第六节

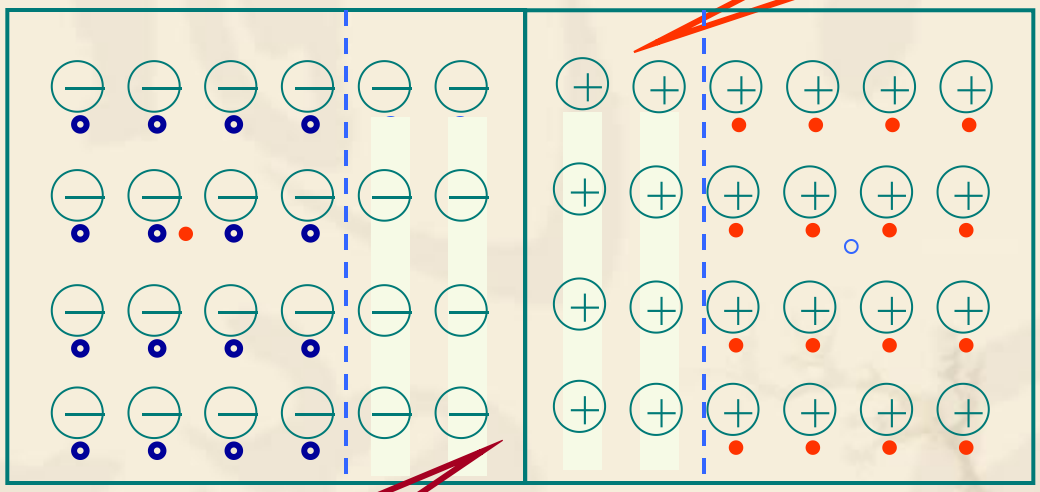
晶体管和晶闸管

预备知识—PN结的形成

空间电荷区也称 PN 结

少子的漂移运动

P 型半导体 内电场 N 型半导体



浓度差 ⇒ 多子的扩散运动

形成空间电荷区

扩散的结果使空间电荷区变宽。

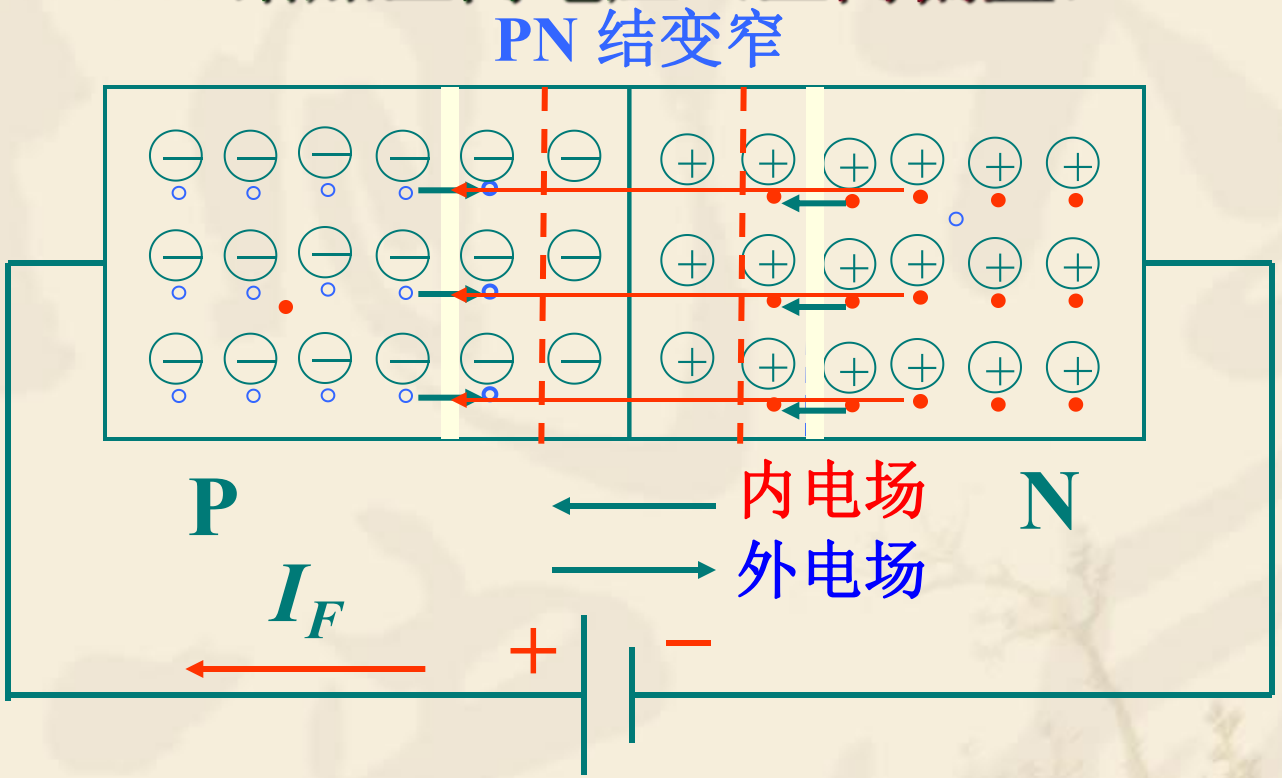
内电场越强，漂移运动越强，而漂移使空间电荷区变薄。

扩散和漂移这一对相反的运动最终达到动态平衡，空间电荷区的厚度固定不变。

PN结的单向导电性

1. PN 结加正向电压（正向偏置）

P接正、N接负

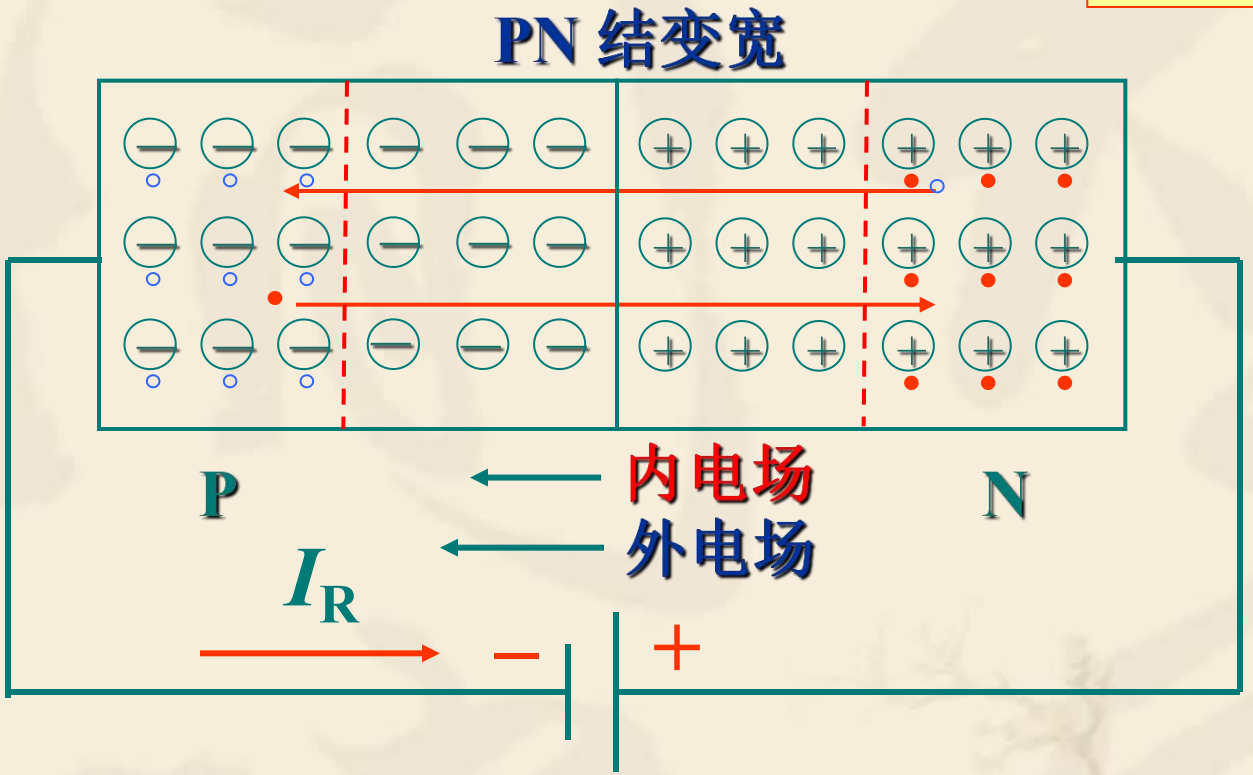


内电场被削弱，多子的扩散加强，形成较大的扩散电流。

PN 结加正向电压时，PN结变窄，正向电流较大，正向电阻较小，PN结处于导通状态。

2. PN 结加反向电压（反向偏置）

P接负、N接正



内电场被加强，少子的漂移加强，由于少子数量很少，形成很小的反向电流。

PN 结加反向电压时，PN结变宽，反向电流较小，反向电阻较大，PN结处于截止状态。

温度越高少子的数目越多，反向电流将随温度增加。

一、晶体二极管

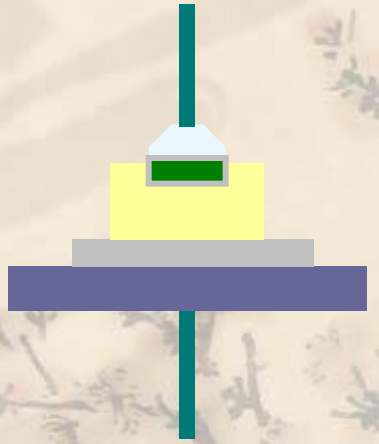
1. 基本结构和分类

(a) 点接触型

结面积小、结电容小、正向电流小。用于检波和变频等高频电路。

(b)面接触型

