

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

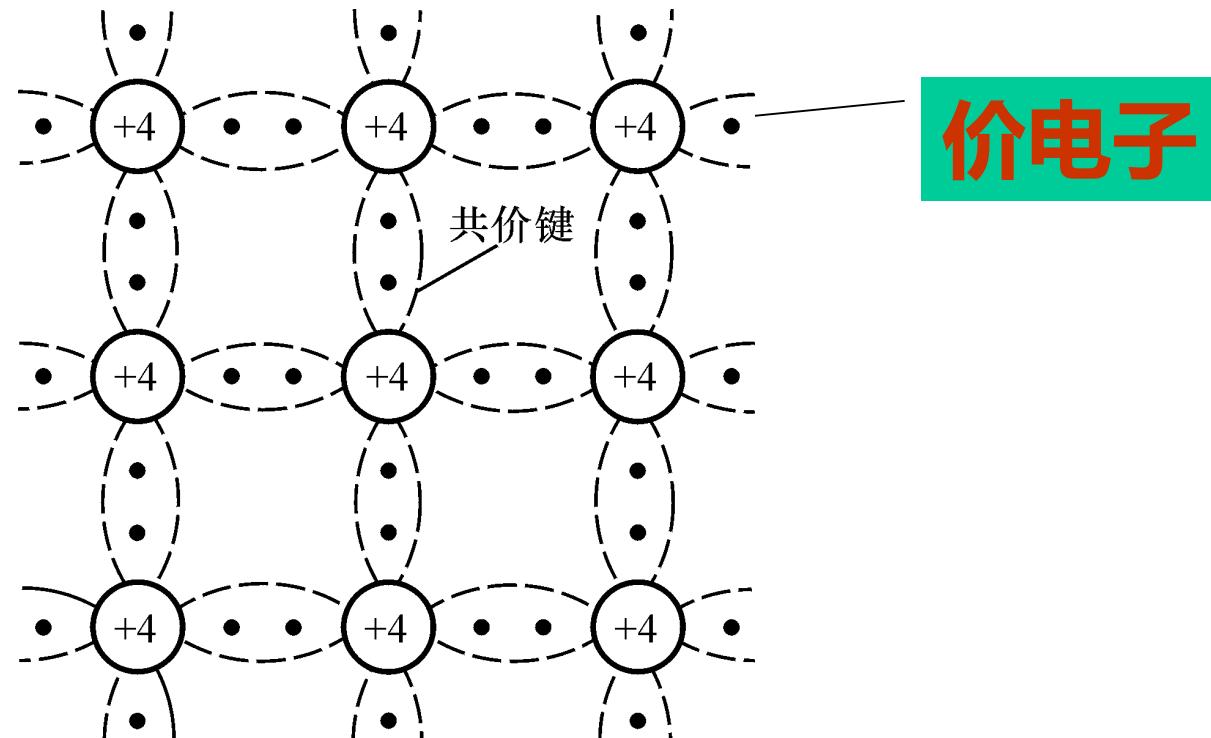
掺杂特性

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



在获得一定能量后，
形成：

两种载流子

(自由) 电子与空穴

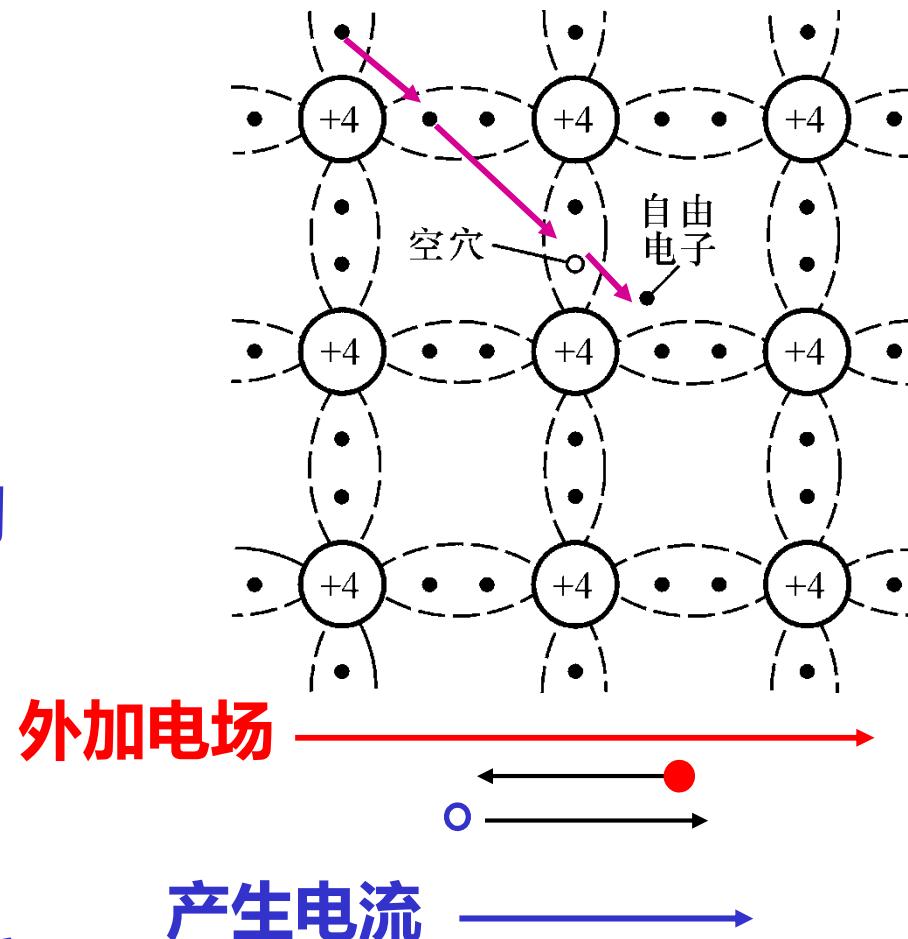
两种运动

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**。

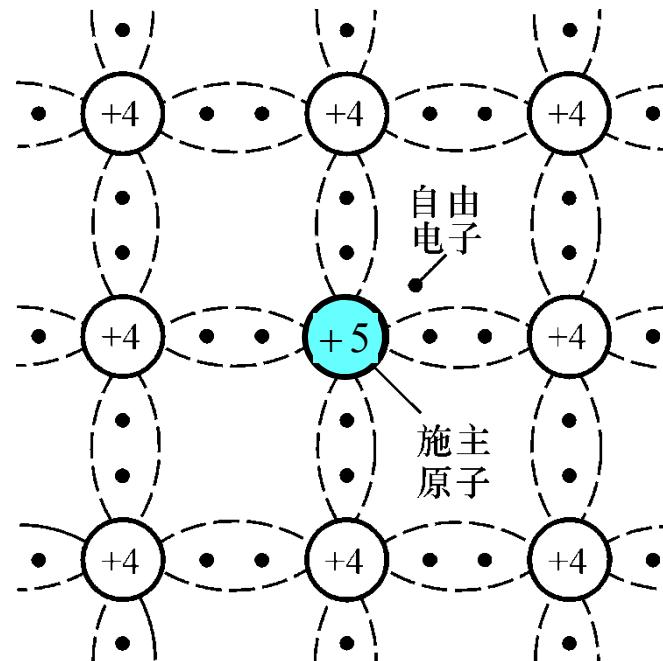
本征半导体的载流子浓度很低，所以导电性能很差

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。

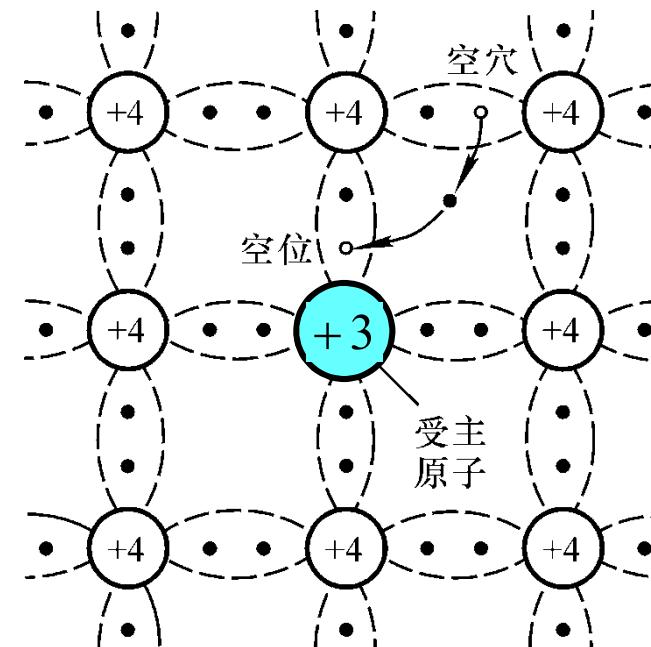


主要是电子导电，又称电子半导体。

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？

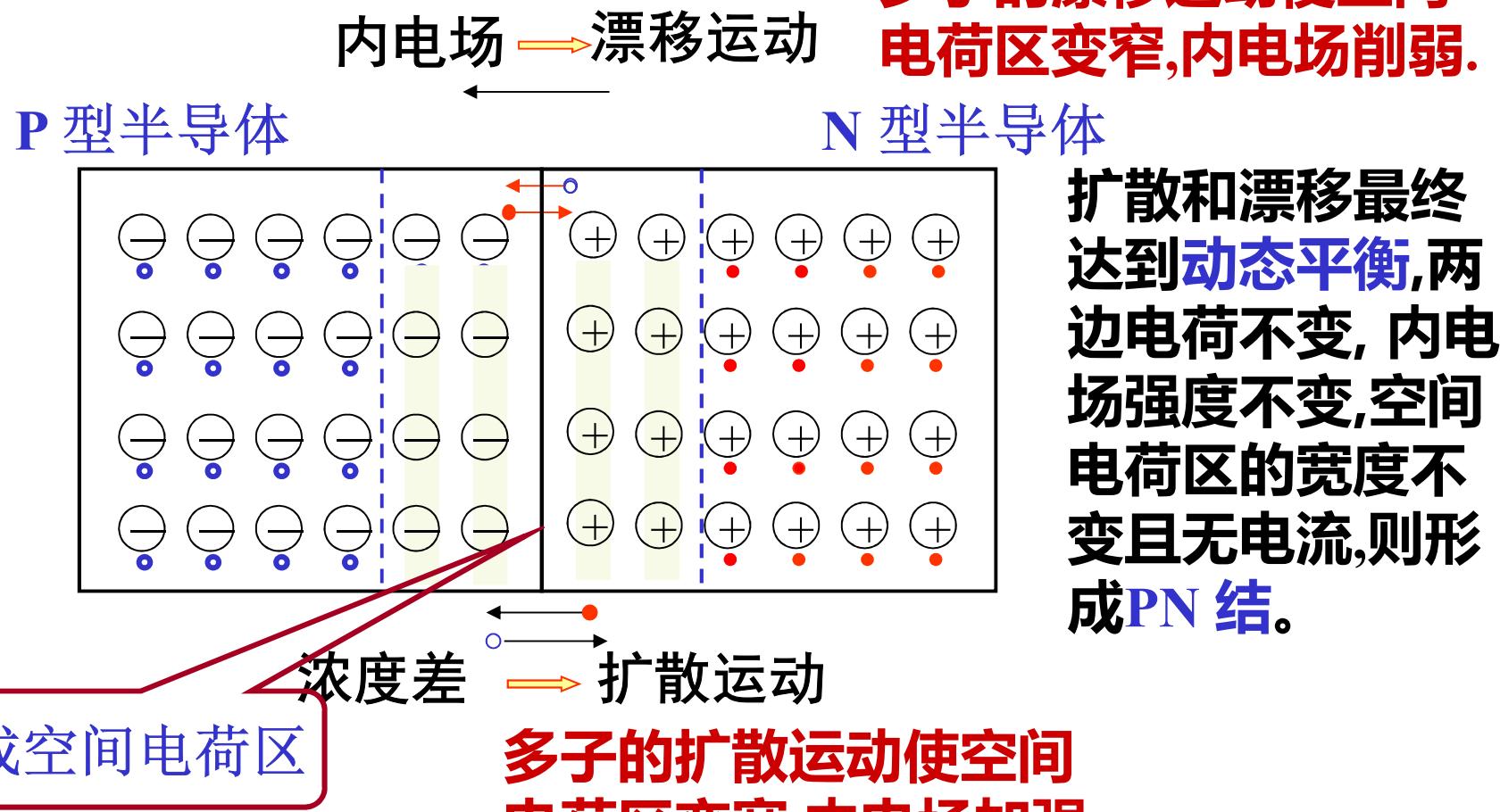
不论N型半导体还是P型半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但是整个晶体仍然是不带电的。

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。

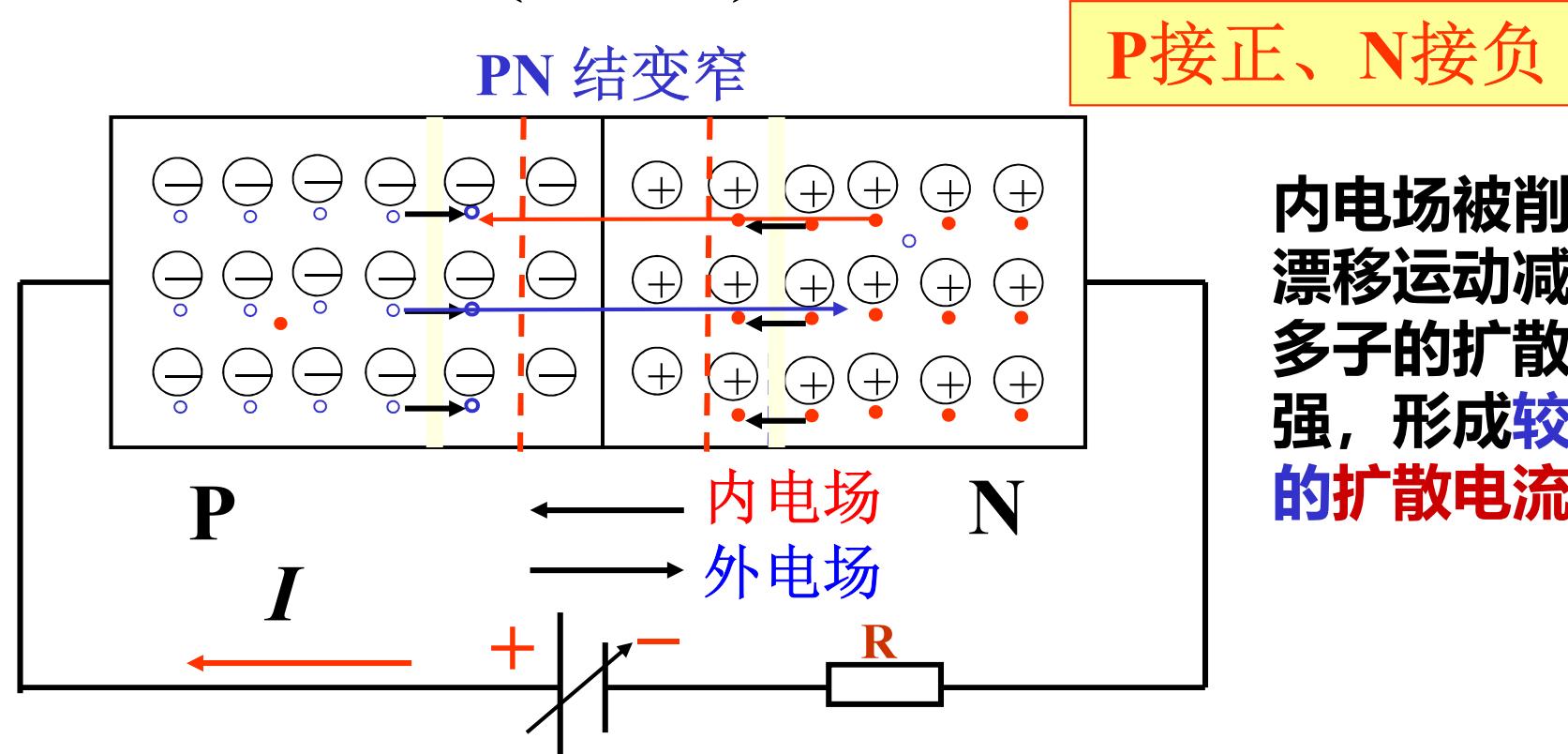
1.1.3 PN结

一、PN结的形成



二、PN结的单向导电性

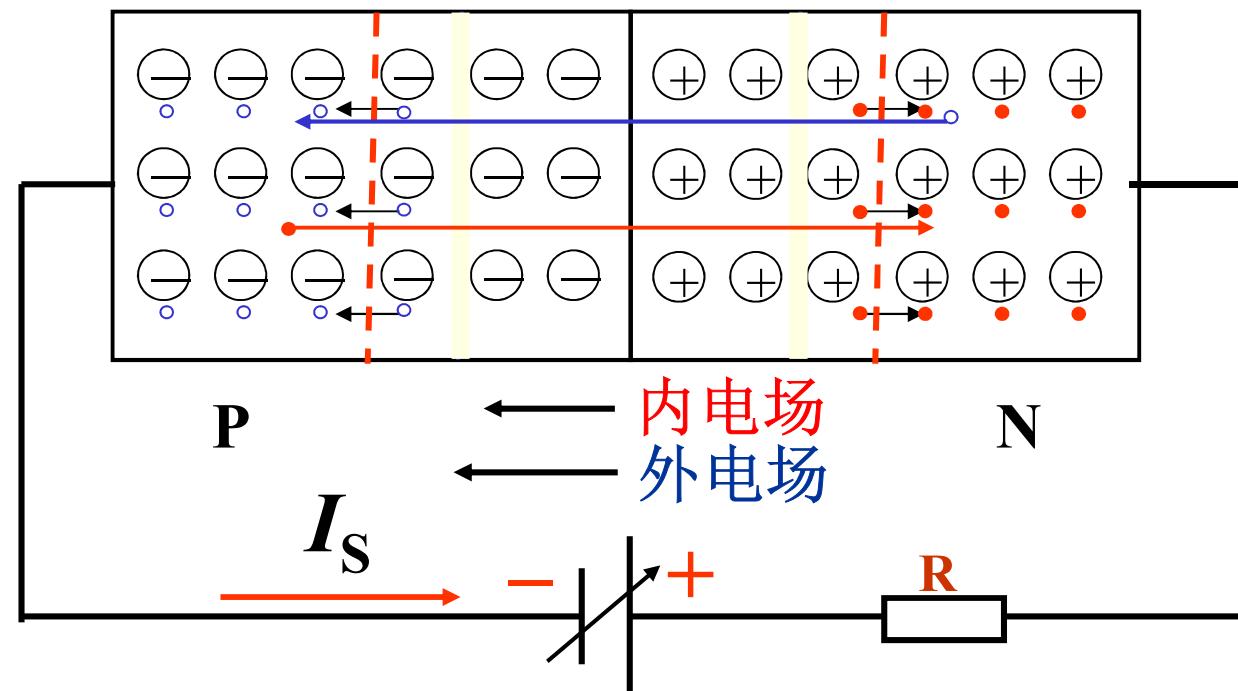
1. 外加正向电压(即正偏)



