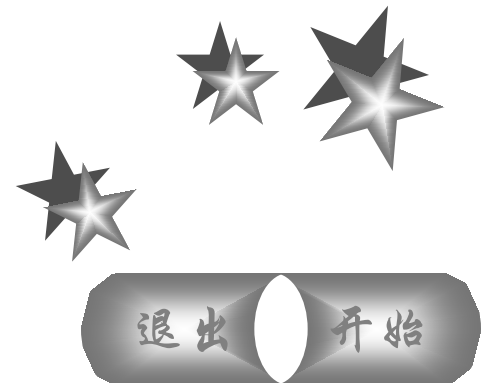


第五章 基本半导体器件

北京邮电大学电子工程学院



第五章 基本半导体器件

本章主要内容：

- 半导体及PN结
- 晶体二极管的结构及电路模型
- 双极型晶体三极管及其性质
- 场效应晶体管及其性质

本章重点：

- PN结的单向导电性，晶体二极管的伏安特性和基本电路模型，双极性晶体三极管的特性曲线和低频小信号电路模型。

电子电路部分的注意事项

- 注意对于约等于的使用
 - $1+100 \approx 100$
 - 交流通路中电容相当于导线
- 注意等效的使用和条件
 - 等效只有在某些情况下可以可以用
- 注意工程实践中的固定用法
 - 比如单只三极管只有三种常见的连接方式
- 注意工程实践中的常用参数
 - $U_T = 26\text{mV}$
 - 反向饱和电流

第五章 基本半导体器件

§5-1 半导体基本理论简述◇

§5-2 晶体二极管◇

§5-3 双极型晶体三极管◇

§5-4 场效应晶体管◇

作业

二极管、稳压管

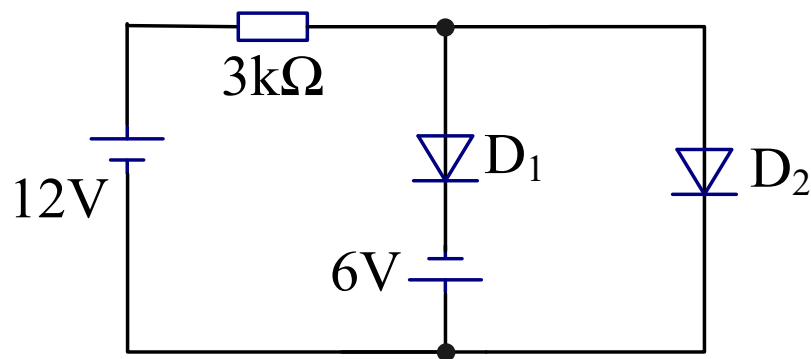
- 5-1 (1)、(3)、(4)
- 5-8 5-9 5-11 5-12 5-13 5-15 5-16
- 补充5-1

三极管

- 5-1 (2)、(5) 6-2
- 5-21 (求两个电阻的取值) 5-24
- 补充5-2

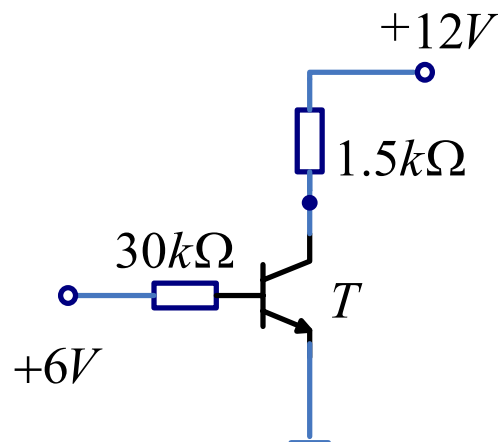
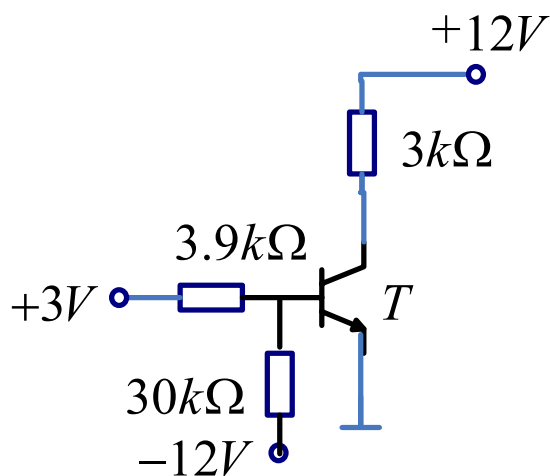
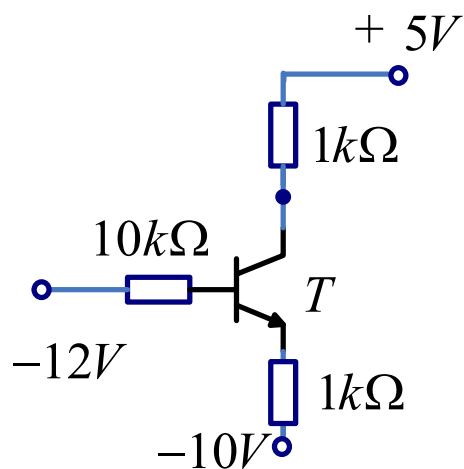
补充5-1

- 如图所示电路中两个二极管的状态分别为导通还是截止？



补充5-2

- 判断下图所示电路中三极管工作的状态 $\beta = 30$
截止、饱和、放大？



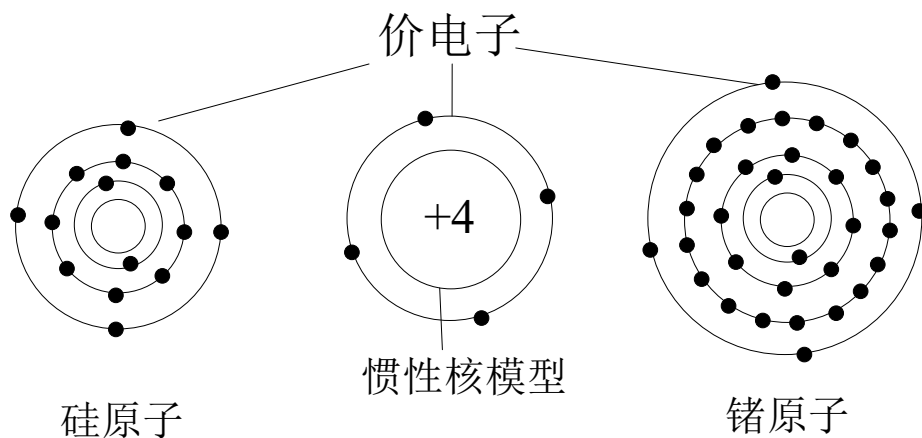
5-1 半导体基本理论简述

主要内容

1. 半导体基本概念
2. PN结与单向导电性

1. 半导体基本概念

- 根据导电特性，物质分为：导体、绝缘体、半导体
导体：存在着大量自由电子，在外电场作用下容易形成电流
绝缘体：其原子或分子的最外层电子为稳定结构，不易产生自由电子
半导体：导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。自然状态下具有绝缘体特性，而当满足一定外界条件时具有导电能力的材料。
- 元素周期表中最外层为四个电子的元素所组成的物质，都可以成为半导体。如：硅（Si）、锗（Ge），原子结构如图：



