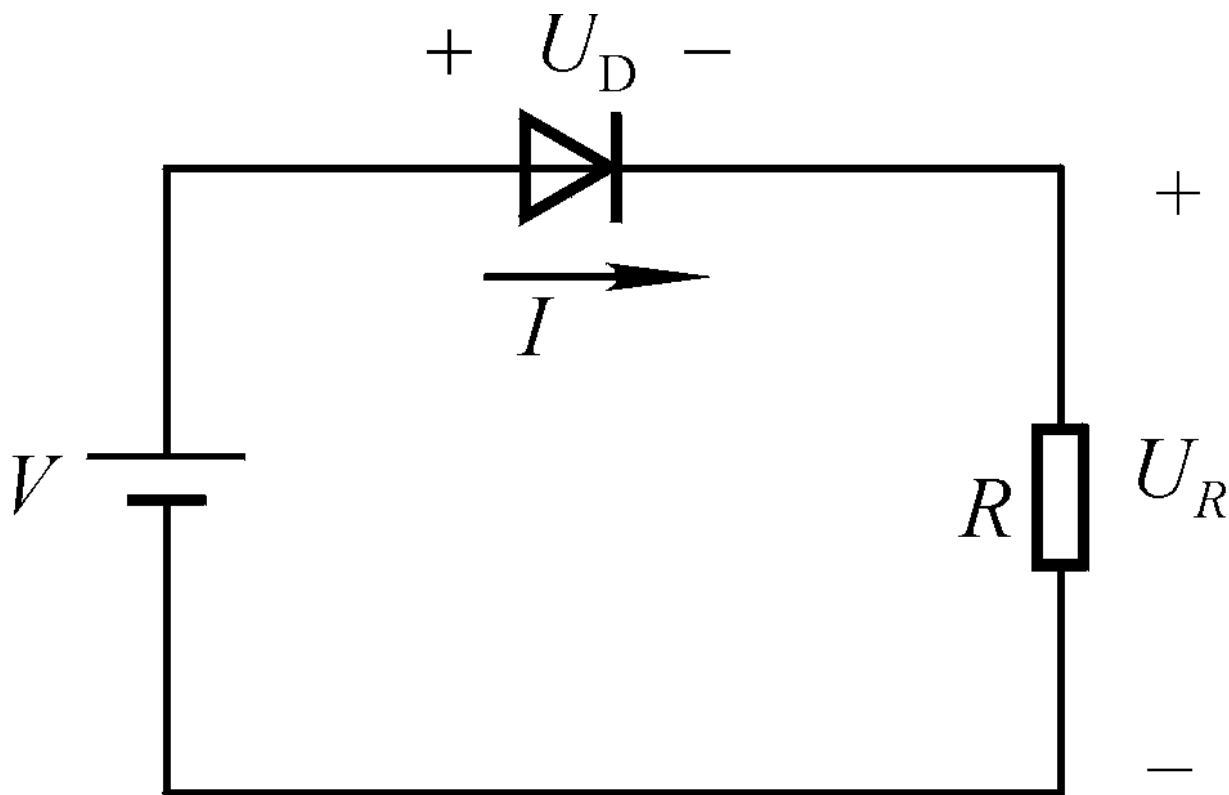
1.2.4 二极管的等效电路

一、将伏安特性折线化得到的等效电路



应根据不同情况选择不同的等效电路！

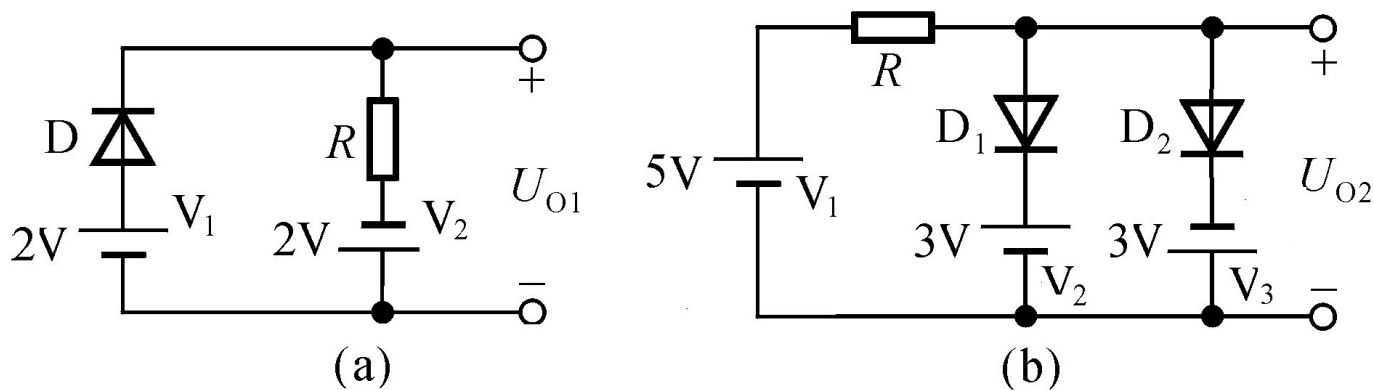
例1.2.1 已知二极管为硅管， $R=10\text{K}\Omega$ ，试分析电压源 V 分别为30V、6V和1.5V时的电流 I 。



二极管的**应用**：整流、钳位、限幅、稳压、温度传感器等等。

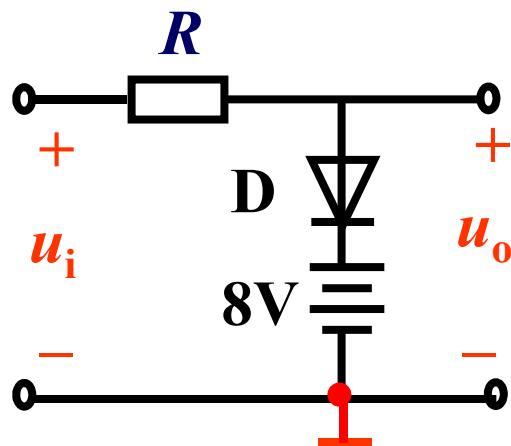
例

已知 $U_{on}=0.7V$ ，判断电路中二极管的工作状态，并求解输出电压。

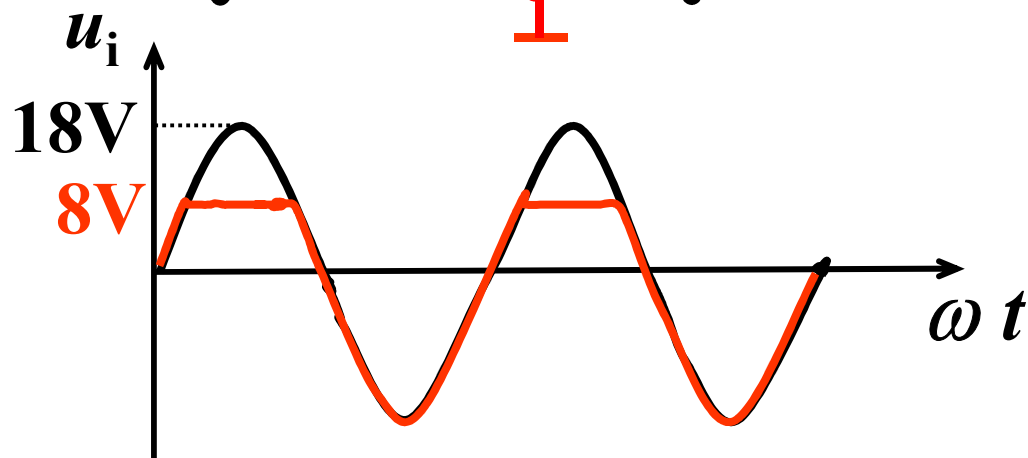


先断开二极管，求得二极管两端的电压，由此判断二极管的工作状态；再对二极管进行相应的等效，得到所求。

例



已知: $u_i = 18\sin\omega t \text{ V}$
二极管是理想的, 试画出 u_o 波形。

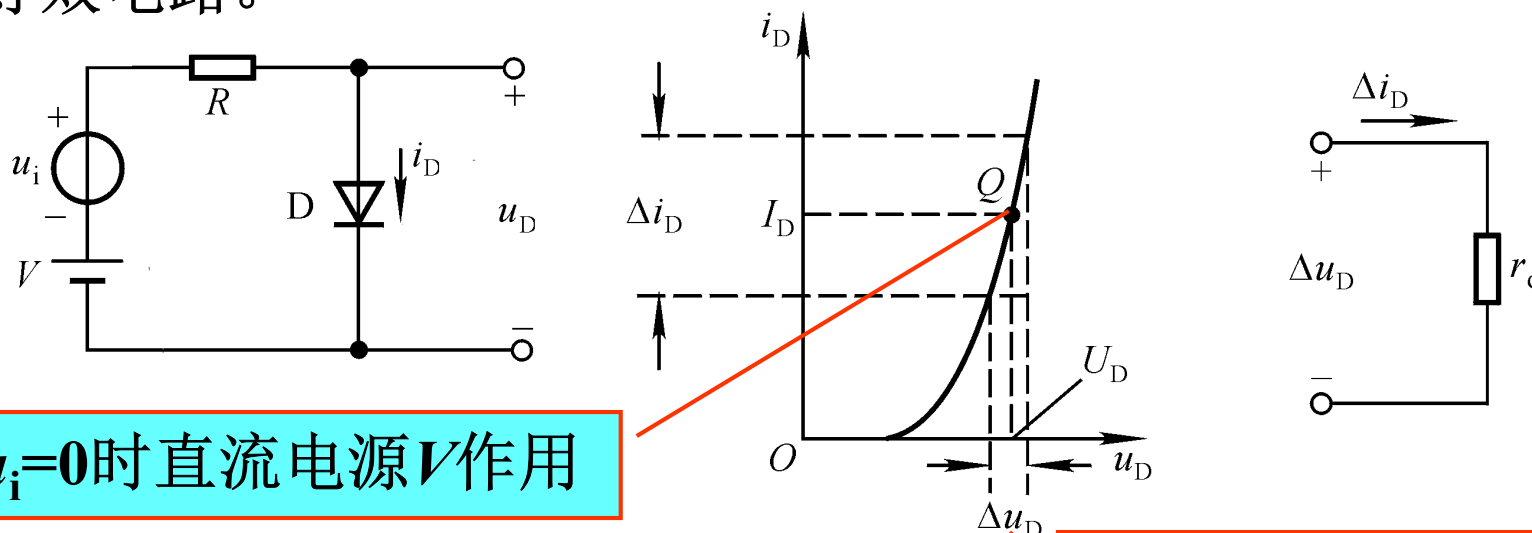


$u_i > 8\text{V}$, 二极管导通, 可看作短路 $u_o = 8\text{V}$

$u_i < 8\text{V}$, 二极管截止, 可看作开路 $u_o = u_i$

二、二极管的微变等效电路

当二极管在直流（静态）基础上叠加一微变交流信号作用（动态）时，则可将二极管等效为一个动态电阻 r_d ，也就是微变等效电路。



$u_i=0$ 时直流电源 V 作用

根据电流方程， $r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \approx \frac{U_T}{I_D}$

微变信号 u_i 作用

Q 越高， r_d 越小。

静态电流

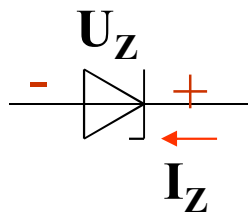
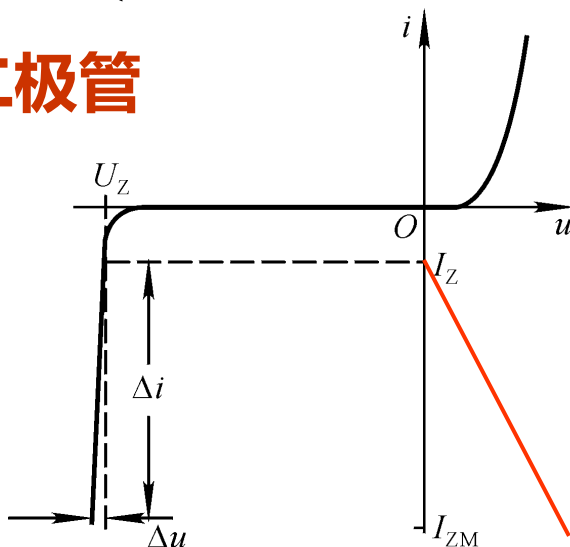
$$u_D = U_D + u_d = U_D + \frac{r_d}{R + r_d} u_i$$

1.2.5 稳压二极管(Zener Diode)

面接触型半导体硅二极管

一、伏安特性

工作于反向击穿区，
曲线很陡，表现出稳压特性。反向击穿是可逆的。



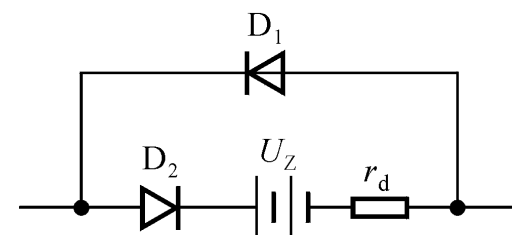
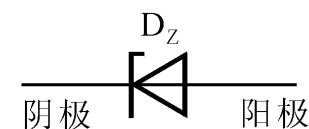
二、主要参数

稳定电压 U_Z 、稳定电流 I_Z

最大功耗 $P_{ZM} = I_{ZM} U_Z$

动态电阻 $r_z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$

温度系数 α



进入稳压区的最小电流

不至于过热而损坏的最大电流

判断稳压管的工作状态：正偏、反向截止还是反向击穿（是否稳压）

例1.2.3 在稳压电路中，已知 $U_Z = 6V$, $I_{Zmin} = 5mA$, $I_{Zmax} = 25mA$, $R_L = 600\Omega$ ，求 R 的取值。

若 $R = 5.4K\Omega$ ，请分析稳压管的工作状态；若 $R = 100\Omega$ ？

判断方法：先断开稳压管，求得此时的 U_O

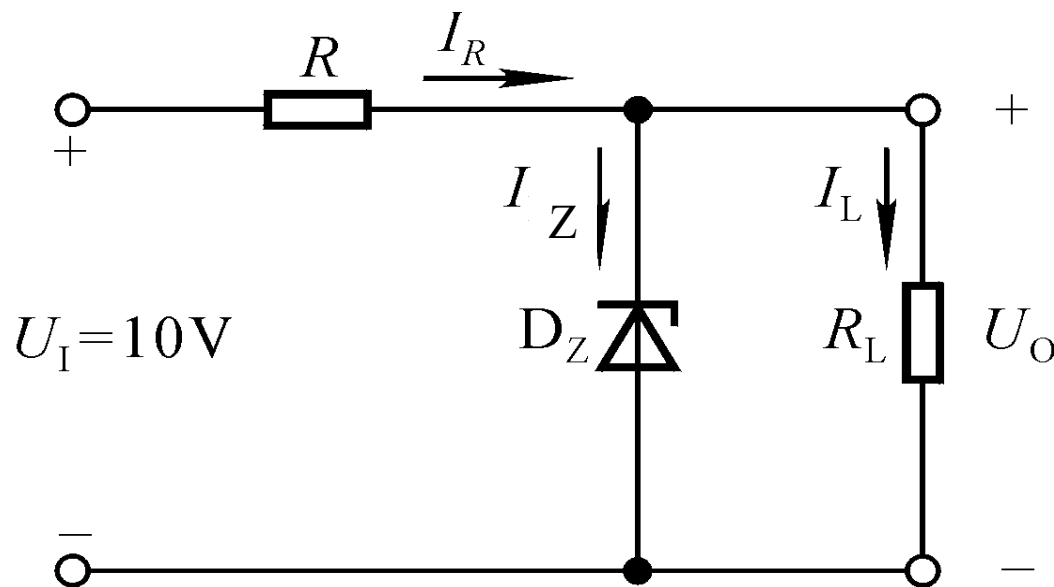
1. 若 $U_O < U_Z$ ，则稳压管反向截止。

2. 若 $U_O > U_Z$ ，则稳压管反向击穿；

再假定此时稳压管处于稳压状态，则：

$$I_Z = \frac{U_I - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L}$$

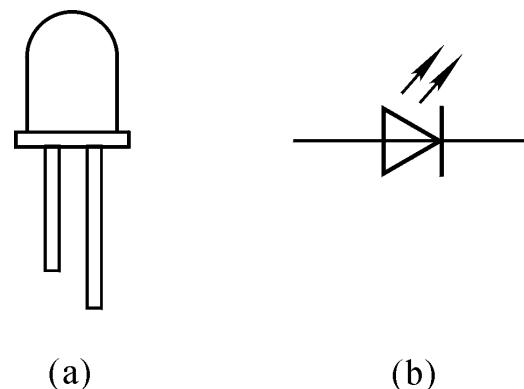
3. 当限流电阻 R 合适时，有 $I_{Zmin} \leq I_Z \leq I_{Zmax}$ ，稳压管才能稳压，才有 $U_O = U_Z$ 。