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 与的关系为

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

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 $U_T = kT/q$

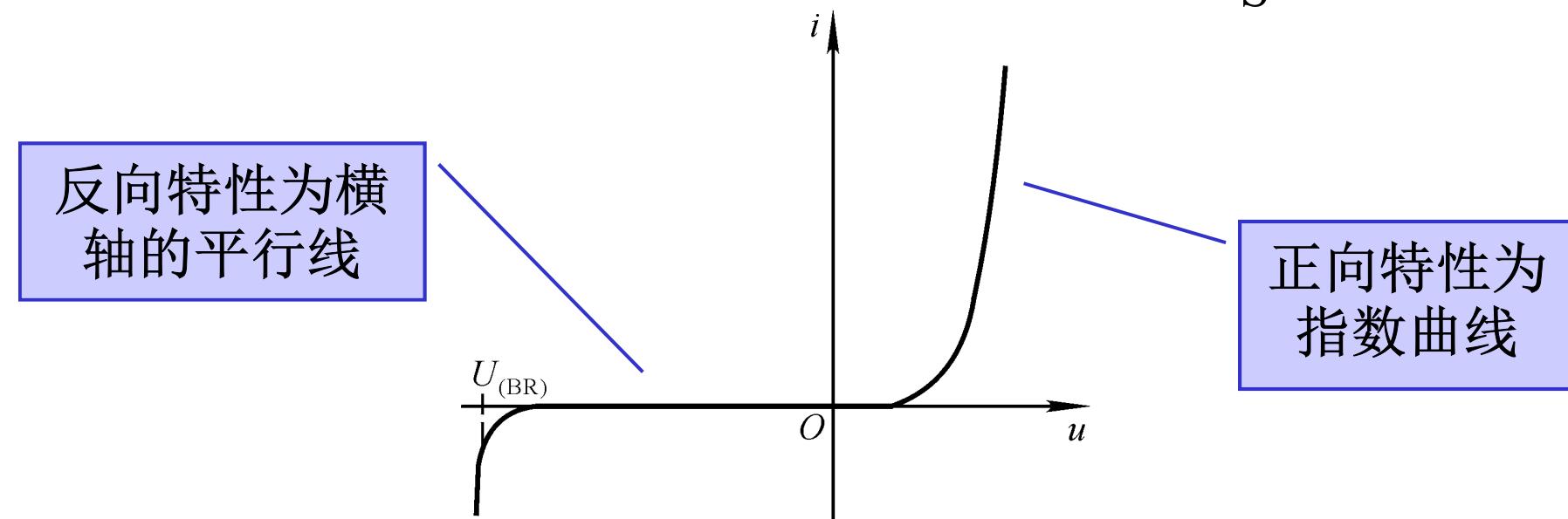
常温下, 即 $T=300K(开)$ 时, $U_T \approx 26mV$ 。

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。

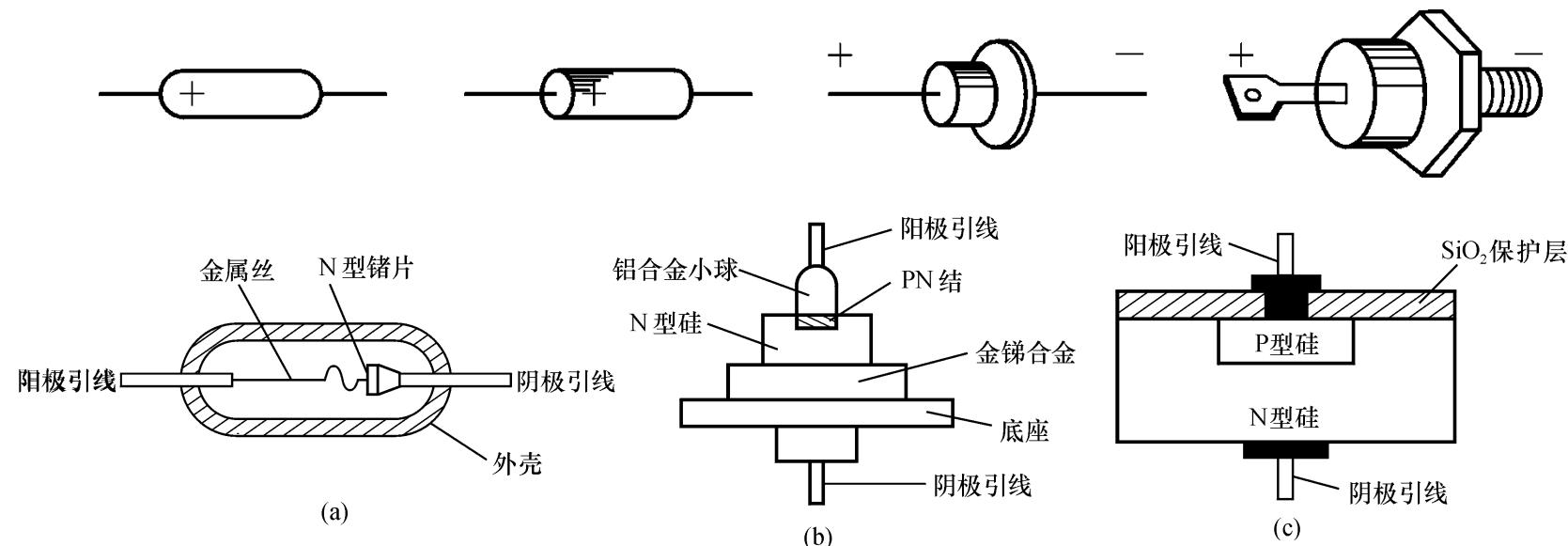


PN结的宽度和掺杂浓度有什么关系？

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:

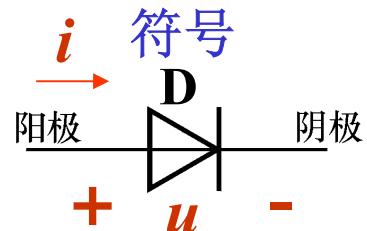
结面积大，结电容大
故允许通过的电流大
工作频率低
一般仅作为整流管

(c)平面型:

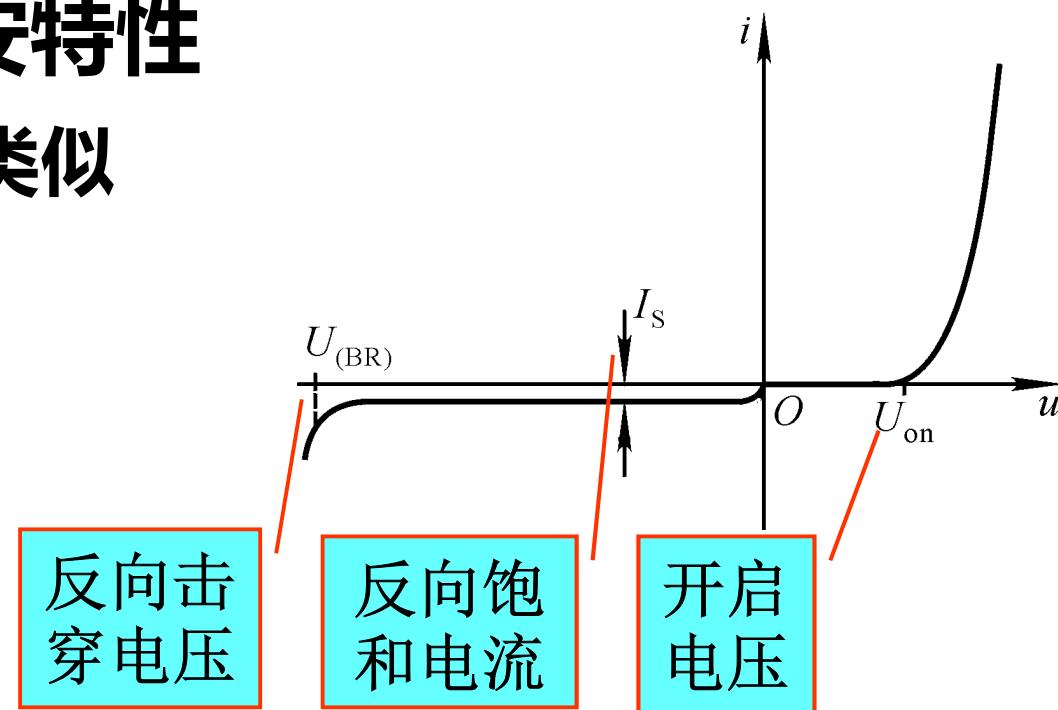
结面积可小可大
大的可用于大功率整流
小的可作为数字电路中
的开关管

1.2.2 二极管的伏安特性

与PN结的伏安特性类似

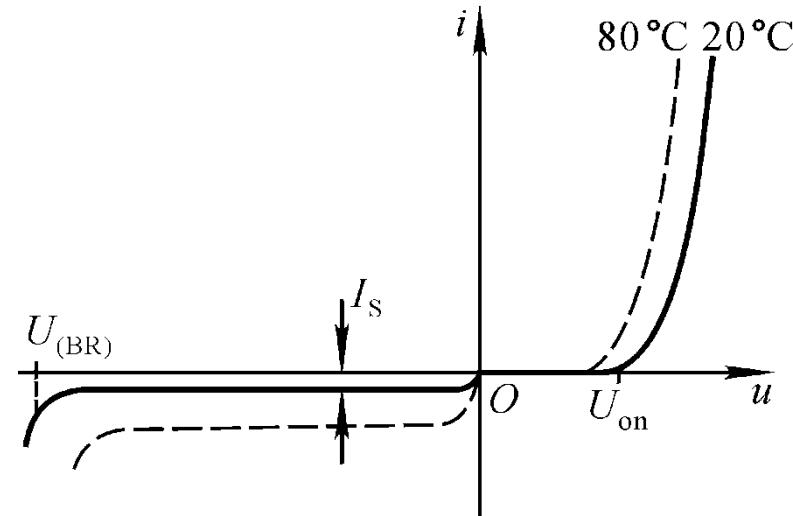


$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$$



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	0.1μA以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	几十μA

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 $U_{on} \downarrow$, 在电流不变情况下正向压降 $u \downarrow$

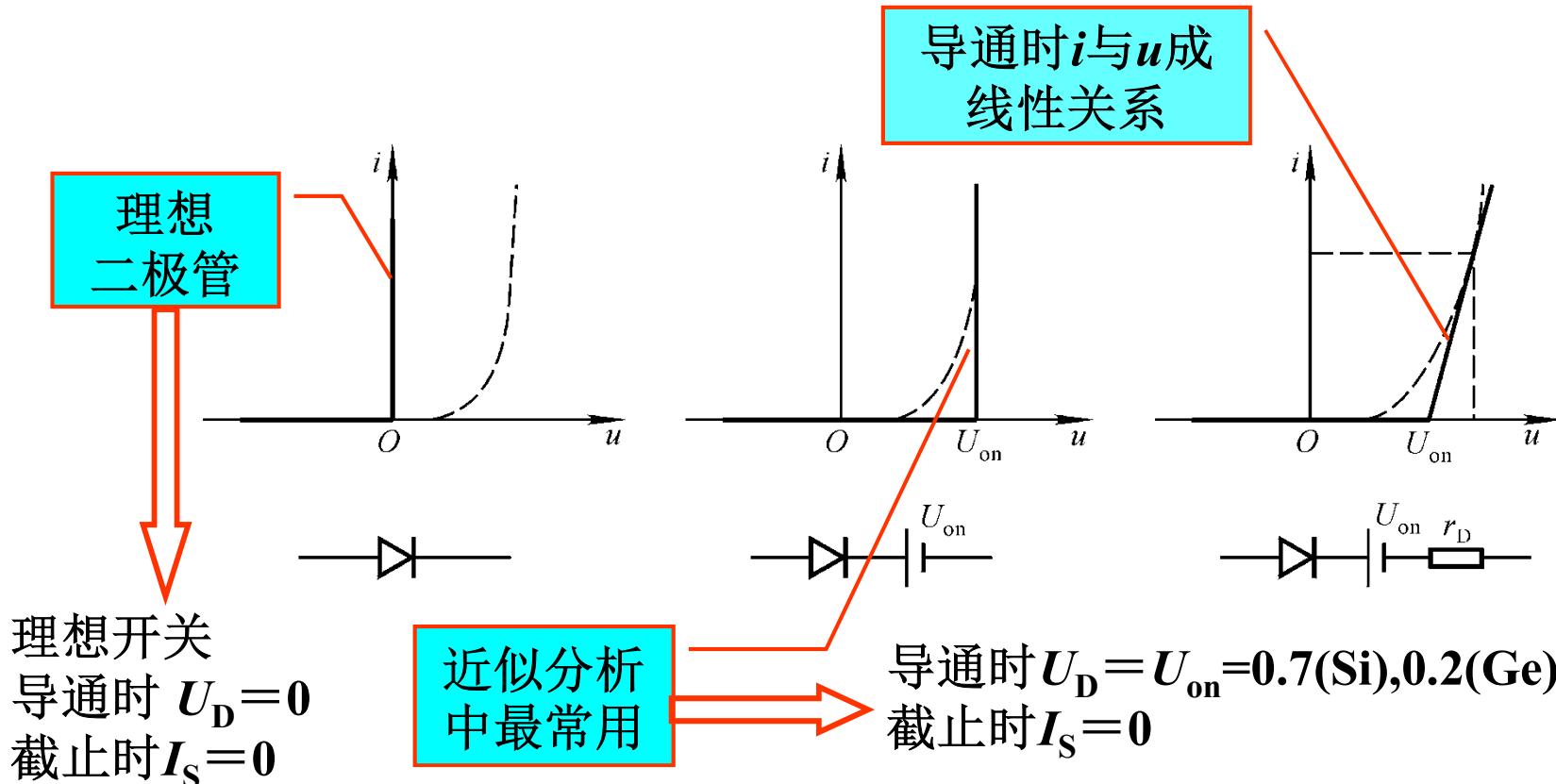
\rightarrow 反向饱和电流 $I_s \uparrow$, $U_{(BR)} \downarrow$

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

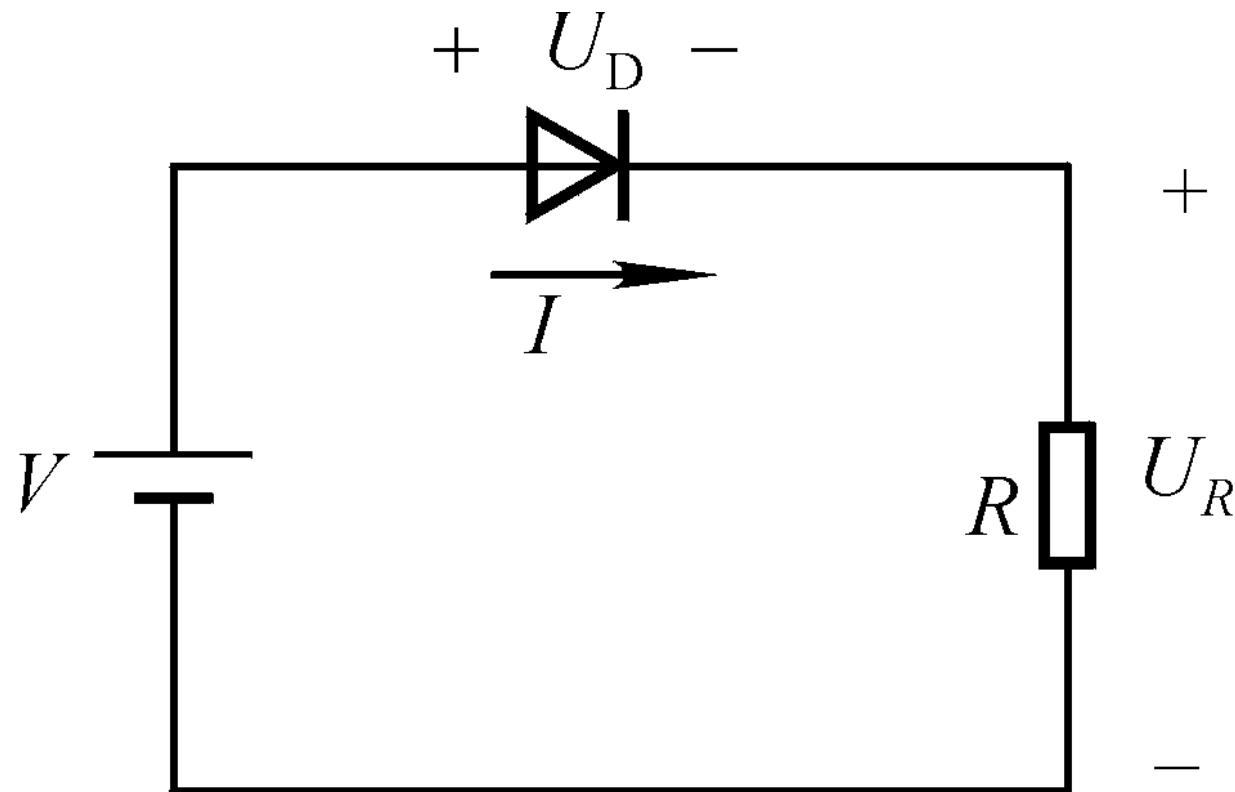
1.2.4 二极管的等效电路

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！

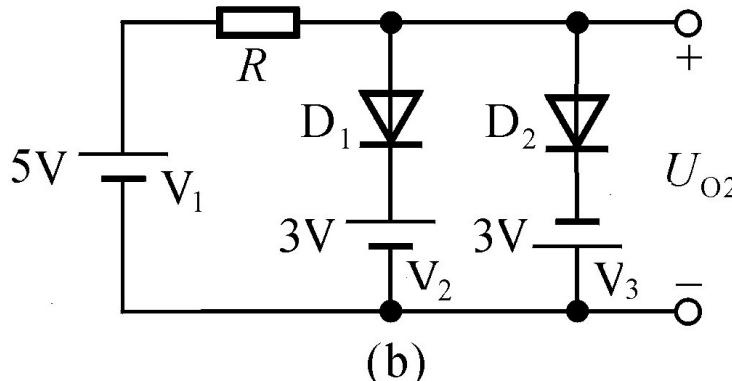
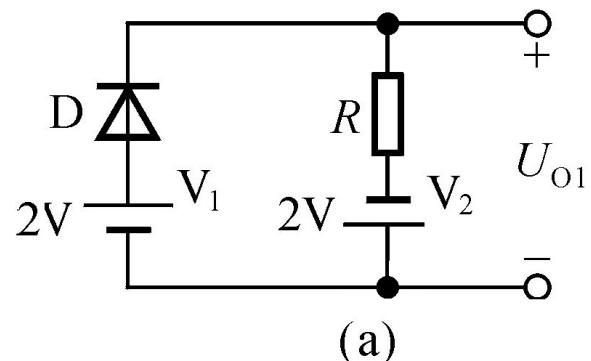
例1.2.1 已知二极管为硅管， $R=10K\Omega$ ， 试分析电压源 V 分别为30V、6V和1.5V时的电流 I 。