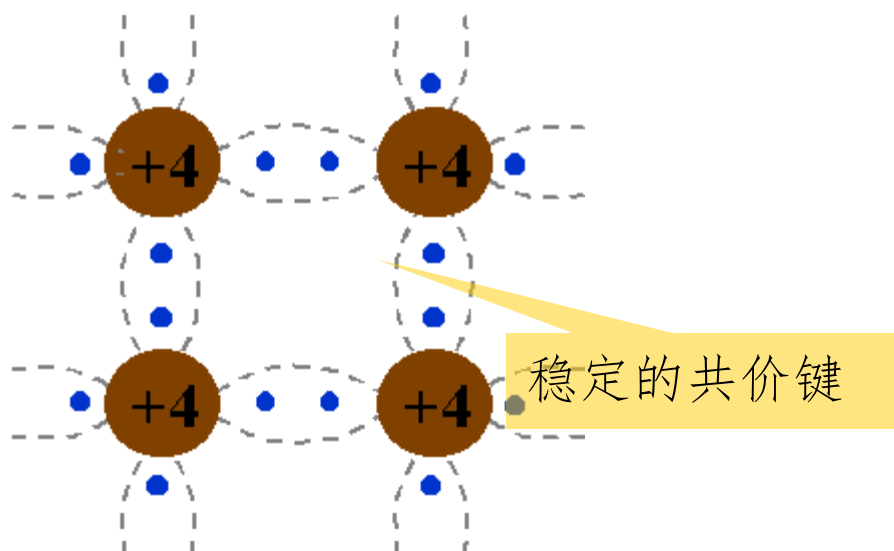
硅和锗的原子结构模型

5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
硼	碳	氮	氧	氟	氖
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
铝	硅	磷	硫	氯	氩
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
镓	锗	砷	硒	溴	氪
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
铟	锡	锑	碲	碘	氙
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
铊	铅	铋	钋	砹	氡

十四族元素

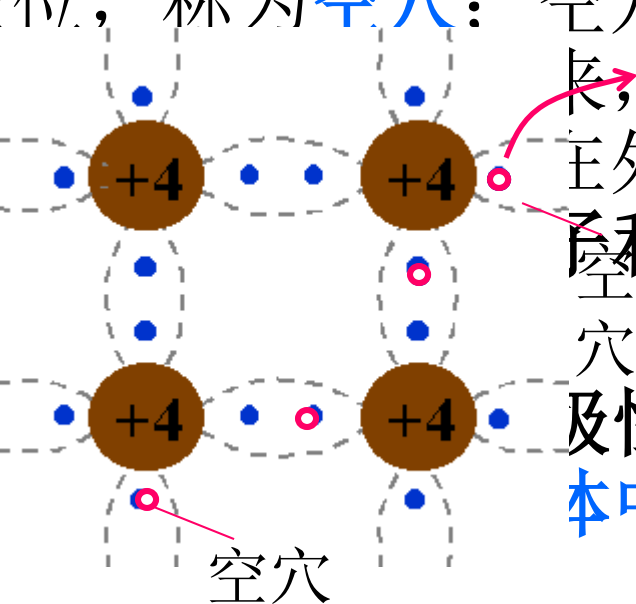
1. 半导体基本概念

- **本征半导体**（Intrinsic crystal）：纯净、结构完整、热力学温度 $T=0\text{ K}$ 时没有自由电子的半导体。
- **晶格**：晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵，称为晶格。
以共用电子的形式，形成共价键结构(covalent bond)。



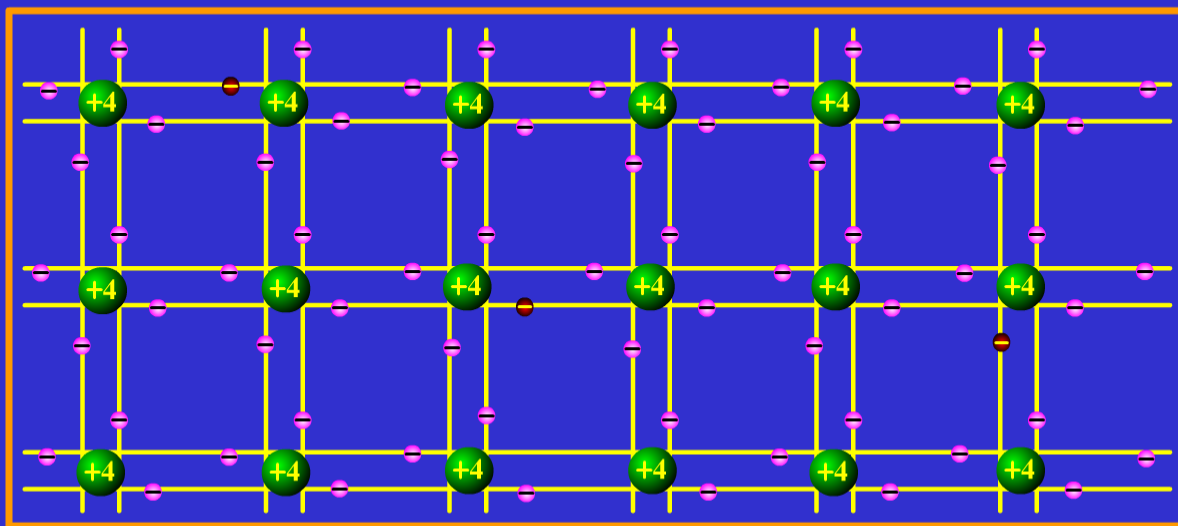
1. 半导体基本概念

- **本征激发**：在常温下受热引起电子激发的现象。
- **载流子**：本征激发产生自由电子，共价结构中留下了一个空位，称为**空穴**：空穴的出现，其他共价键上的电子有可能来填补，其他地方的电子长，其他地方的电子在外电场作用下形成电子流和空穴都参与导电，二者统称为载流子。
- 自由电子和空穴的运动方向相反，所以它们本中的电流等于两个电流之和。