1.2.6 其他类型二极管

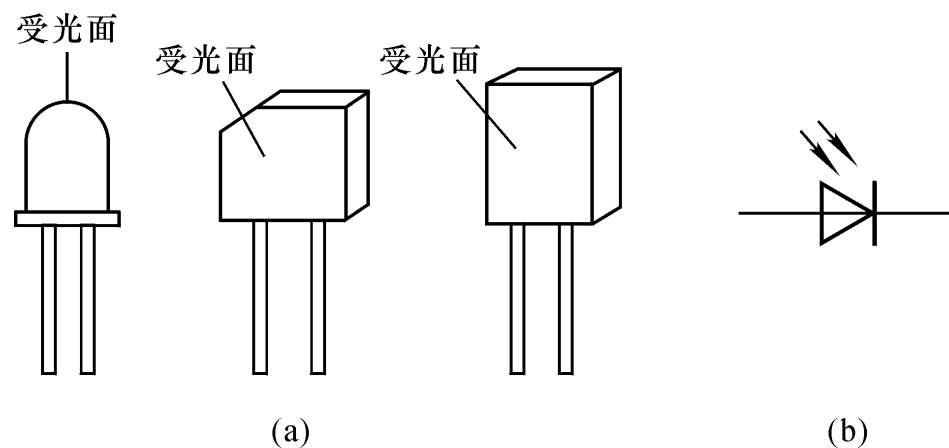
一、发光二极管(LED)

当有足够大的正向电流时，就能发出清晰的光。开启电压比普通二极管大，寿命长，节能。



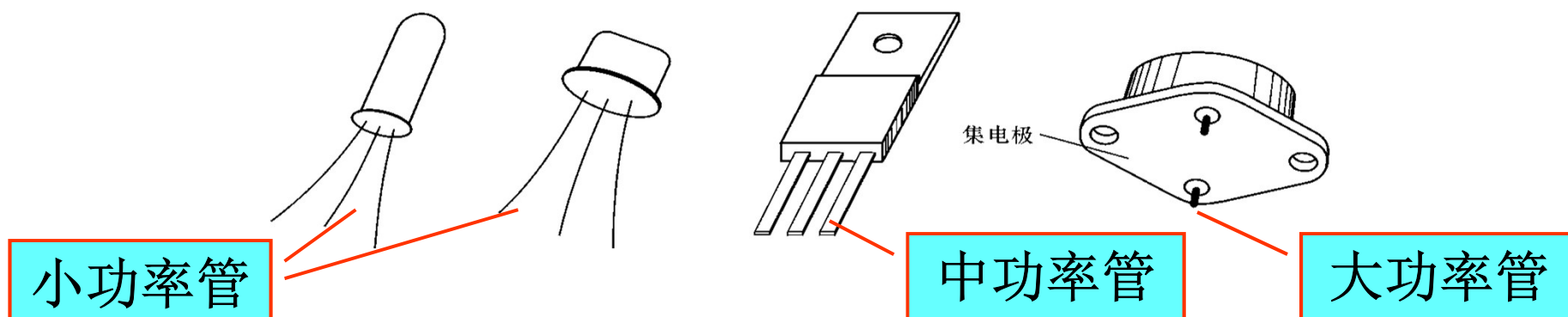
二、光电二极管

反向电流随光照强度的增加而上升，称为光电流。

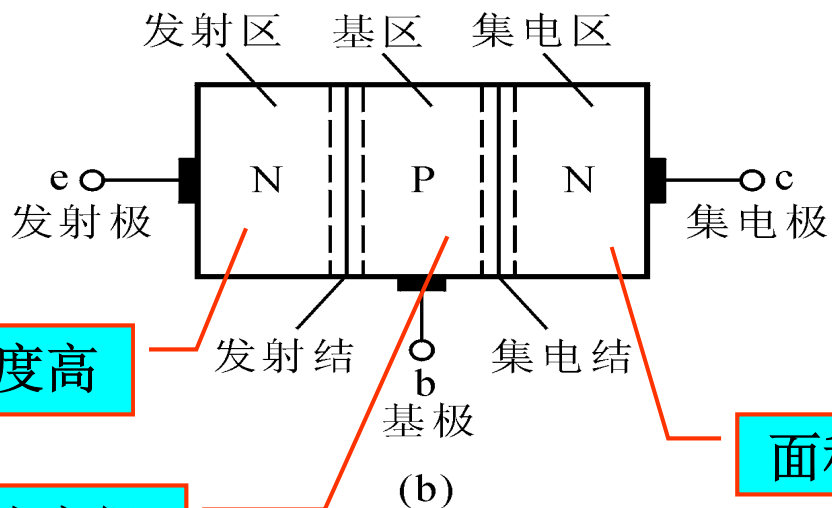
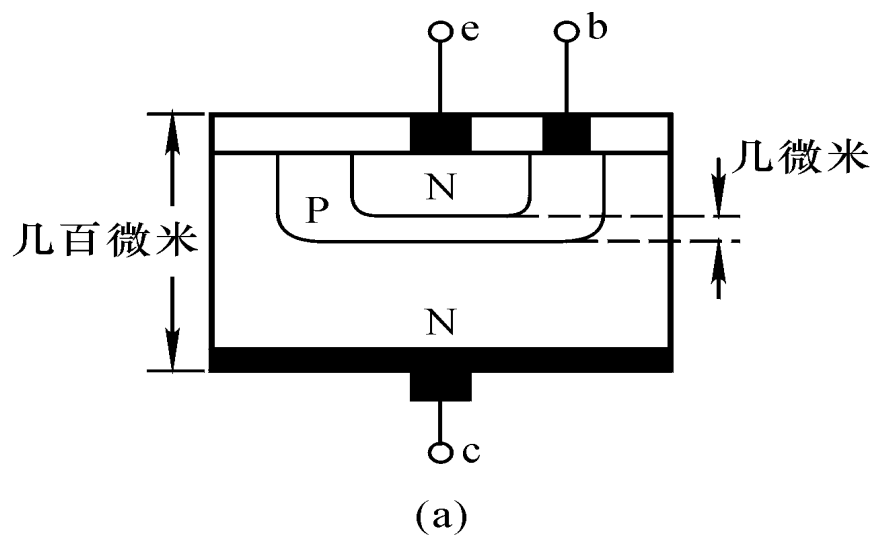


1.3 晶体三极管(Bipolar Junction Transistor)

1.3.1 晶体管的结构及类型



三区，二PN结 三电极

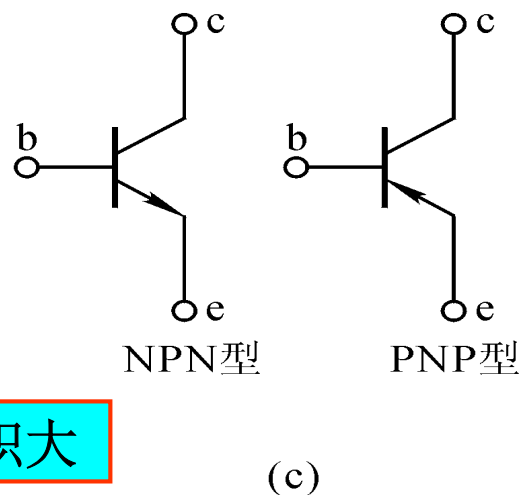


掺杂浓度高

掺杂浓度很低，且很薄

面积大

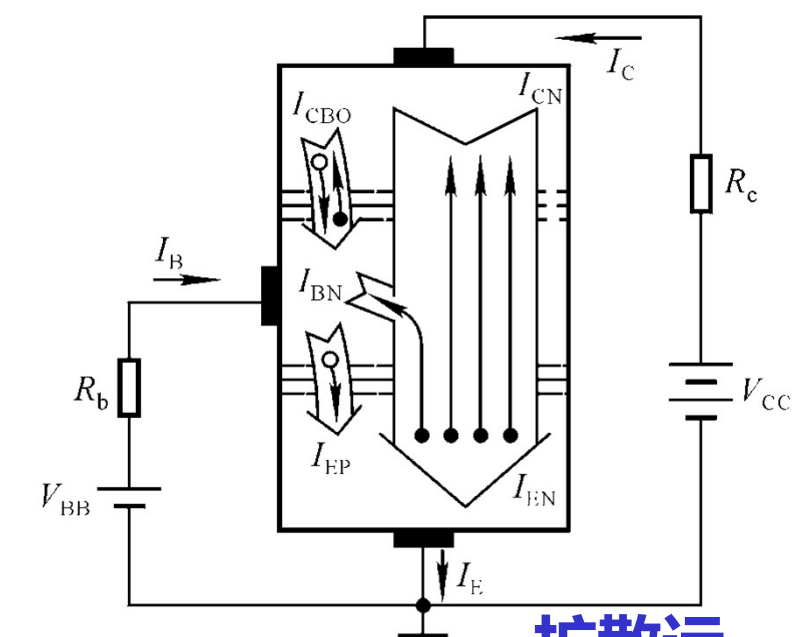
晶体管的工艺特点
(即放大的内部条件)



1.3.2 晶体管的电流放大作用

放大的外部条件：发射结正偏且集电结反偏

一、内部载流子的运动



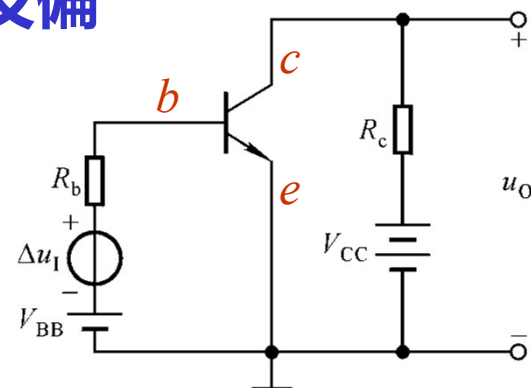
发射结正偏

扩散运动增强

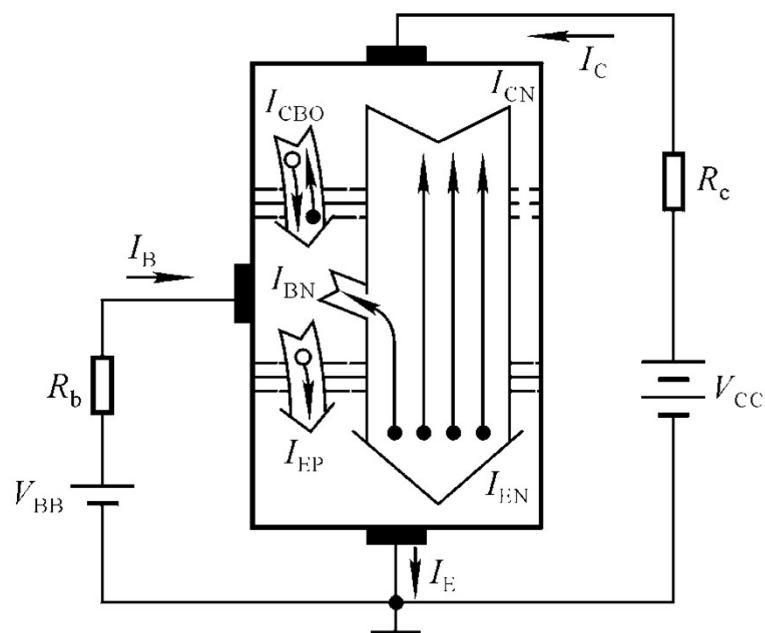
形成发射极电流 I_E

1. 发射结正偏, 扩散运动形成发射极电流 I_E

E区大量的电子扩散到B区, 形成 I_{EN}
B区空穴扩散到E区, 形成 I_{EP} (可忽略)

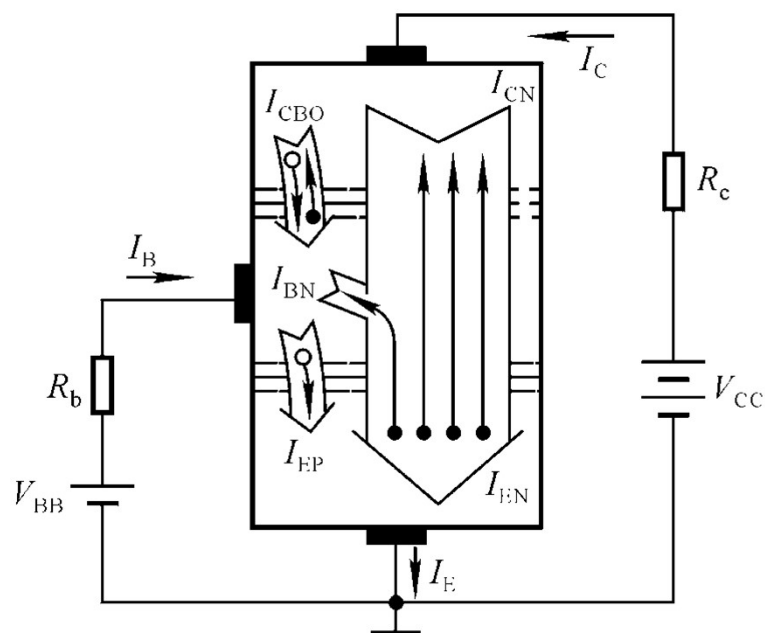


以NPN型基本共射放大电路为例



2. 扩散到基区的电子与空穴的复合运动形成基极电流 I_B

E区电子到基区B后: 绝大部分电子作为基区的**非平衡少子**继续扩散到集电结边沿,
少部分电子与空穴**复合**, 同时基区中的电子被 V_{BB} 拉走形成 I_{BN} 。



二、电流分配关系

$$I_E = I_{EN} + I_{EP} = I_{CN} + I_{BN} + I_{EP}$$

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

$$I_B = I_{BN} + I_{EP} - I_{CBO} = I_B' - I_{CBO}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

3. 集电结反偏, 漂移运动形成集电极电流 I_C

集电结反偏

将到达集电结边沿的电子拉入集电区, 形成漂移电流 I_{CN}

平衡少子也参与漂移运动, 形成反向饱和电流 I_{CBO} (可忽略)

三、共射电流放大系数

共射直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_{\text{CN}}}{I'_B} = \frac{I_C - I_{\text{CBO}}}{I_B + I_{\text{CBO}}}$$

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

一般情况下, $I_B \gg I_{\text{CBO}}, \bar{\beta} \gg 1$

$$\begin{aligned} \therefore I_C &\approx \bar{\beta} I_B \\ I_E &\approx (1 + \bar{\beta}) I_B \end{aligned}$$

$$I_E = I_{\text{EN}} + I_{\text{EP}} = I_{\text{CN}} + I_{\text{BN}} + I_{\text{EP}}$$

$$I_C = I_{\text{CN}} + I_{\text{CBO}}$$

$$I_B = I_{\text{BN}} + I_{\text{EP}} - I_{\text{CBO}} = I_B' - I_{\text{CBO}}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