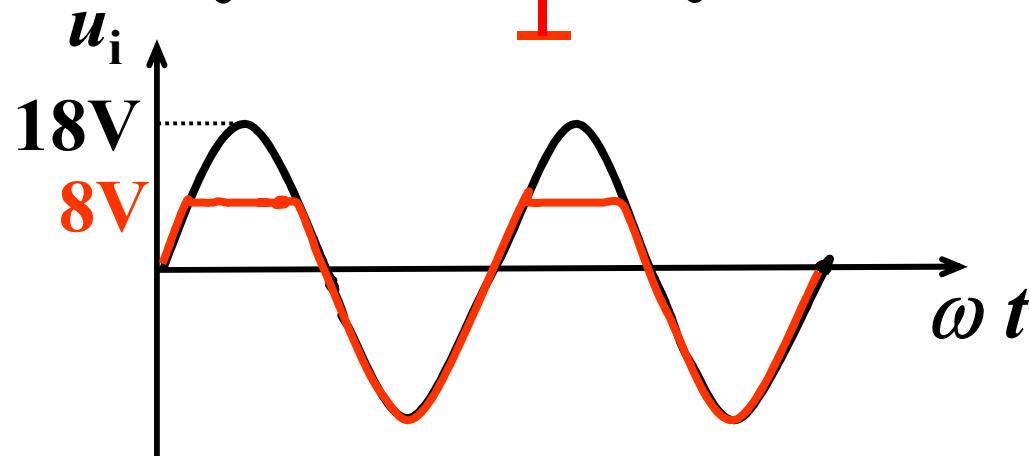
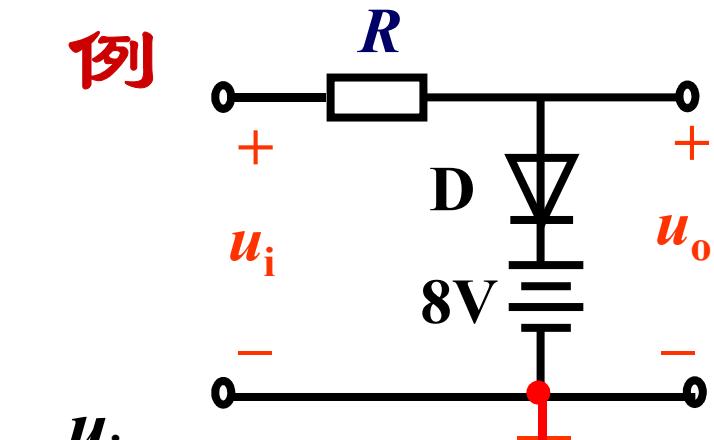
二极管的应用：整流、钳位、限幅、稳压、温度传感器等等。

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。

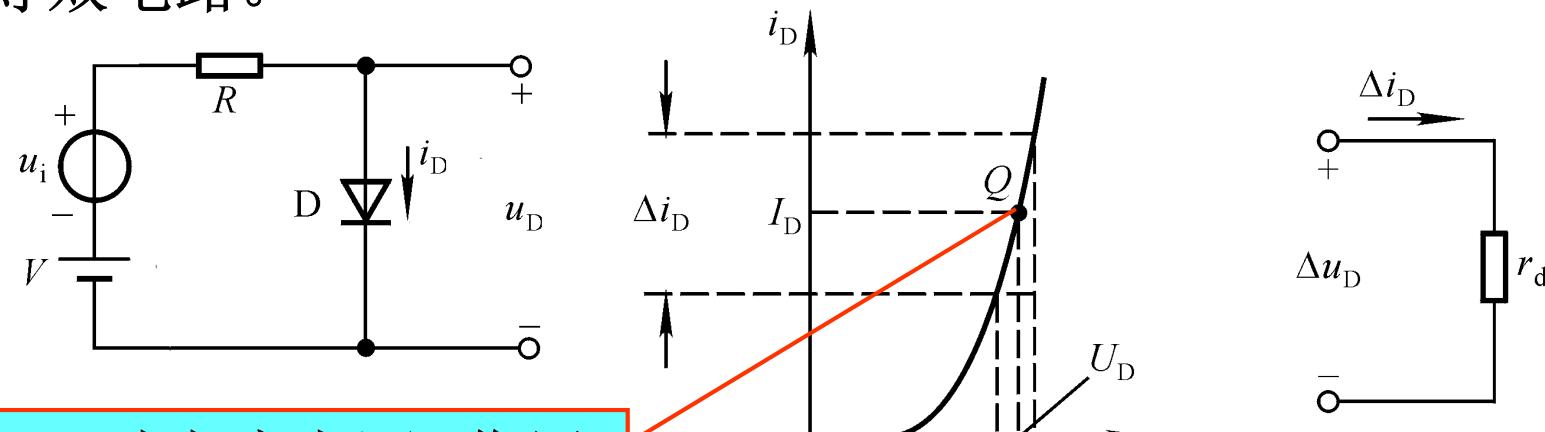
例

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

$u_i > 8V$, 二极管导通, 可看作短路 $u_o = 8V$
 $u_i < 8V$, 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。

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

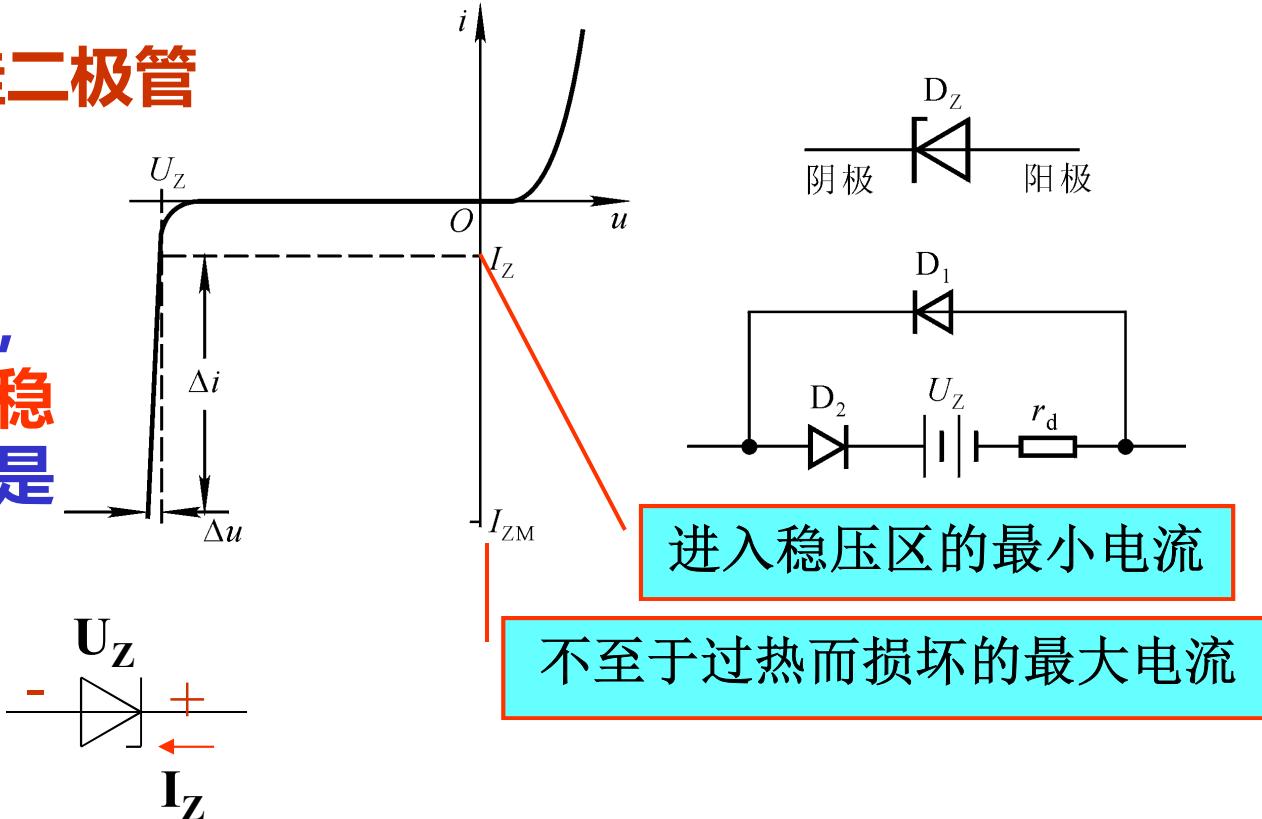
静态电流

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 $P_{ZM} = I_{ZM} U_Z$

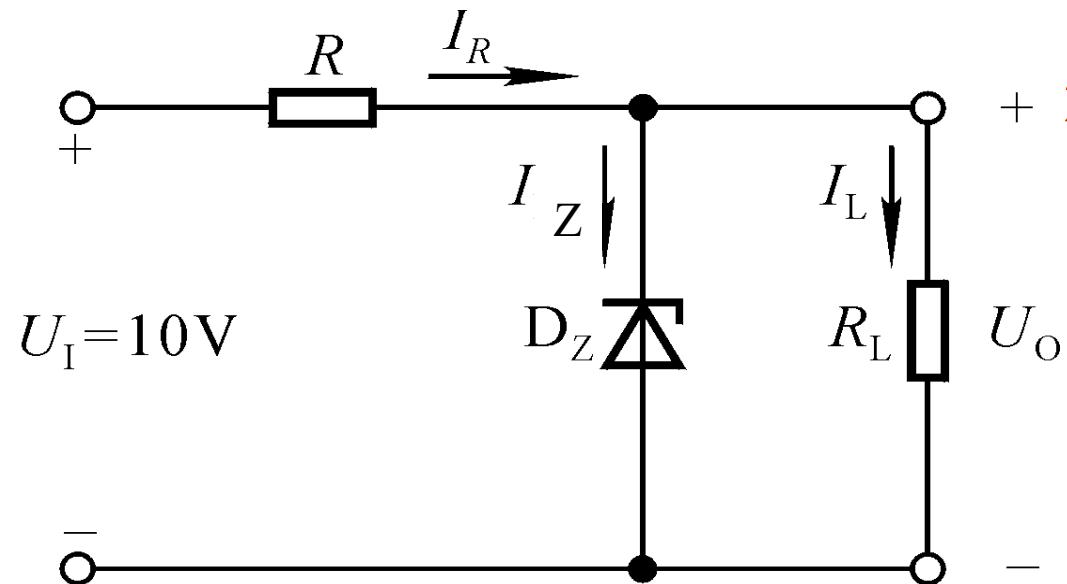
动态电阻 $r_z = \Delta U_z / \Delta I_z$

温度系数 α

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:

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

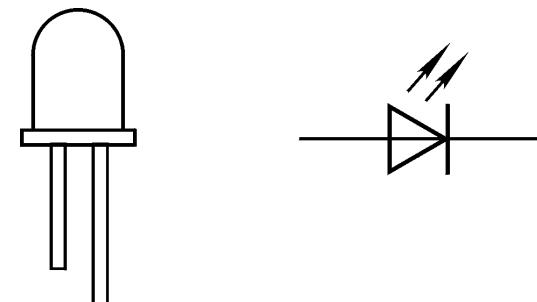
3. 当限流电阻 R 合适时, 有

$I_{Zmin} \leq I_Z \leq I_{Zmax}$, 稳压管才能稳压, 才有 $U_O = U_Z$ 。

1.2.6 其他类型二极管

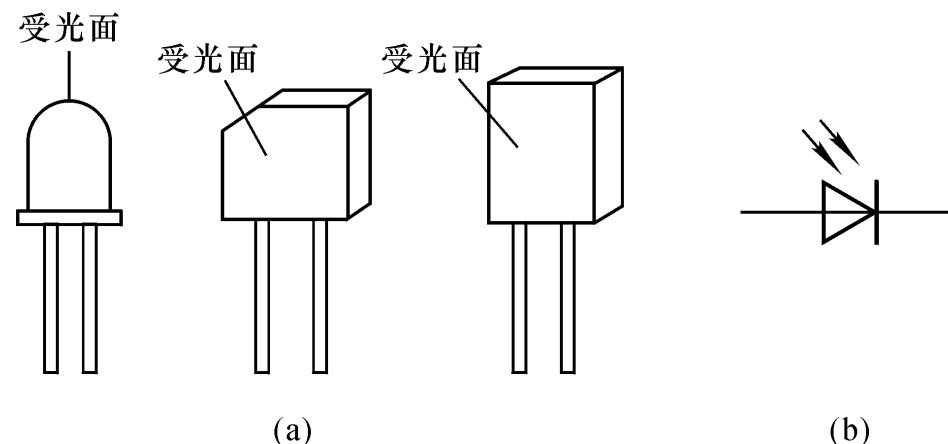
一、发光二极管(LED)

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。



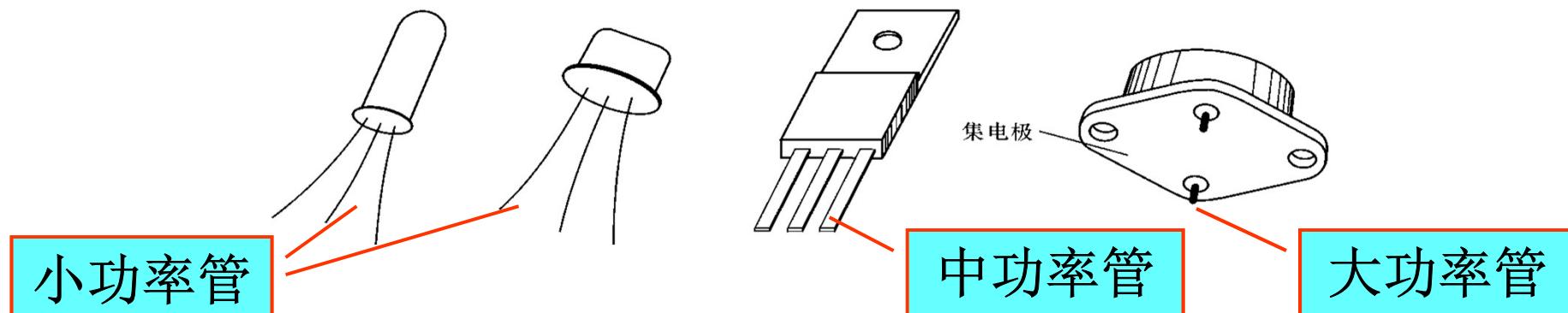
二、光电二极管

反向电流随光照强度的增加而上升，称为光电流。

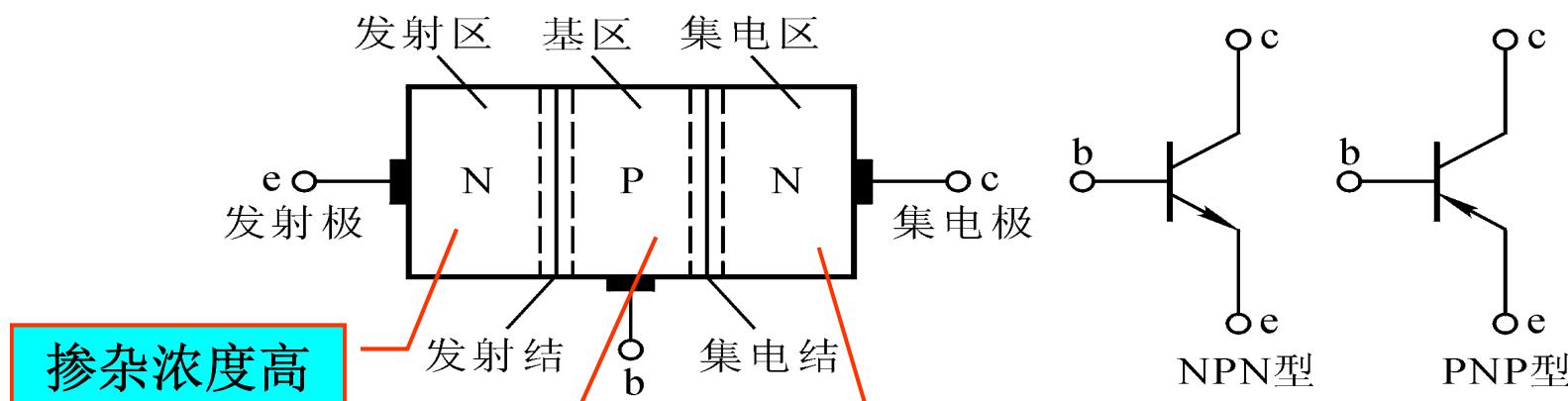
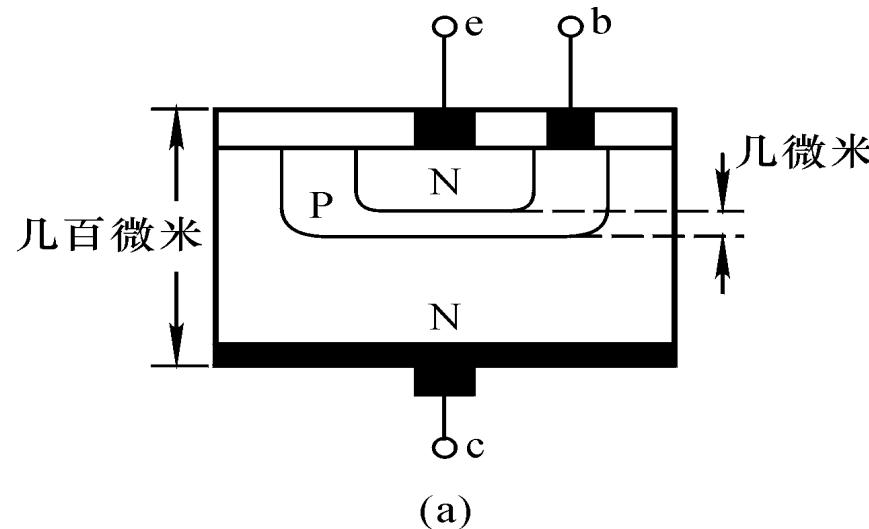