空穴可在共价键内移动

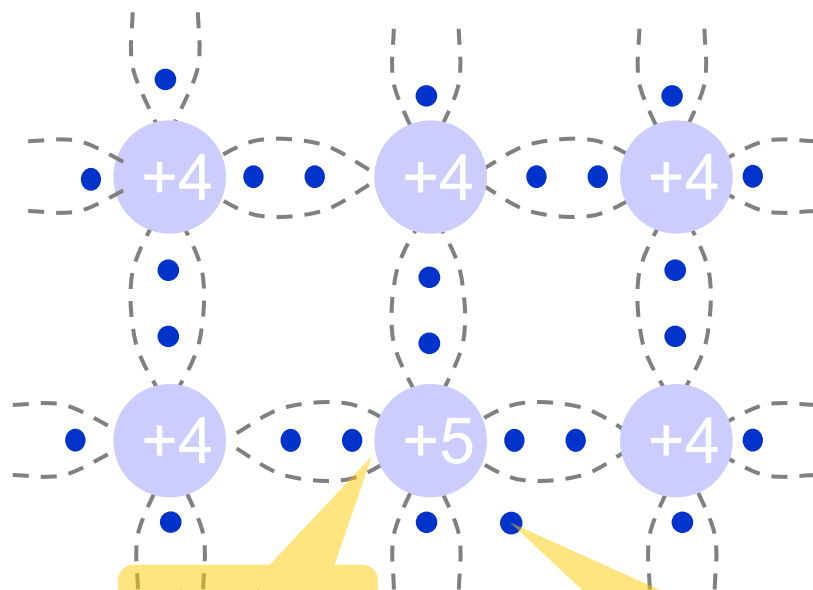
空穴和电子产生过程



1. 半导体基本概念

- 半导体的导电性：掺杂性、热敏性、光敏性
- 根据掺入不同的杂质，可生成N型和P型两类半导体
 - **N型半导体**：在本征半导体中掺入五价元素（如磷、锑）后会出现多余电子，从而形成以自由电子为主的载流子，空穴为少数载流子，这种半导体叫做N型半导体。
 - **P型半导体**：在本征半导体中掺入三价元素（如硼、镓等），形成多余空穴，从而形成以空穴为主的载流子，电子为少数载流子，这种半导体叫做P型半导体。

N型半导体



电子为多数载流子

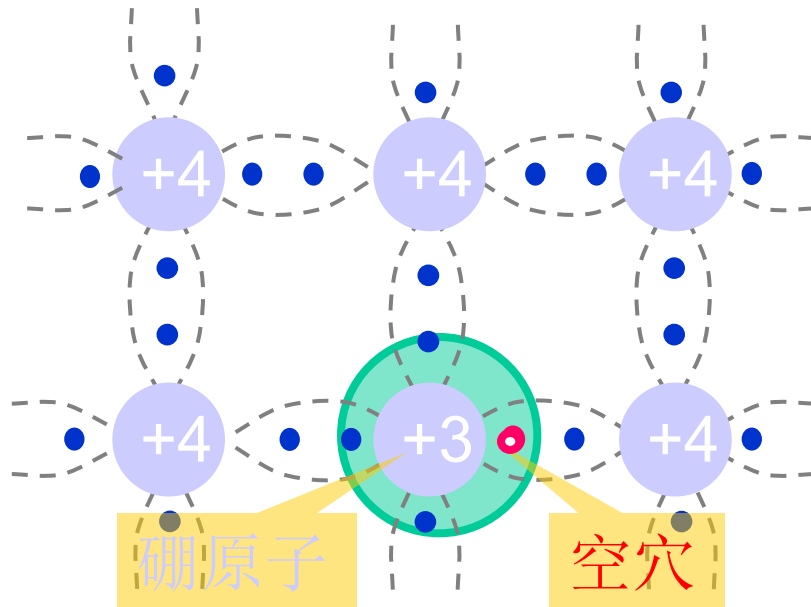
空穴为少数载流子

磷原子

自由电子

载流子数 \approx 电子数

P型半导体

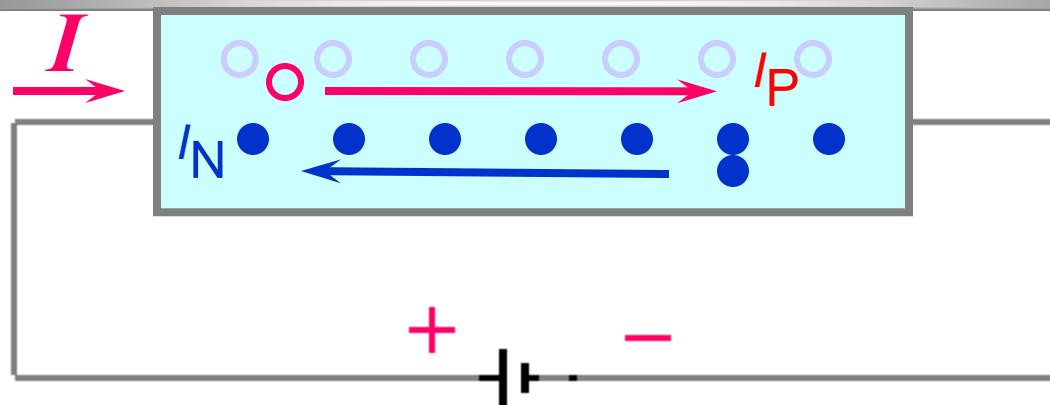


空穴 — 多子

电子 — 少子

载流子数 \approx 空穴数

掺杂半导体的导电作用



$$I = I_P + I_N$$

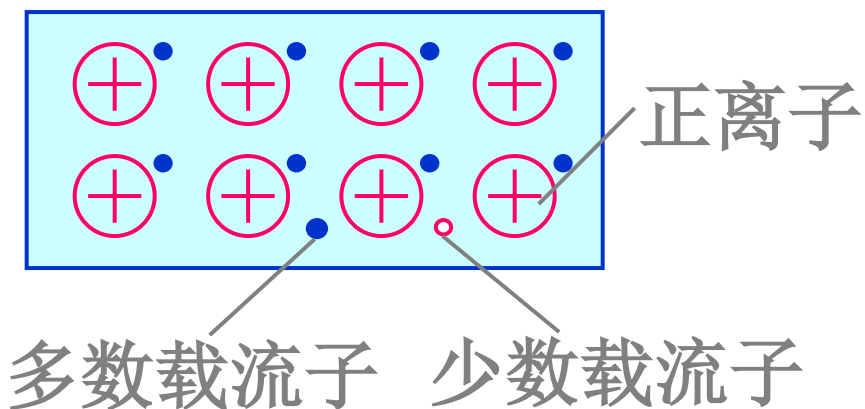
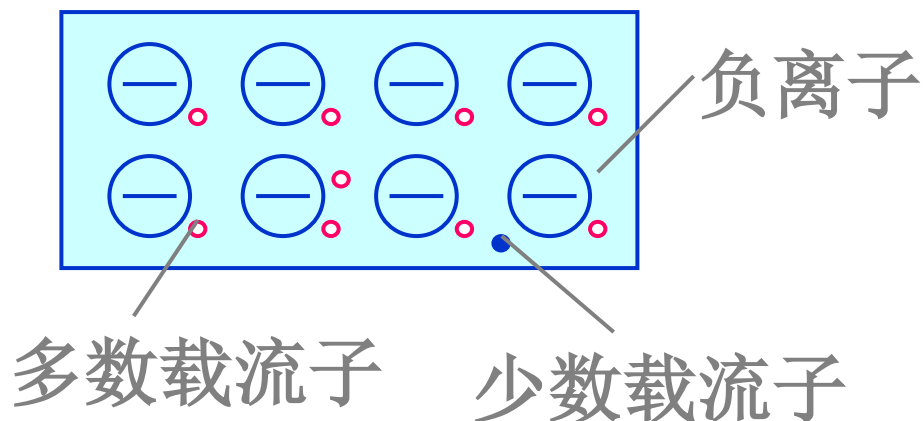
N 型半导体 $I \approx I_N$