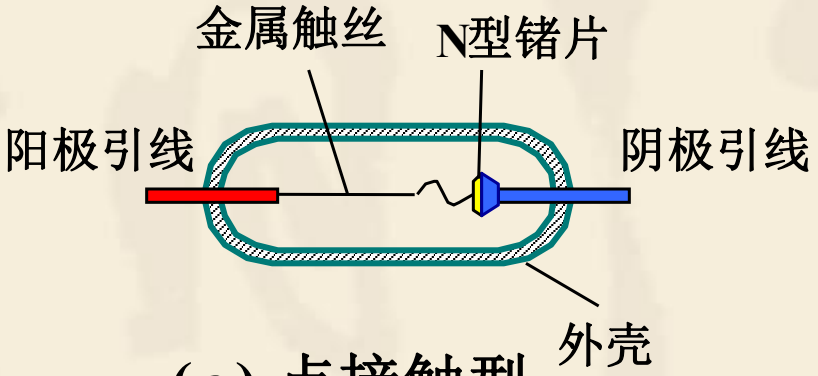
结面积大、正向电流大、结电容大，用于工频大电流整流电路。



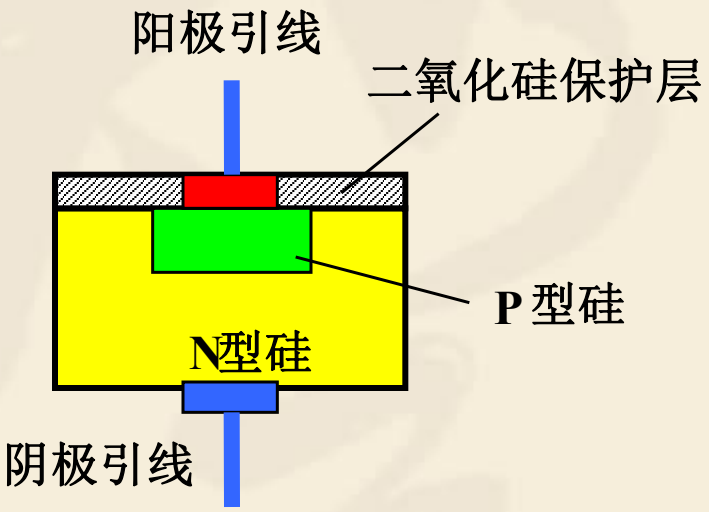
(c) 平面型

用于集成电路制作工艺中。PN结结面积可大可小，用于高频整流和开关电路中。

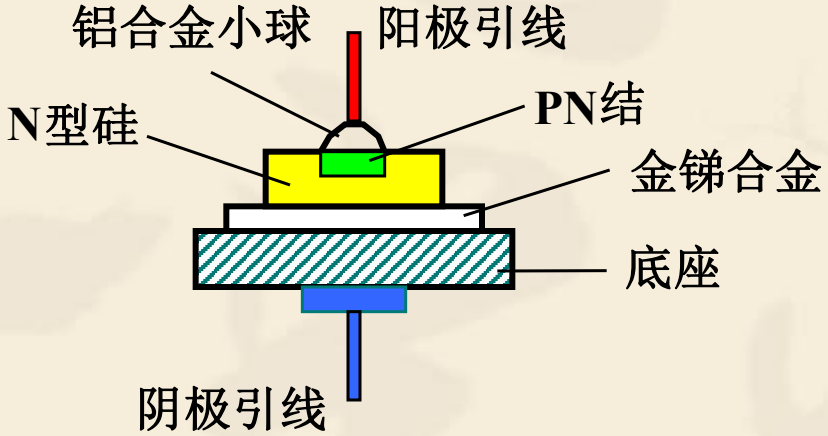
二极管的结构示意图



(a) 点接触型



(c) 平面型



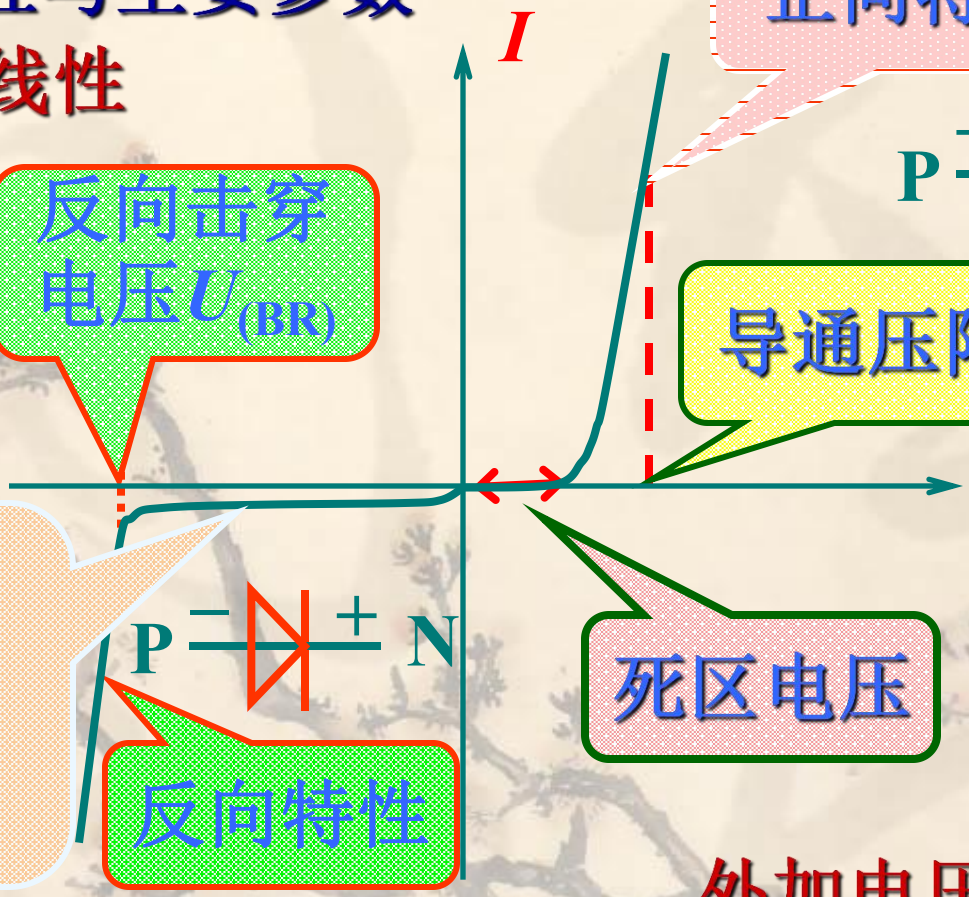
(b) 面接触型

(d) 符号

半导体二极管的结构和符号

2.伏安特性与主要参数

特点：非线性



硅0.6~0.8V
锗0.2~0.3V

硅管0.5V
锗管0.1V

反向电流在一定电压范围内保持常数。

外加电压大于反向击穿电压二极管被击穿，失去单向导电性。

外加电压大于死区电压二极管才能导通。

主要参数

1. 最大整流电流 I_{OM}

二极管长期使用时，允许流过二极管的最大正向平均电流。

2. 反向工作峰值电压U_{RWM}

是保证二极管不被击穿而给出的反向峰值电压，一般是二极管反向击穿电压U_{BR}的一半或三分之二。二极管击穿后单向导电性被破坏，甚至过热而烧坏。

3. 反向峰值电流I_{RM}

指二极管加最高反向工作电压时的反向电流。反向电流大，说明管子的单向导电性差，I_{RM}受温度的影响，温度越高反向电流越大。硅管的反向电流较小，锗管的反向电流较大，为硅管的几十到几百倍。