1.3 晶体三极管(Bipolar Junction Transistor)

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

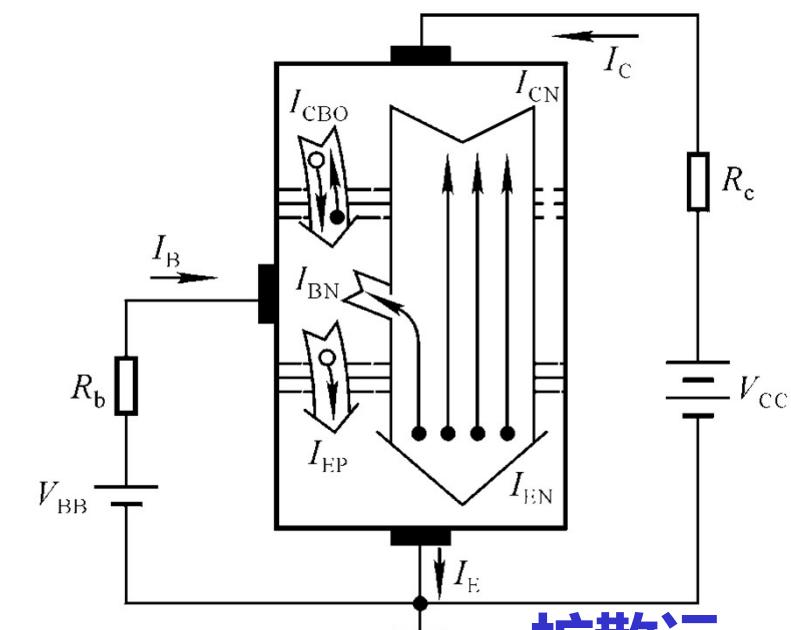
**晶体管的工艺特点
(即放大的内部条件)**

(c)

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

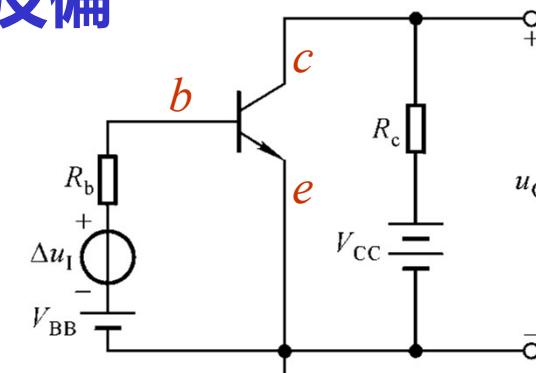
一、内部载流子的运动



发射结正偏

扩散运动增强

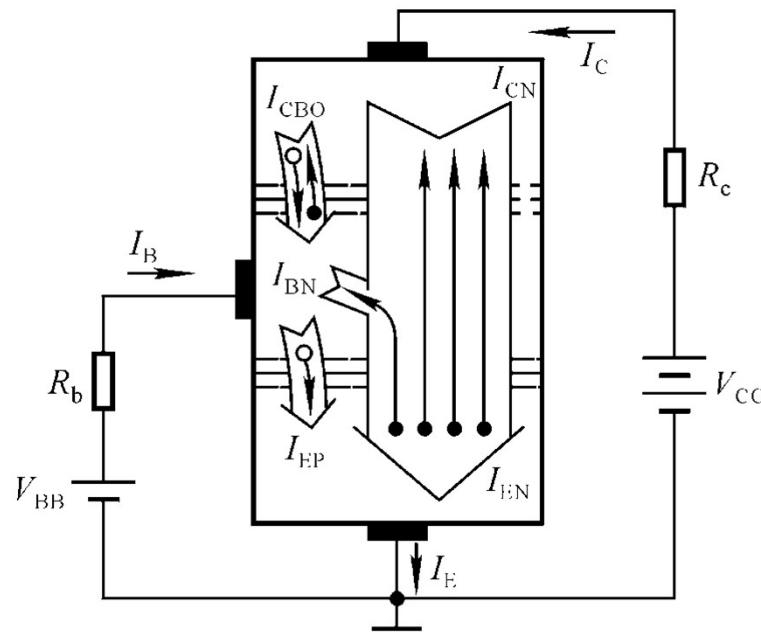
形成发射极电流 I_E



以NPN型基本共射放大电路为例

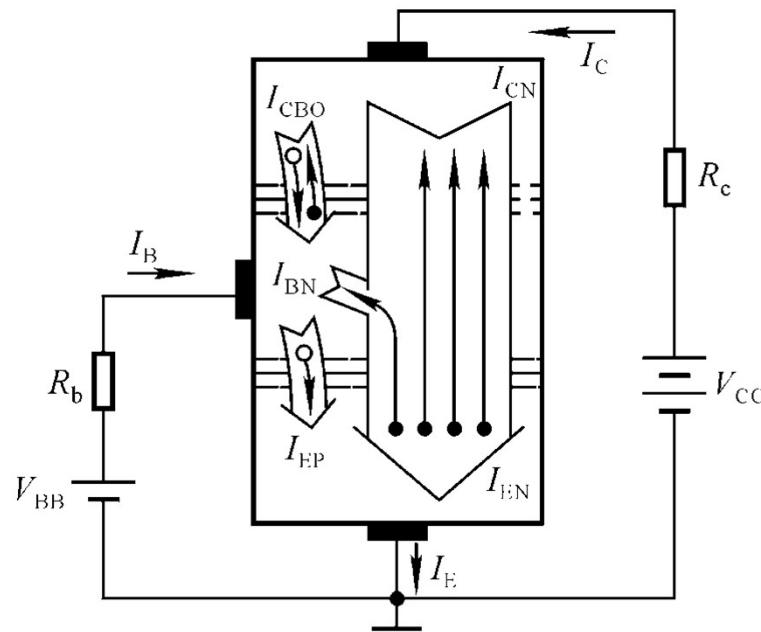
1. 发射结正偏, 扩散运动形成发射极电流 I_E

{ 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)



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

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

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

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

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

$$I_E \approx (1 + \bar{\beta}) I_B$$

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

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

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

$$I_E = I_C + I_B$$

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

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

$$\bar{\alpha} = \frac{I_{CN}}{I_E} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E}$$

$$\begin{aligned} I_E &= I_{EN} + I_{EP} = I_{CN} + I_{BN} + I_{EP} \\ I_C &= I_{CN} + I_{CBO} \\ I_B &= I_{BN} + I_{EP} - I_{CBO} = I_B' - I_{CBO} \\ I_E &= I_C + I_B \end{aligned}$$

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CN}}{I'_B} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} = \frac{\bar{\alpha} I_E}{I_E - I_C + I_{CBO}} = \frac{\bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$$

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

$$I_C = \bar{\alpha} I_E + I_{CBO}$$

一般情况下, I_{CBO} 可以忽略

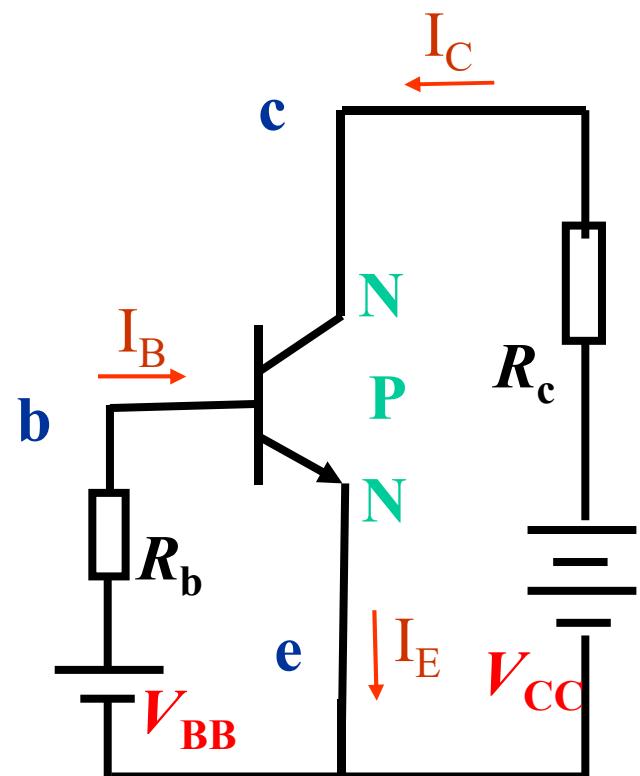
$$\therefore I_C \approx \bar{\alpha} I_E$$

共基交流电流放大系数

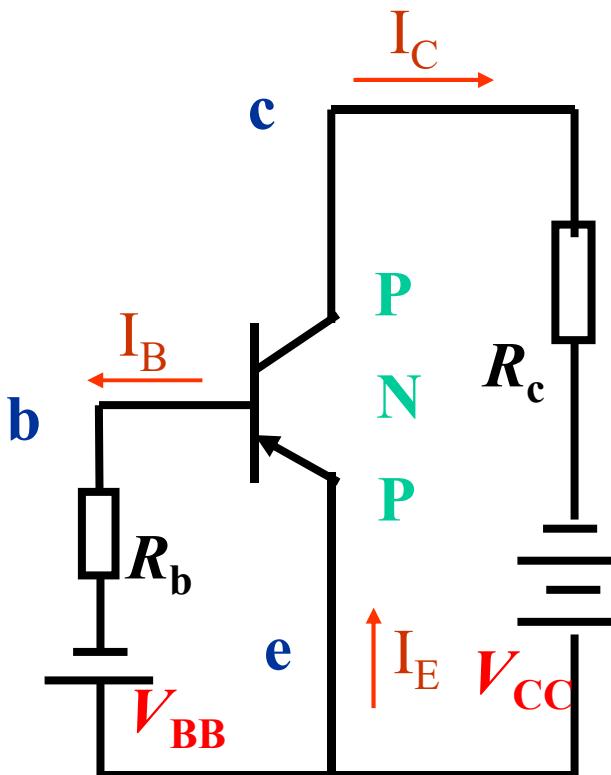
$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \approx \bar{\alpha}$$

思考

PNP型晶体管具有直流电流放大作用时，外部应如何接线？



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



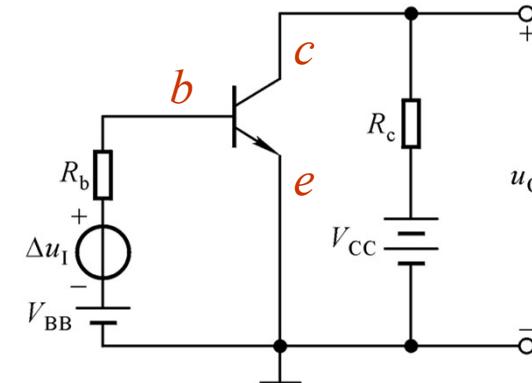
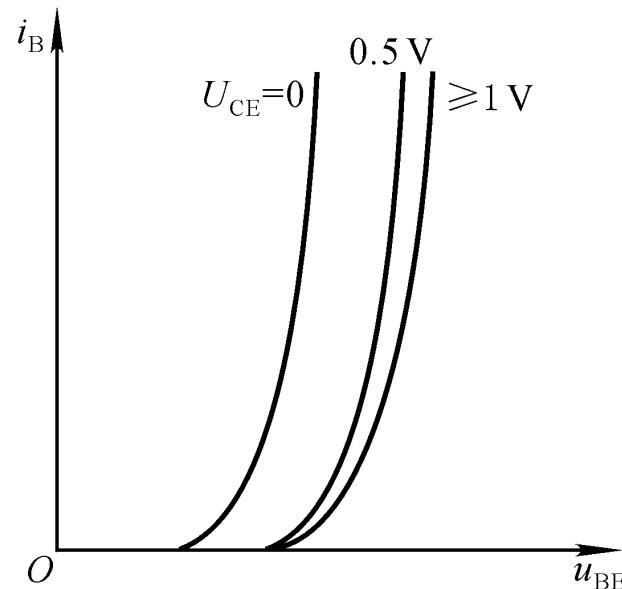
$$U_{CE} < U_{BE} < 0$$

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

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

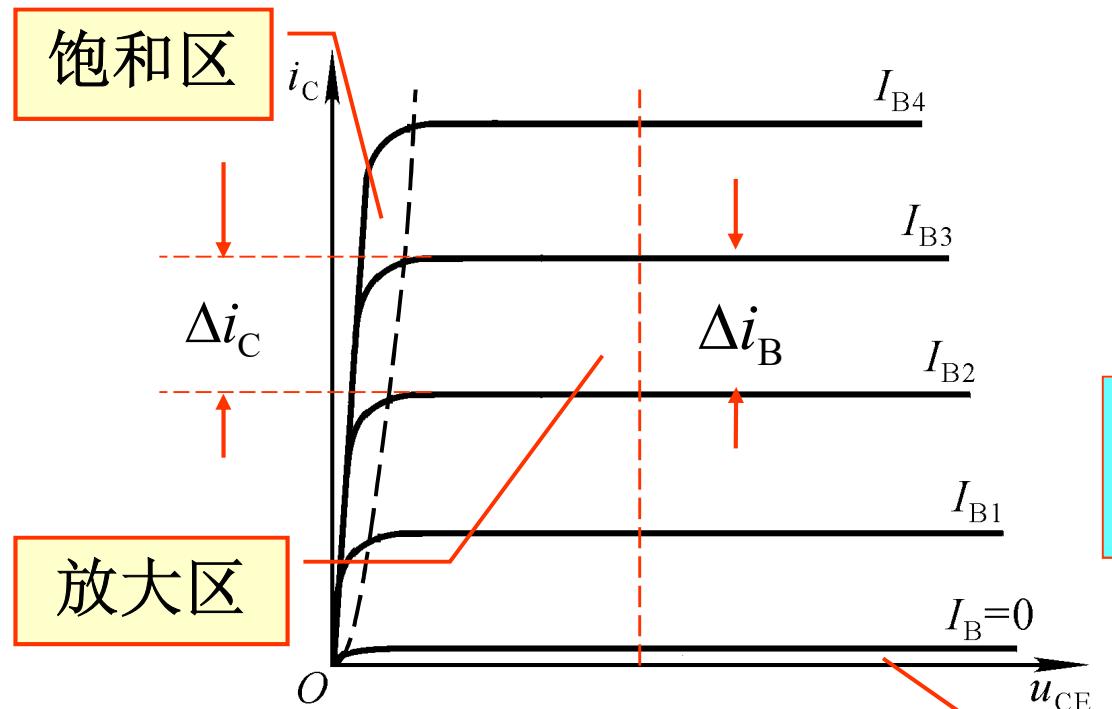


以NPN型基本共射放大电路为例

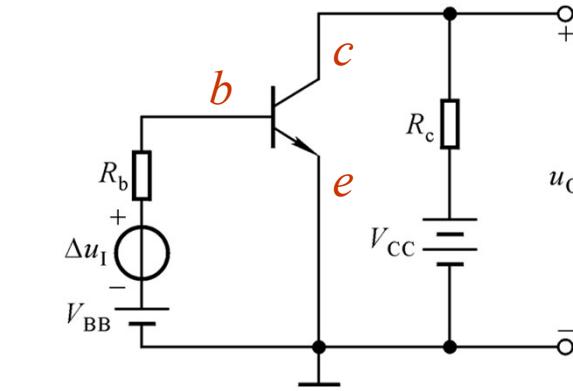
二、输出特性曲线

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

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

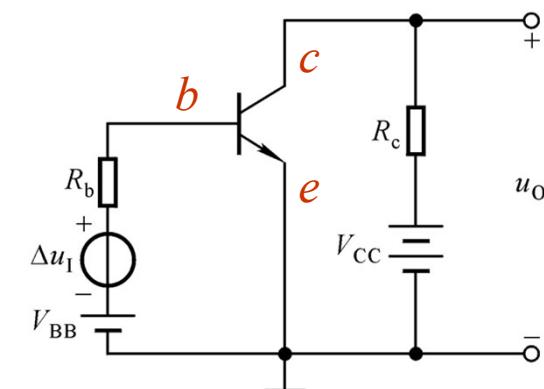
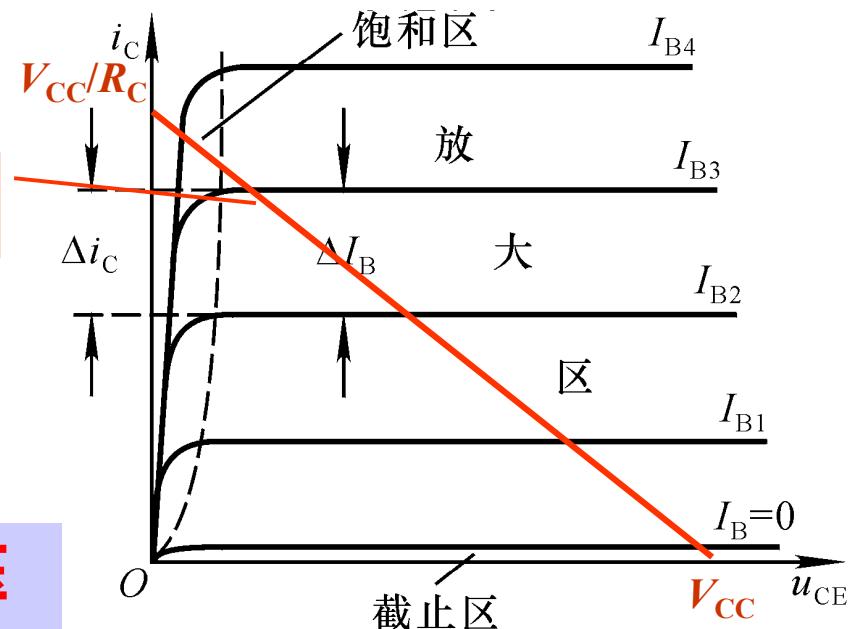
(1) 截止区

$I_B=0$ 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 $u_{CE} > u_{BE}$)