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

基极开路时c-e
间穿透电流

发射极开路时集电结
反向饱和电流

共射交流电流放大系数 $\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \approx \bar{\beta}$

共基直流电流放大系数

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{\text{CN}}}{I_{\text{E}}} = \frac{I_{\text{C}} - I_{\text{CBO}}}{I_{\text{E}}}$$

$$I_{\text{E}} = I_{\text{EN}} + I_{\text{EP}} = I_{\text{CN}} + I_{\text{BN}} + I_{\text{EP}}$$

$$I_{\text{C}} = I_{\text{CN}} + I_{\text{CBO}}$$

$$I_{\text{B}} = I_{\text{BN}} + I_{\text{EP}} - I_{\text{CBO}} = I_{\text{B}}' - I_{\text{CBO}}$$

$$I_{\text{E}} = I_{\text{C}} + I_{\text{B}}$$

$$\bar{\beta} = \frac{I_{\text{CN}}}{I_{\text{B}}'} = \frac{I_{\text{C}} - I_{\text{CBO}}}{I_{\text{B}} + I_{\text{CBO}}} = \frac{\bar{\alpha} I_{\text{E}}}{I_{\text{E}} - I_{\text{C}} + I_{\text{CBO}}} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\bar{\beta}}{1 + \bar{\beta}} \approx 1$$

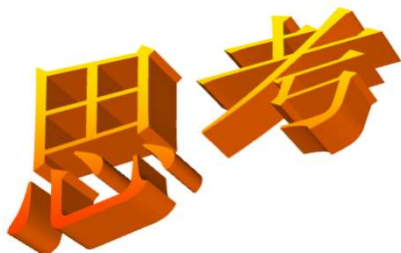
$$I_{\text{C}} = \bar{\alpha} I_{\text{E}} + I_{\text{CBO}}$$

一般情况下, I_{CBO} 可以忽略

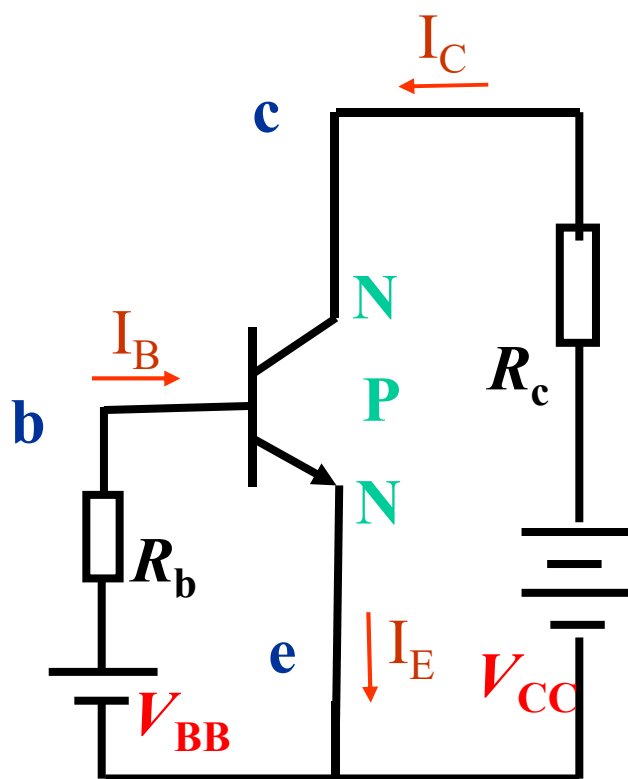
$$\therefore I_{\text{C}} \approx \bar{\alpha} I_{\text{E}}$$

共基交流电流放大系数

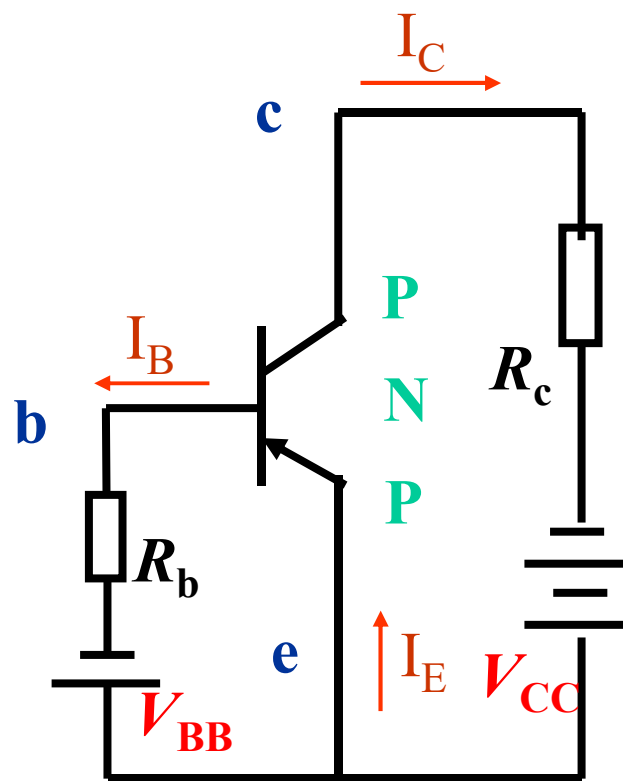
$$\alpha = \frac{\Delta i_{\text{C}}}{\Delta i_{\text{E}}} \approx \bar{\alpha}$$



PNP型晶体管具有直流电流放大作用时，外部应如何接线？



$$U_{CE} > U_{BE} > 0$$



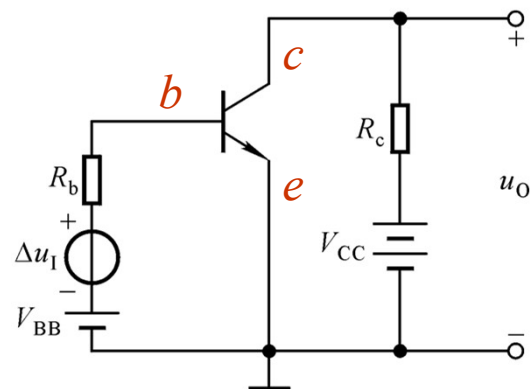
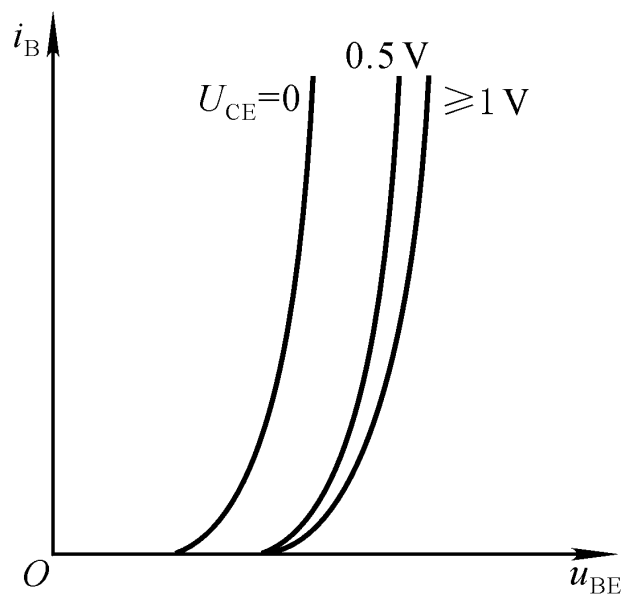
$$U_{CE} < U_{BE} < 0$$

只要调换直流电源的极性，电压、电流的方向也反向

1.3.3 晶体管的共射特性曲线

一、输入特性曲线

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{U_{CE}=\text{常数}}$$

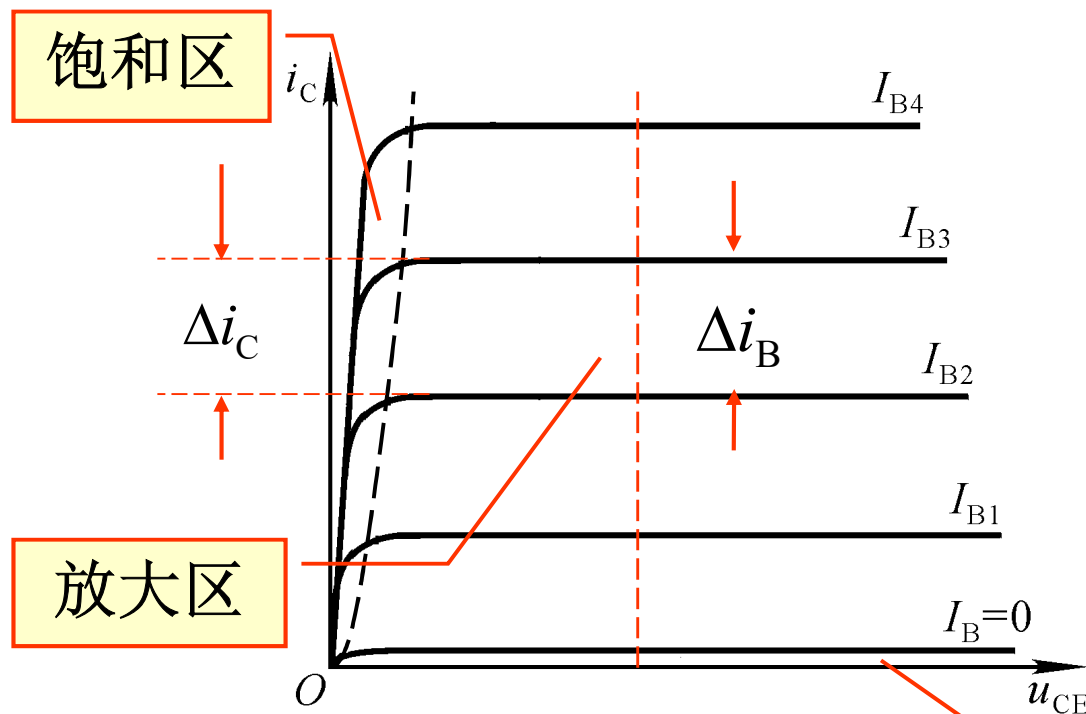


**以NPN型基本共射
放大电路为例**

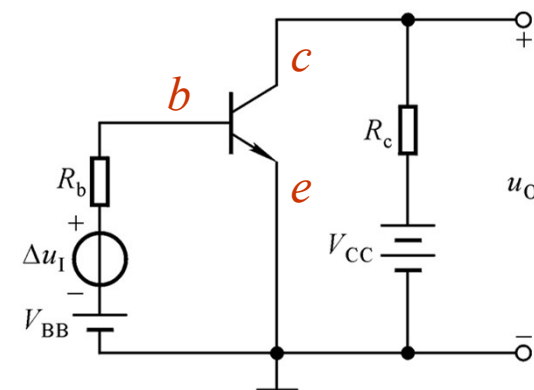
二、输出特性曲线

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}}$$

发射结正偏，且集电结正偏



发射结正偏，且集电结反偏



$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \Big|_{U_{CE} = \text{常量}}$$

截止区

发射结反偏，且集电结反偏

晶体管的三个工作区域

(1) 截止区

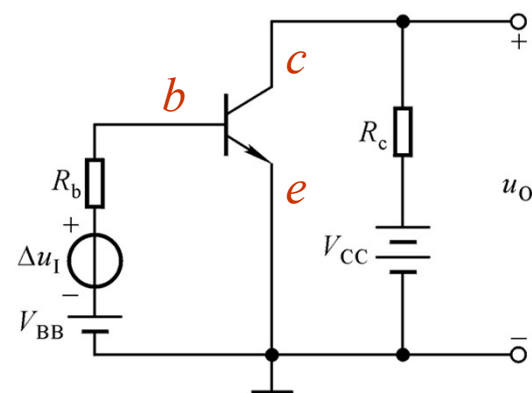
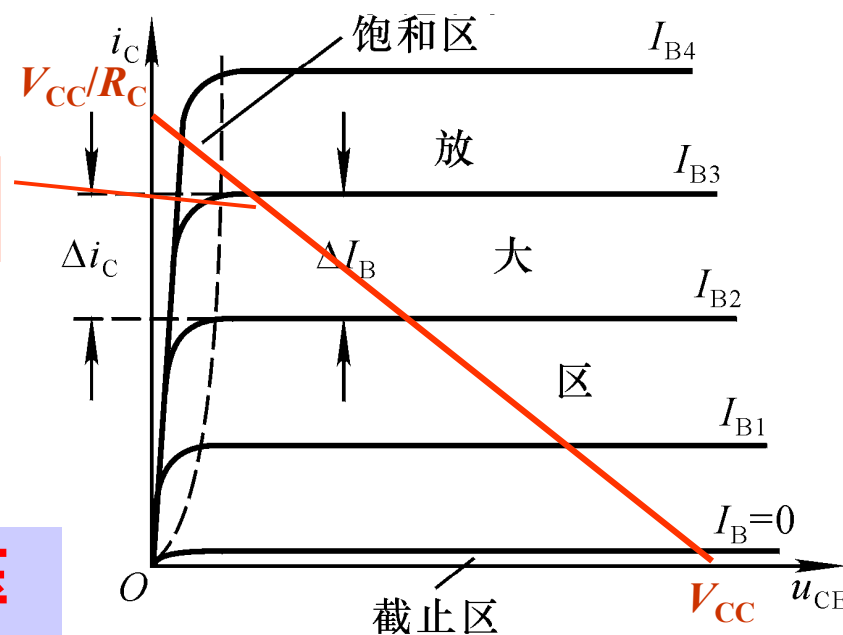
$$u_{CE} = V_{CC} - i_C R_C$$

$I_B = 0$ 曲线以下的区域为截止区

条件：发射结电压小于开启电压或反偏，且集电结反偏

(NPN型管： $u_{BE} \leq U_{on}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$)

特点： $i_B = 0$, $i_C = I_{CEO} \approx 0$,
 $u_{CE} = V_{CC} - R_C i_C \approx V_{CC}$ (最大值)

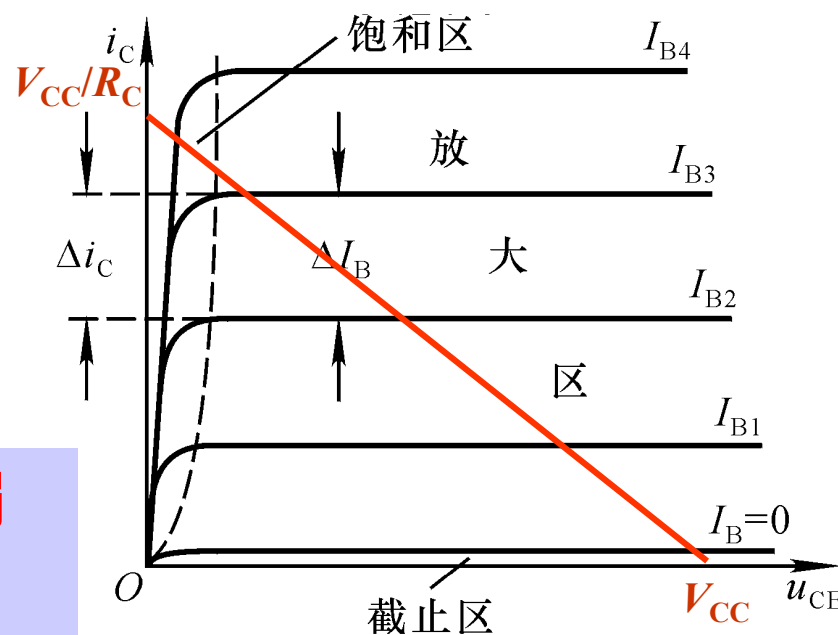


(2) 放大区 (线性区)

输出特性曲线的近似水平部分。

条件：发射结正偏，且集电结反偏

(NPN型管： $u_{BE} > U_{on}$ 且 $u_{CE} > u_{BE}$)