P 型半导体 $I \approx I_P$

- 半导体的导电能力取决于载流子浓度（数目）
 - 可以通过掺入杂质的方法提高载流子浓度，通过控制掺入杂质的种类和数量可以控制半导体各种电学特性。
 - 载流子浓度与温度有关，温度越高载流子浓度越高，所以半导体的导电能力与温度成正比

2.PN结与单向导电性

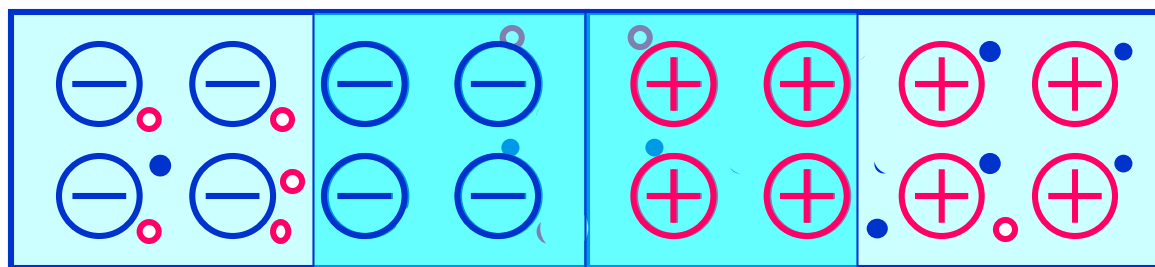
P型、N型半导体的简化图示



2.PN结与单向导电性

PN结： P型和N型半导体通过一定的工艺结合在一起时，交界面形成PN结，PN结是半导体器件的最基本单元结构。

1. 载流子的浓度差引起多子的扩散



← **内建电场**

N区的多子（电子）向P区扩散，P区的多子（空穴）向N区扩散，在交界面的N区剩下不可移动的带正电荷的施主离子，P区剩下带负电荷的受主离子

2. 复合使交界面形成空间电荷区（耗尽层）

空间电荷区特点：

无载流子， 形成内电场，阻止扩散进行，利于少子的漂移。

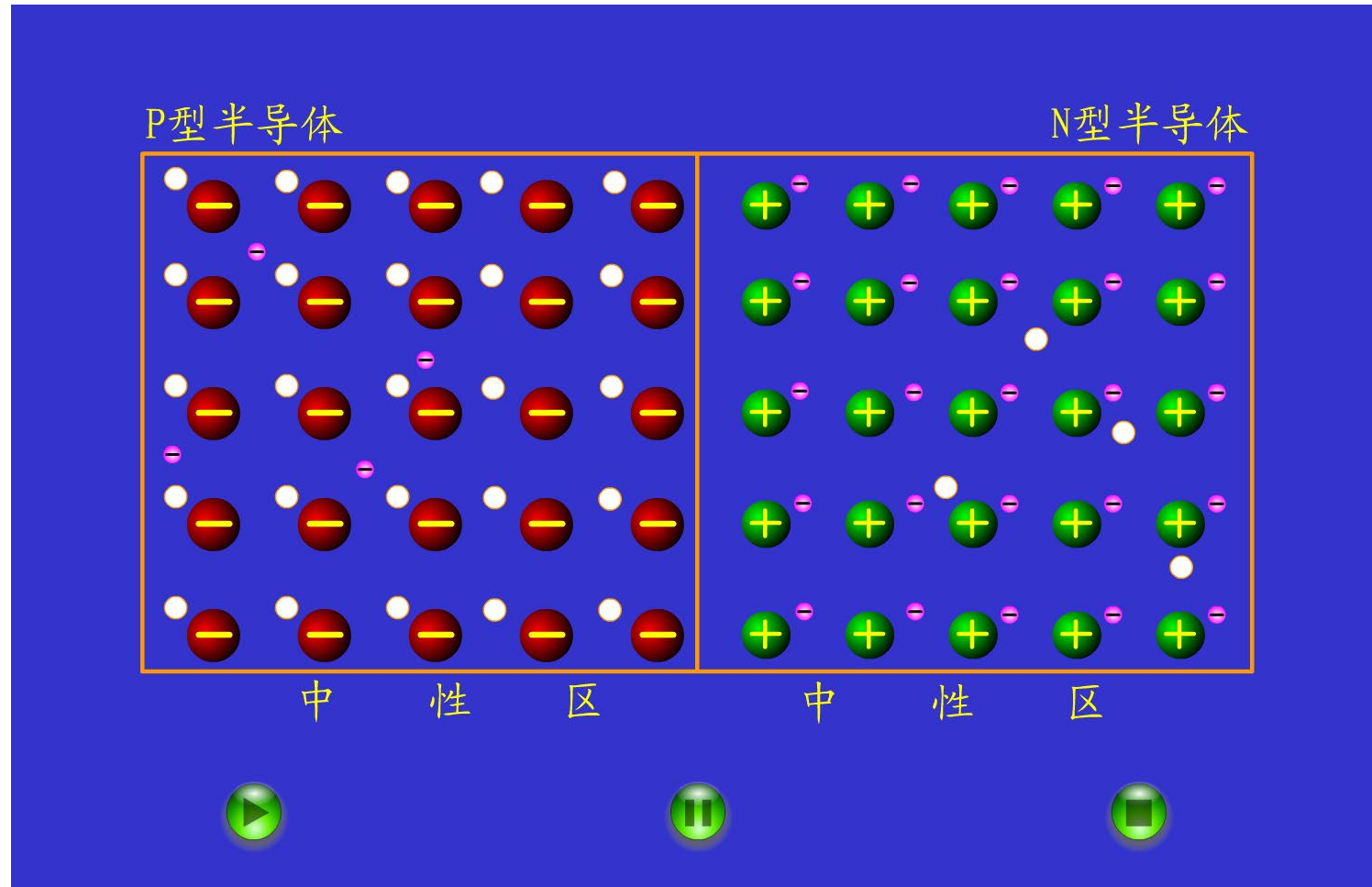
3. 扩散和漂移达到动态平衡

扩散电流 等于漂移电流，

总电流 $I = 0$ 。

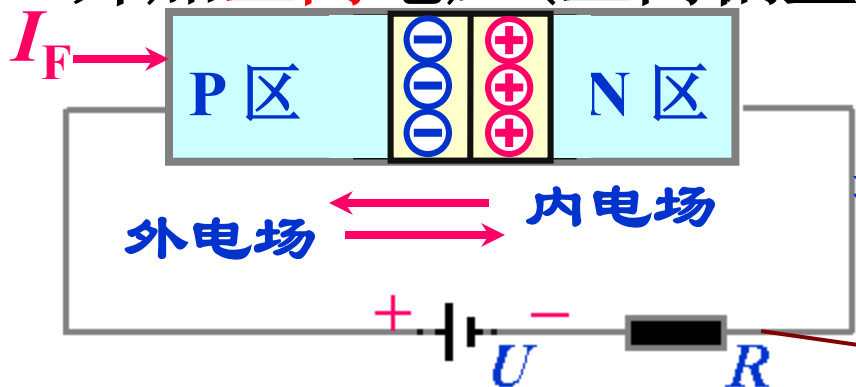
- **扩散运动**：物质从浓度高的地方向浓度低的地方运动，这种由于浓度差而产生的运动，称为扩散运动。
- **漂移运动**：在电场力的作用下，载流子的运动感称为漂移运动。