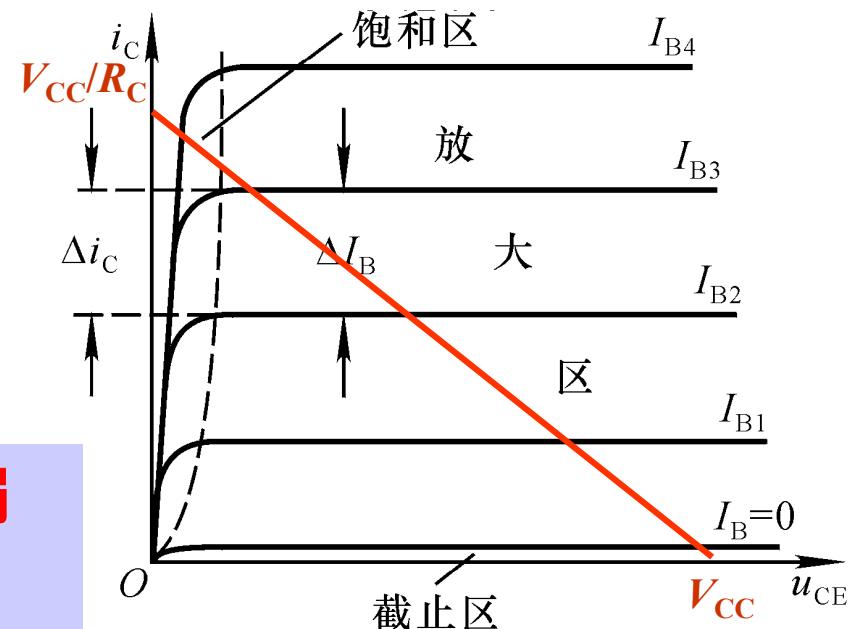
特点： $i_B = 0$, $i_C = I_{CEO} \approx 0$,
 $u_{CE} = V_{CC} - R_C i_C \approx V_{CC}$ (最大值)



(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

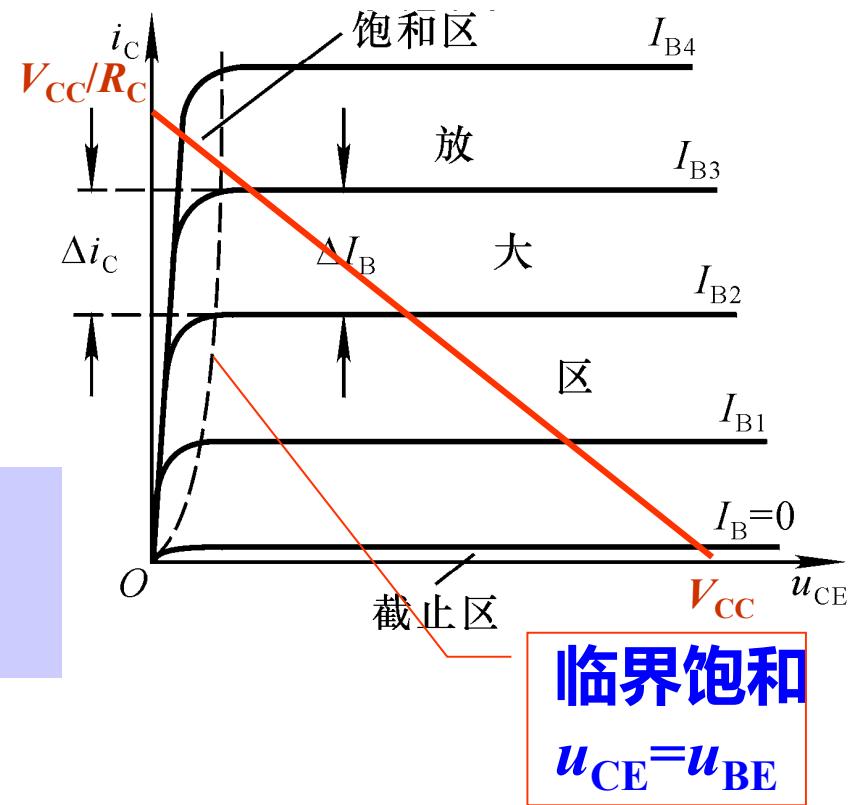
(NPN型管： $u_{BE} > U_{on}$ 且 $u_{CE} < u_{BE}$)

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)

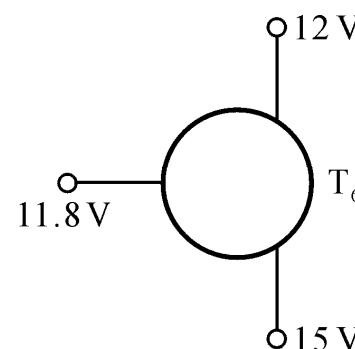
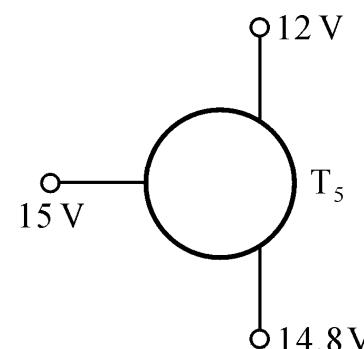
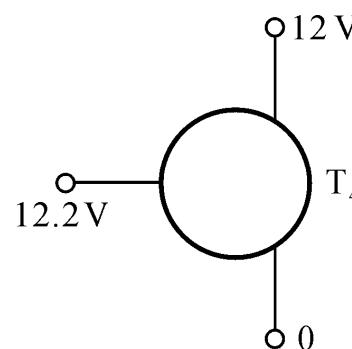
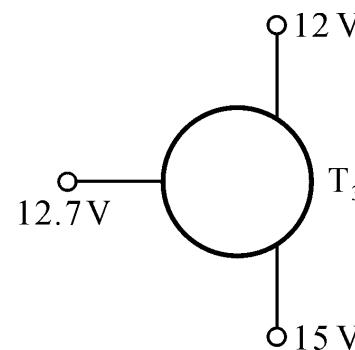
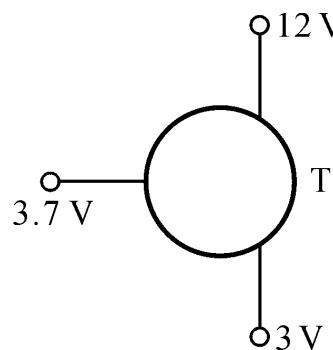
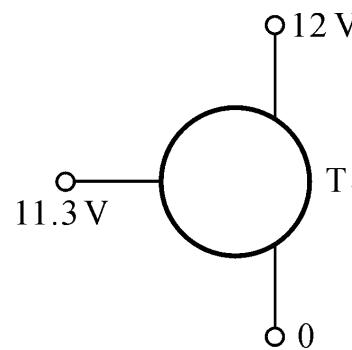
U_{CES} 为饱和时的管压降



判断晶体管的类型和管脚

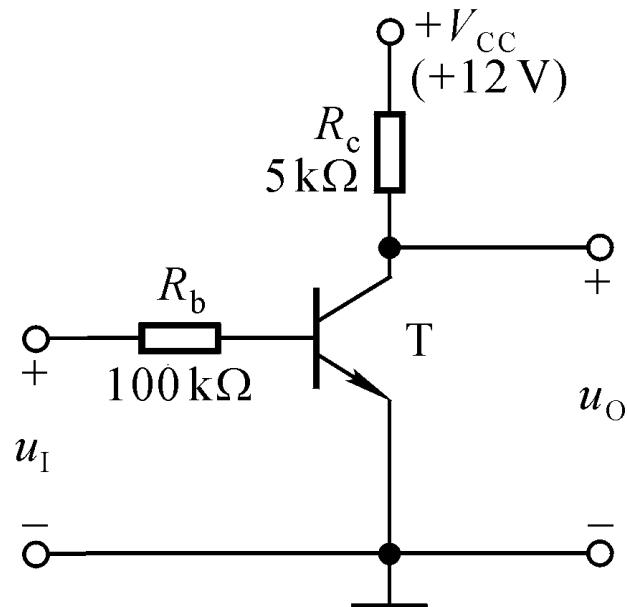
判断方法：任何类型的晶体管处于放大区的条件是
发射结正偏，集电结反偏

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

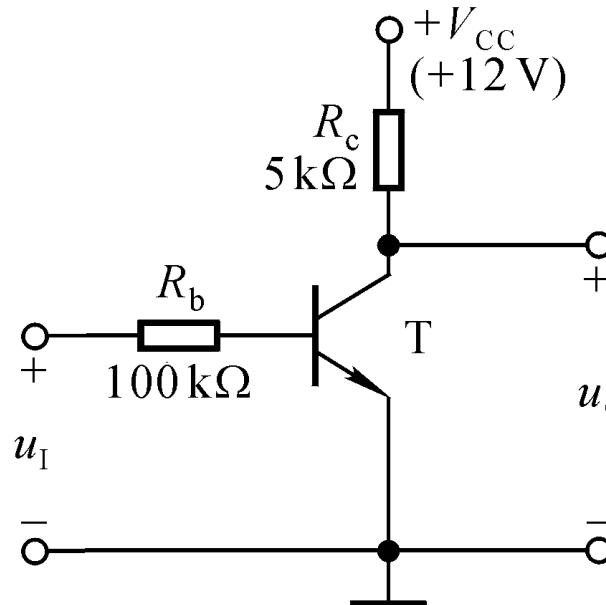
例 已知T导通时的 $U_{BE}=0.7V$, $\beta=60$, 饱和管压降 $U_{CES} = 0.3V$, 分别分析 $u_I=0V$ 、 $3V$ 、 $6V$ 时T的工作状态, 并求 u_O 。



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，

$$u_O \quad U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = V_{CC} - R_C \cdot \beta \frac{u_i - U_{BE}}{R_b} = 5.1V > U_{BE}$$

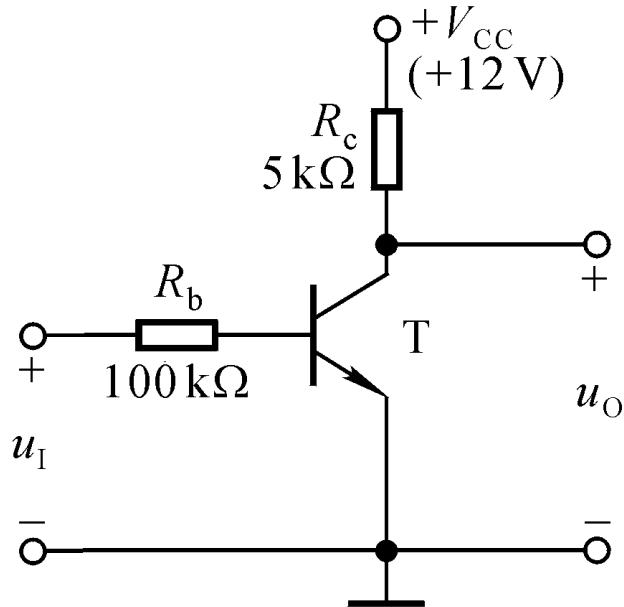
晶体管放大 $u_O = U_{CE} = 5.1V$

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 。

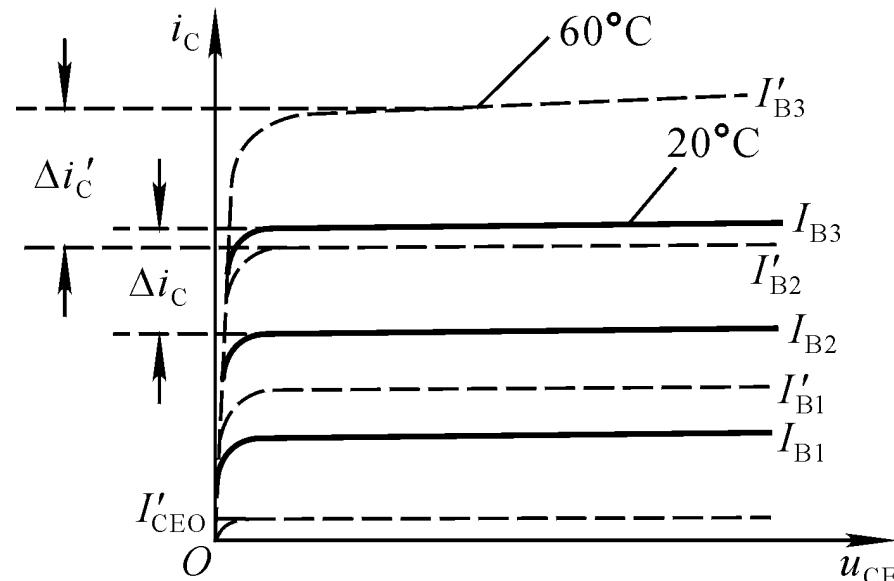
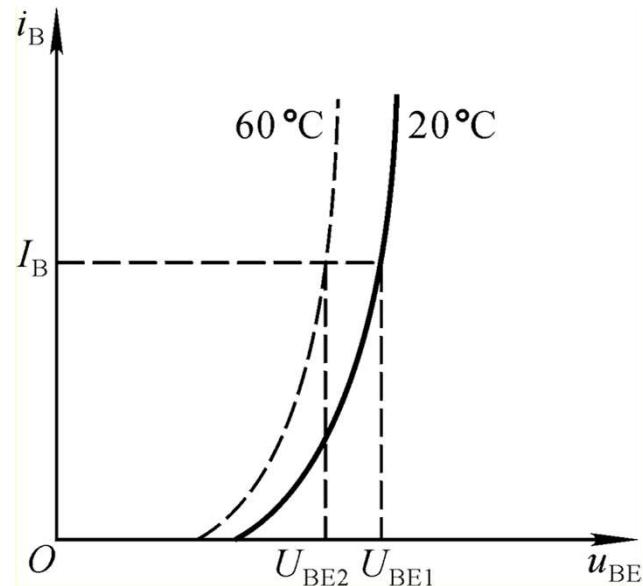


$$\begin{aligned} \text{临界饱和时 } I_{BS} &= \frac{V_{CC} - U_{CES}}{\beta R_c} \\ &= \left(\frac{12 - 0.3}{60 \times 5} \right) \text{mA} = 39 \mu\text{A} \end{aligned}$$

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

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

1.3.4 温度对晶体管特性的影响



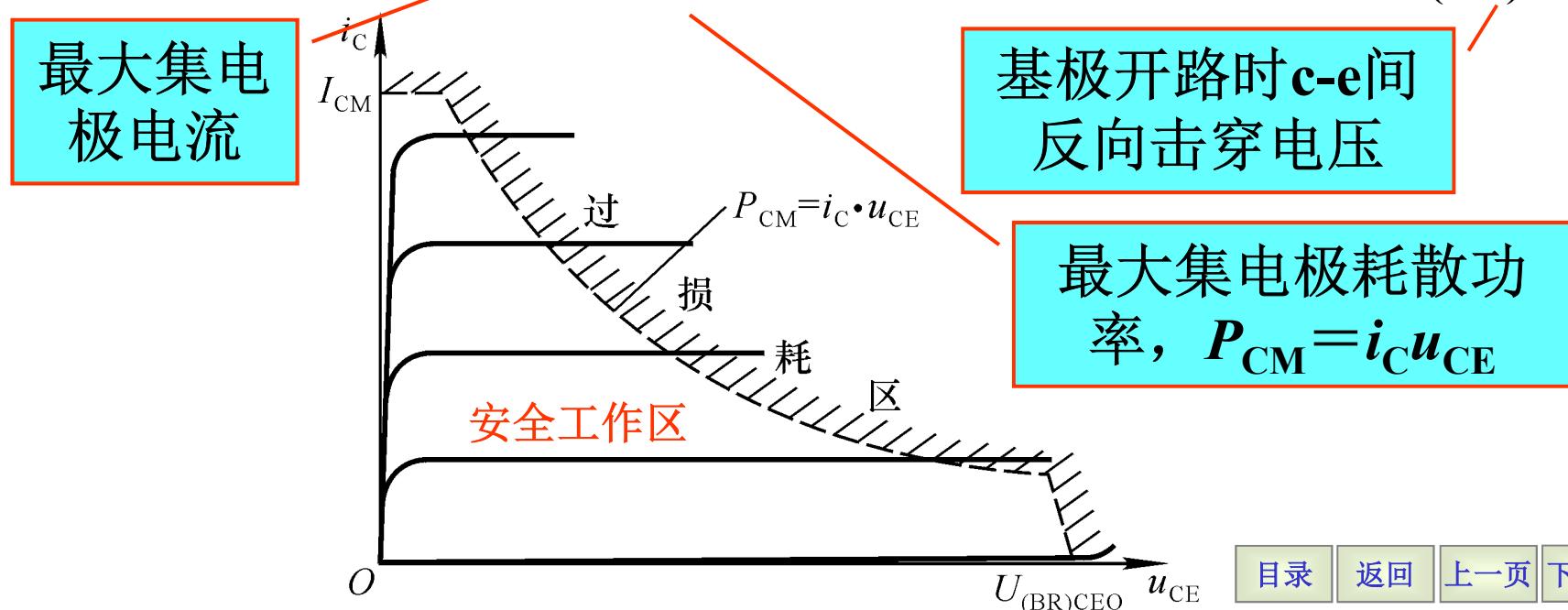
$T(\text{ }^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{\text{CBO}} \uparrow \rightarrow I_{\text{CEO}} \uparrow$
 $\rightarrow \beta \uparrow$
 $\rightarrow u_{\text{BE}} \text{ 不变时 } i_{\text{B}} \uparrow$
 $\left. \begin{array}{c} \\ \\ \end{array} \right\} \Rightarrow I_{\text{C}} \uparrow$

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

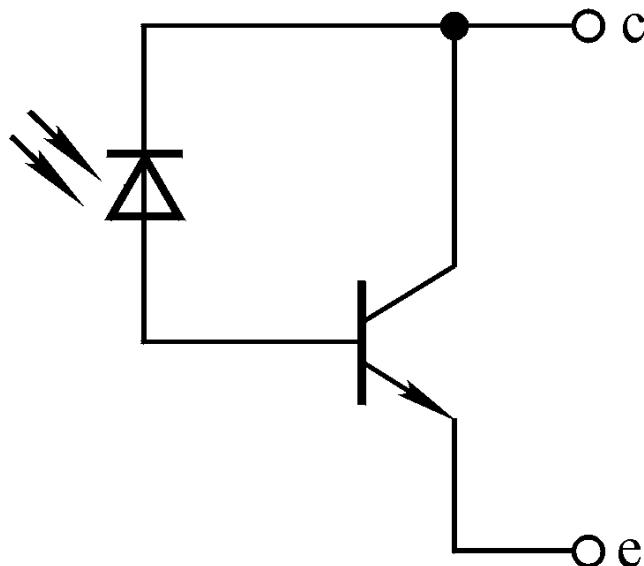
【例 1.3.2】 在一个单管放大电路中,电源电压为 30 V,已知三只管子的参数如表 1.3.3 所示,请选用一只管子,并简述理由。