可以取 $U_D = U_{on} = 0.7(\text{Si}), 0.2(\text{Ge})$ 来估算

材料	开启电压 U_{on}	导通电压 U_D
硅Si	0.5V	0.6~0.8V
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V

特点： $u_{BE} \approx U_D$,

$i_C \approx \beta i_B$ (基本随 i_B 线性变化),

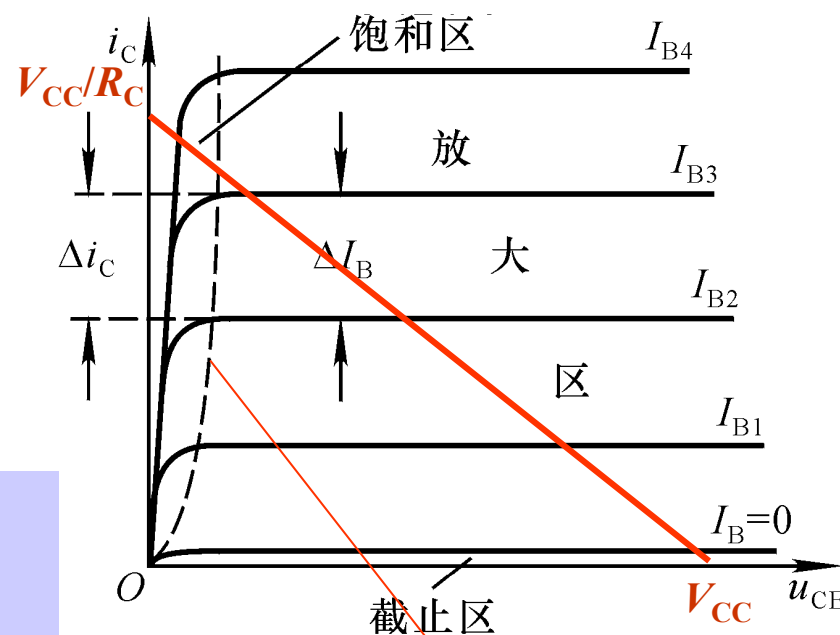
$u_{CE} = V_{CC} - R_C i_C$ (随 i_B 的增大而减小)

(3) 饱和区

临界饱和线左边的区域

条件：发射结正偏，且集电结正偏

(NPN型管： $u_{BE} > U_{on}$ 且 $u_{CE} < u_{BE}$)



临界饱和
 $u_{CE} = u_{BE}$

特点： $u_{BE} \approx U_D$,

$i_C < \beta i_B$ (随 i_B 的增大而变化不多),

$u_{CE} \approx U_{CES} < u_{BE}$ (最小值)

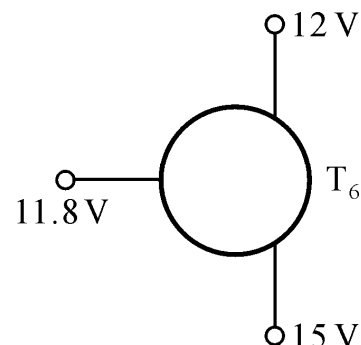
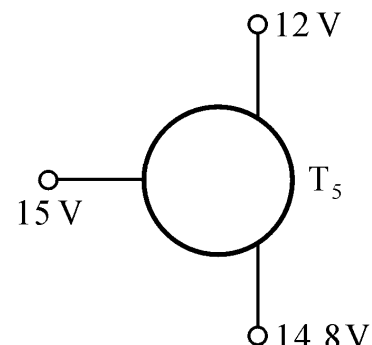
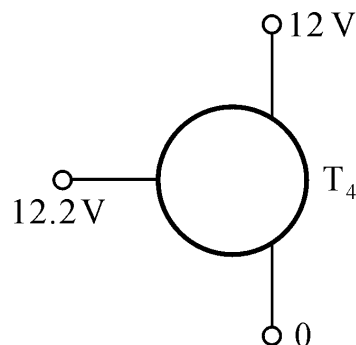
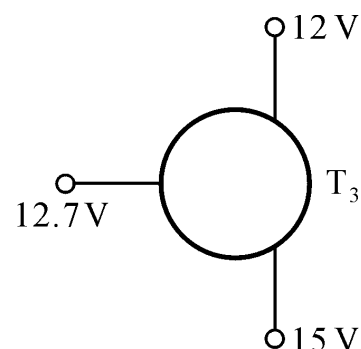
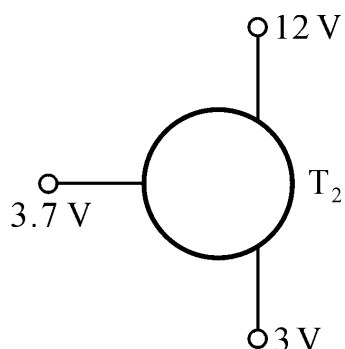
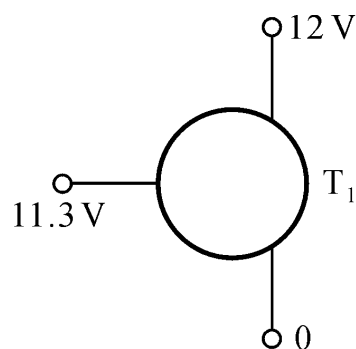
U_{CES} 为饱和时的管压降

判断晶体管的类型和管脚

判断方法：任何类型的晶体管处于**放大区**的条件是

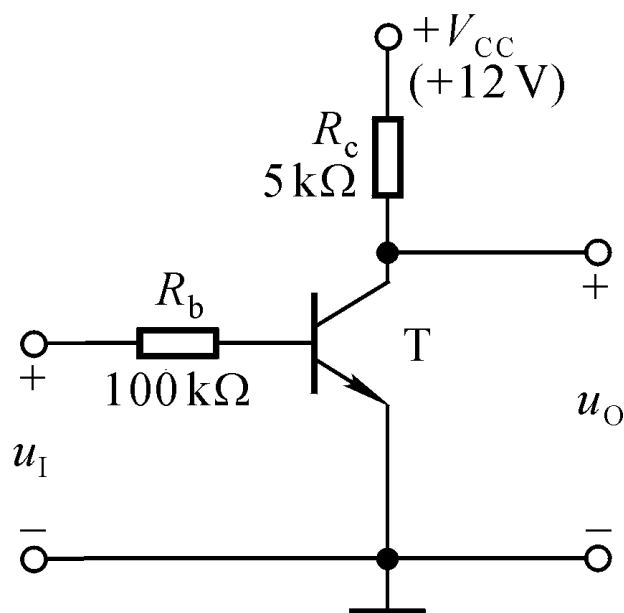
发射结正偏，集电结反偏

习题1.9 测得放大电路中六只晶体管的直流电位如图所示。在圆圈中画出管子，并分别说明它们是硅管还是锗管。



判断晶体管的工作状态

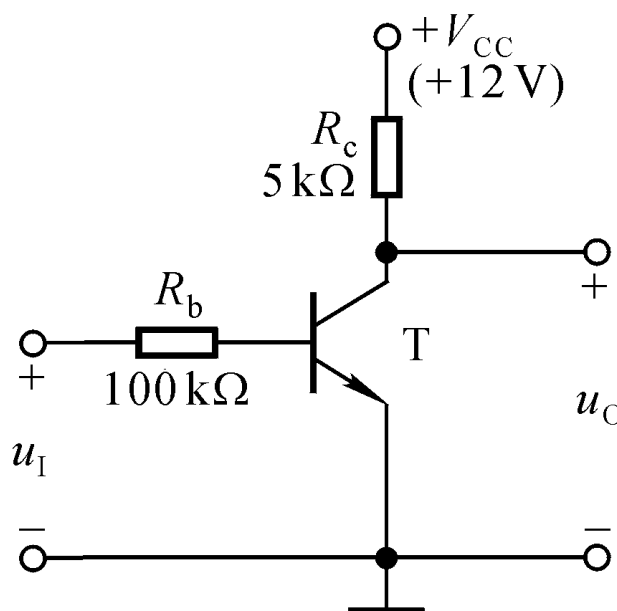
例 已知T导通时的 $U_{BE}=0.7V$, $\beta=60$, 饱和管压降 $U_{CES}=0.3V$, 分别分析 $u_I=0V$ 、 $3V$ 、 $6V$ 时T的工作状态, 并求 u_O 。



首先通过 u_{BE} 是否大于 U_{on} 判断管子是否导通。

若导通, 再假设T为放大状态, 求出 u_{CE} , 通过 u_{CE} 与 u_{BE} 的电压比较来判断管子处于放大还是饱和; 也可以通过电流比较来判断。

例 已知T导通时的 $U_{BE}=0.7V$, $\beta=60$, $U_{CES}=0.3V$, 分别分析 $u_I=0V$ 、 $3V$ 、 $6V$ 时T的工作状态, 并求 u_O 。



当 $u_I=0V$ 时: **晶体管截止**, $I_C \approx I_B = 0$
 $u_O \approx V_{CC} = 12V$

当 $u_I=3V$ 时: **晶体管导通**, 先假设T放大,
 u_O $U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = V_{CC} - R_C \cdot \beta \frac{u_i - U_{BE}}{R_b} = 5.1V > U_{BE}$

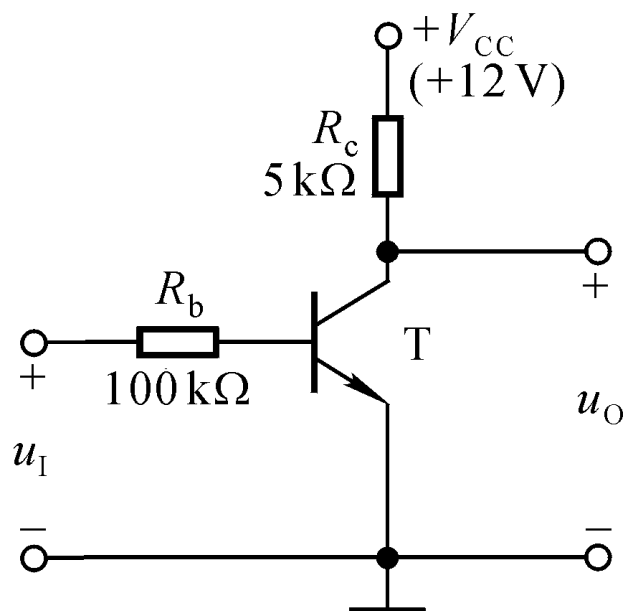
晶体管放大 $u_O = U_{CE} = 5.1V$

当 $u_I=6V$ 时: **晶体管导通**, 先假设T放大,

$$U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = V_{CC} - R_C \cdot \beta \frac{u_i - U_{BE}}{R_b} = -3.9V < U_{BE}$$

晶体管饱和 $u_O \approx U_{CES} = 0.3V$

例 已知T导通时的 $U_{BE}=0.7V$, $\beta=60$, 饱和管压降 $U_{CES}=0.3V$, 分别分析 $u_I=0V$ 、 $3V$ 、 $6V$ 时T的工作状态, 并求 u_O 。

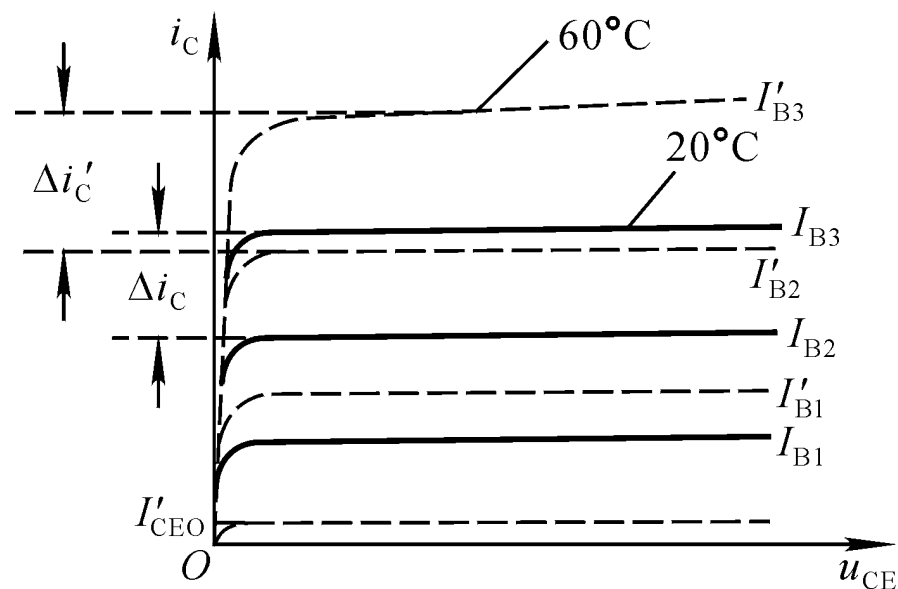
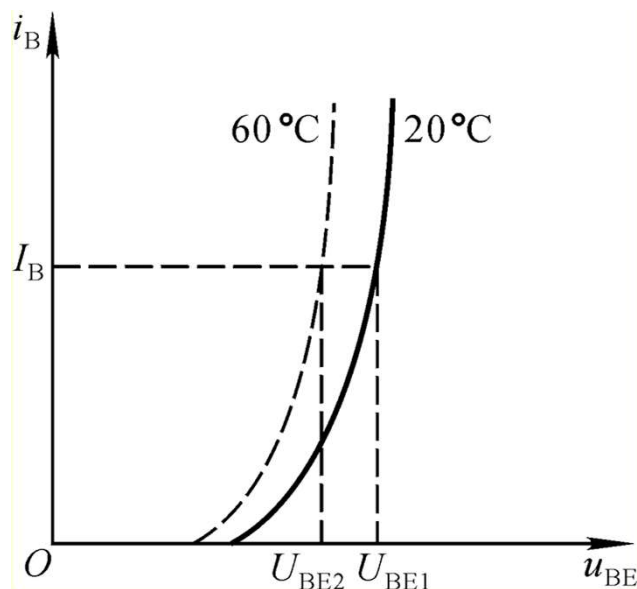


$$\begin{aligned} \text{临界饱和时 } I_{BS} &= \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\beta R_c} \\ &= \left(\frac{12 - 0.3}{60 \times 5} \right) \text{mA} = 39 \mu\text{A} \end{aligned}$$

$$I_{B1} = \frac{u_I - U_{BE}}{R_b} = \left(\frac{3 - 0.7}{100} \right) \text{mA} = 23 \mu\text{A} < I_{BS}, \therefore \text{放大状态}$$

$$I_{B2} = \left(\frac{6 - 0.7}{100} \right) \text{mA} = 53 \mu\text{A} > I_{BS}, \therefore \text{饱和状态}$$

1.3.4 温度对晶体管特性的影响



$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{\text{CBO}} \uparrow \rightarrow I_{\text{CEO}} \uparrow$
 $\rightarrow \beta \uparrow$
 $\rightarrow u_{\text{BE}} \text{ 不变时 } i_{\text{B}} \uparrow$