PN结形成过程



2.2 PN 结的单向导电性

1. 外加正向电压(正向偏置) — forward bias

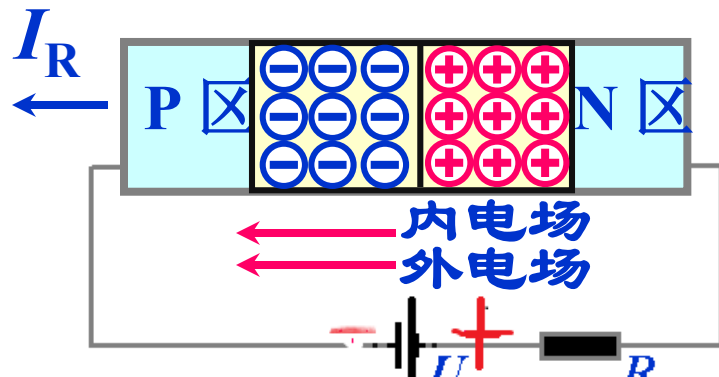


外电场使多子向 PN 结移动，中和部分离子使空间电荷区变窄。扩散运动加强形成正向电流 I_F 。

$$I_F = I_{\text{多子}} - I_{\text{少子}} \approx I_{\text{多子}}$$

限流电阻

2. 外加反向电压(反向偏置) — reverse bias



漂移运动加强形成反向电流 I_R

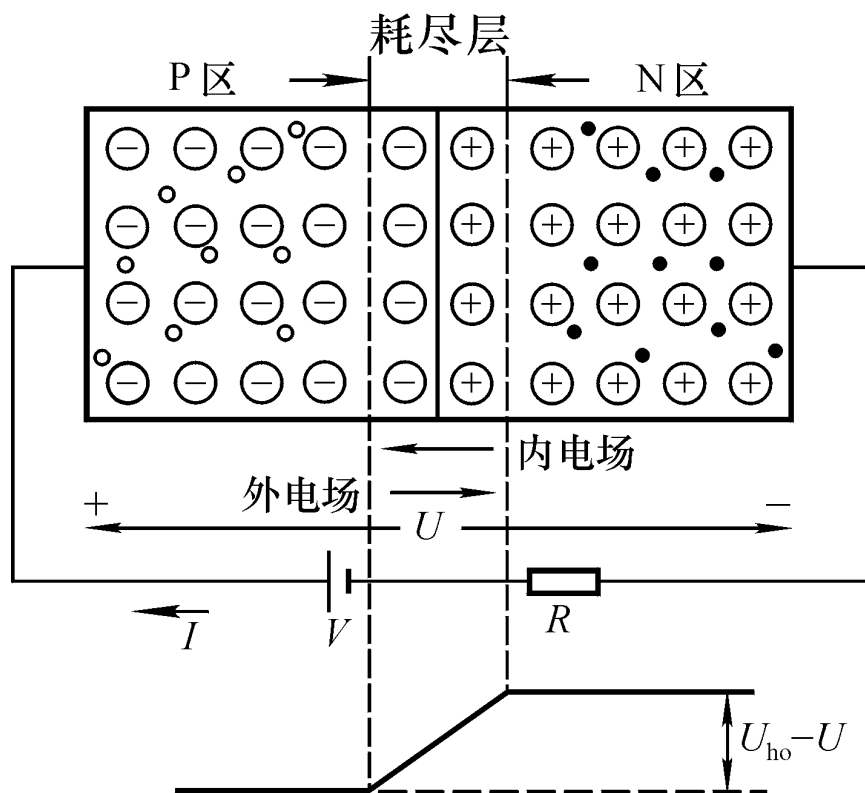
外电场使多子背离 PN 结移动，

$I_R = I_{\text{少子}} \approx$ 空间电荷区变宽。

PN 结的单向导电性：正偏导通，呈小电阻，电流较大；
反偏截止，电阻很大，电流近似为零。

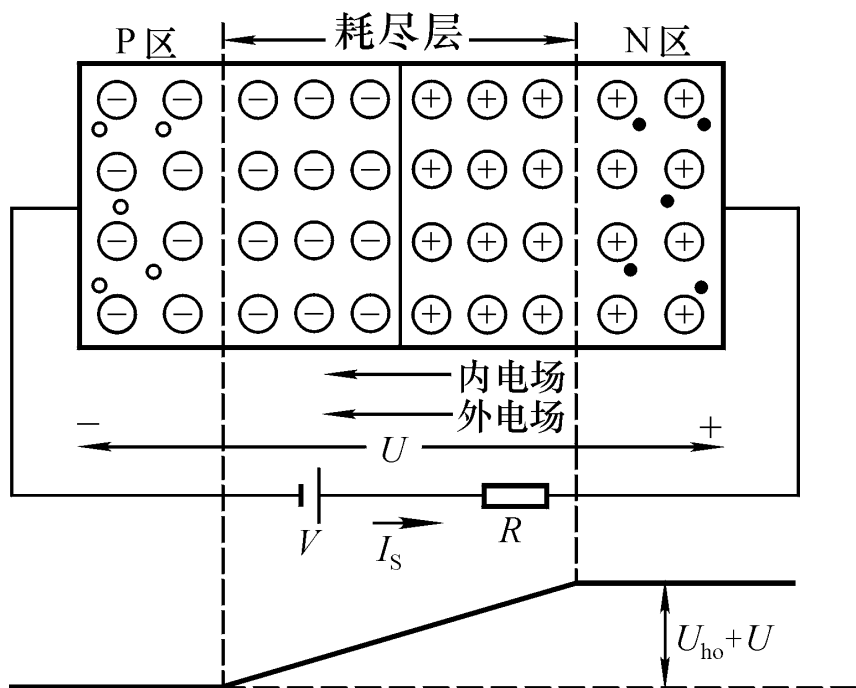
PN结加正向电压——正向导通

- 空间电荷区也叫**耗尽层**
- 半导体器件上施加的外电压称为**偏置电压**
- 如果外加电场削弱内电场（耗尽层变窄），引起载流子的连续扩散，形成电流，称为**正向偏置电压**，如图所示：



PN结加反向电压——反向截止

- 如果外加电场与内电场方向相同，使内电场加强（耗尽层变宽），进一步阻止载流子的扩散，阻止电流的形成，即**反向偏置电压**的情况，如图所示：



反向饱和电流：本征（热）激发产生的少子在电场作用下产生的漂移电流，电流的大小由**PN**结的结面积和杂质浓度所决定，当**PN**结制作完成后这个电流就是固定的。

2.3 PN 结的伏安特性

$$I = I_s (e^{u/U_T} - 1)$$

反向饱和
电流

温度电压
当量

当 $T = 300\text{K} (27^\circ\text{C})$:

$$U_T = 26 \text{ mV}$$

加正向电压时

$$i \approx I_s e^{u/U_T}$$

加反向电压时

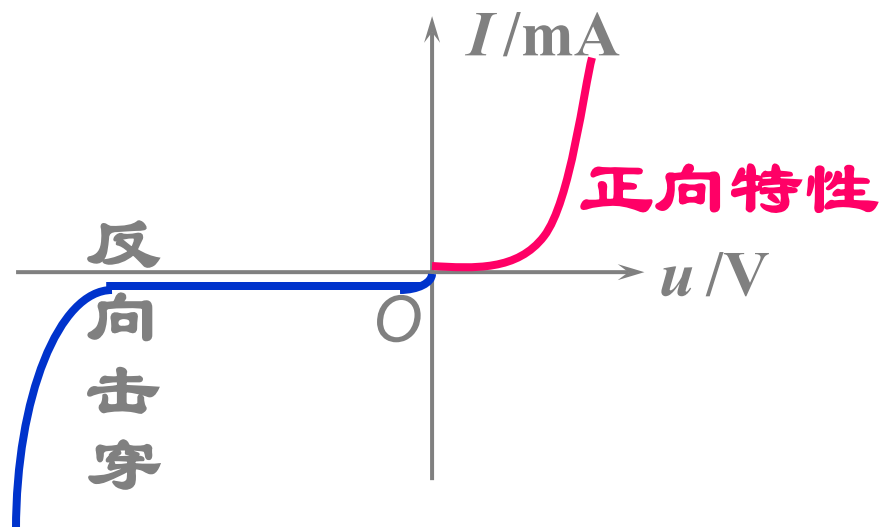
$$I \approx -I_s$$

$$k = 1.3806488(13) \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$$

玻尔兹曼
常数

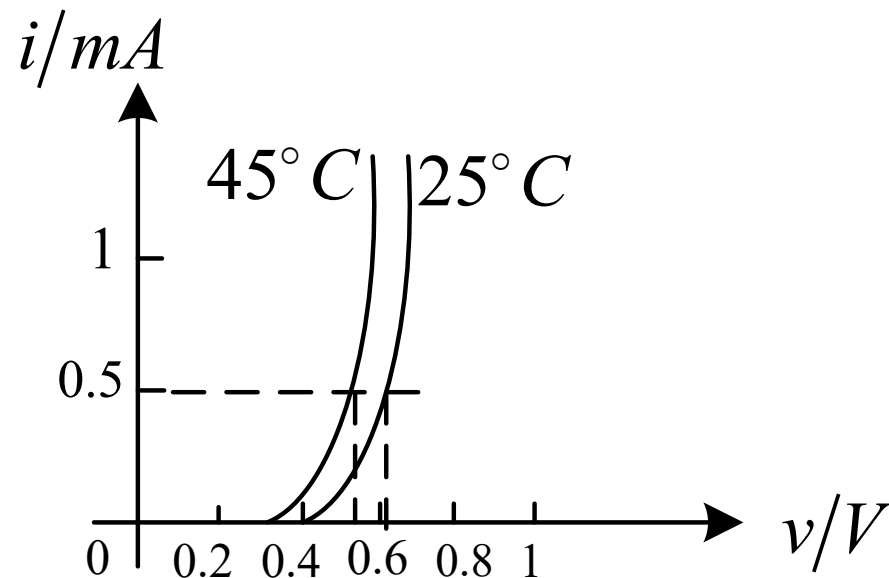
电子电量

$$U_T = \frac{kT}{q}$$



例题5-1

如图所示的PN结正向输出特性，试估算出温度分别为 25°C 、 45°C ，要使PN结电流达到 0.5mA ，需要的正向偏置电压的大小为多少？



PN结正向输出特性

解：

- ① 所给的特性图估计出 25°C ，正向偏置电压为 0.6V
- ② 从所给的特性图估计出 45°C ，正向偏置电压为 0.55V

结论:

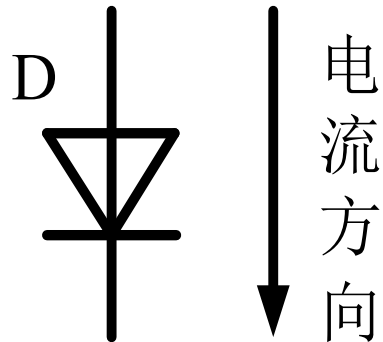
1. 半导体的电子空穴成对出现，且数量少；
2. 半导体中有电子和空穴两种载流子参与导电；
3. 半导体导电能力弱，并与温度有关。
4. 掺杂和高温都能使半导体导电能力提高。
5. PN结正向导通和反向截止特性