二极管的单向导电性

1. 二极管加正向电压（正向偏置，阳极接正、阴极接负 ）时， 二极管处于正向导通状态，二极管正向电阻较小，正向电流较大。

2. 二极管加反向电压（反向偏置，阳极接负、阴极接正 ）时， 二极管处于反向截止状态，二极管反向电阻较大，反向电流很小。

3. 外加电压大于反向击穿电压二极管被击穿，失去单向导电性。

4. 二极管的反向电流受温度的影响，温度愈高反向电流愈大。

二极管电路分析举例

定性分析：判断二极管的工作状态 { 导通 / 截止

若二极管是理想的，**正向导通时正向管压降为零，反向截止时二极管相当于断开。**

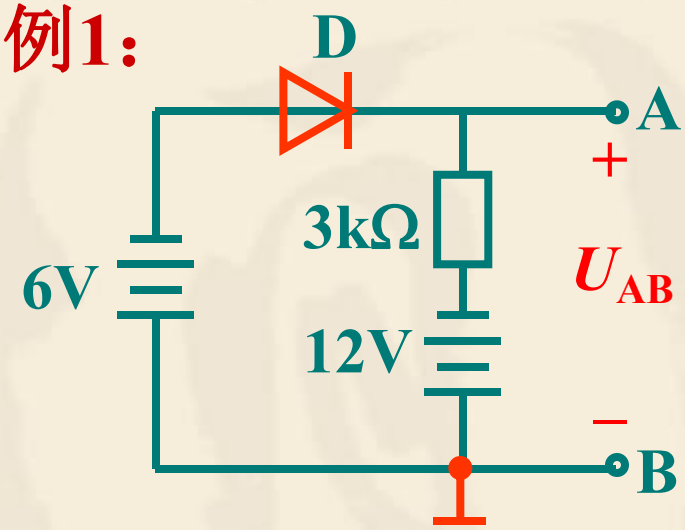
否则，正向管压降 { 硅0.6~0.7V / 锗0.2~0.3V

分析方法：将二极管断开，分析二极管两端电位的高低或所加电压U_D的正负。

若 $V_{阳} > V_{阴}$或 U_D为正(正向偏置)，二极管导通

若 $V_{阳} < V_{阴}$或 U_D为负(反向偏置)，二极管截止

例1：



电路如图，求：U_{AB}

取 B 点作参考点，断开二极管，分析二极管阳极和阴极的电位。

$V_{阳}$ =−6 V　$V_{阴}$ =−12 V

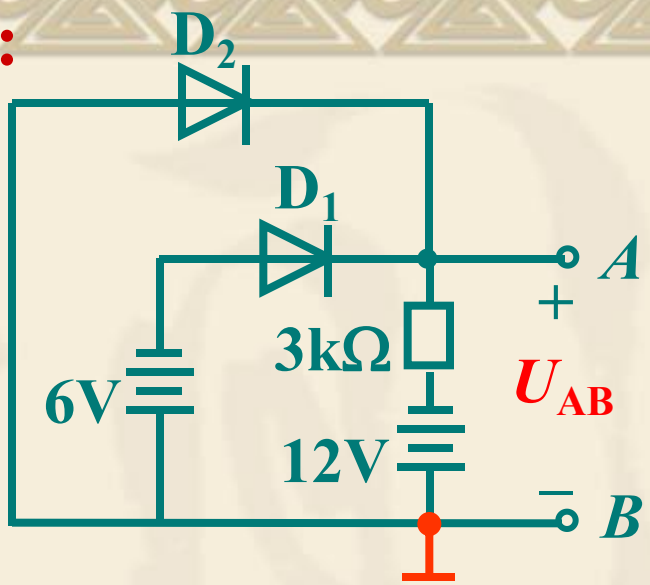
$V_{阳}$>$V_{阴}$ 二极管导通

若忽略管压降，二极管可看作短路，U_{AB} =− 6V

否则，U_{AB}低于−6V一个管压降，为−6.3 V 或−6.7V

在这里，二极管起钳位作用。

例2：



求：U_{AB}

两个二极管的阴极接在一起

取 B 点作参考点，断开二极管，分析二极管阳极和阴极的电位。

$V_{1阳} = -6\ V$，$V_{2阳} = 0\ V$，$V_{1阴} = V_{2阴} = -12\ V$

$U_{D1} = 6V$，$U_{D2} = 12V$

$\because U_{D2} > U_{D1}$ $\therefore$ D_2 优先导通，D_1 截止。

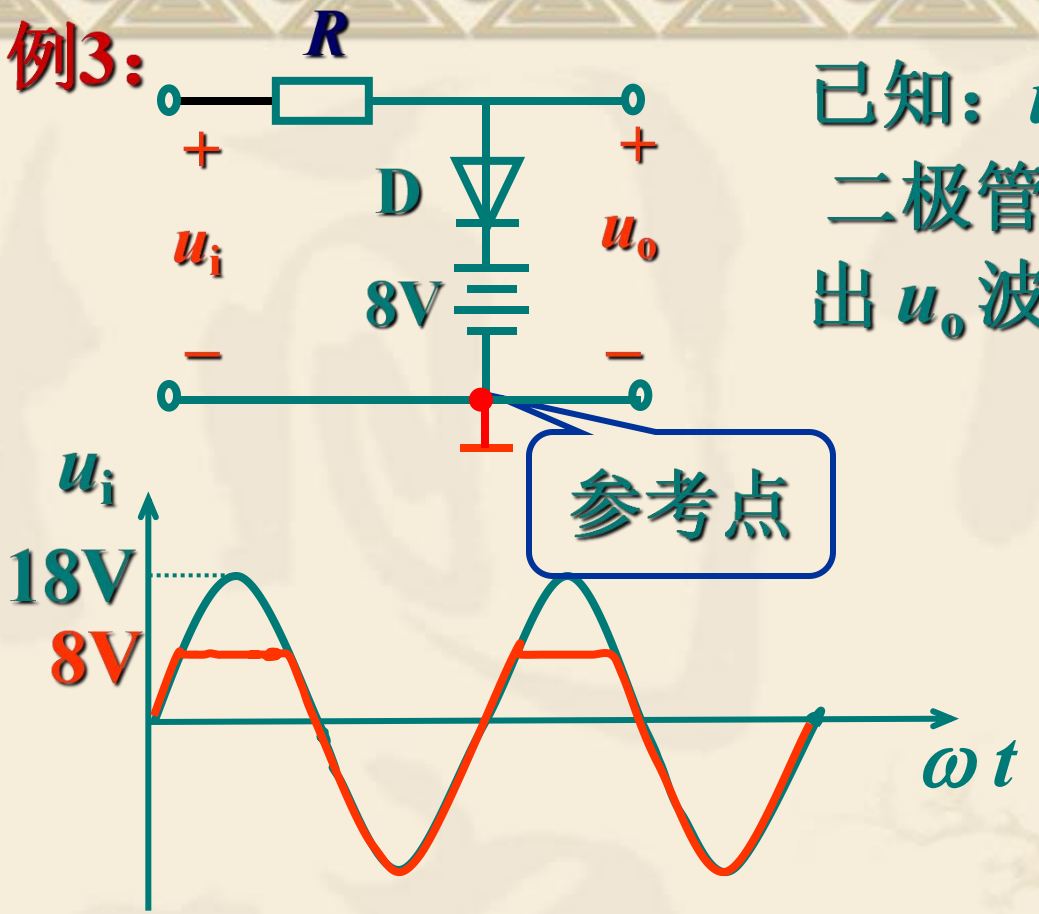
若忽略管压降，二极管可看作短路，$U_{AB} = 0\ V$