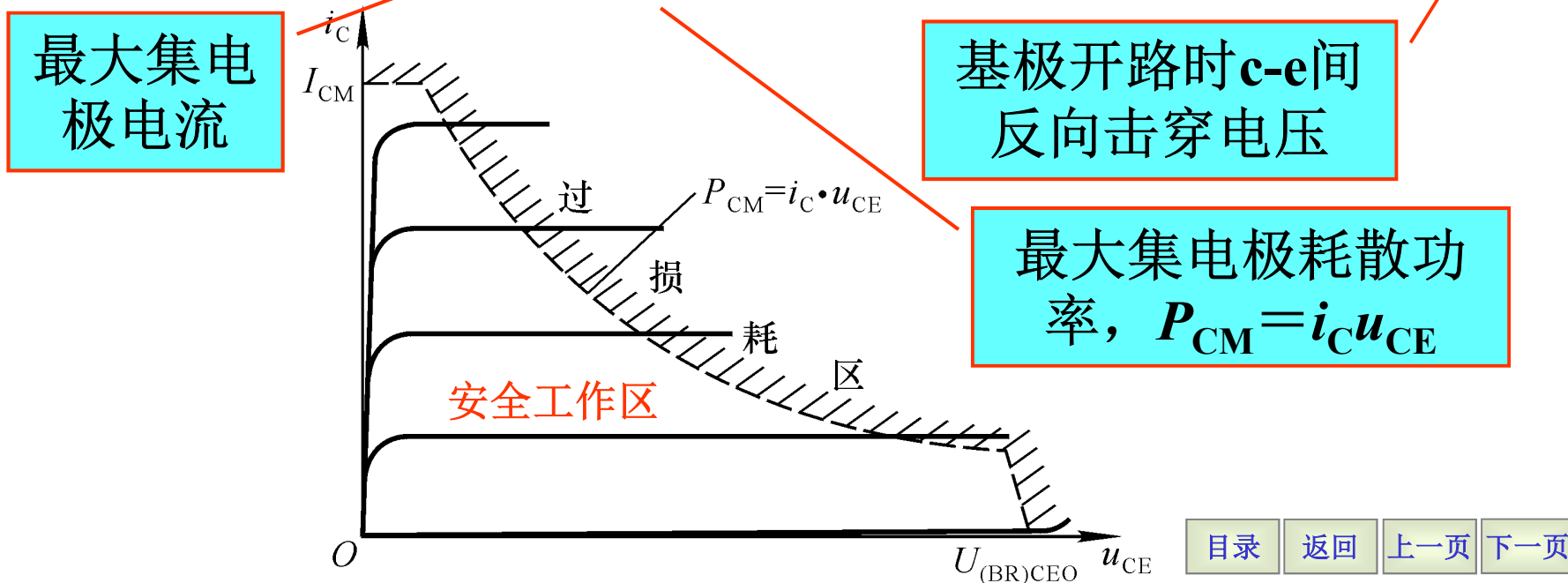
$\left. \begin{array}{l} \rightarrow \beta \uparrow \\ \rightarrow u_{\text{BE}} \text{ 不变时 } i_{\text{B}} \uparrow \end{array} \right\} \Rightarrow I_{\text{C}} \uparrow$

1.3.5 晶体管的主要参数

- 直流参数: $\bar{\beta}$ 、 $\bar{\alpha}$ 、 I_{CBO} 、 I_{CEO}
- 交流参数: β 、 α 、特征频率 f_T

由于结电容的存在, β 会随频率的增高而下降, f_T 是 β 下降到 1 的信号频率。

- 极限参数: I_{CM} 、 P_{CM} 、极间反向击穿电压 (如 $U_{(BR)CEO}$)



例1.3.2

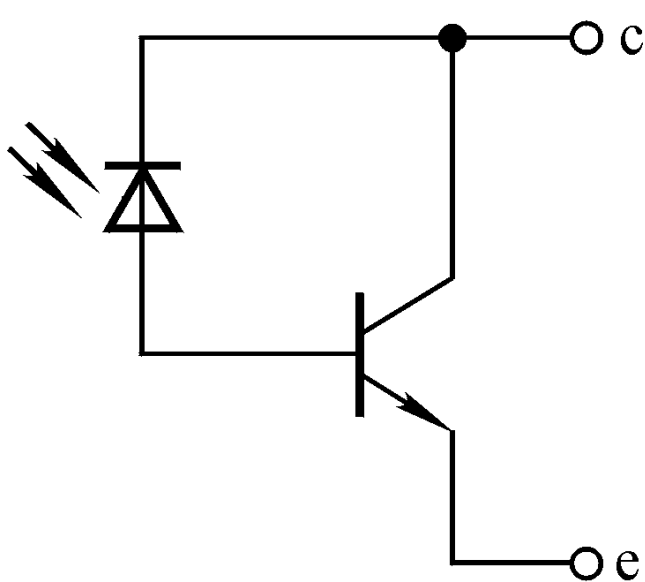
【例 1.3.2】 在一个单管放大电路中,电源电压为 30 V,已知三只管子的参数如表 1.3.3 所示,请选用一只管子,并简述理由。

表 1.3.3 例 1.3.2 的晶体管参数表

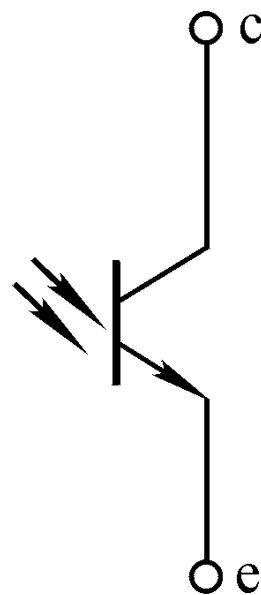
晶体管参数	T ₁	T ₂	T ₃
$I_{CBO}/\mu A$	0.01	0.1	0.05
U_{CEO}/V	50	50	20
β	15	100	100

1.3.6 光电三极管

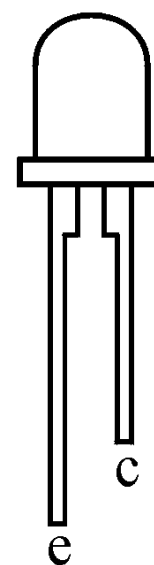
用入射光照的强弱来控制集电极电流的。



(a)



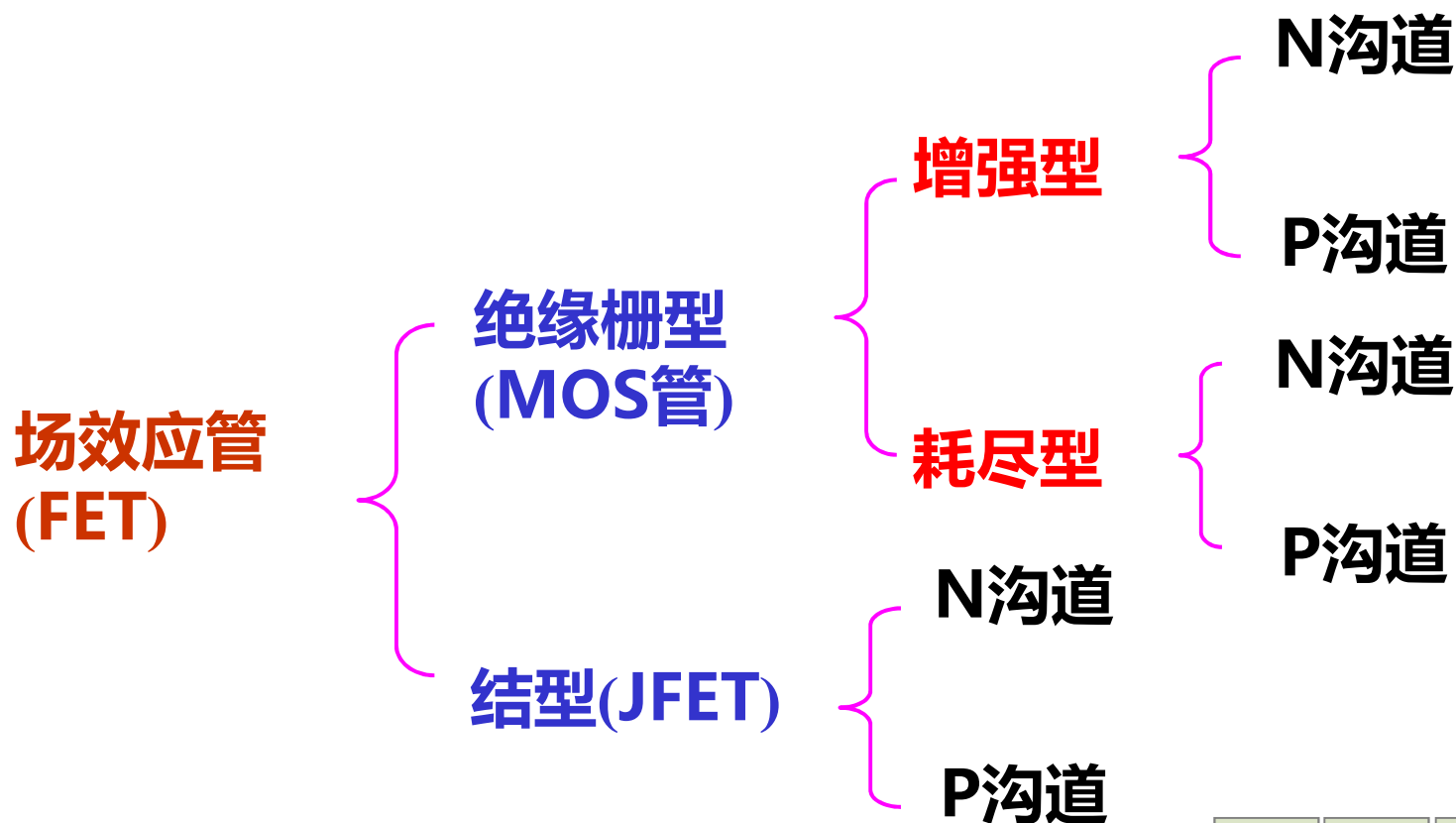
(b)



(c)

1.4 场效应管(Field Effect Transistor)

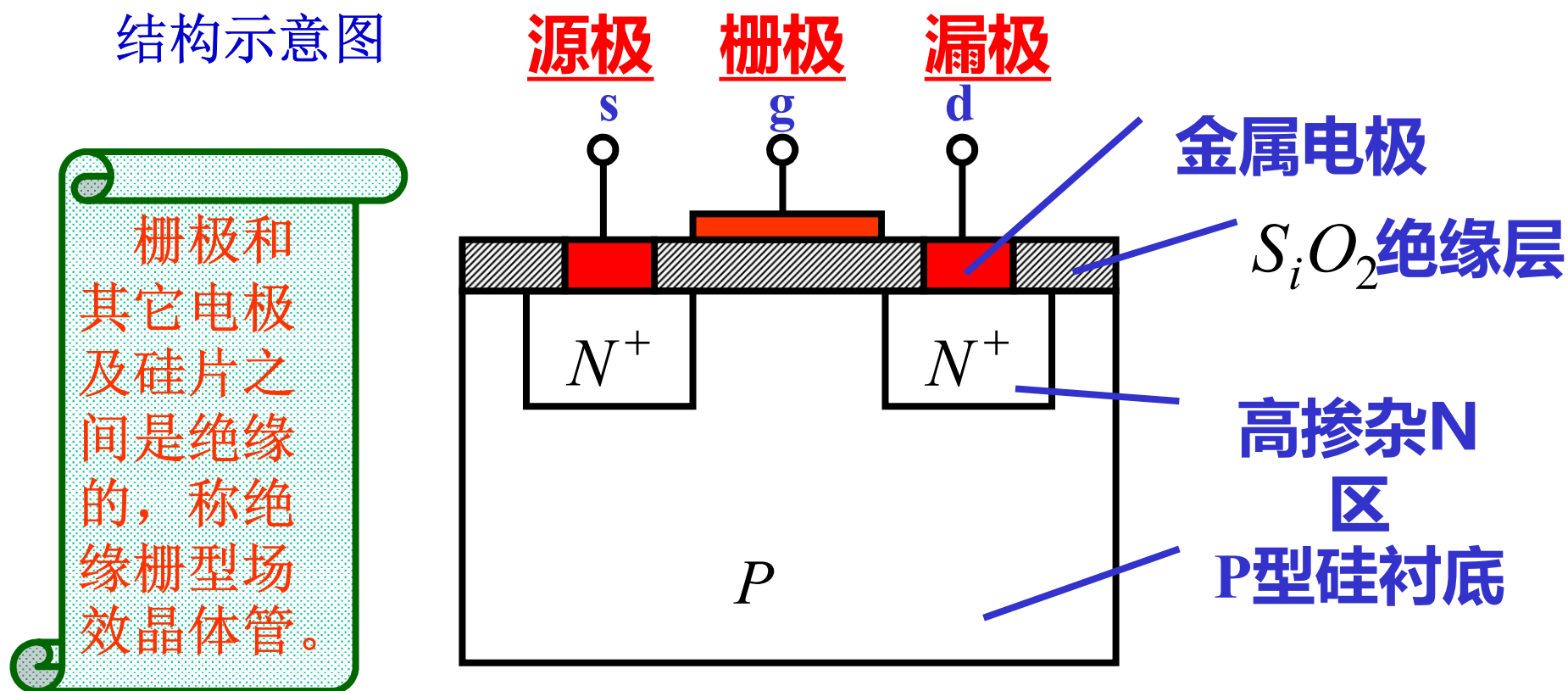
晶体三极管是利用输入回路**电流控制**输出回路**电流**；而场效应管是利用输入回路**电场效应（电压）**控制输出回路**电流**。



1.4.1 绝缘栅型场效应管(MOS管)

一、N沟道增强型MOS管

结构示意图

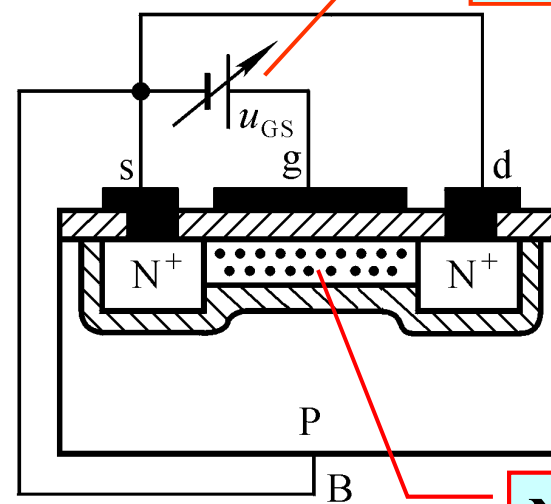
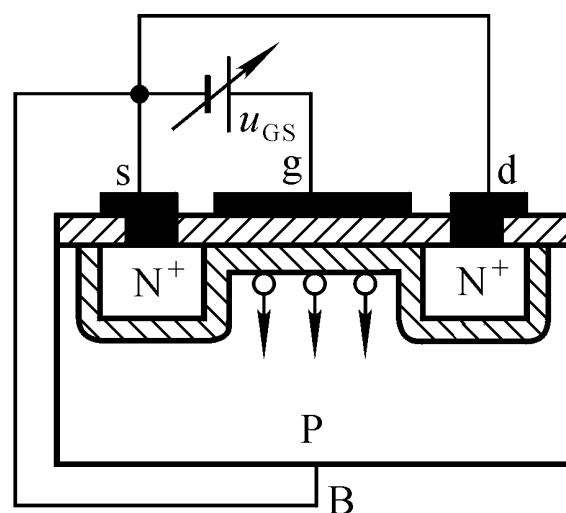