表 1.3.3 例 1.3.2 的晶体管参数表

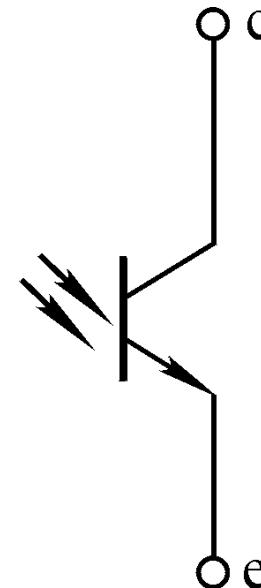
晶体管参数	T ₁	T ₂	T ₃
$I_{CBO}/\mu A$	0.01	0.1	0.05
U_{CEO}/V	50	50	20
β	15	100	100

1.3.6 光电三极管

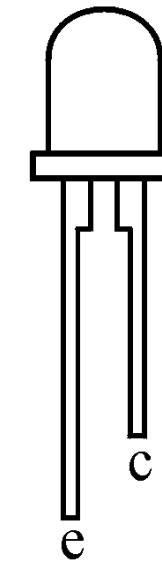
用入射光照的强弱来控制集电极电流的。



(a)



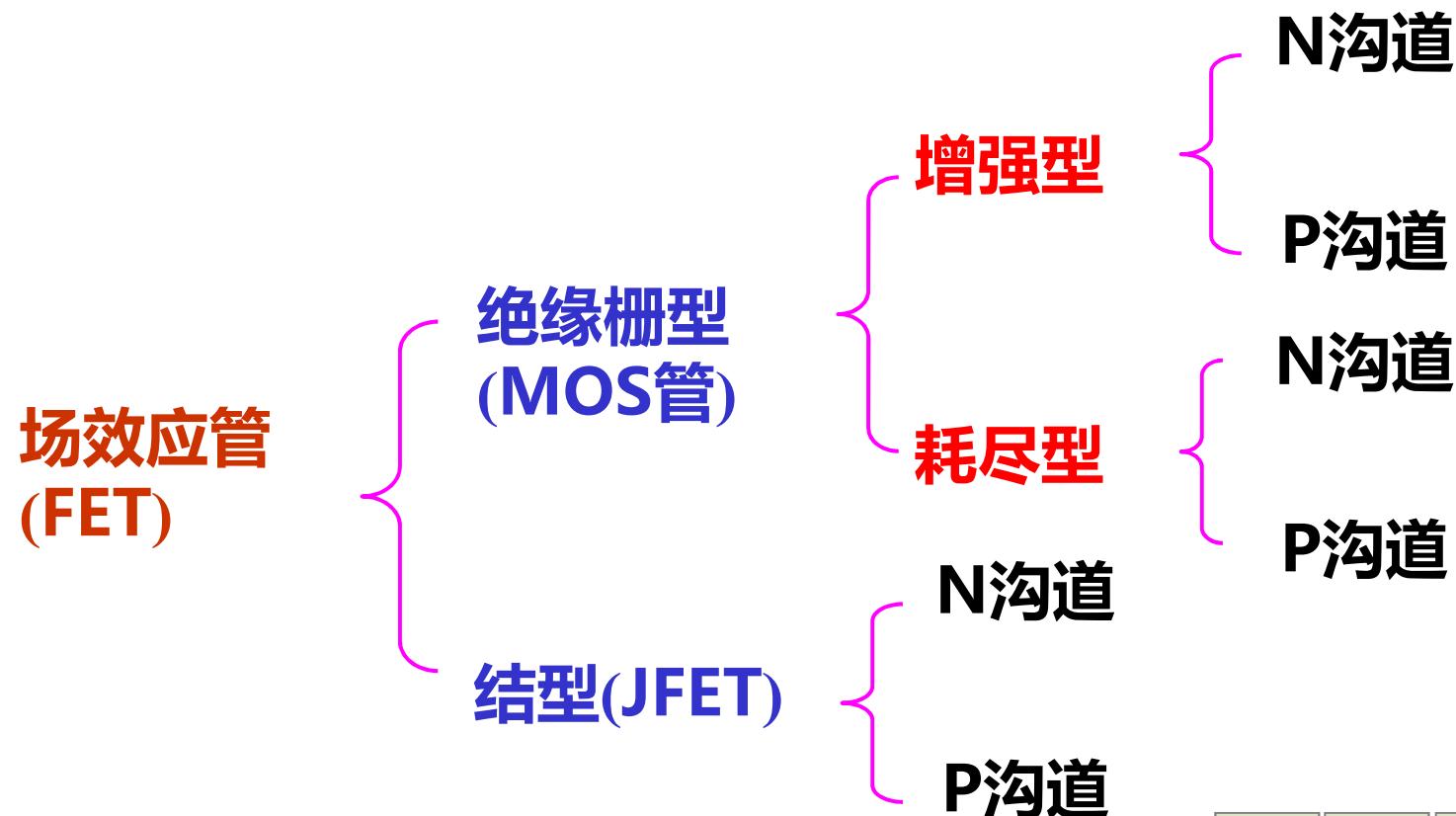
(b)



(c)

1.4 场效应管(Field Effect Transistor)

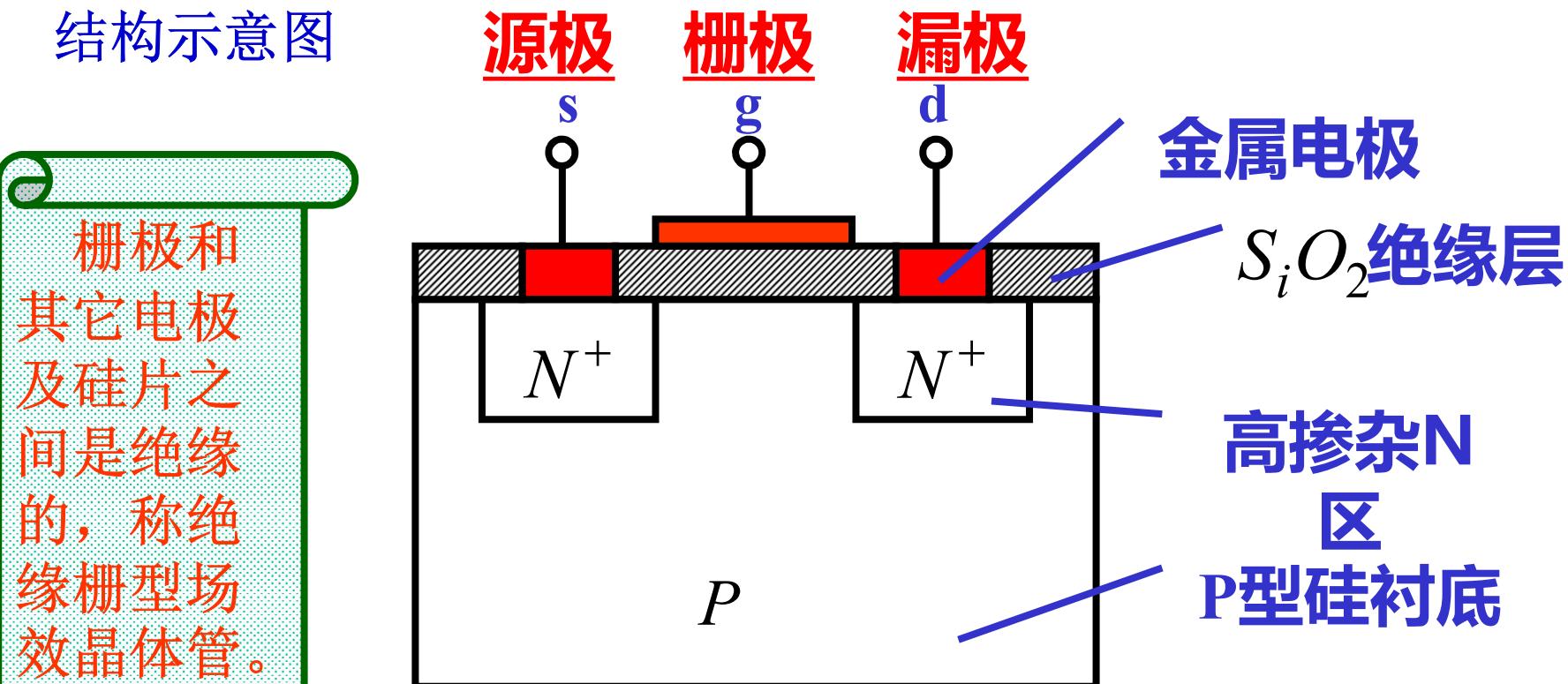
晶体三极管是利用输入回路电流控制输出回路电流；而场效应管是利用输入回路电场效应（电压）控制输出回路电流。



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



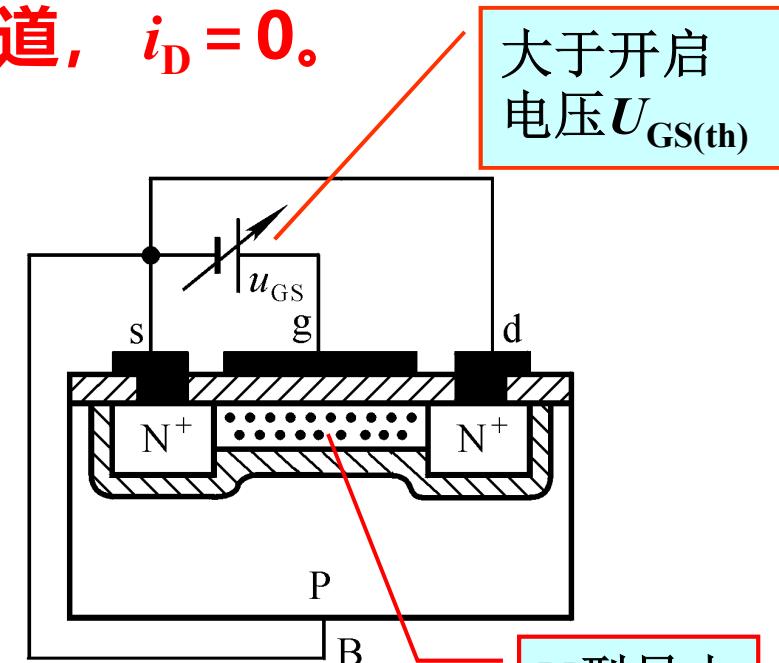
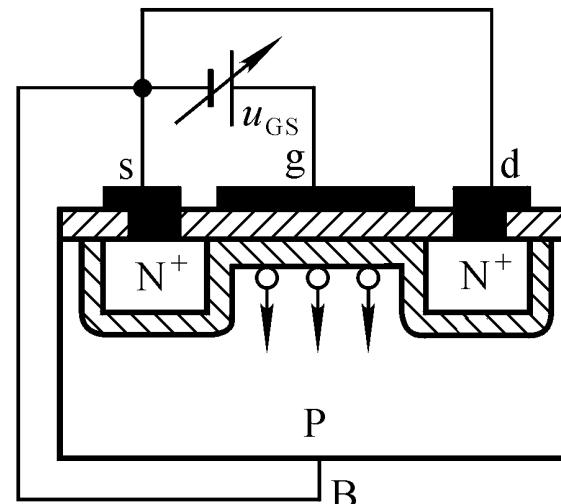
输入电阻 R_{GS} 比晶体管大得多

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， $i_D = 0$ 。

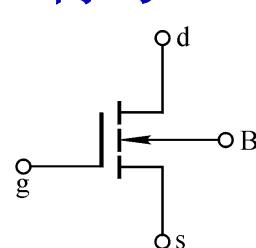
(2) $u_{DS} = 0$ 且 $u_{GS} > 0$



大于开启
电压 $U_{GS(th)}$

N型导电
沟道

符号



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。

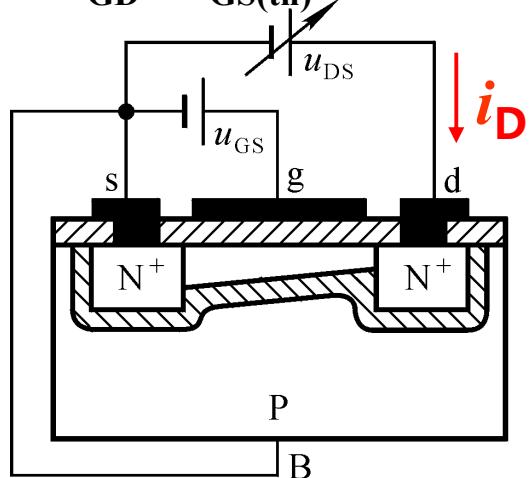
漏-源电压对漏极电流的影响(当 $u_{GS} > U_{GS(th)} > 0$ 时)

随着 $u_{DS} \uparrow$

若 $u_{DS} > 0$ 形成 i_D , 管子导通。

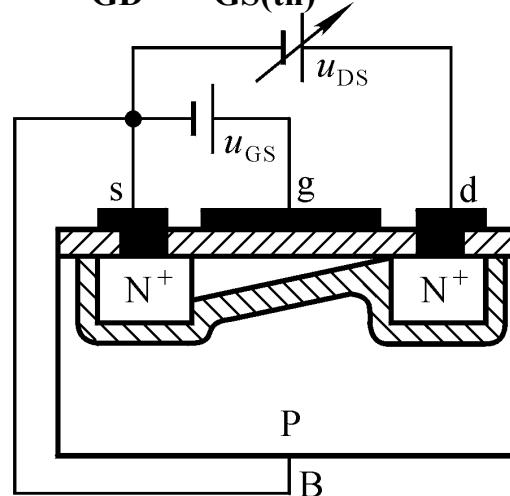
$$u_{DS} < u_{GS} - U_{GS(th)}$$

即 $u_{GD} > U_{GS(th)}$



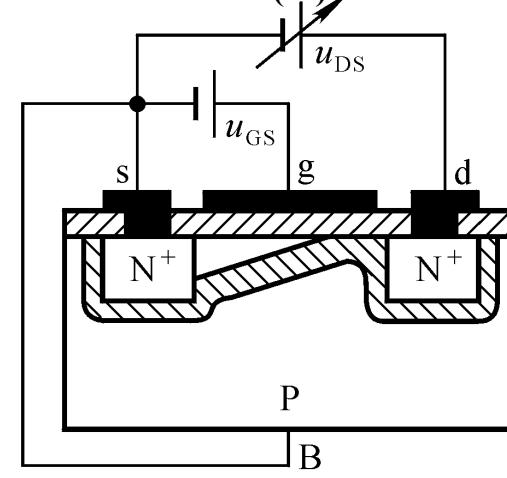
$$u_{DS} = u_{GS} - U_{GS(th)}$$

即 $u_{GD} = U_{GS(th)}$



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

即 $u_{GD} < U_{GS(th)}$



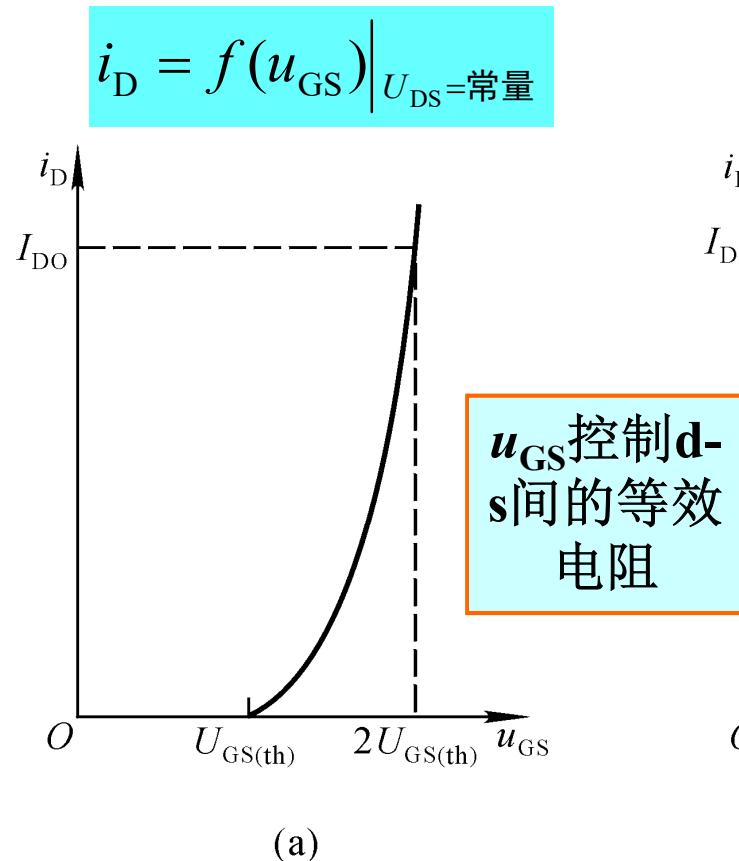
i_D 随 u_{DS} 的增大而线性
增大, 沟道电阻决定
于 u_{GS} , 可变电阻区

预夹断

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}

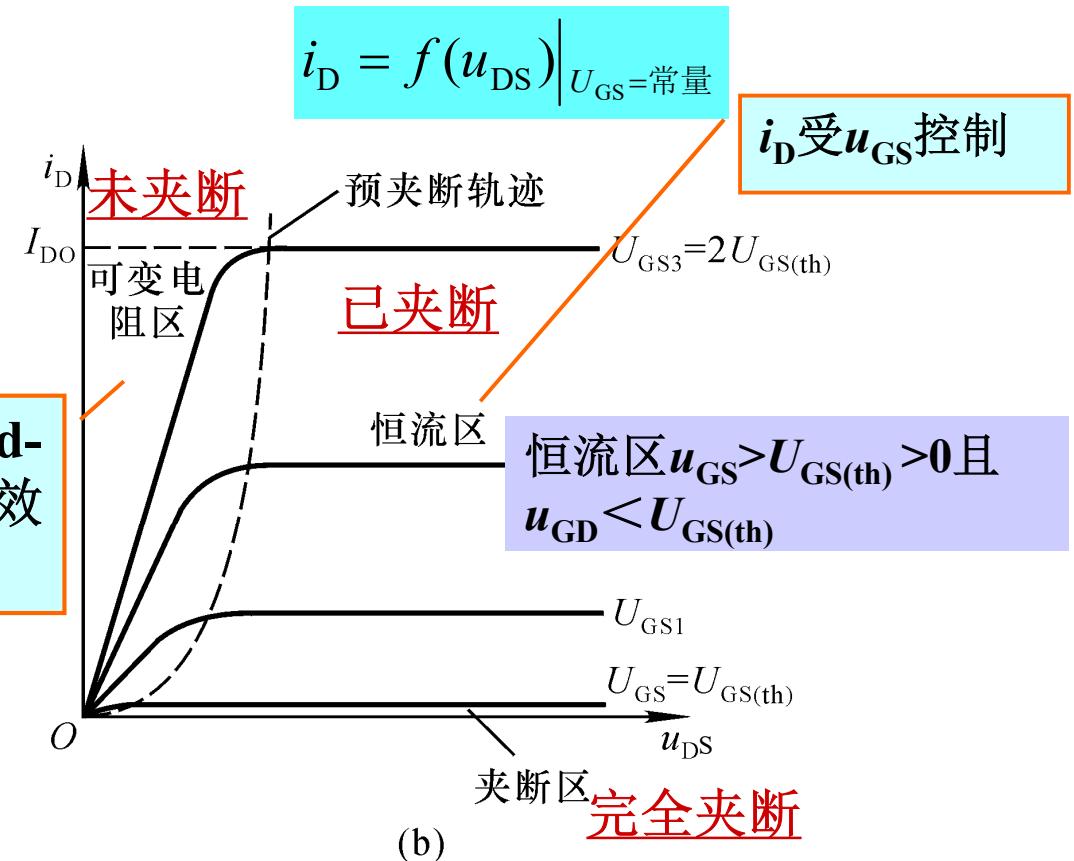
工作在恒流区时, $u_{GS} > U_{GS(th)} > 0$ 且 $u_{GD} < U_{GS(th)}$