主要内容

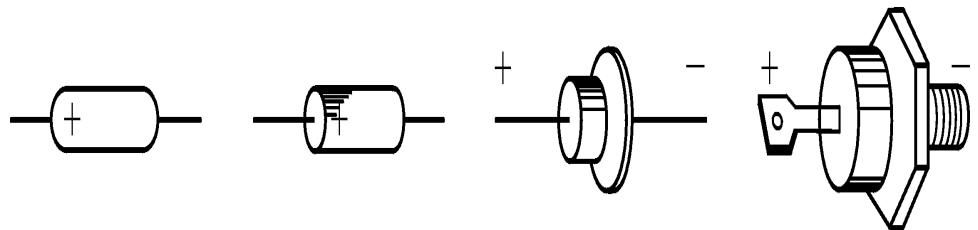
- 1.二极管的基本结构
- 2.二极管的伏安特性
- 3.二极管的主要参数
- 4.二极管基本电路模型
- 5.二极管分类

1.二极管的基本结构

- 二极管的基本结构就是一个PN结，二极管的所有特性都取决于PN结的特性，其电路符号和外形如下图所示。



(a)
二极管的电路符号



(b)
二极管的外形

1.二极管的基本结构

- 二极管根据结构，分为
 - 点接触型（图a）：结面积小，工作电流低，高频特性好
 - 面接触型（图b, c）：PN结接触面积大，工作电流大，适用于低频大电流工作