输入电阻 R_{GS} 比晶体管大得多

栅-源电压对导电沟道宽度的控制作用

(1) G、S之间不加电压

无论 u_{DS} 极性如何，无导电沟道， $i_D = 0$ 。

(2) $u_{DS} = 0$ 且 $u_{GS} > 0$ 

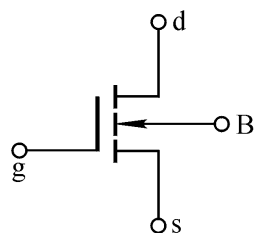
大于开启
电压 $U_{GS(th)}$

N型导电
沟道

u_{GS} 愈大，N沟道愈厚，沟道电阻愈小。

当 $u_{GS} < U_{GS(th)}$ 时，无导电沟道，无论 u_{DS} 极性如何， $i_D = 0$ ，管子处于夹断区。

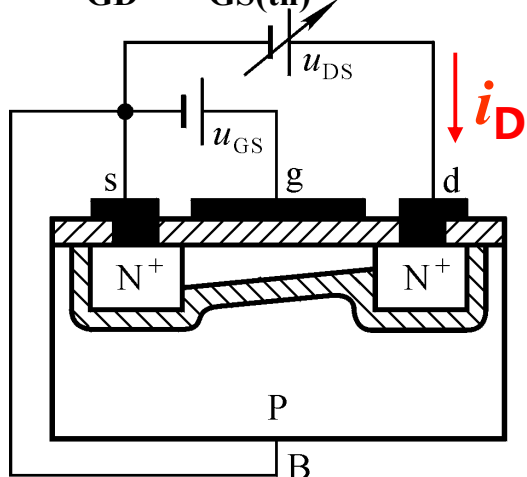
符号



漏-源电压对漏极电流的影响(当 $u_{GS} > U_{GS(th)} > 0$ 时)随着 $u_{DS} \uparrow$ 若 $u_{DS} > 0$ 形成 i_D , 管子导通。

$$u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(th)}$$

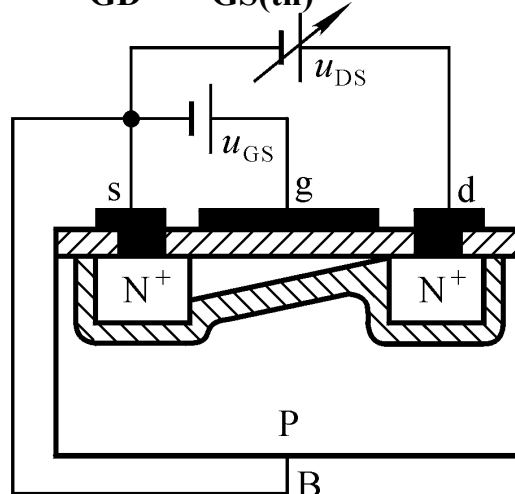
$$\text{即 } u_{GD} > U_{GS(th)}$$



i_D 随 u_{DS} 的增大而线性增大, 沟道电阻决定于 u_{GS} , 可变电阻区

$$u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)}$$

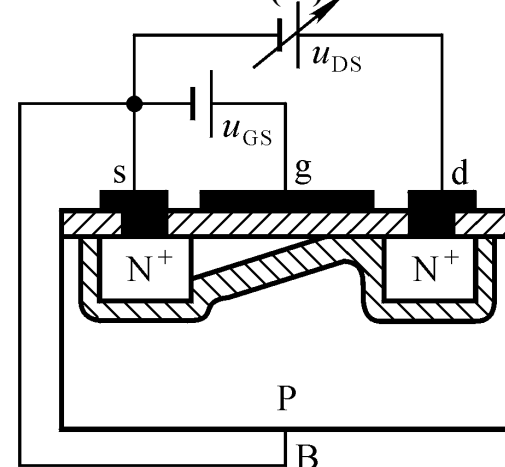
$$\text{即 } u_{GD} = U_{GS(th)}$$



预夹断

$$u_{DS} > u_{GS} - U_{GS(th)}$$

$$\text{即 } u_{GD} < U_{GS(th)}$$

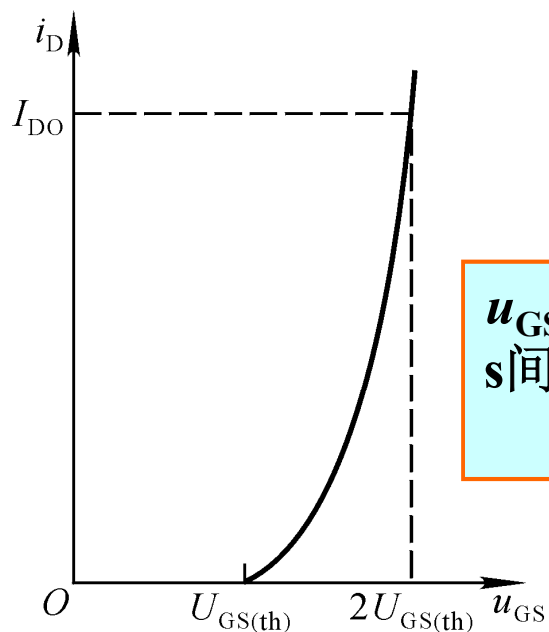


随着 u_{DS} 的增大, 夹断区加长, u_{DS} 的增大几乎全部用来克服夹断区的电阻, i_D 几乎不变, 进入恒流区。 i_D 几乎仅受控于 u_{GS}

工作在恒流区时, $u_{GS} > U_{GS(th)} > 0$ 且 $u_{GD} < U_{GS(th)}$

转移特性

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

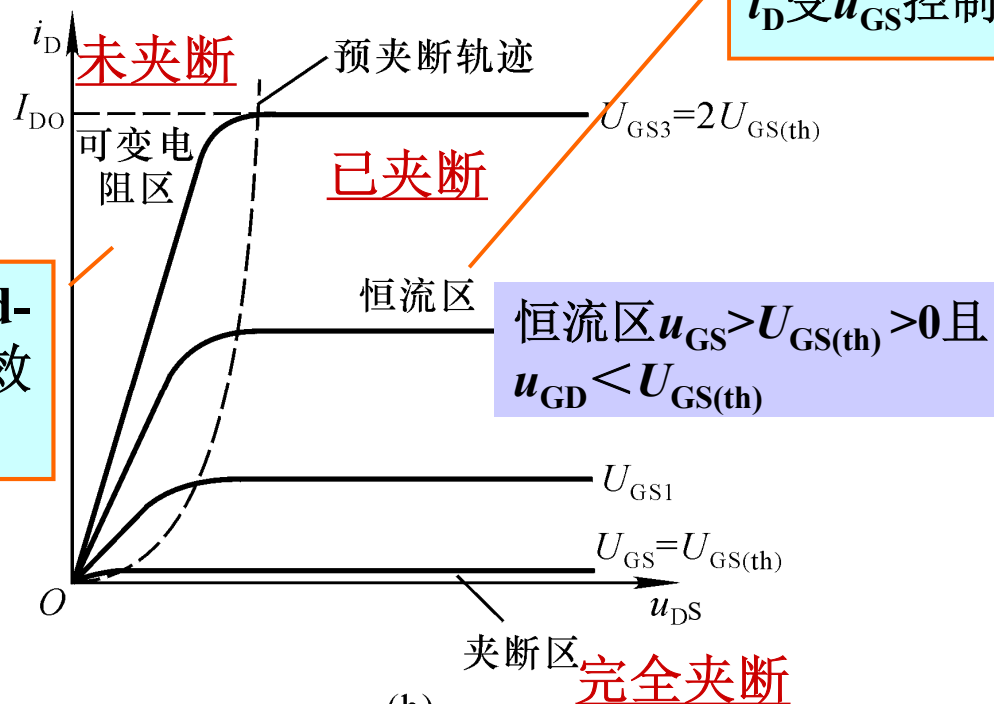


(a)

在恒流区时, $i_D = I_{DO} \left(\frac{u_{GS}}{U_{GS(th)}} - 1 \right)^2$
 式中 I_{DO} 为 $u_{GS} = 2U_{GS(th)}$ 时的 i_D

输出特性

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



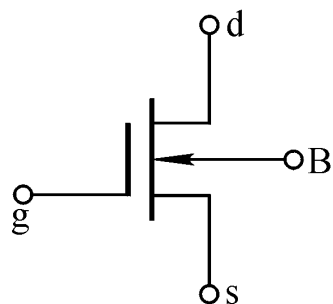
(b)

低频跨导:

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

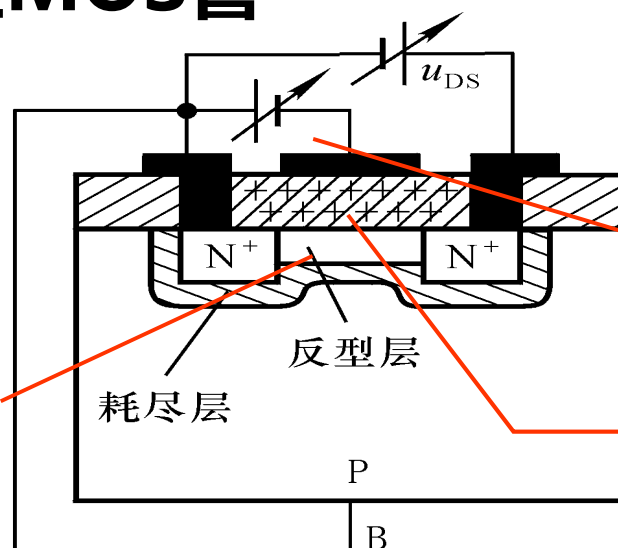
g_m 是转移特性曲线在工作点上的斜率, 反映了 u_{GS} 对 i_D 的控制能力。

二、N沟道耗尽型MOS管



$u_{GS}=0$ 时就存在
导电沟道

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



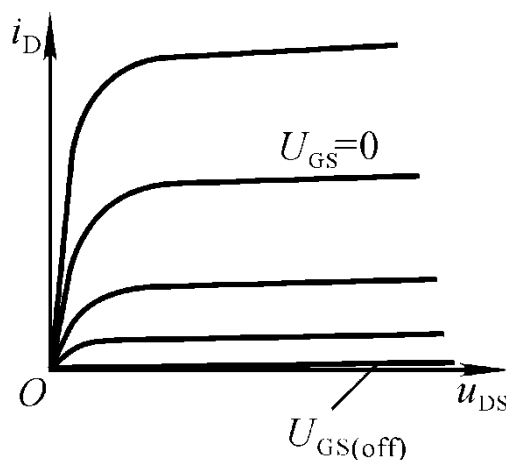
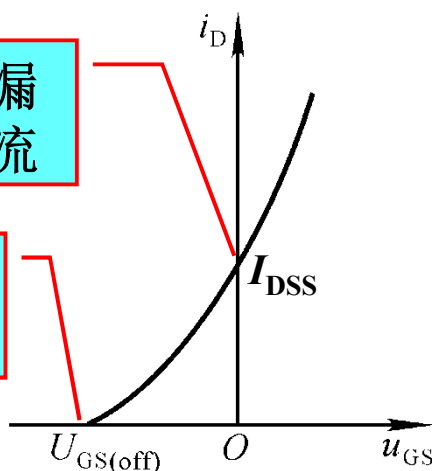
小到一定
值才夹断

加正离子

耗尽型MOS管在 u_{GS} 为正、负和零值时
均可导通, 小于夹断电压 $U_{GS(off)}$ 才截止。

饱和漏
极电流

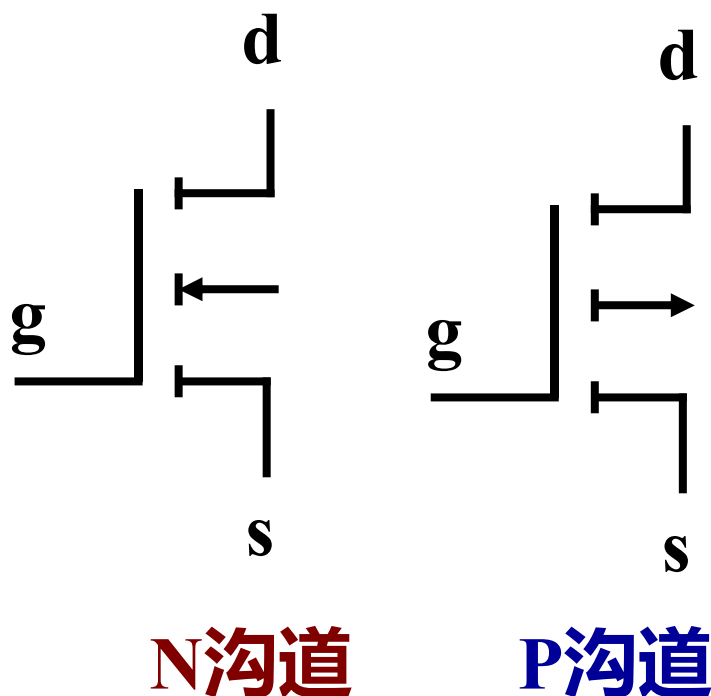
夹断
电压



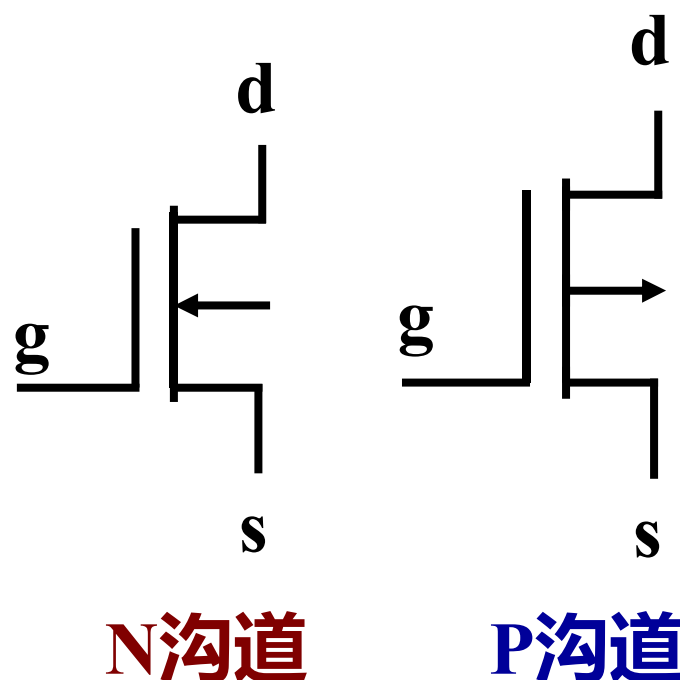
三、P沟道增强型MOS管

四、P沟道耗尽型MOS管

增强型



耗尽型

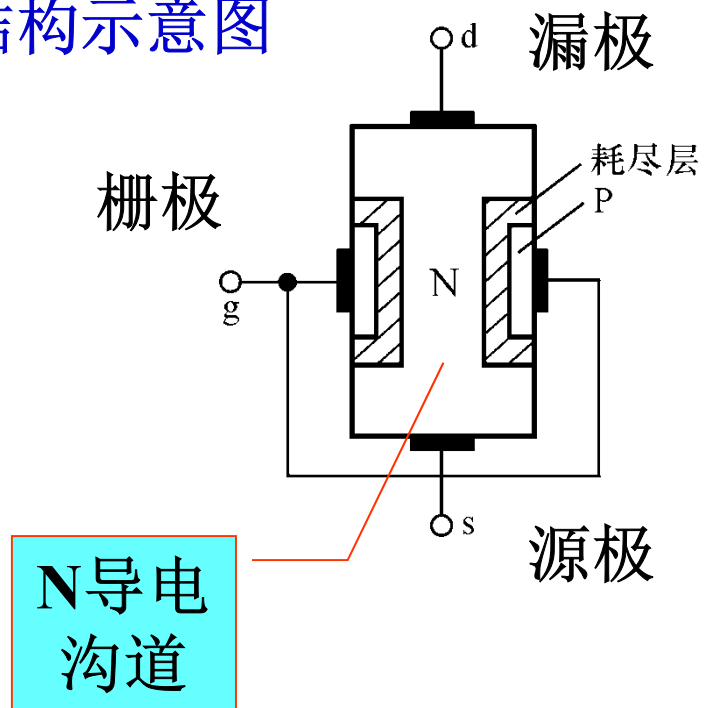


P沟道与N沟道在应用时的区别：只要调换直流电源的极性，则电压、电流的方向也反向

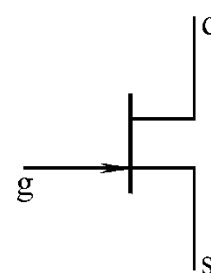
1.4.2 结型场效应管(JFET)