流过 D_2 的电流为 $I_{D2} = \dfrac{12}{3} = 4mA$

D_1 承受反向电压为 $-6\ V$

在这里，D_2 起钳位作用，D_1 起隔离作用。

例3：



已知：$u_i = 18\sin\omega t$ V

二极管是理想的，试画出 u_o 波形。

二极管的用途：

整流、检波、限幅、钳位、开关、元件保护、温度补偿等。

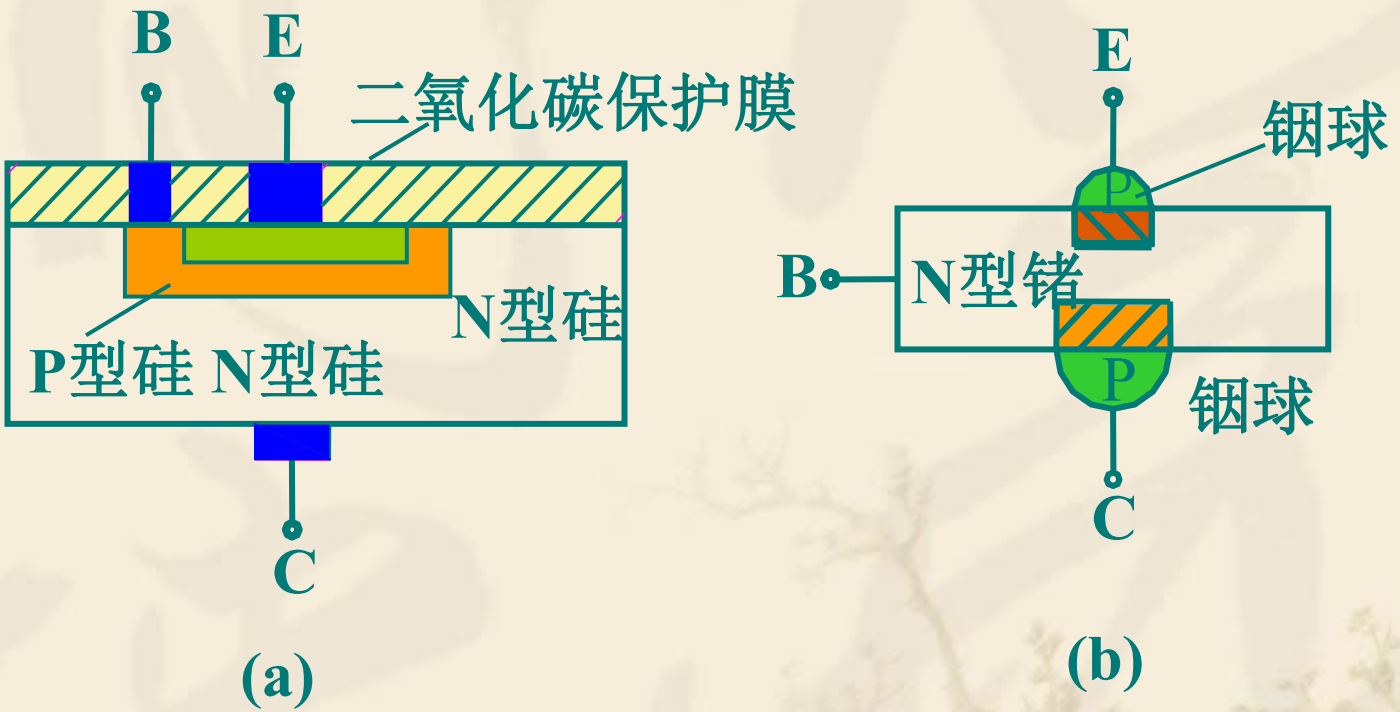
二极管阴极电位为 8 V

$u_i > 8$V，二极管导通，可看作短路　$u_o = 8$V

$u_i < 8$V，二极管截止，可看作开路　$u_o = u_i$

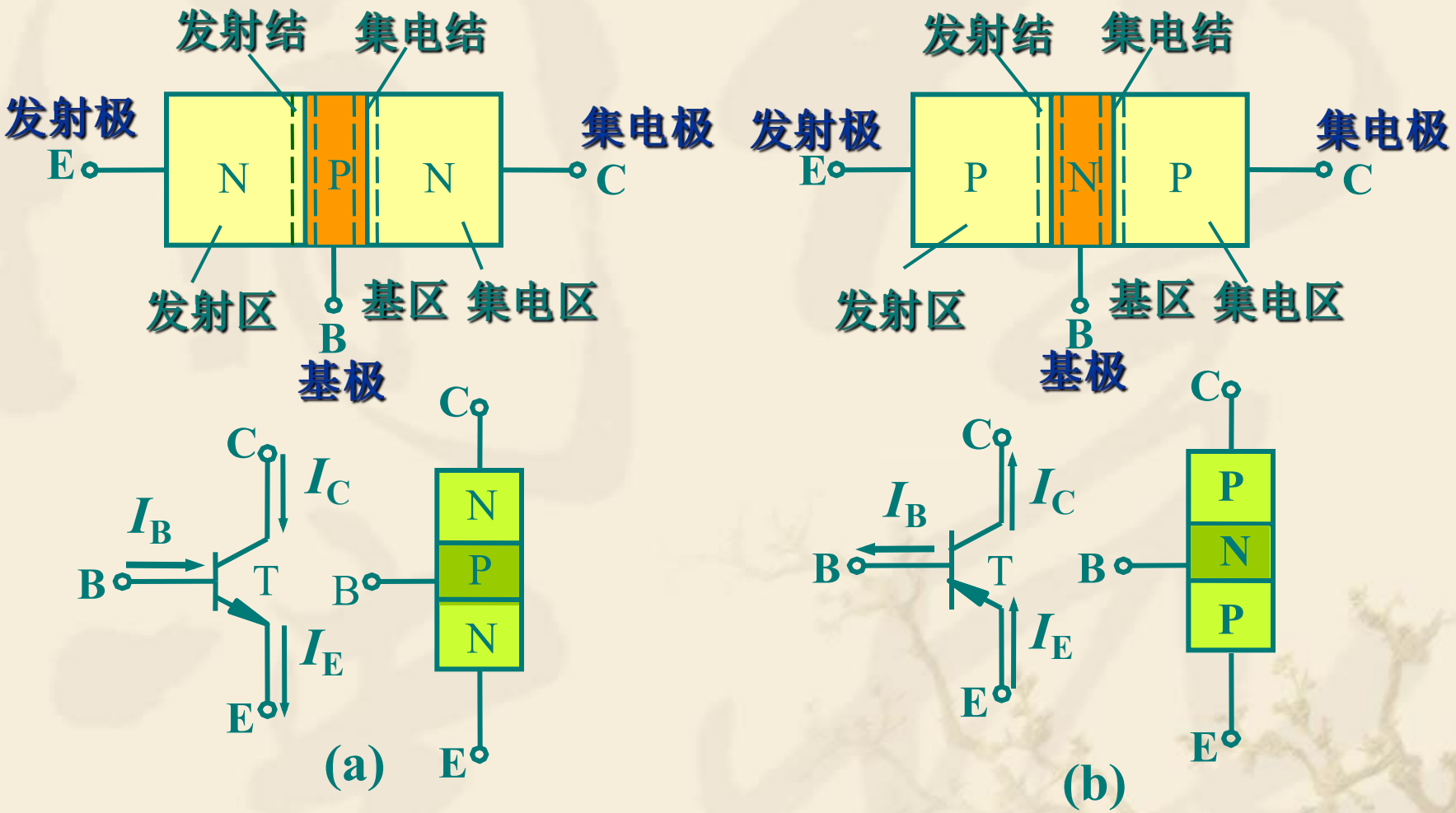
二、晶体三极管

1.结构和工作原理



晶体管的结构

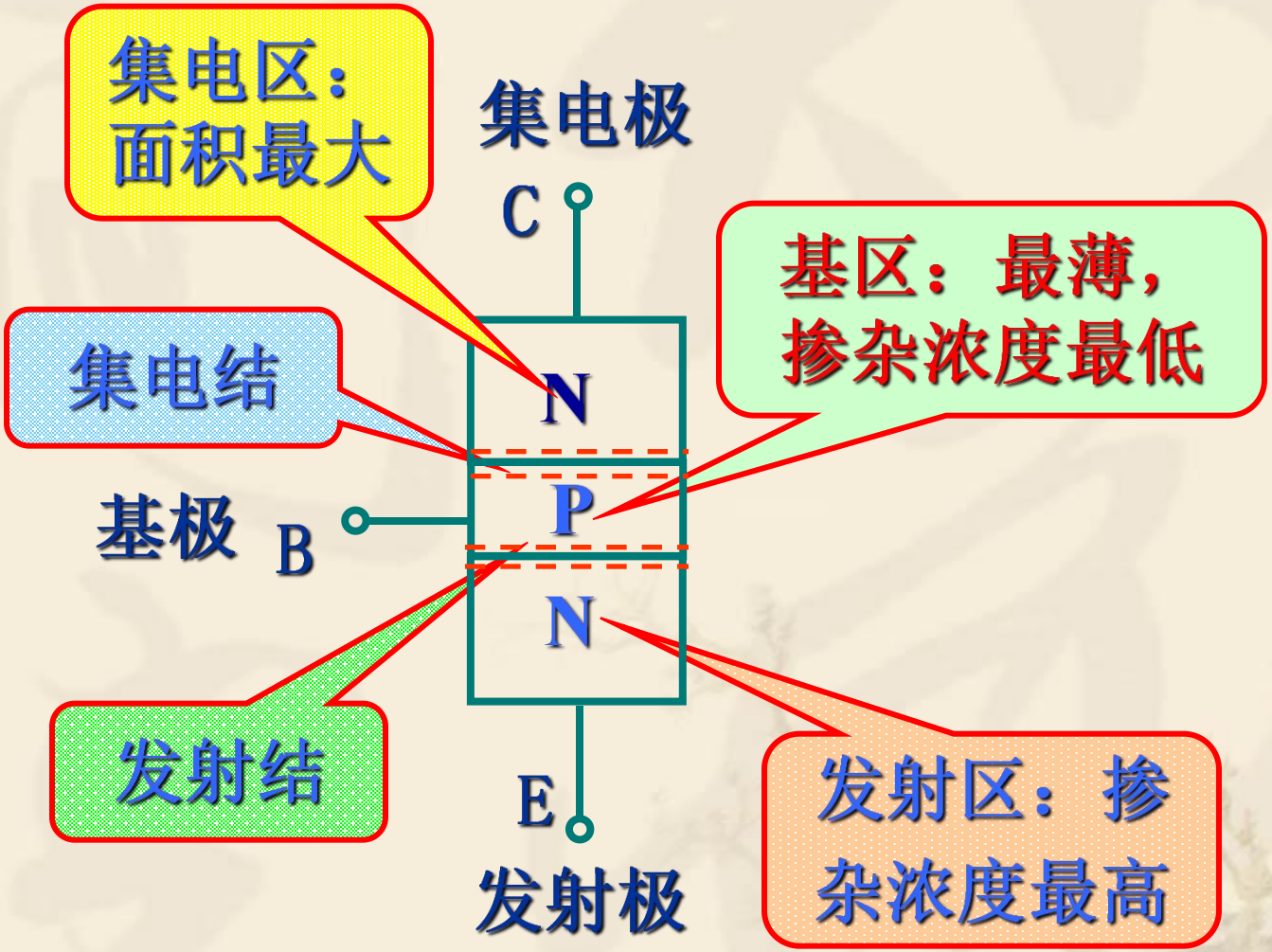
(a)平面型； (b)合金型



晶体管的结构示意图和表示符号

(a)NPN型晶体管；(b)PNP型晶体管

结构特点：



晶体管放大原理

1. 三极管放大的外部条件

发射结正偏、集电结反偏

从电位的角度看：

NPN

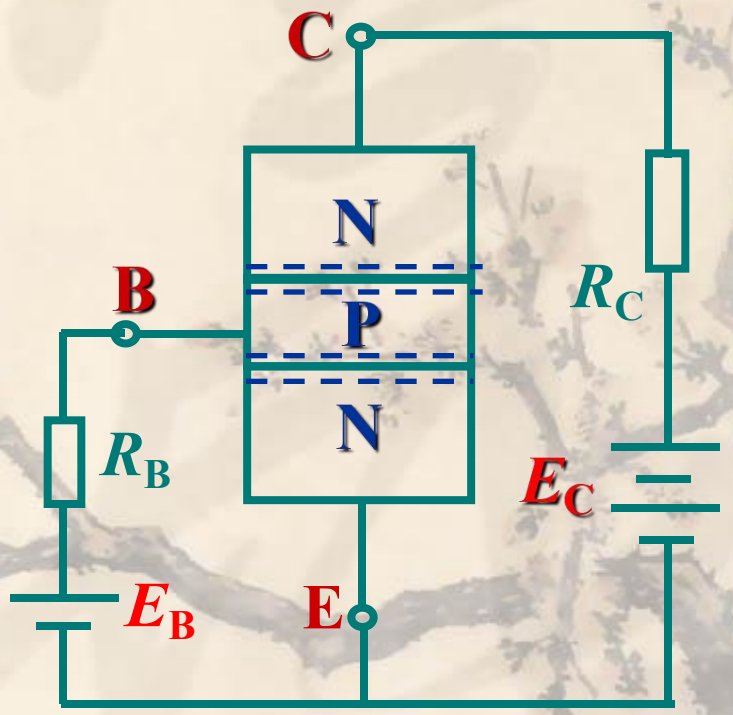
发射结正偏　$V_B > V_E$

集电结反偏　$V_C > V_B$

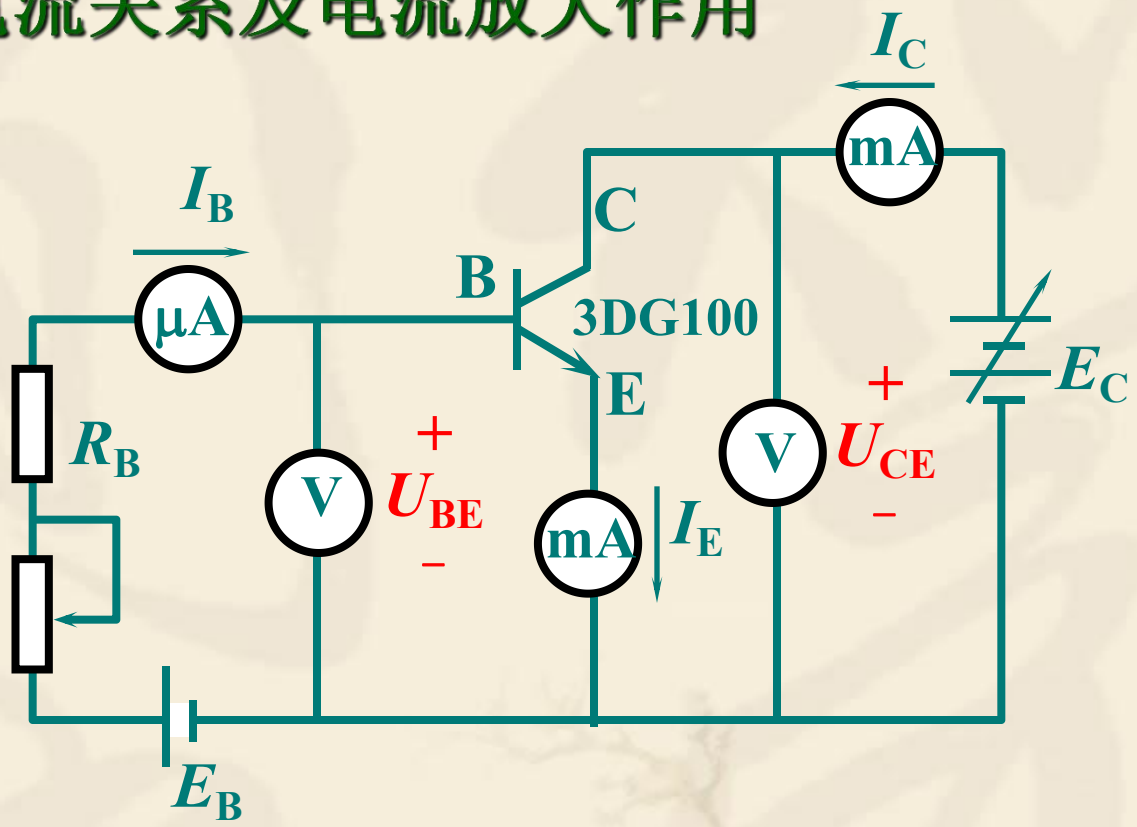
PNP

发射结正偏　$V_B < V_E$

集电结反偏　$V_C < V_B$



2. 各电极电流关系及电流放大作用



晶体管电流放大的实验电路

设 $E_C = 6\ V$，改变可变电阻 R_B，则基极电流 I_B、集电极电流 I_C 和发射极电流 I_E 都发生变化，测量结果如下表：

晶体管电流测量数据

I_B(mA)	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
I_C(mA)	<0.001	0.70	1.50	2.30	3.10	3.95
I_E(mA)	<0.001	0.72	1.54	2.36	3.18	4.05