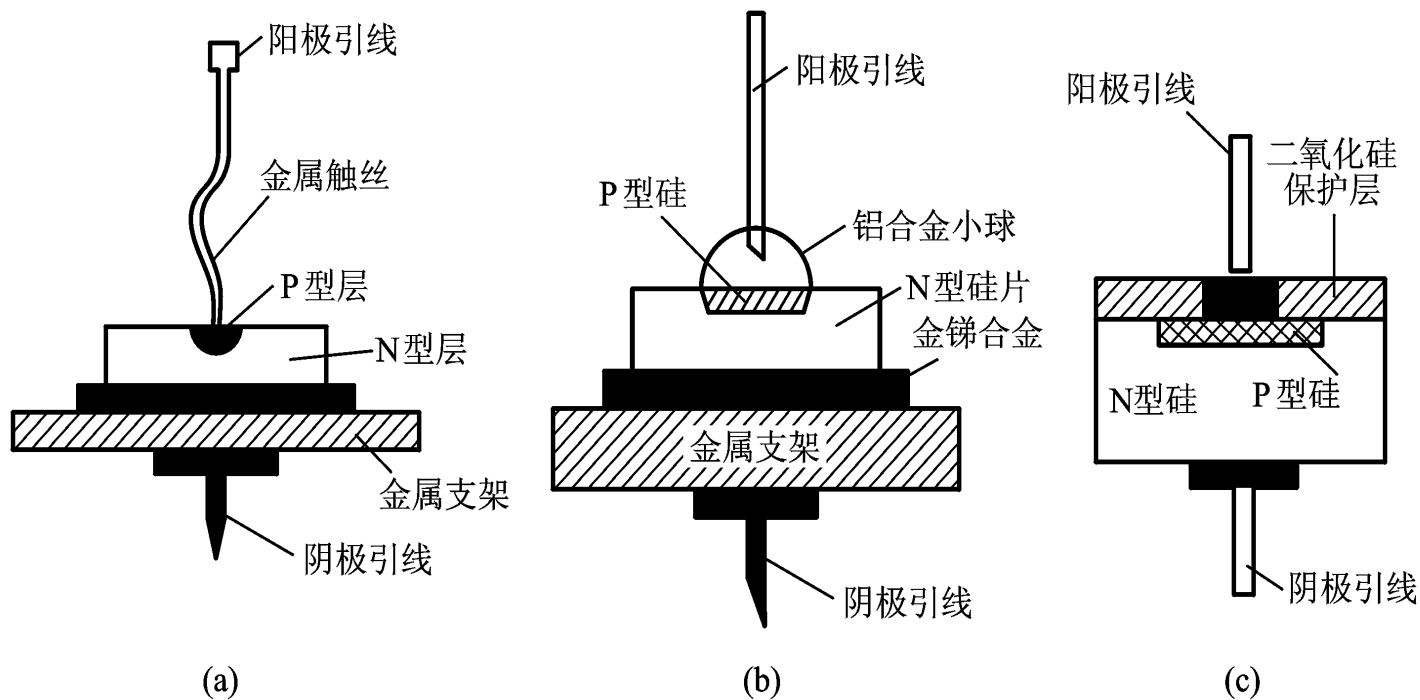


图5-2-2 二极管结构示意图

2.二极管的伏安特性

正向特性：二极管外加正向偏置电压时的伏安特性，如图所示

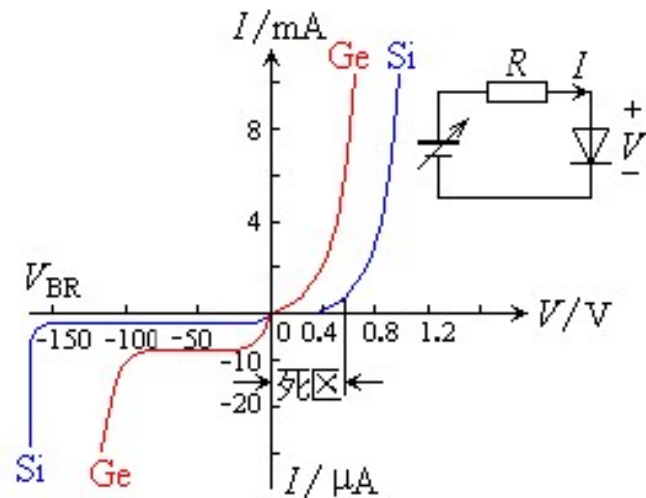
死区：正向特性的起始电流几乎为零

死区电压：硅管0.5V，锗管0.1V

正向导通电压：硅管0.6-0.7V，锗管0.2-0.3V

反向特性：外加反向偏置电压时的伏安特性，如图所示

反向饱和电流：外加反向偏置电压不超过一定范围时，通过二极管的是少数载流子漂移运动所形成的很小反向电流，几乎不受反向偏置电压的影响。受温度影响很大



硅/锗二极管伏安特性曲线

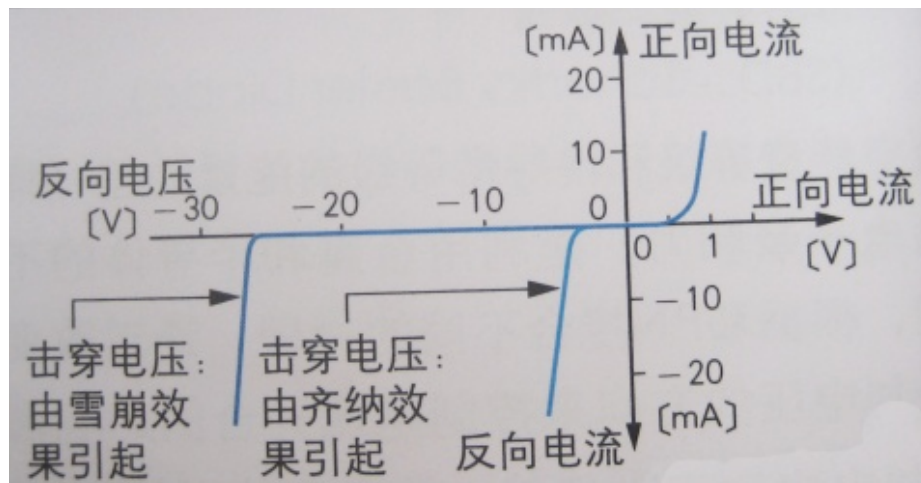
二极管的伏安特性方程为：

$$i_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1)$$

其中， I_S 为反向饱和电流

$U_T = 26mV$ 为温度电压当量

击穿特性



击穿特性：{ 电击穿 { 雪崩击穿（为主）
齐纳击穿（稳压）
热击穿

3.二极管的主要参数

- **最大整流电流 I_{OM}** ：二极管长期工作时，允许通过的最大正向平均电流。PN结的面积越大，最大整流电流也越大。
- **最大反向偏置电压 U_{RM}** ：保证二极管不被击穿而允许的最高反向电压，约为击穿电压的一半。点接触二极管约为数十伏，面接触二极管可达数百伏。