一、N沟道结型场效应管

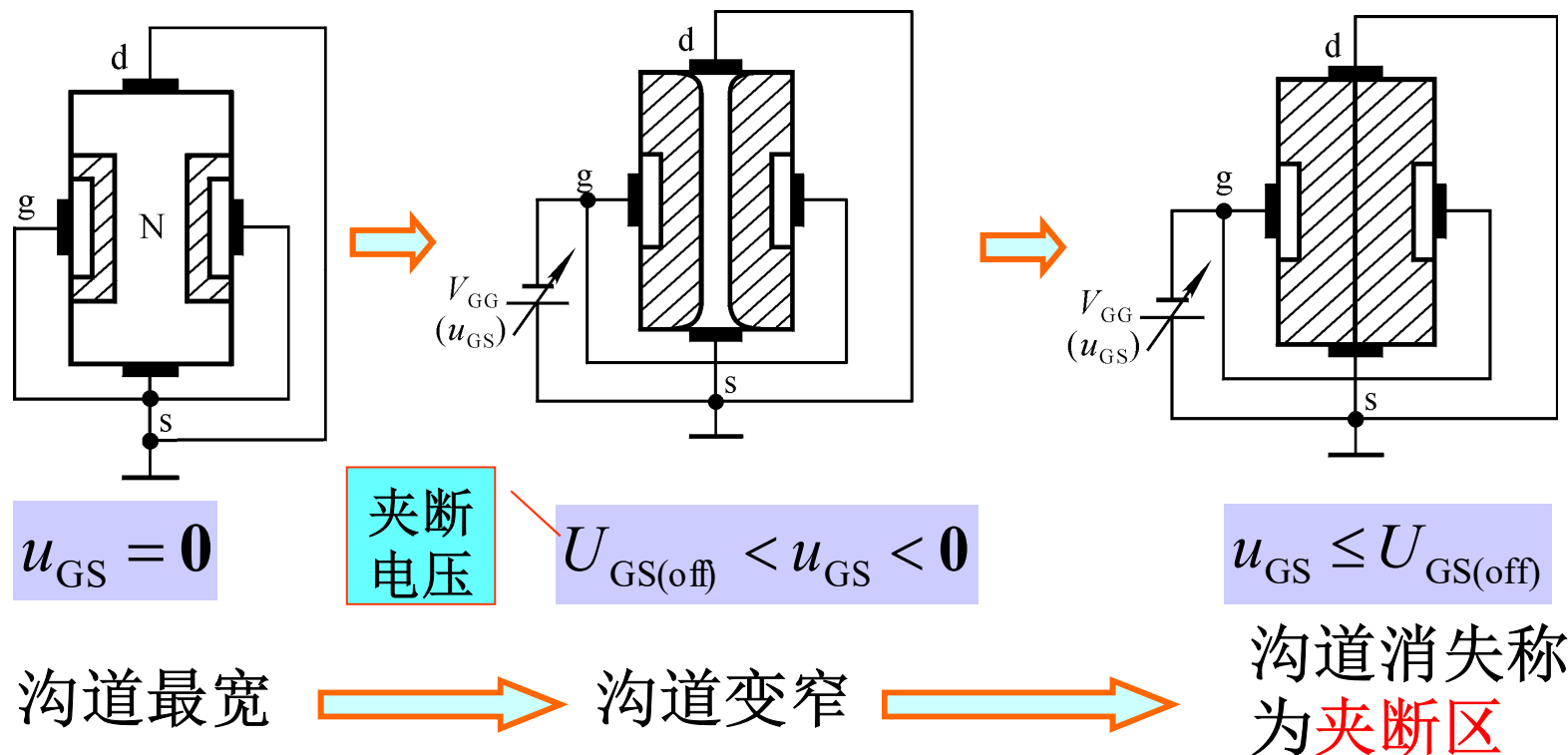
结构示意图



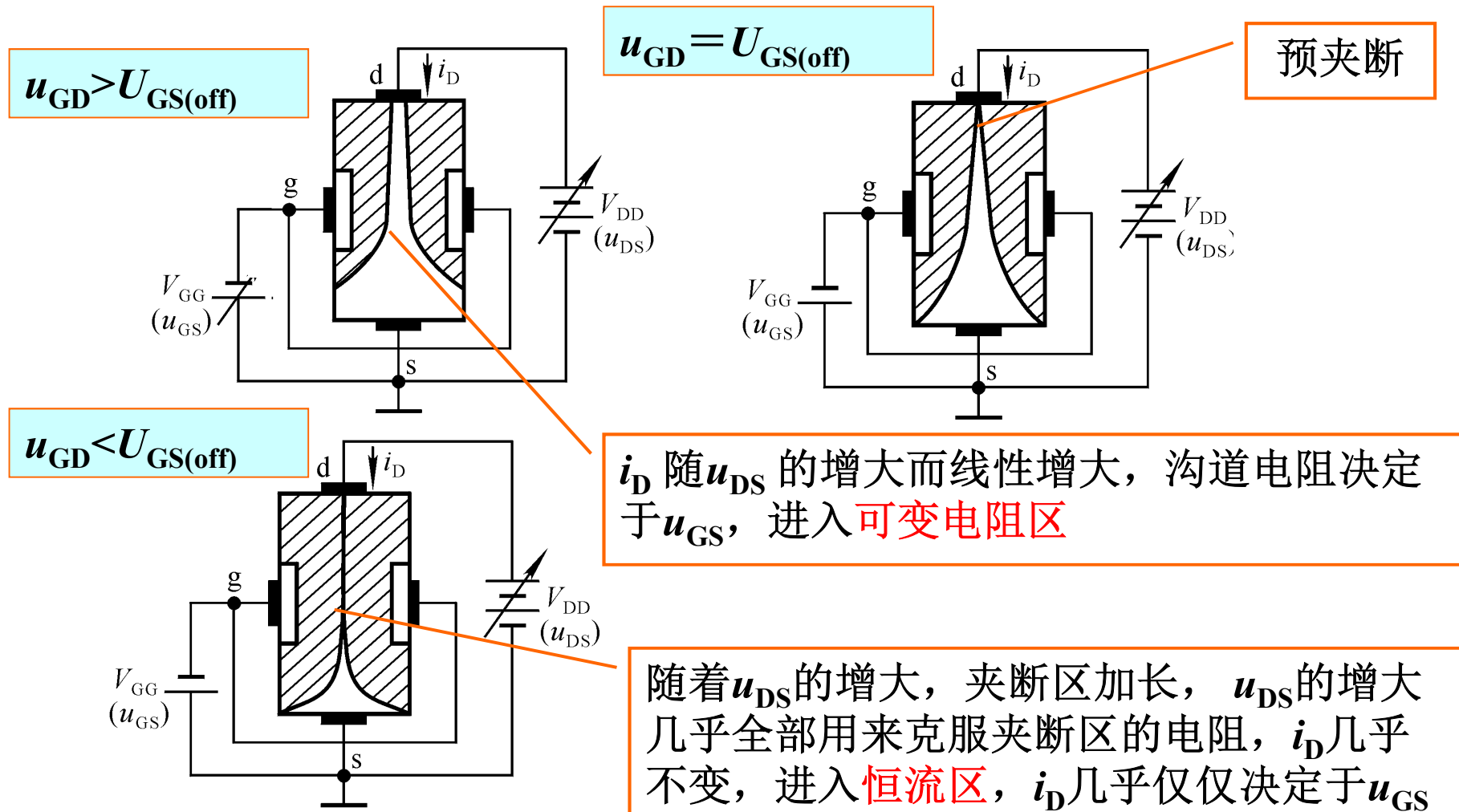
符号



栅-源电压对导电沟道宽度的控制作用



$u_{GS} < 0$, 既保证了 R_{GS} 很高的特点, 又实现了
 u_{GS} 通过调节导电沟道的宽度来控制沟道电流
的目的。

漏-源电压对漏极电流的影响 (当 $U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$ 时)

工作在恒流区时， $U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$ 且 $u_{GD} < U_{GS(off)}$

输出特性

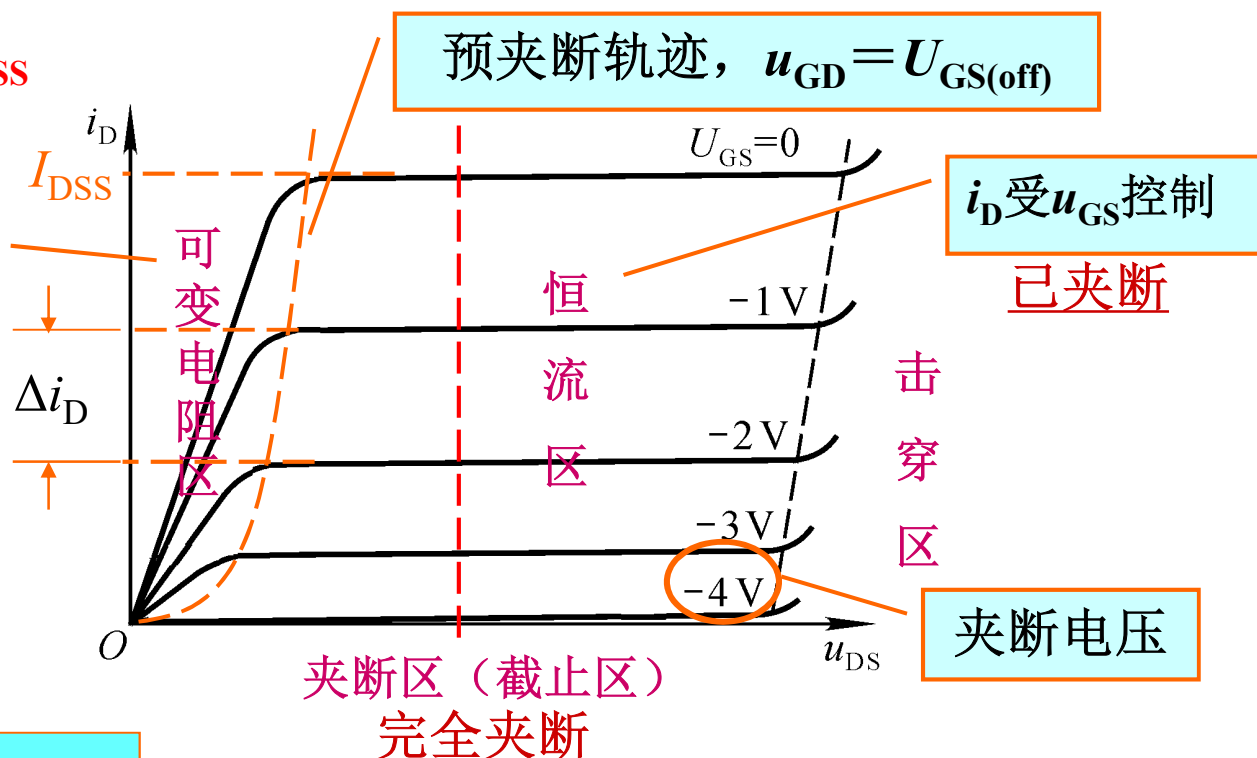
$$i_D = f(u_{DS}) \Big|_{U_{GS}=\text{常量}}$$

饱和漏极电流 I_{DSS} u_{GS} 控制 d-s 间的
等效电阻

未夹断

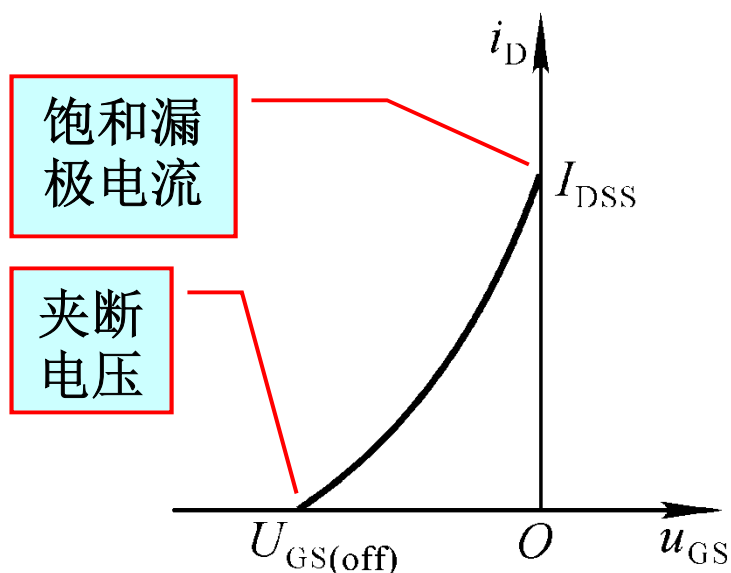
低频跨导:

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



转移特性

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



在恒流区时

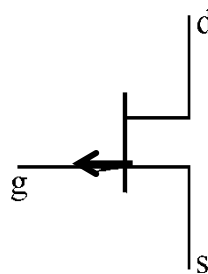
$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}}\right)^2$$

低频跨导是转移特性曲线在工作点上的斜率，反映了 u_{GS} 对 i_D 的控制能力。

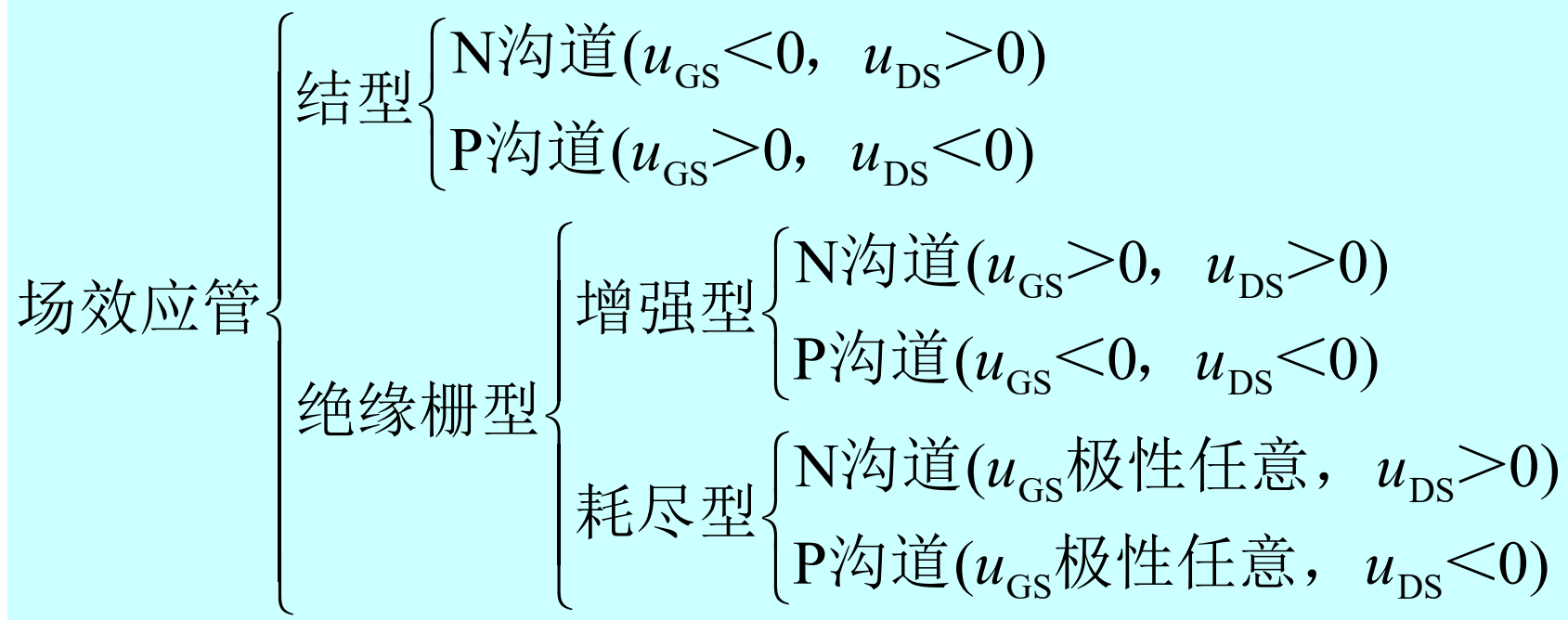
二、P沟道结型场效应管

只要调换直流电源的极性，
则电压、电流的方向也反向

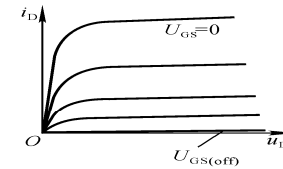
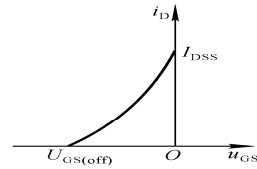
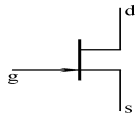
符号