结论：

(1) $I_E = I_B + I_C$ 符合基尔霍夫定律

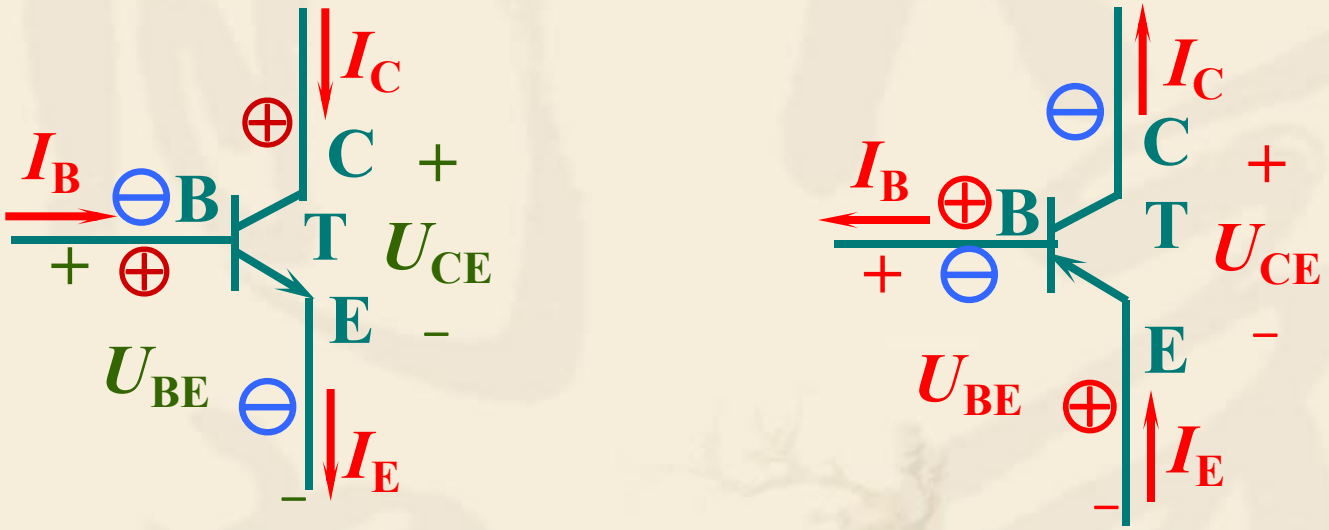
(2) $I_C >> I_B$， $I_C \approx I_E$

(3) $\Delta I_C >> \Delta I_B$

把基极电流的微小变化能够引起集电极电流较大变化的特性称为晶体管的电流放大作用。

实质：用一个微小电流的变化去控制一个较大电流的变化，是CCCS器件。

(4) 要使晶体管起放大作用，发射结必须正向偏置，集电结必须反向偏置。



电流方向和发射结与集电结的极性

(a) NPN 型晶体管；　　(b) PNP 型晶体管

3. 三极管内部载流子的运动规律

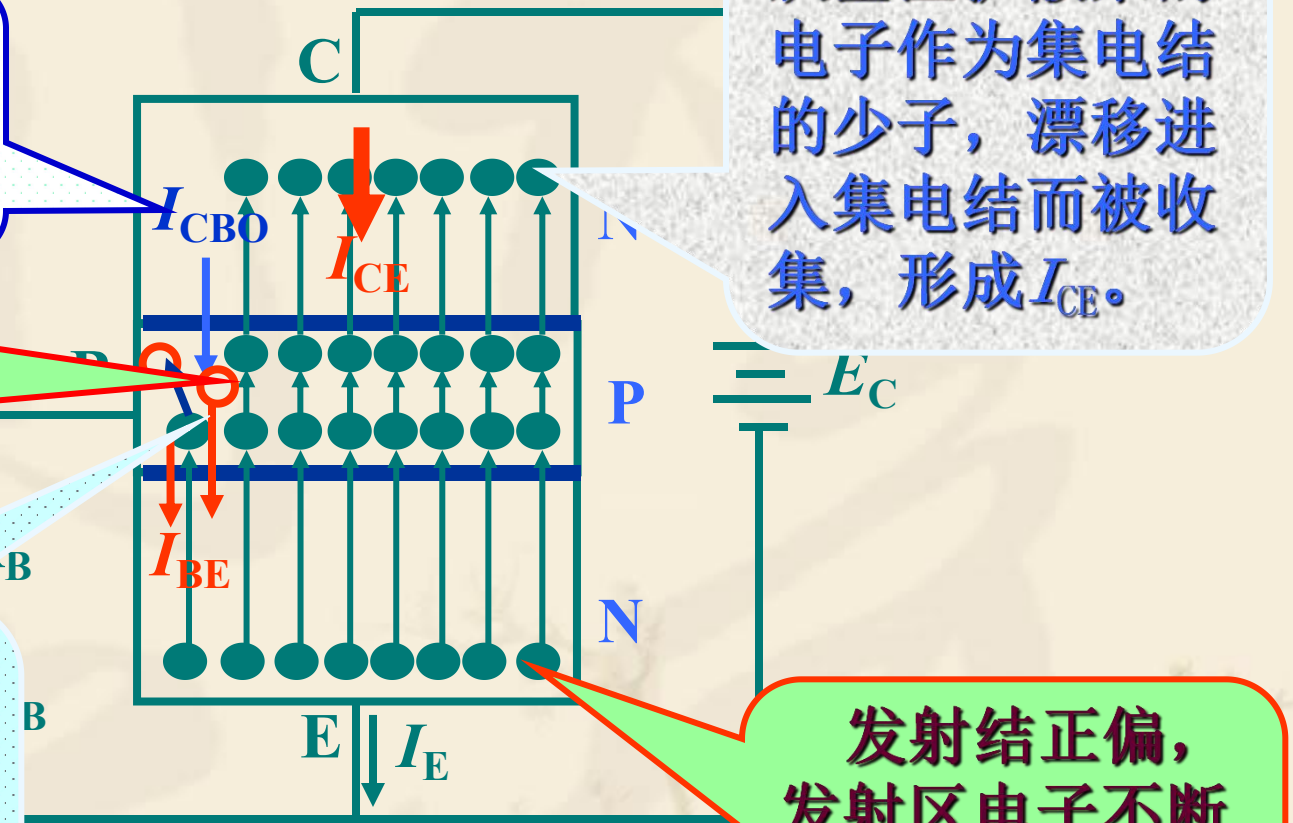
集电结反偏，有少子形成的反向电流I_{CBO}。

从基区扩散来的电子作为集电结的少子，漂移进入集电结而被收集，形成I_{CE}。

基区空穴向发射区的扩散可忽略。

进入P 区的电子少部分与基区的空穴复合，形成电流I_{BE}，多数扩散到集电结。

发射结正偏，发射区电子不断向基区扩散，形成发射极电流I_E。



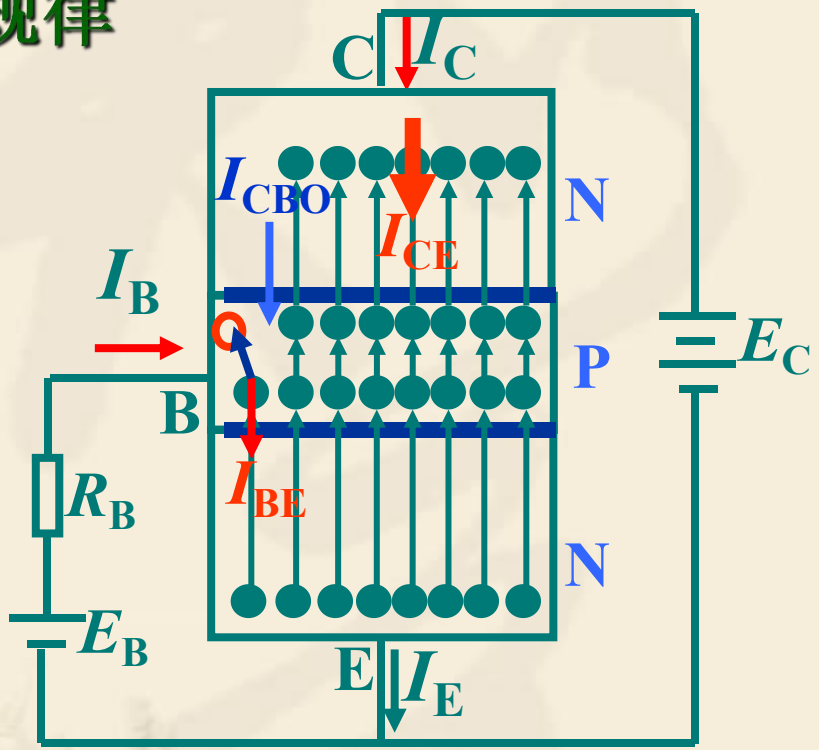
3. 三极管内部载流子的运动规律

$$I_C = I_{CE} + I_{CBO} \approx I_{CE}$$

$$I_B = I_{BE} - I_{CBO} \approx I_{BE}$$

I_{CE} 与 I_{BE} 之比称为共发射极电流放大倍数

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



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

若I_B=0, 则$I_C \approx I_{CEO}$集—射极穿透电流, 温度↑→I_{CEO}↑

忽略I_{CEO}，有 $I_C \approx \bar{\beta} I_B$ (常用公式)

4. 特性曲线

即管子各电极电压与电流的关系曲线，是管子内部载流子运动的外部表现，反映了晶体管的性能，是分析放大电路的依据。

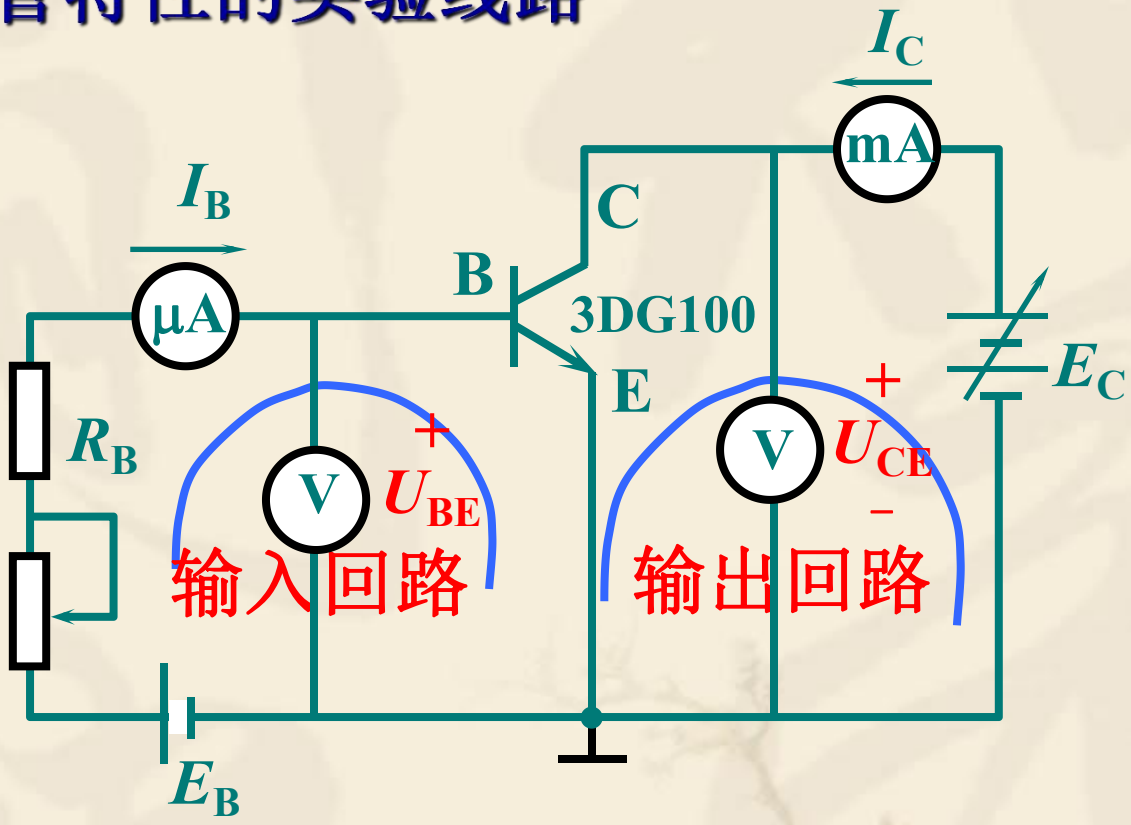
为什么要研究特性曲线：

(1)直观地分析管子的工作状态

(2)合理地选择偏置电路的参数，设计性能良好的电路

重点讨论应用最广泛的共发射极接法的特性曲线

测量晶体管特性的实验线路

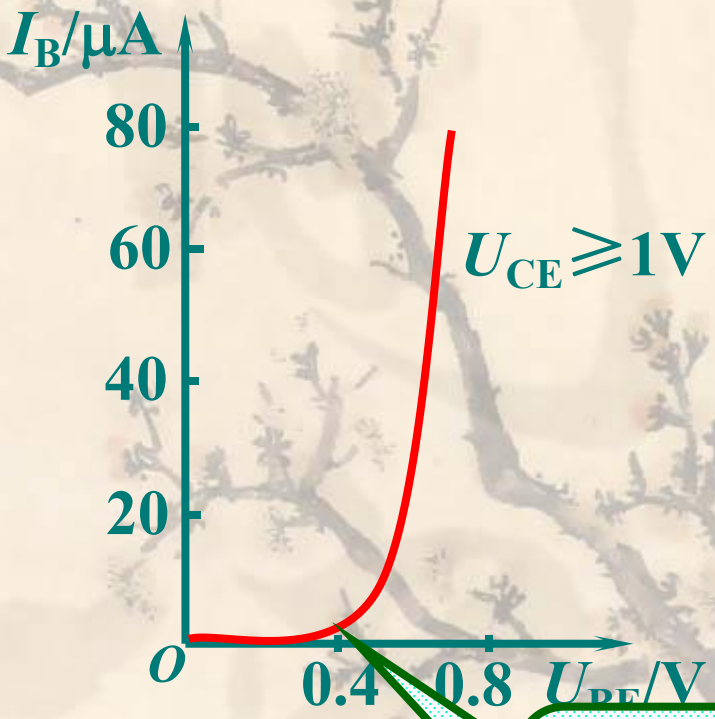


共发射极电路

发射极是输入回路、输出回路的公共端

(1) 输入特性 $I_B = f(U_{BE})\big|_{U_{CE}=常数}$

特点:非线性



3DG100晶体
输入特性曲

死区电压:
硅管0.5V,
锗管0.1V。

正常工作时发射结电压:

NPN型硅管

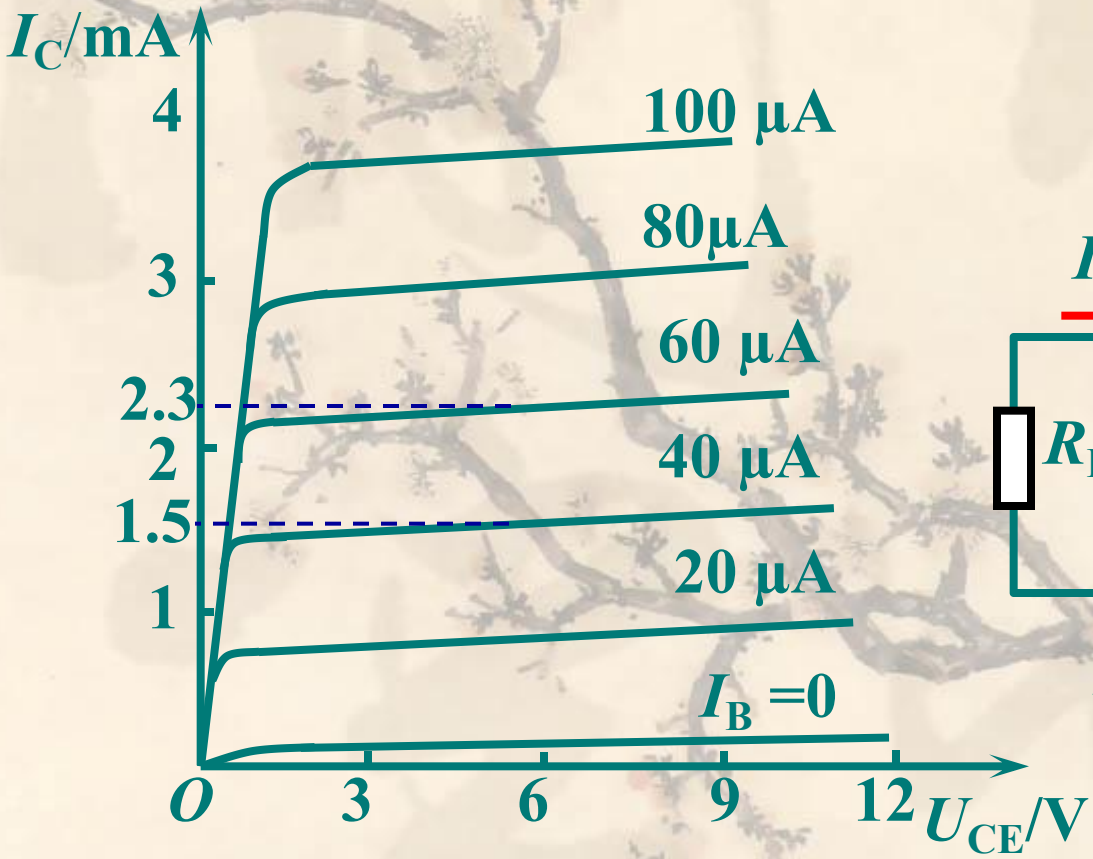
$U_{BE} \approx 0.6 \sim 0.7V$

PNP型锗管

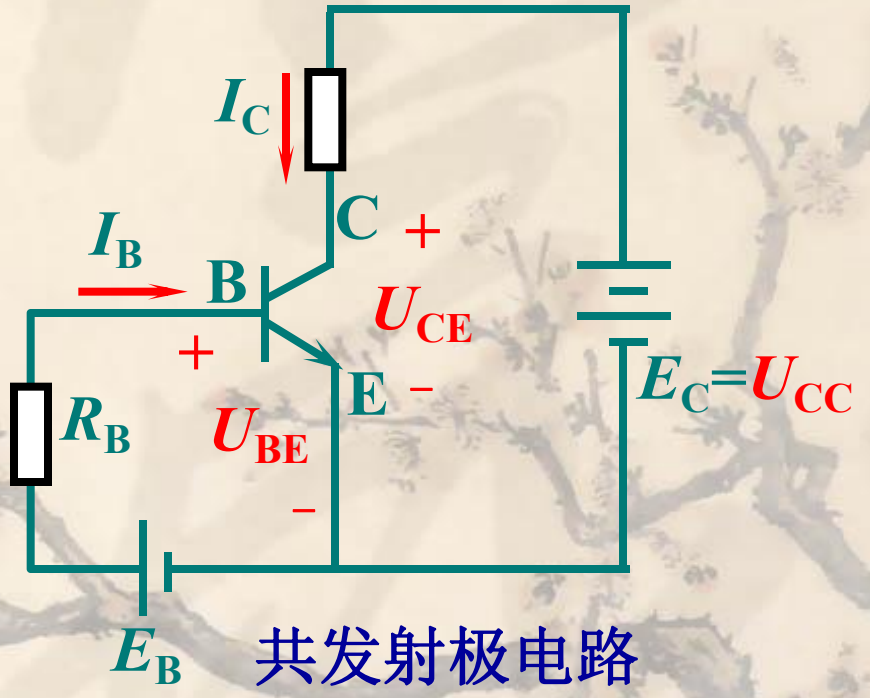
$U_{BE} \approx -0.2 \sim -0.3V$

(2)输出特性 $I_C = f(U_{CE})\big|_{I_B=常数}$

在不同的 I_B 下，可得出不同的曲线，所以晶体管的输出特性曲线是一组曲线。



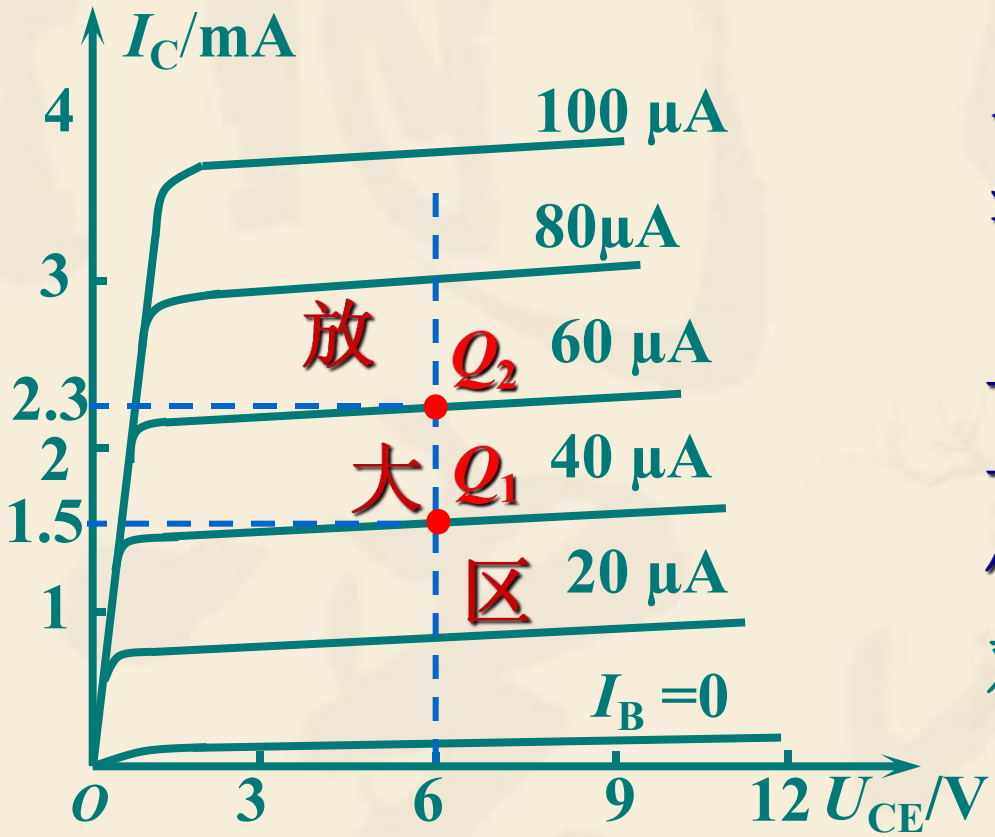
3DG100晶体管的输出特性曲线



共发射极电路

$$I_C = f(U_{CE})\big|_{I_B=常数}$$

晶体管有三种工作状态，因而输出特性曲线分为三个工作区



3DG100晶体管的输出特性曲线

a. 放大区

在放大区 $I_C = \beta I_B$，也称为线性区，具有恒流特性。

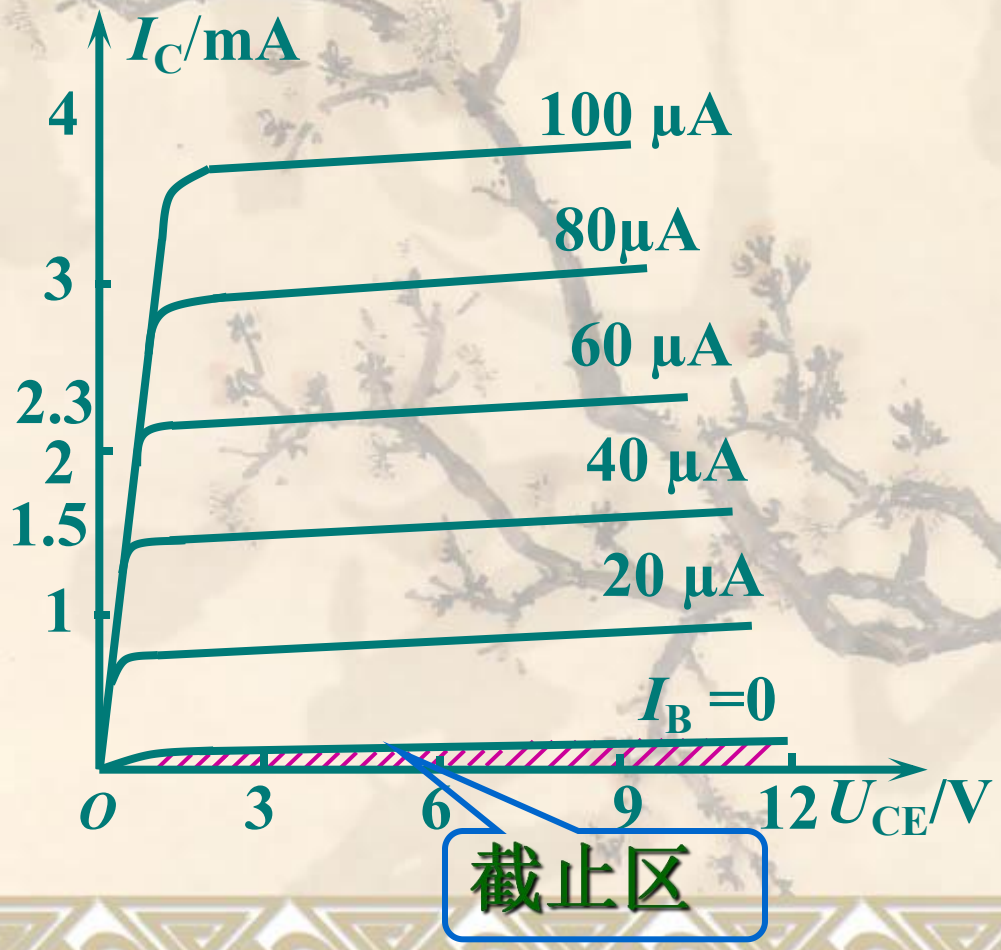
在放大区，发射结处于正向偏置、集电结处于反向偏置，晶体管工作于放大状态。

对 NPN 型管而言，应使 $U_{BE} > 0$, $U_{BC} < 0$，此时，$U_{CE} > U_{BE}$。

b.截止区

$I_B = 0$ 的曲线以下的区域称为截止区。

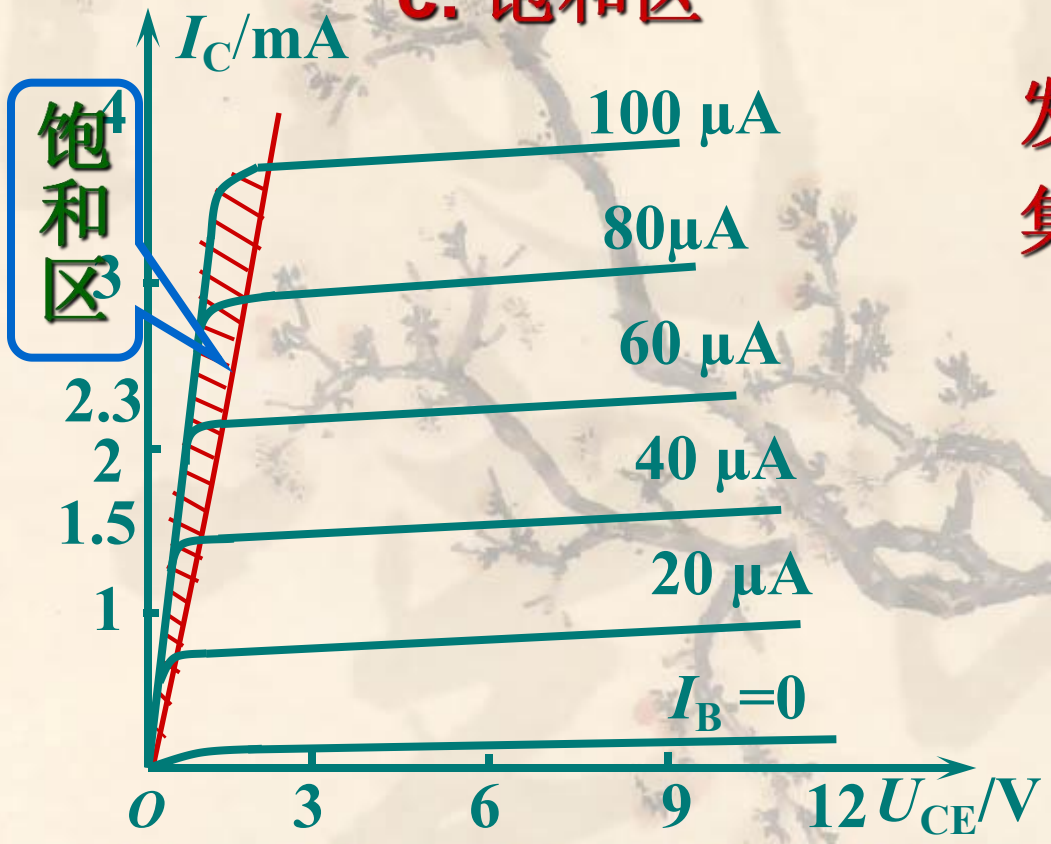
$I_B = 0$ 时，$I_C = I_{CEO}$（很小）。(I_{CEO}<0.001mA)



对NPN型硅管，当U_{BE}<0.5V时，即已开始截止，为使晶体管可靠截止，常使$U_{BE} \leq 0$。截止时，集电结也处于反向偏置（$U_{BC} < 0$），此时，$I_C \approx 0$，$U_{CE} \approx U_{CC}$。

当 $U_{CE} < U_{BE}$ 时， 集电结处于正向偏置（$U_{BC} > 0$），晶体管工作于饱和状态。

c. 饱和区



在饱和区，$\beta I_B \geq I_C$，发射结处于正向偏置，集电结也处于正偏。

深度饱和时，

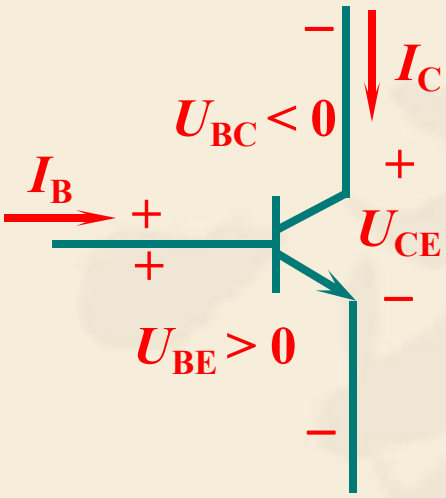
硅管 $U_{CES} \approx 0.3$V，

锗管 $U_{CES} \approx 0.1$V。