转移特性



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

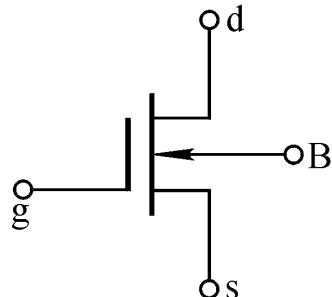


低频跨导：

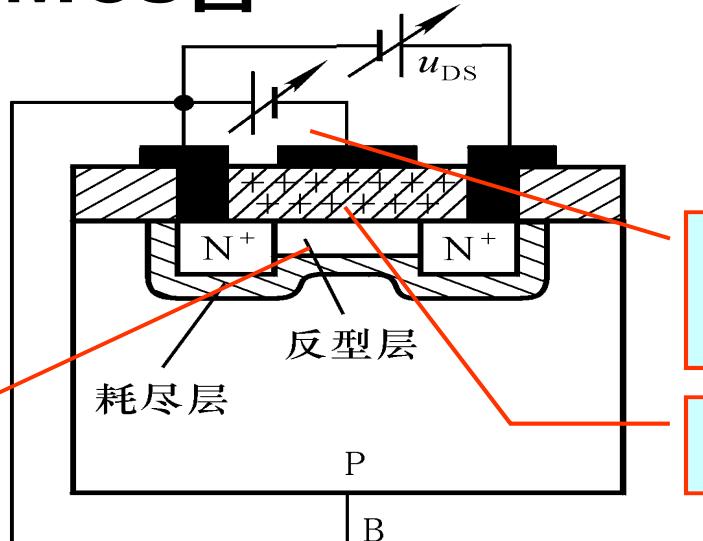
$$g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_{GS}} \Big|_{U_{DS}=\text{常量}}$$

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



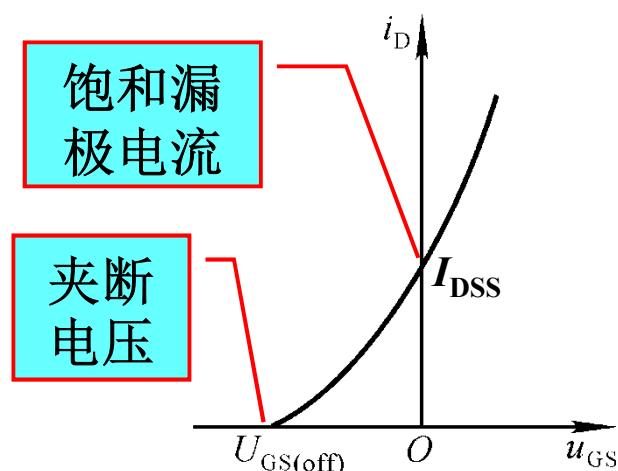
$u_{GS}=0$ 时就存在导电沟道



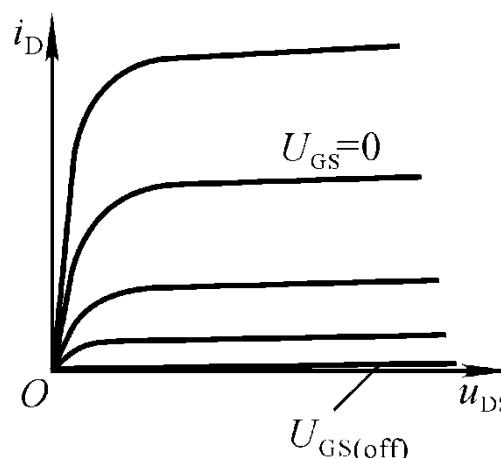
小到一定值才夹断

加正离子

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

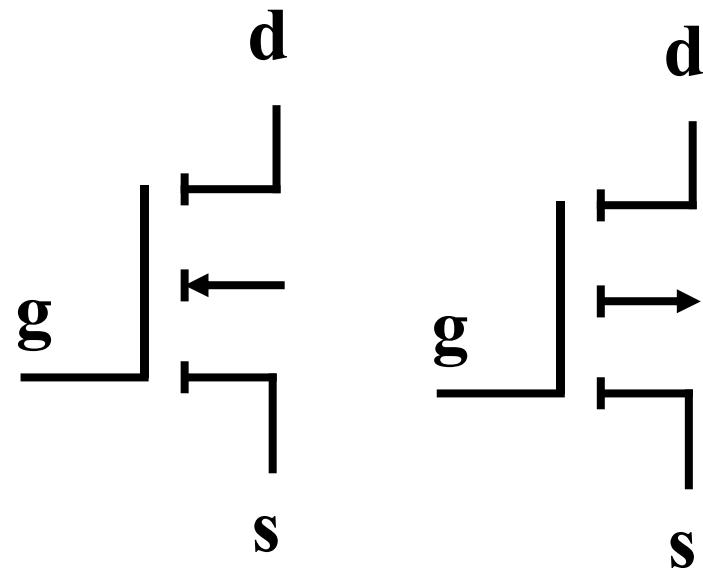


耗尽型MOS管在 u_{GS} 为正、负和零值时均可导通，小于夹断电压 $U_{GS(off)}$ 才截止。



三、P沟道增强型MOS管 四、P沟道耗尽型MOS管

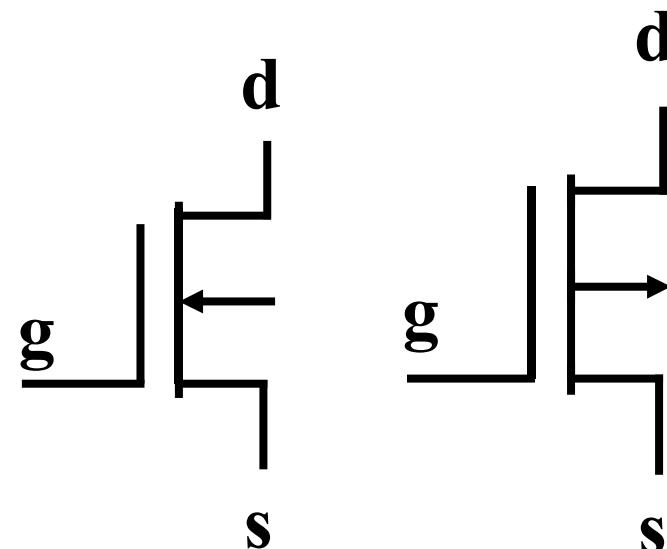
增强型



N沟道

P沟道

耗尽型



N沟道

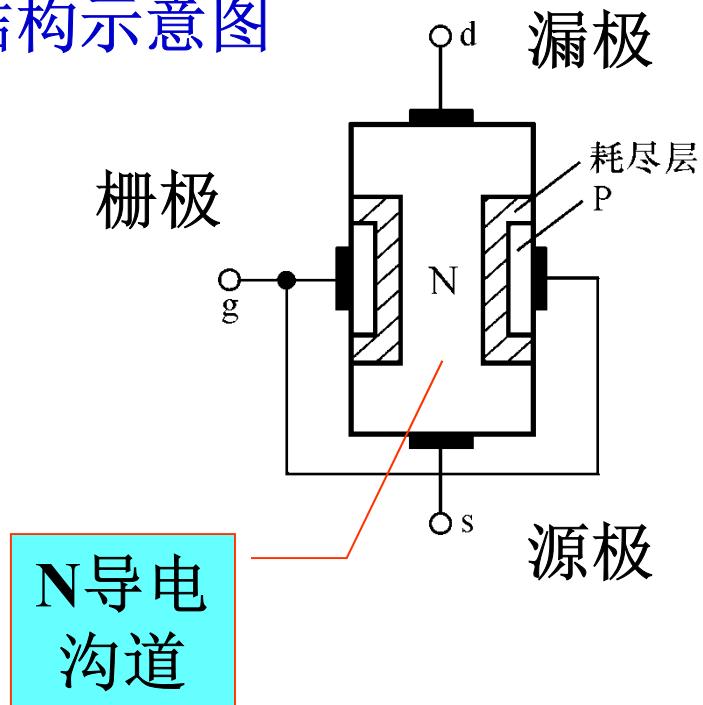
P沟道

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

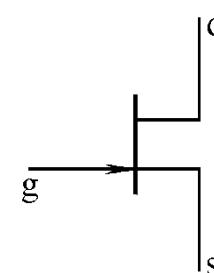
1.4.2 结型场效应管(JFET)

一、N沟道结型场效应管

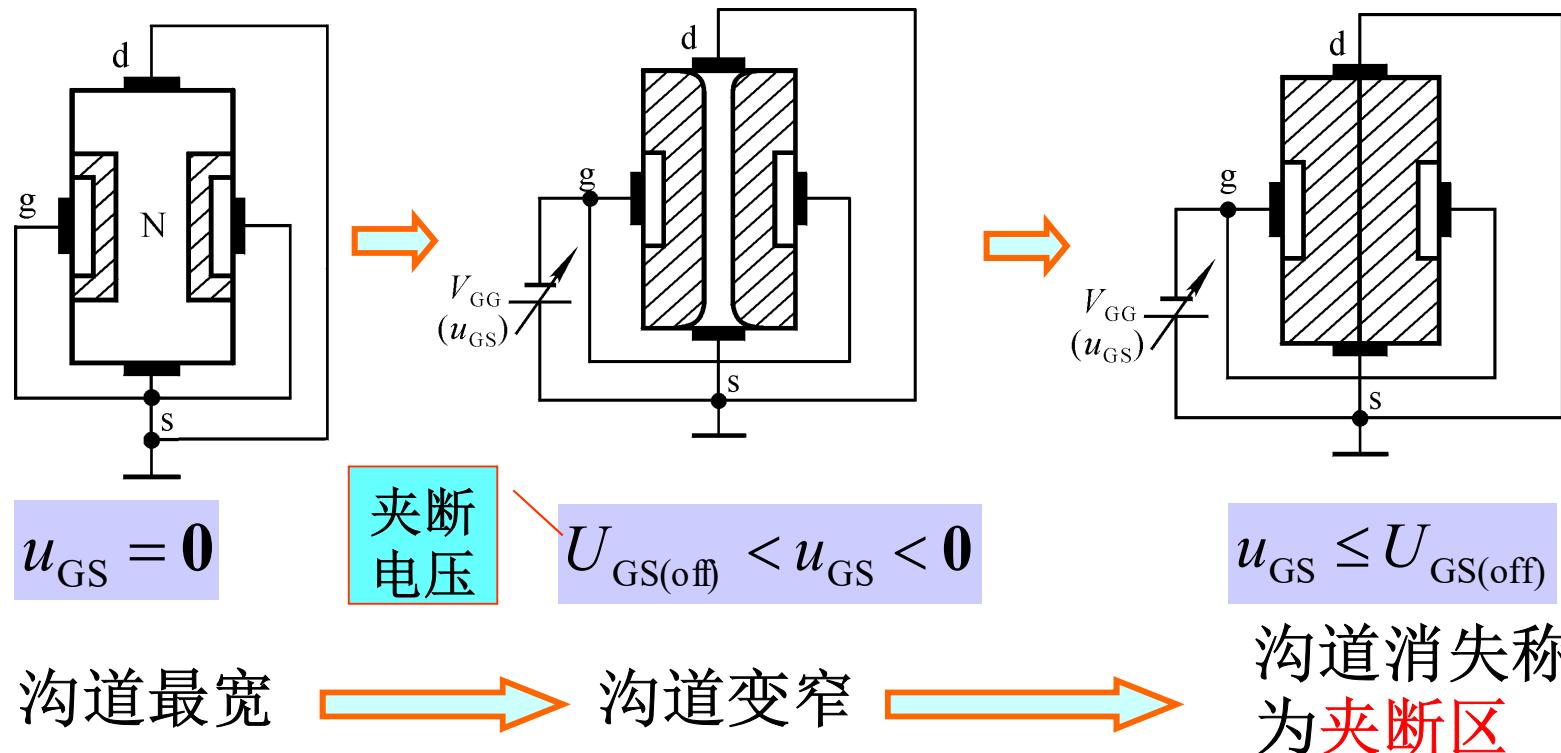
结构示意图



符号

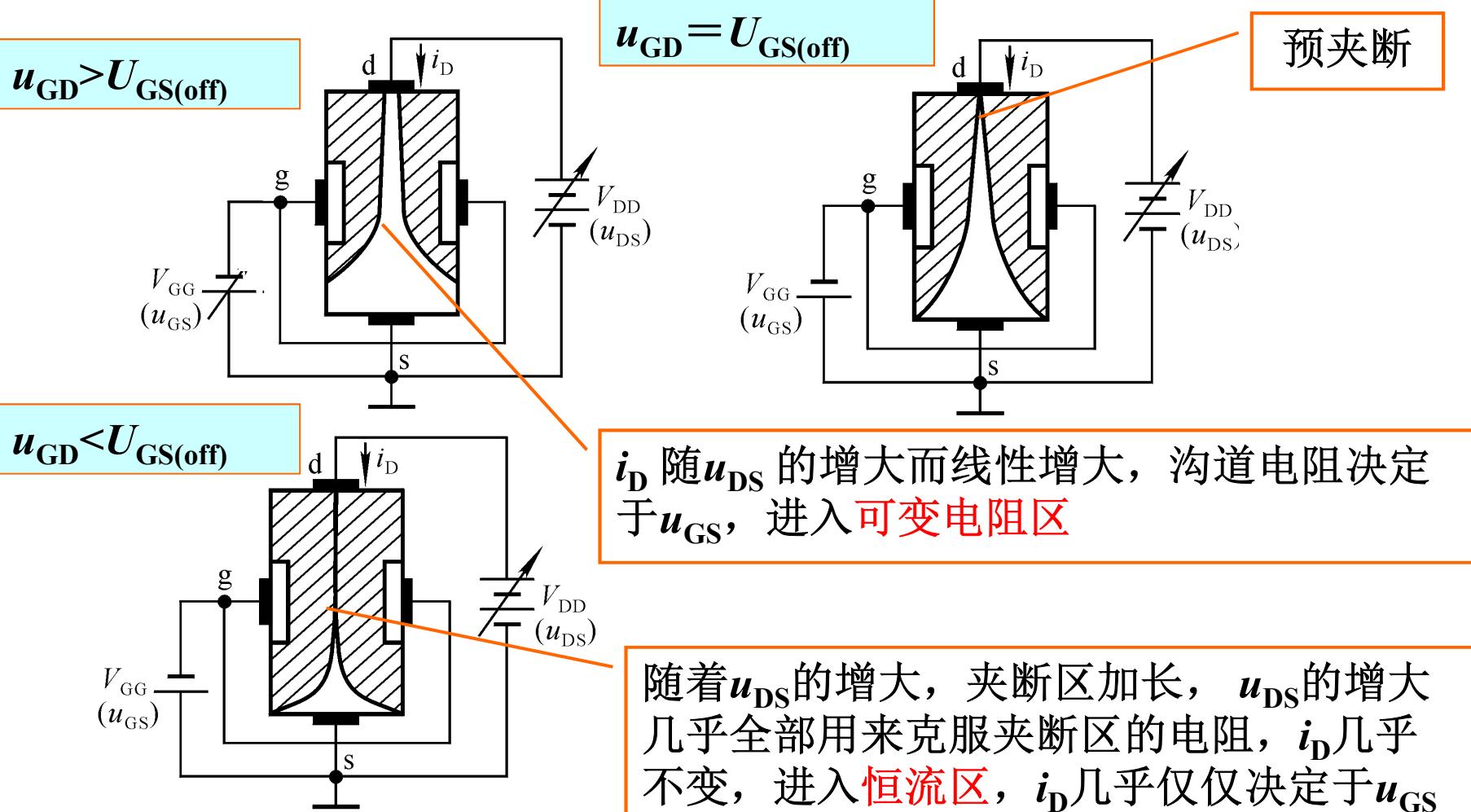


栅-源电压对导电沟道宽度的控制作用



$u_{GS} < 0$, 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

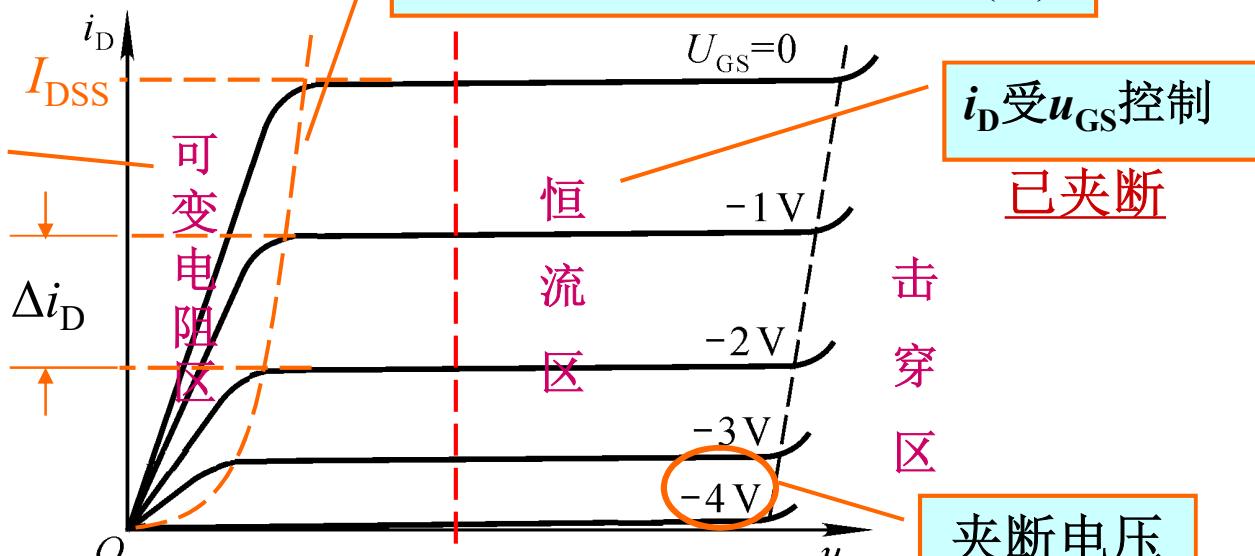
低频跨导:

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

预夹断轨迹, $u_{GD} = U_{GS(\text{off})}$ i_D 受 u_{GS} 控制已夹断

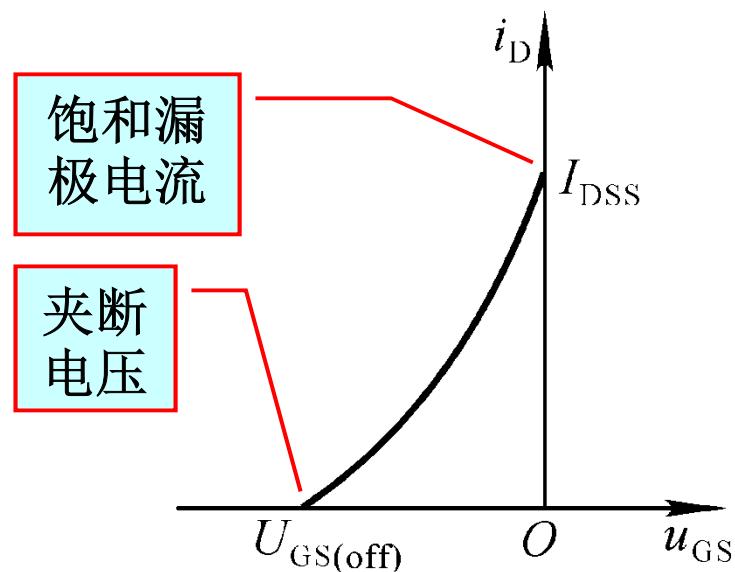
击穿区

夹断电压

夹断区(截止区)
完全夹断

转移特性

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



在恒流区时

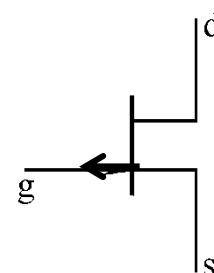
$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(\text{off})}}\right)^2$$

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。

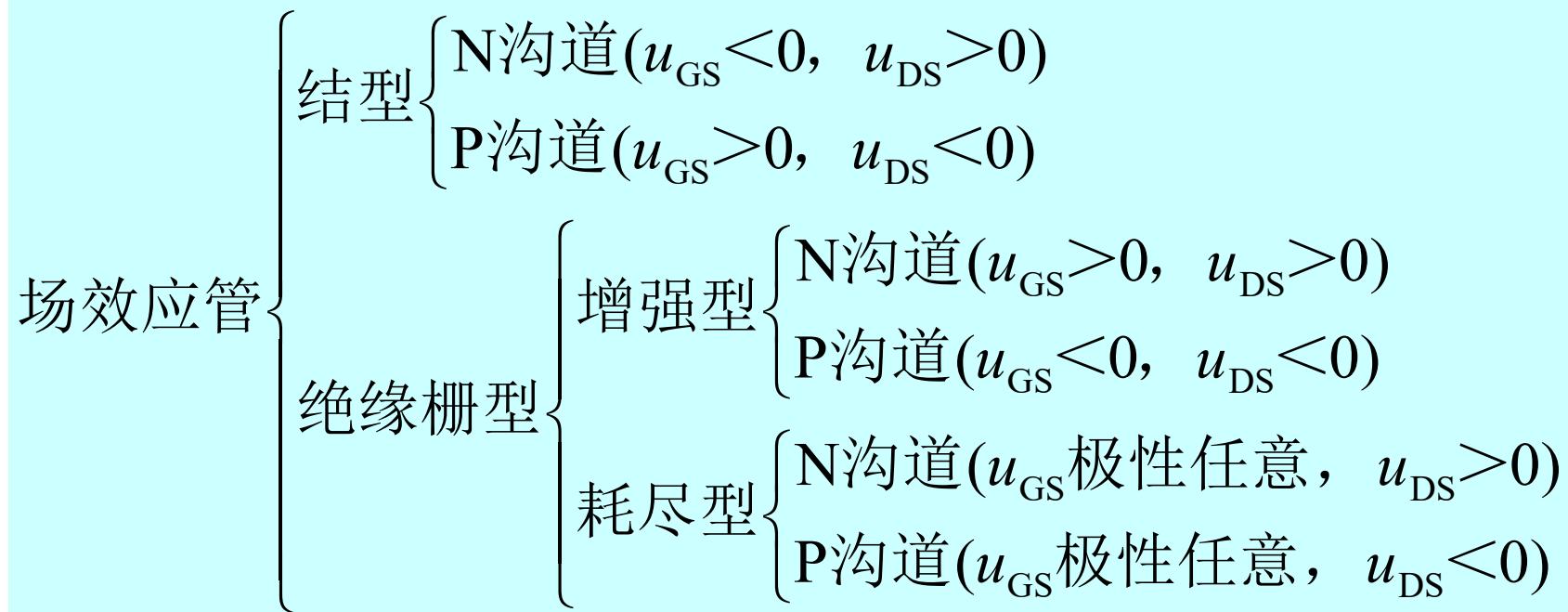
二、P沟道结型场效应管

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:

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

此时 $u_{GS} > u_{GD}$

P沟道增强型MOS管:

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

此时 $u_{GS} < u_{GD}$

N沟道耗尽型MOS管:

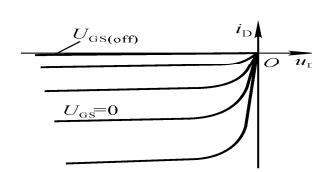
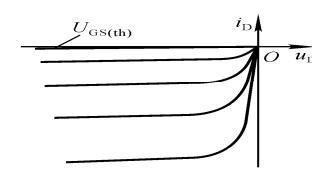
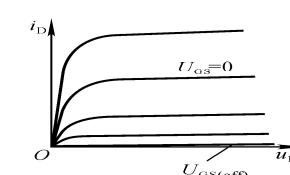
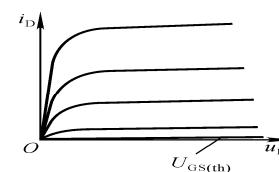
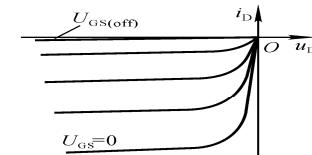
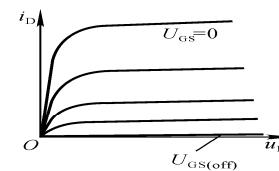
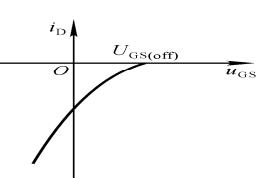
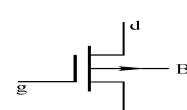
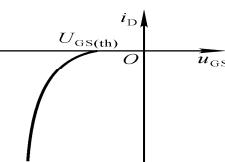
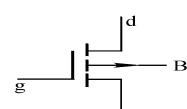
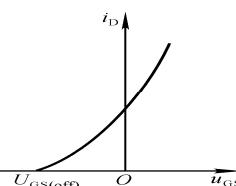
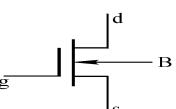
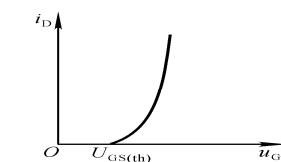
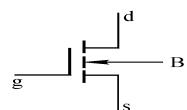
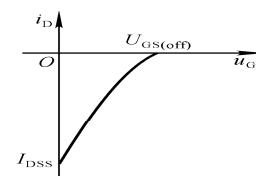
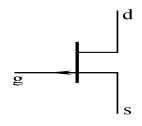
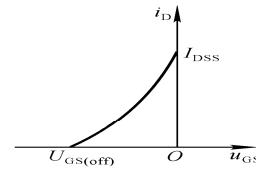
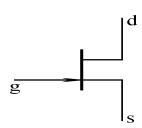
$$u_{GS} > U_{GS(off)} \text{ 且 } u_{GD} < U_{GS(off)}$$

此时 $u_{GS} > u_{GD}$

P沟道耗尽型MOS管:

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

此时 $u_{GS} < u_{GD}$



N沟道增强型MOS管:

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

此时 $u_{GS} > u_{GD}$

P沟道增强型MOS管:

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

此时 $u_{GS} < u_{GD}$

N沟道耗尽型MOS管:

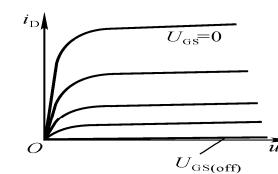
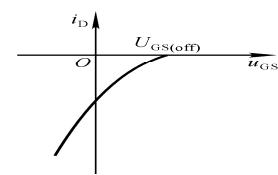
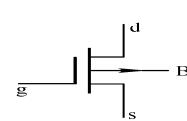
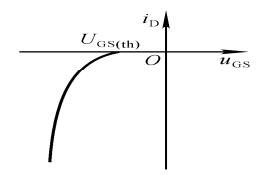
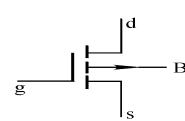
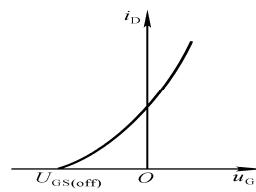
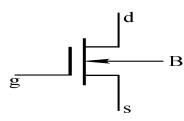
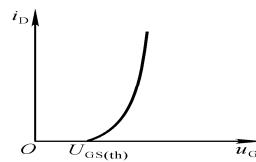
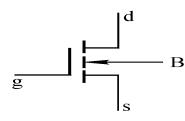
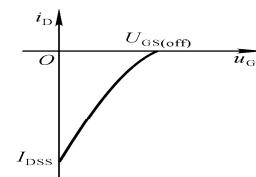
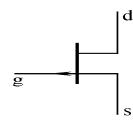
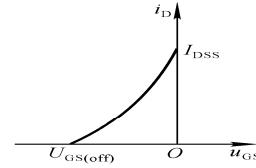
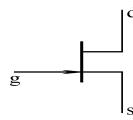
$$u_{GS} > U_{GS(off)} \text{ 且 } u_{GD} < U_{GS(off)}$$

此时 $u_{GS} > u_{GD}$

P沟道耗尽型MOS管:

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

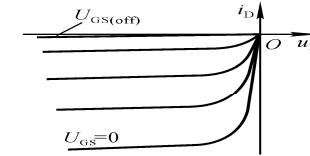
此时 $u_{GS} < u_{GD}$



N沟道JFET:

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

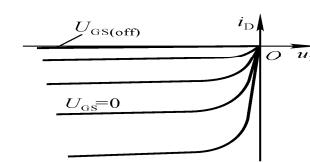
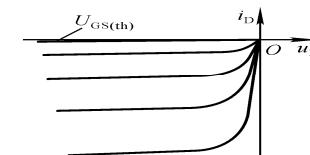
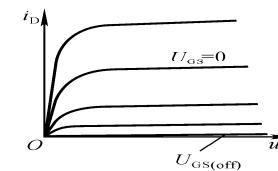
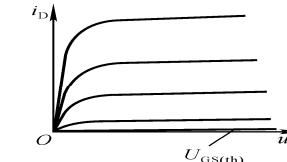
此时 $u_{GS} > u_{GD}$



P沟道JFET:

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

此时 $u_{GS} < u_{GD}$



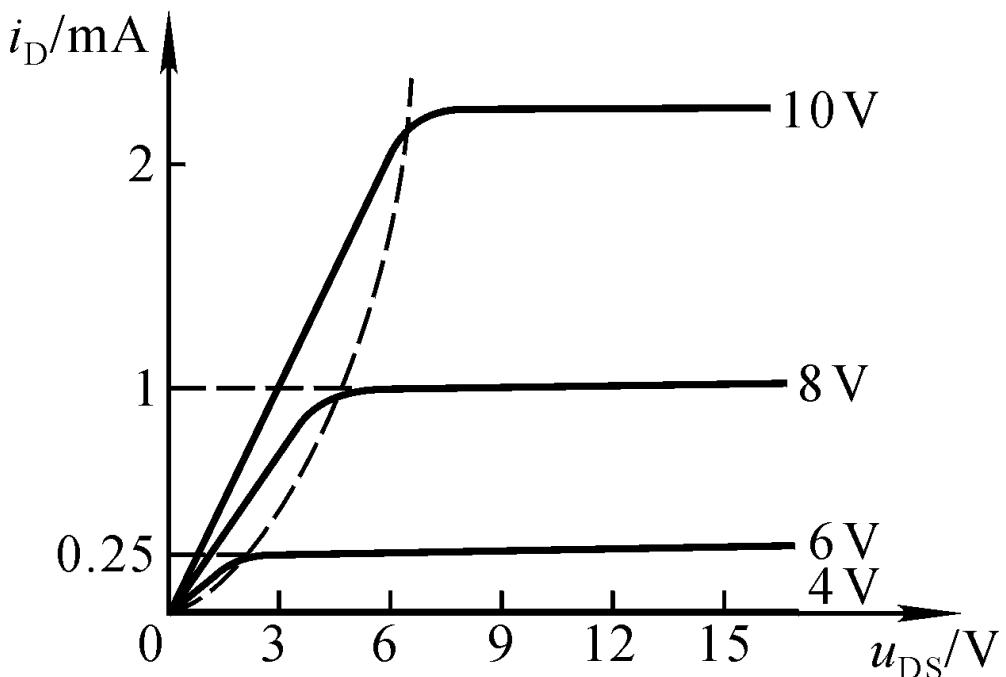
恒流区的条件

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

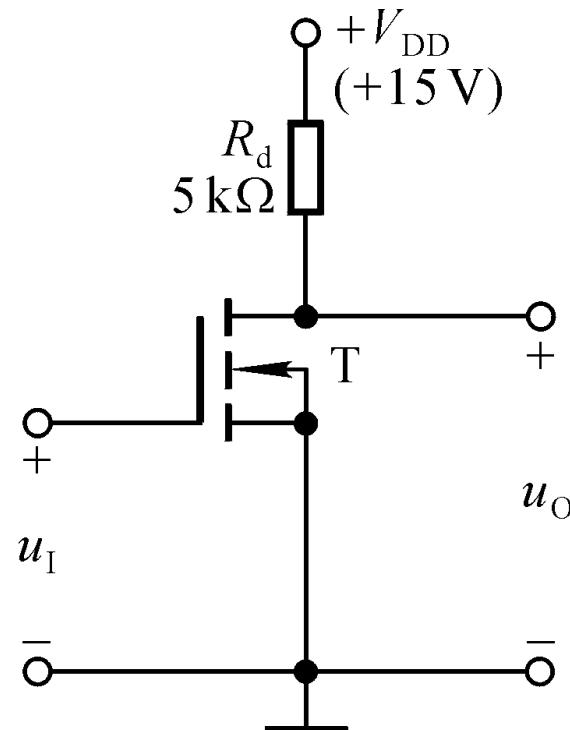
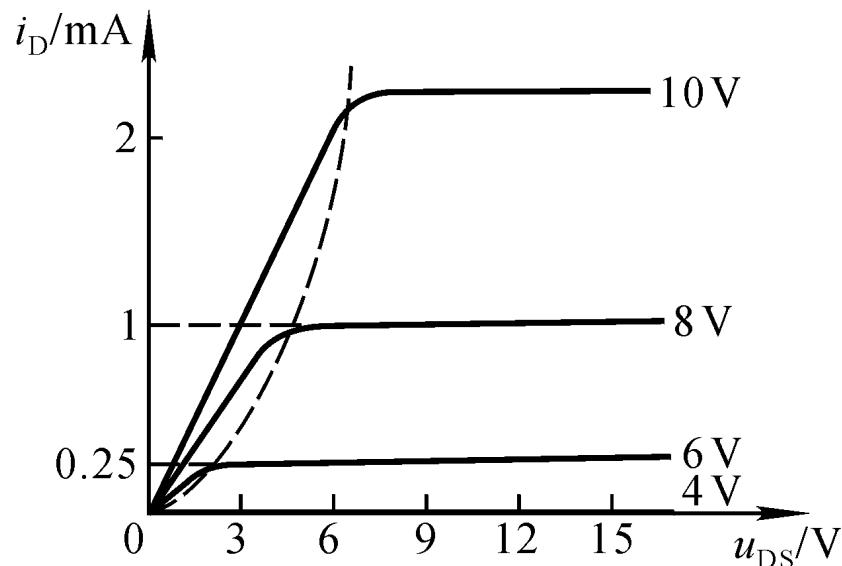
N沟道耗尽型

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

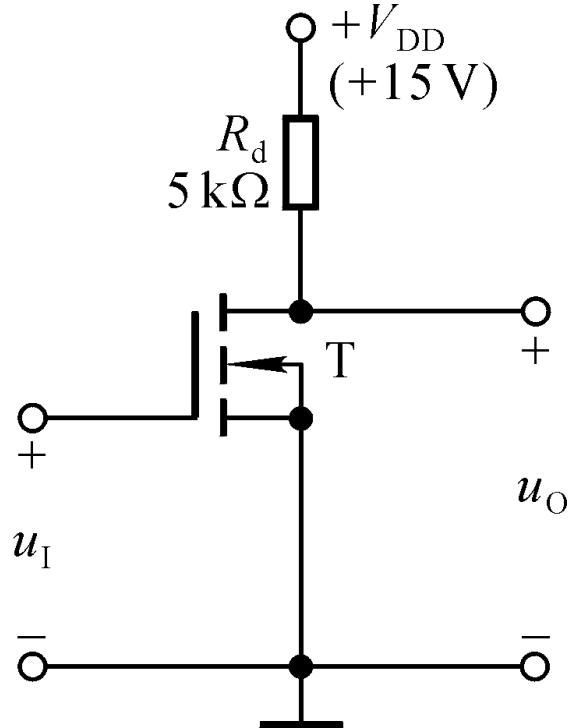
例1.4.2 试分析 $u_I=0V$ 、 $8V$ 、 $10V$ 时 T 的工作状态，并求 u_O 。



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 $u_I=0\text{V}$ 时：MOS管在夹断区， $i_D=0$

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

当 $u_I=8\text{V}$ 时：MOS管导通，先假设在恒流区，

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

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

当 $u_I=10\text{V}$ 时：MOS管导通，先假设在恒流区，

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

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

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

击穿电压

最大耗散功率

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