场效应管的分类



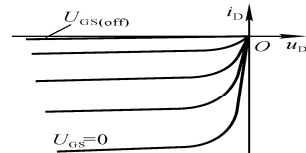
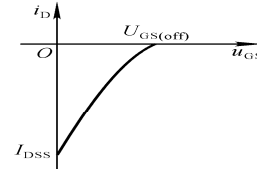
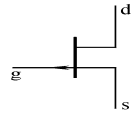
恒流区的条件



N沟道增强型MOS管:

$$u_{GS} > U_{GS(th)} > 0 \text{ 且 } u_{GD} < U_{GS(th)}$$

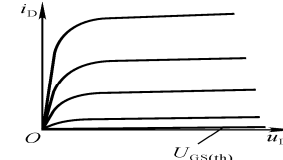
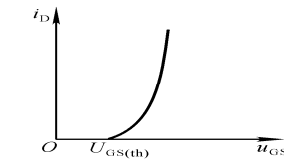
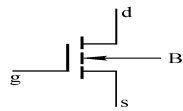
$$\text{此时 } u_{GS} > u_{GD}$$



P沟道增强型MOS管:

$$u_{GS} < U_{GS(th)} < 0 \text{ 且 } u_{GD} > U_{GS(th)}$$

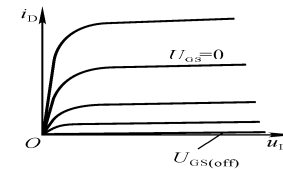
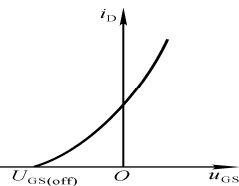
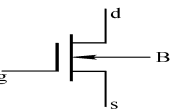
$$\text{此时 } u_{GS} < u_{GD}$$



N沟道耗尽型MOS管:

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

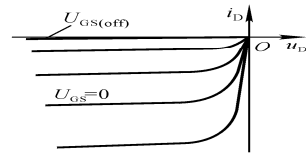
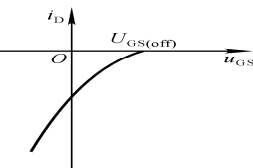
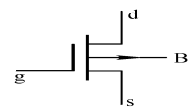
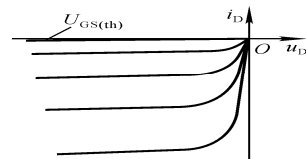
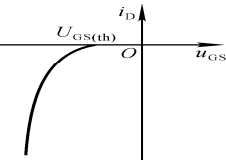
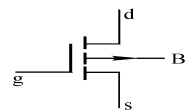
$$\text{此时 } u_{GS} > u_{GD}$$



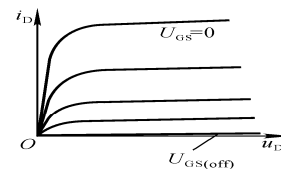
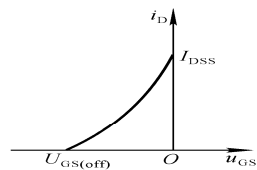
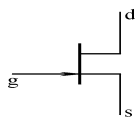
P沟道耗尽型MOS管:

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

$$\text{此时 } u_{GS} < u_{GD}$$



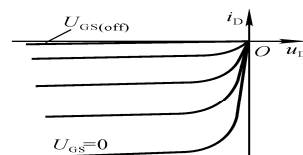
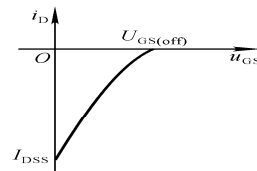
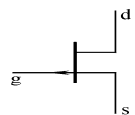
恒流区的条件



N沟道JFET:

$U_{GS(off)} < u_{GS} < 0$ 且
 $u_{GD} < U_{GS(off)}$

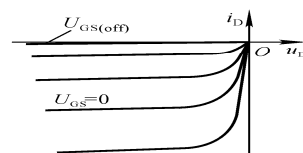
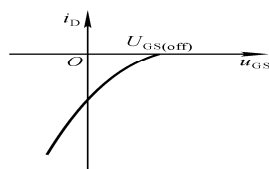
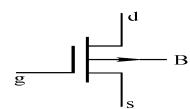
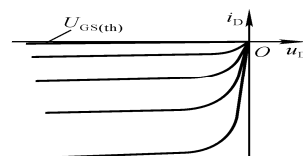
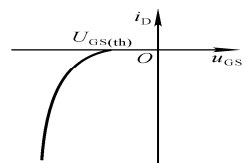
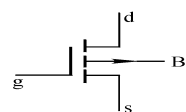
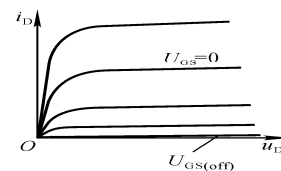
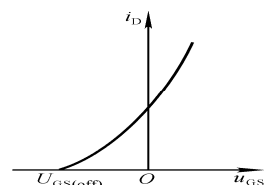
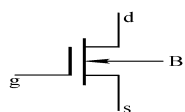
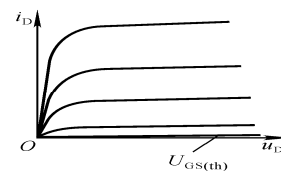
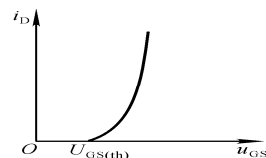
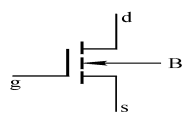
此时 $u_{GS} > u_{GD}$



P沟道JFET:

$0 < u_{GS} < U_{GS(off)}$ 且
 $u_{GD} > U_{GS(off)}$

此时 $u_{GS} < u_{GD}$

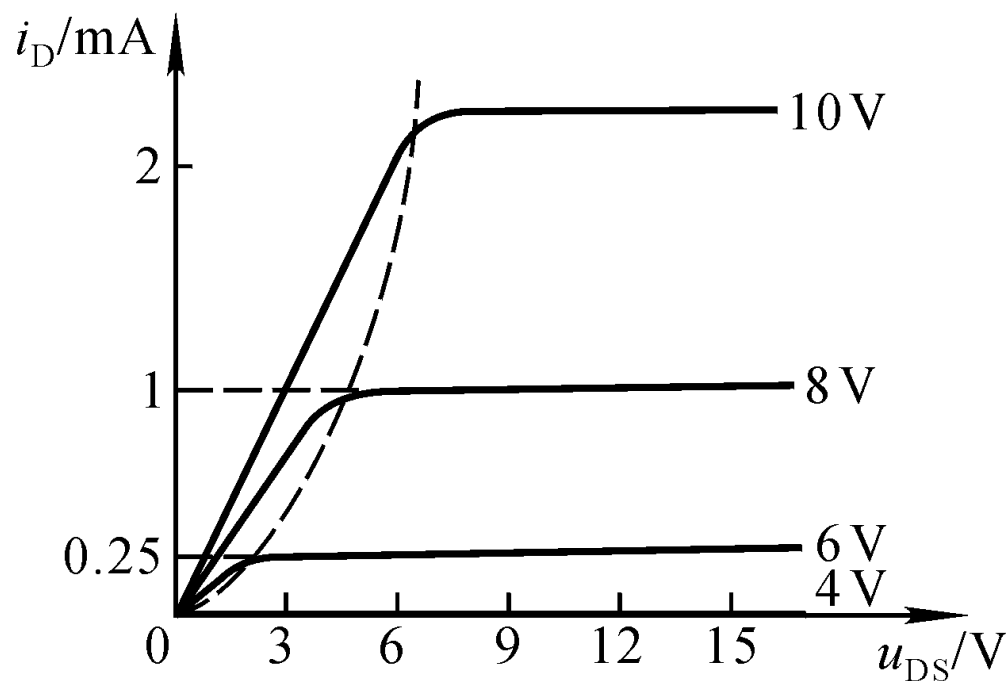


判断场效应管的类型和管脚

判断方法：根据不同场效应管处于恒流区的条件
(只能用电压比较来判断)

例1.4.1

已知某管子的输出特性曲线如图所示，试分析该管的类型，并画出其转移特性曲线。



自测题六

测得某放大电路中三个MOS管的三个电极的电位如表所示，它们的开启电压和夹断电压也在表中。试分析各管的工作状态，并填入表内。

N沟道增强型

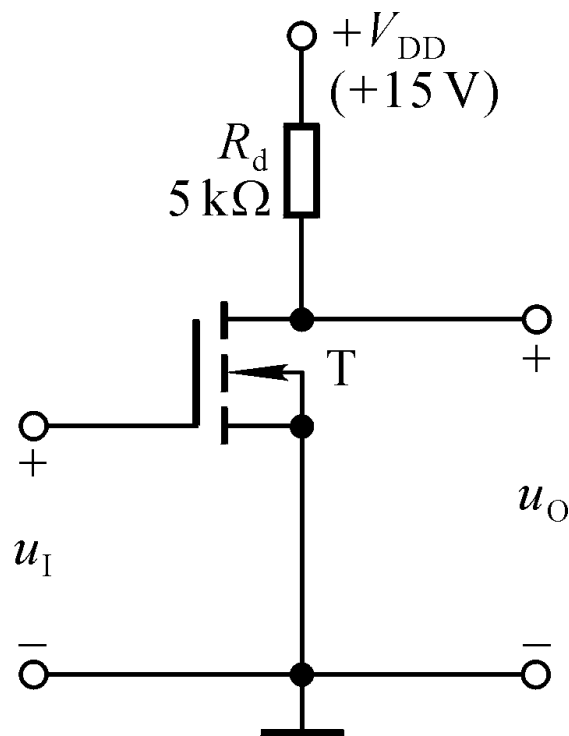
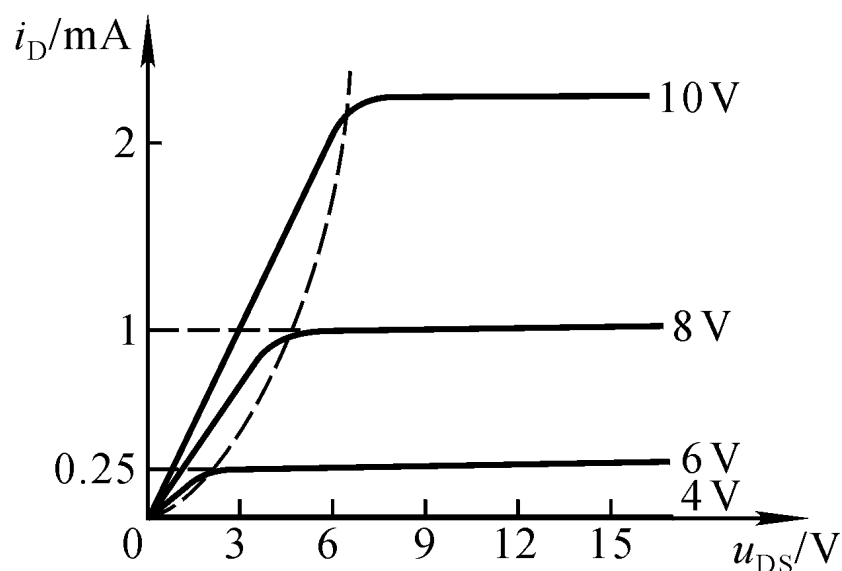
N沟道耗尽型

管 号	$U_{GS(th)}$ 或 $U_{GS(off)}/V$	U_S/V	U_G/V	U_D/V	工作状态
T ₁	4	-5	1	3	恒流区
T ₂	-4	3	3	10	恒流区
T ₃	-4	6	0	5	可变电阻区

P沟道增强型

判断场效应管的工作状态

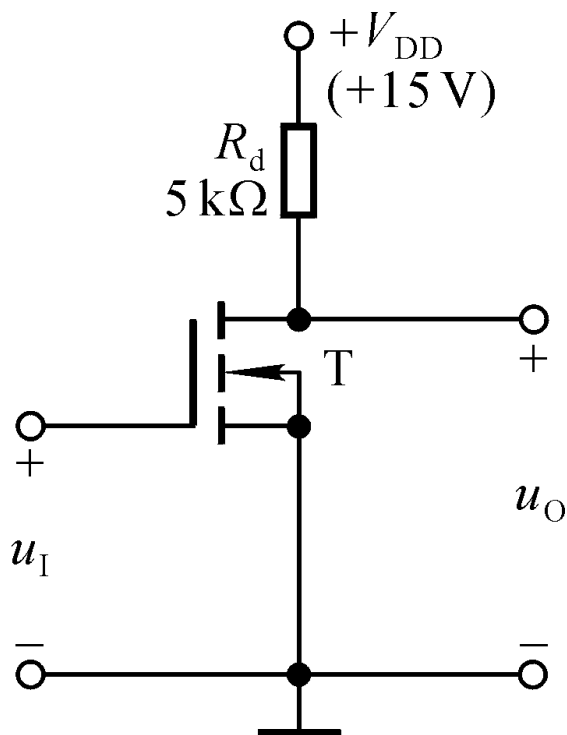
例1.4.2 试分析 $u_I=0V$ 、 $8V$ 、 $10V$ 时T的工作状态，并求 u_O 。



首先通过 u_{GS} 来判断管子是否导通。

若导通，再假设T处于恒流区，求出 u_{GD} ，通过 u_{GD} 来判断管子处于恒流区还是可变电阻区。（只能用电压比较来判断）

例1.4.2 试分析 $u_I=0V$ 、 $8V$ 、 $10V$ 时T的工作状态，并求 u_O 。



当 $u_I=0V$ 时: MOS管在夹断区, $i_D = 0$

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

当 $u_I=8V$ 时: MOS管导通, 先假设在恒流区,

$$u_{GD} = u_I - (V_{DD} - R_d i_D) = -2V < U_{GS(th)}$$

MOS管在恒流区 $u_O = V_{DD} - R_d i_D = 10V$

当 $u_I=10V$ 时: MOS管导通, 先假设在恒流区,

$$u_{GD} = u_I - (V_{DD} - R_d i_D) = 6V > U_{GS(th)}$$

MOS管在可变电阻区 $u_O = \frac{R_{DS}}{R_d + R_{DS}} \cdot V_{DD} \approx 5.6V$

1.4.3 场效应管的主要参数

- 直流参数: $U_{GS(th)}$ 、 $U_{GS(off)}$ 、 I_{DSS} 、 $R_{GS(DC)}$

直流输入电阻

- 交流参数: g_m 、三个极间电容

由此确定最高
工作频率 f_M

- 极限参数: I_{DM} 、 P_{DM} 、 $U_{(BR)DS}$ 或 $U_{(BR)GS}$

最大漏极
电流

最大耗散功率

击穿电压

1.4.3 场效应管与晶体管的比较

晶体管	场效应管
电流控制元件	电压控制元件
输入电阻较低	输入电阻很高
双极型三极管	单极型三极管

绝缘栅型场效应管的输入电阻**最大**，温度稳定性也**最好**，集成化时工艺简单，而广泛用于大规模和超大规模**集成电路**中。

场效应管有三个极：源极（s）、栅极（g）、漏极（d），对应于晶体管的e、b、c；有三个工作区域：夹断区、**恒流区**、可变电阻区，对应于晶体管的截止区、**放大区**、饱和区。

第 1 章

结 束