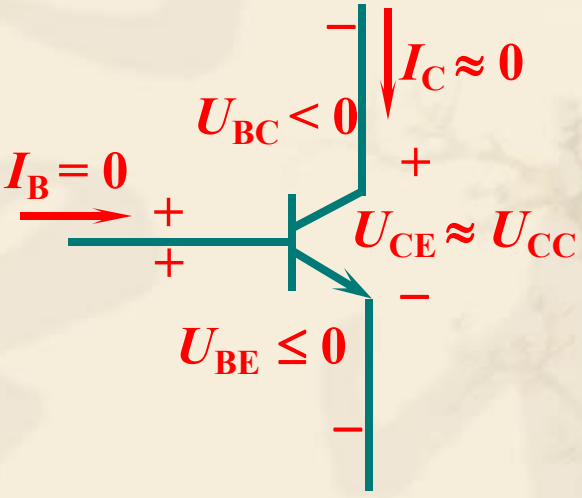
$I_C \approx U_{CC}/R_C$ 。

当晶体管饱和时，$U_{CE} \approx 0$，发射极与集电极之间如同一个开关的接通，其间电阻很小；当晶体管截止时，$I_C \approx 0$，发射极与集电极之间如同一个开关的断开，其间电阻很大，可见，晶体管除了有放大作用外，还有开关作用。

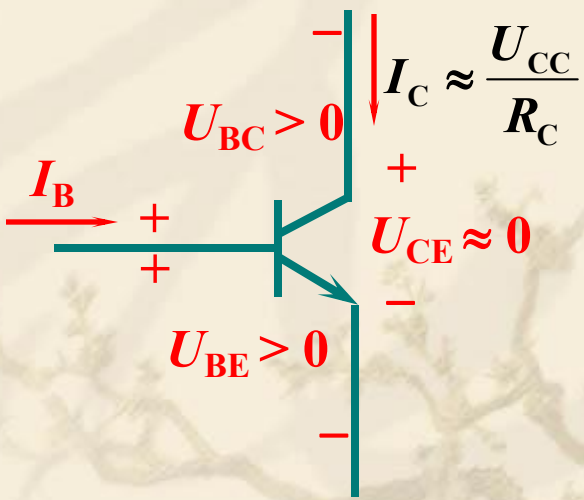
晶体管三种工作状态的电压和电流



(a)放大



(b)截止



(c)饱和

晶体管结电压的典型值

管　型	工　作　状　态				
	饱和		放大	截 止	
	U_{BE}/V	U_{CE}/V	U_{BE}/V	U_{BE}/V	
				开始截止	可靠截止
硅管(NPN)	0.7	0.3	0.6 ~ 0.7	0.5	≤0
锗管(PNP)	–0.3	–0.1	–0.2 ~ –0.3	–0.1	0.1

主要参数

表示晶体管特性的数据称为晶体管的参数，晶体管的参数也是设计电路、选用晶体管的依据。

1. 电流放大系数 $\bar{\beta}$，β

当晶体管接成发射极电路时，

直流电流放大系数

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B}$$

交流电流放大系数

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

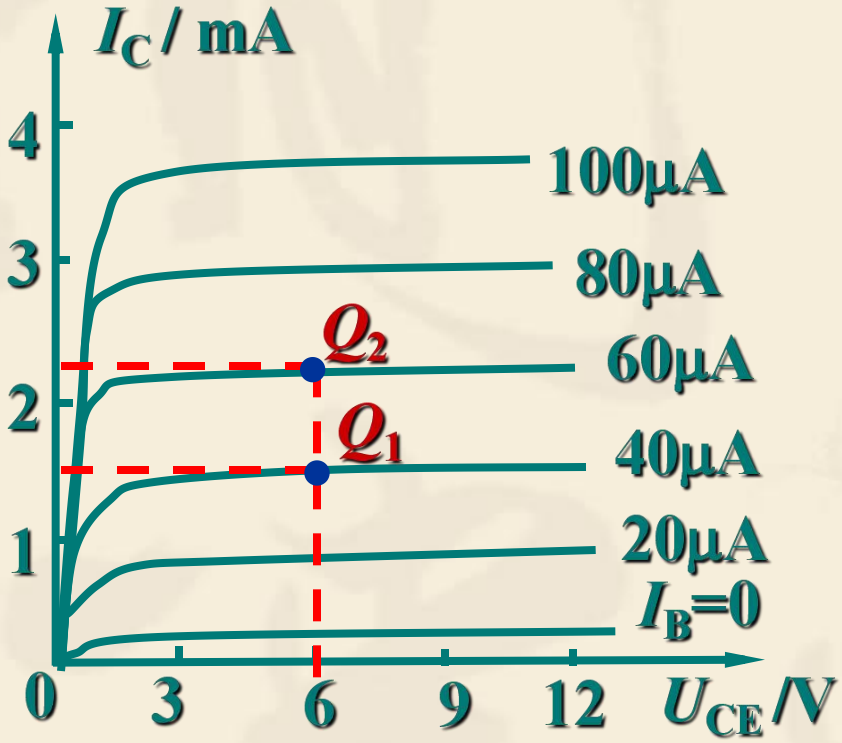
注意：

$\bar{\beta}$和β的含义不同，但在特性曲线近于平行等距并且I_{CE0}较小的情况下，两者数值接近。

由于晶体管的输出特性曲线是非线性的，只有在特性曲线的近于水平部分，I_C随I_B成正比变化，β值才可认为是基本恒定的。

常用晶体管的β值在20～200之间。

例：在U_{CE}= 6 V时，　在 Q_1 点I_B=40μA，I_C=1.5mA；
在 Q_2 点I_B=60 μA，I_C=2.3mA。



在 Q_1 点，有

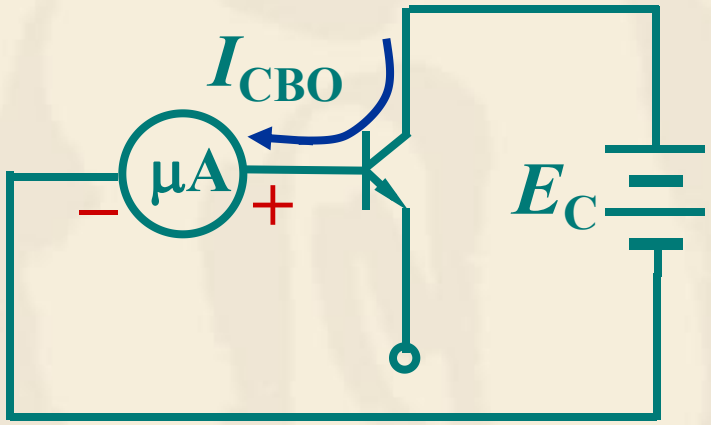
$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.5}{0.04} = 37.5$$

由 Q_1 和Q_2点，得

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.3 - 1.5}{0.06 - 0.04} = 40$$

在以后的计算中，一般作近似处理：$\beta = \bar{\beta}$。

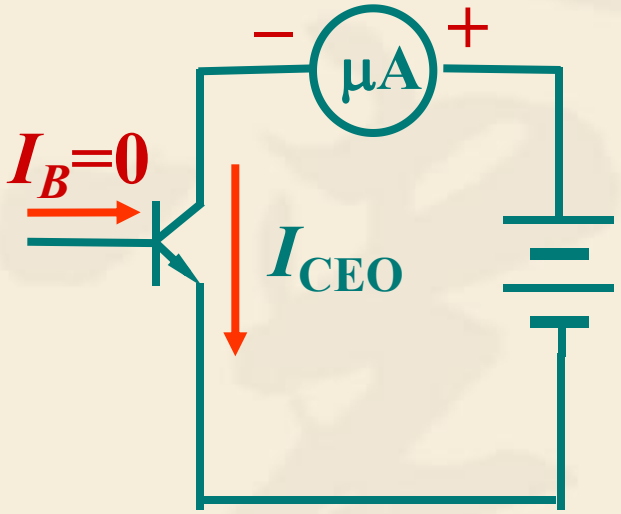
2.集-基极反向截止电流 I_{CBO}



I_{CBO}是由少数载流子的漂移运动所形成的电流，受温度的影响大。

温度↑→I_{CBO}↑

3.集-射极反向截止电流(穿透电流)I_{CEO}



I_{CEO}受温度的影响大。温度↑→I_{CEO}↑，所以I_C也相应增加。三极管的温度特性较差。

4.集电极最大允许电流 I_{CM}

集电极电流 I_C上升会导致三极管的β值的下降，当β值下降到正常值的三分之二时的集电极电流即为 I_{CM}。

5.集-射极反向击穿电压$U_{(BR)CEO}$

当集—射极之间的电压U_{CE}超过一定的数值时，三极管就会被击穿。手册上给出的数值是25℃、基极开路时的击穿电压$U_{(BR)\ CEO}$。

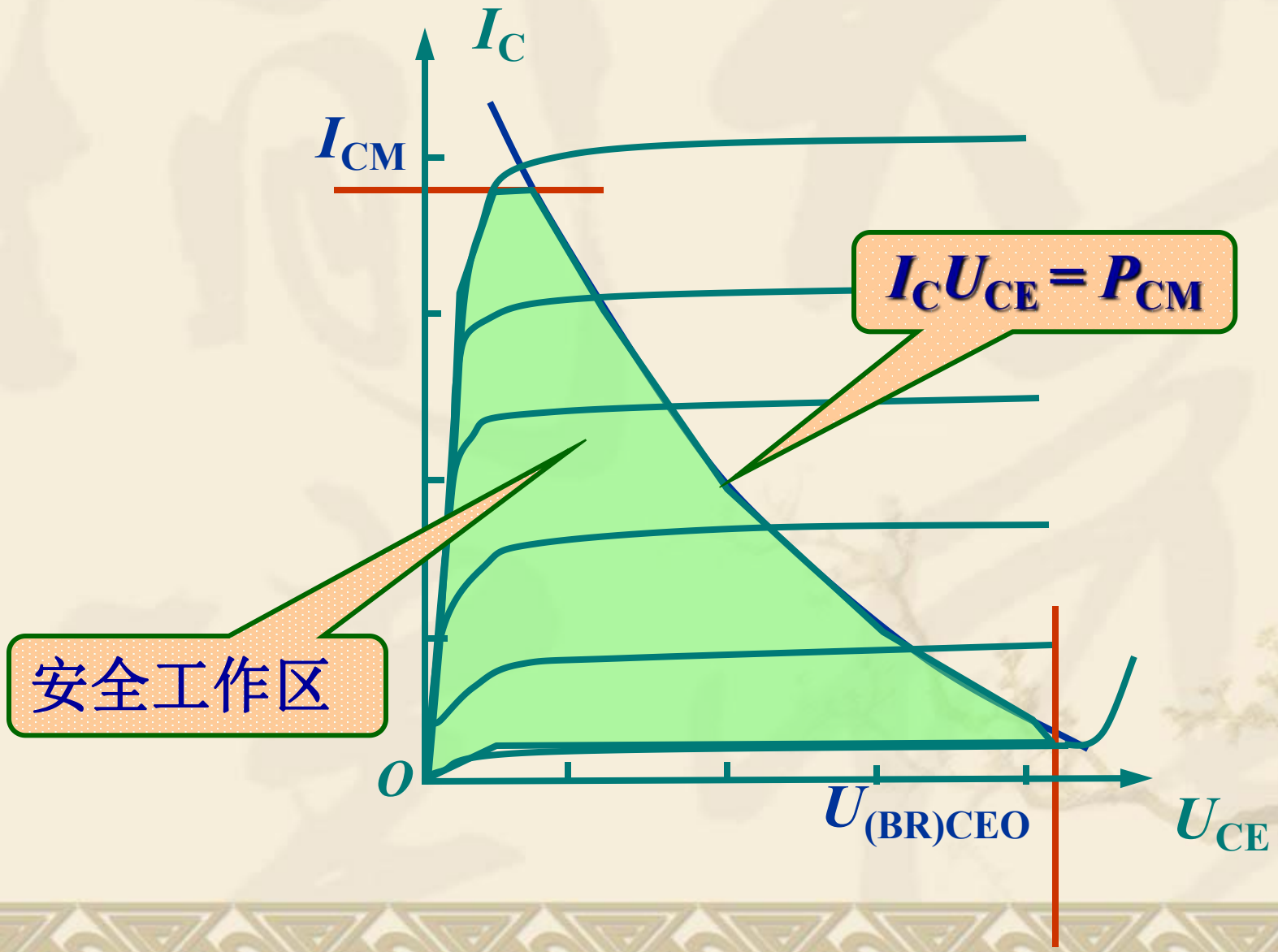
6.集电极最大允许耗散功耗P_{CM}

P_{CM}取决于三极管允许的温升，消耗功率过大，温升过高会烧坏三极管。

$$P_C \le P_{CM} = I_C U_{CE}$$

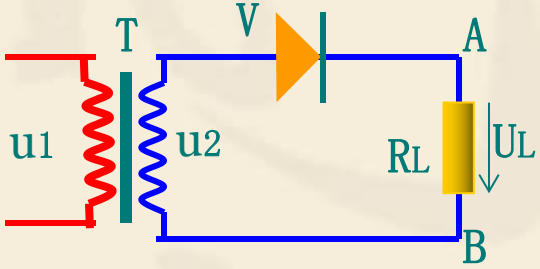
硅管允许结温约为150℃，锗管约为70~90℃。

由三个极限参数可画出三极管的安全工作区

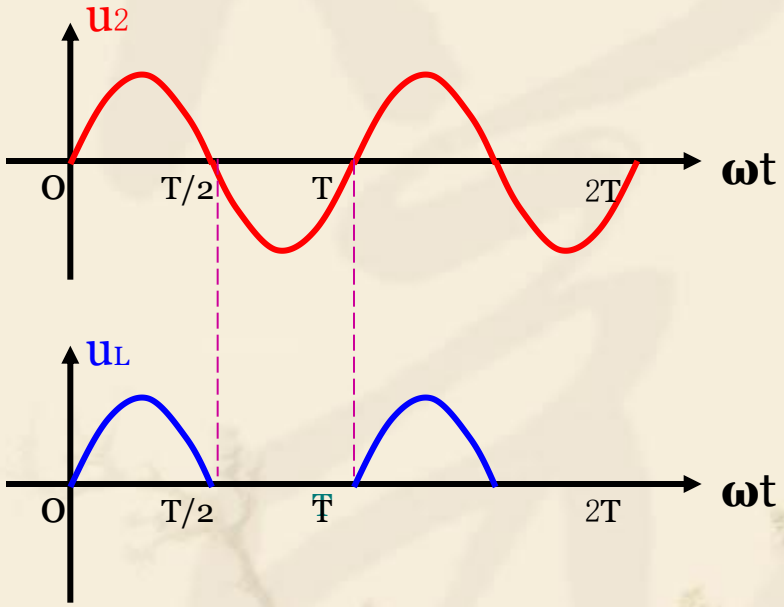


三、晶体管整流电路

1. 单相半波整流电路



半波整流电路



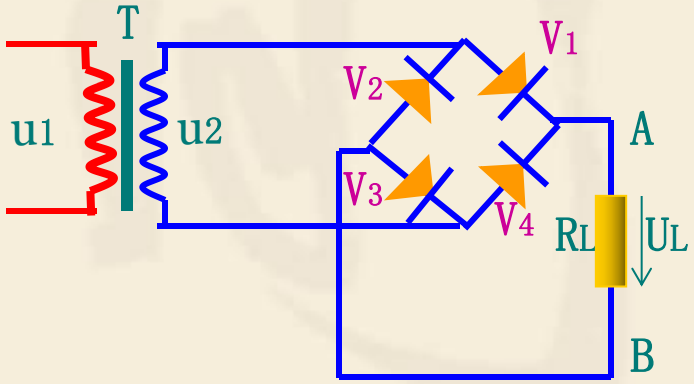
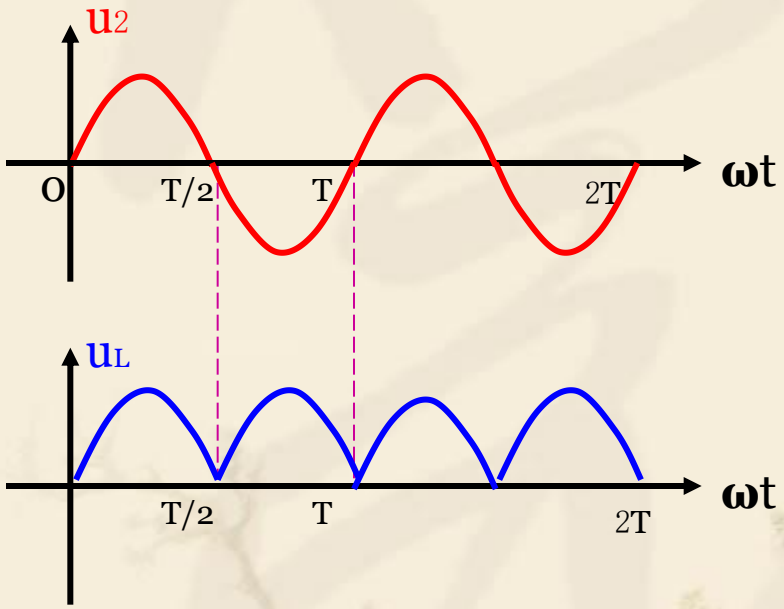
半波整流波形图

通过计算可知，整流出来的直流电压平均值u_L的大小为

$$U_L=0.45U_2$$

式中U_L为输出电压u_L的有效值，U_2为变压器二次侧电压。

2. 单相桥式整流电路



半波整流电路