- **最大反向电流 I_{RM}** ：二极管加上最大反向偏置电压时的反向电流。反向电流越大，说明二极管的单向导电性越差，且受温度影响也越大。硅管的反向电流很小，一般在几个微安以下。锗管的反向电流较大，一般在几十到几百个微安之间。
- **最高工作频率 f_M** ：二极管具有单向导电性的最高工作频率。由于PN结有电容效应，频率过高，单向性变差。点接触二极管PN结面积小，结电容小，适合工作在高频；面接触二极管适合工作在低频、大电流环境中。

4.二极管基本电路模型

- 二极管是无源器件，其作用相当于一个非线性电阻。
- 二极管的单向导电性决定了其具有整流（rectify）功能。利用这个特性可实现电源变换、信号检波、过电压保护和信号隔离的功能，电路如图5-2-4所示。

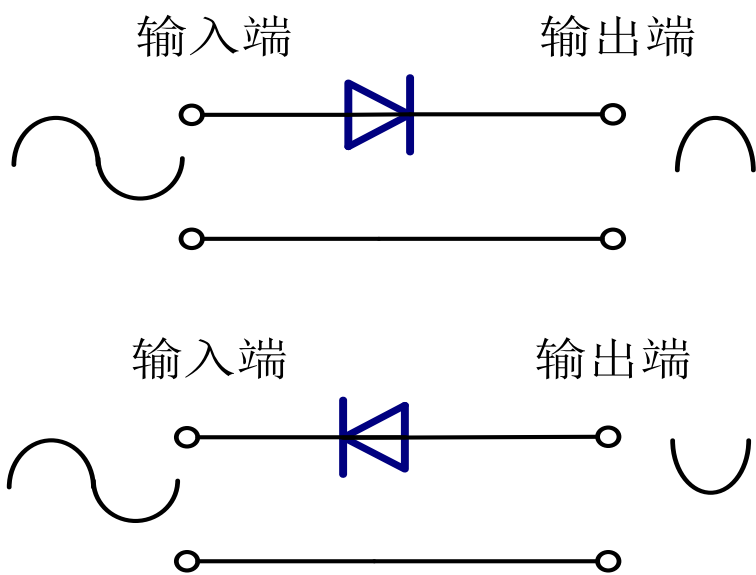
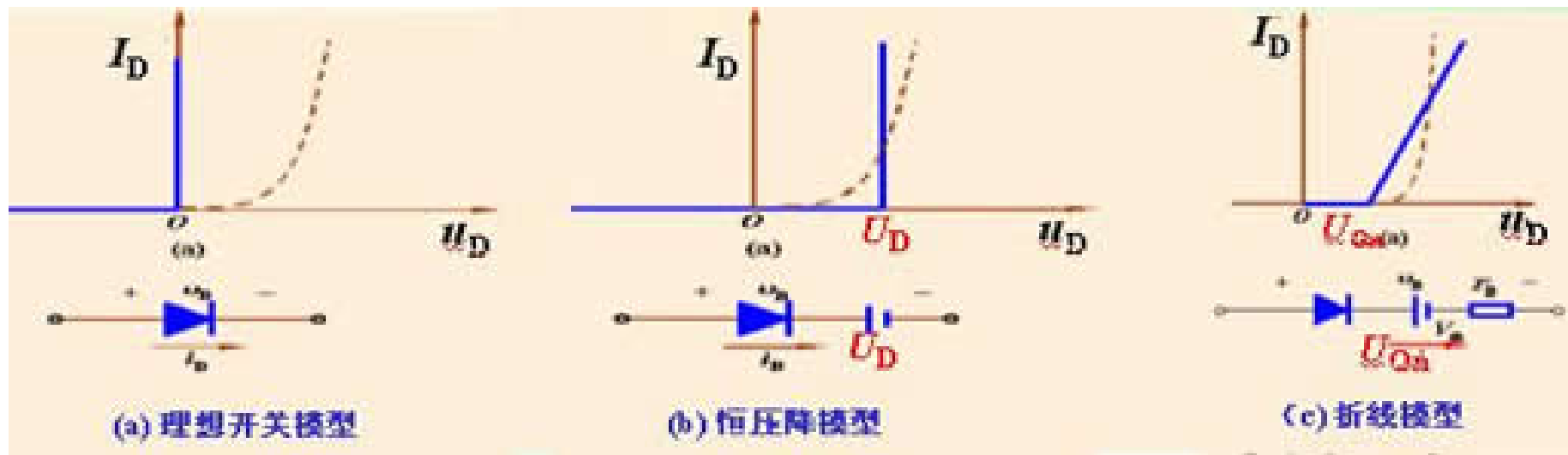


图5-2-4 二极管的整流作用

- 二极管理想化模型：正向导通电压为零。
- 恒压降模型：将正向导通电压考虑在内的二极管电路模型。硅管0.6-0.7V；锗管0.2-0.3V

二极管的直流模型

- 1) 理想开关模型
- 2) 恒压降模型
- 3) 折线模型



例题5-2

用Multisim仿真图5-2-5电路，观察输入输出信号之间的关系和变化，说明变化原因。仿真中设

$$C_1 = 470\mu F, C_2 = 1\mu F, R_1 = 1k\Omega$$

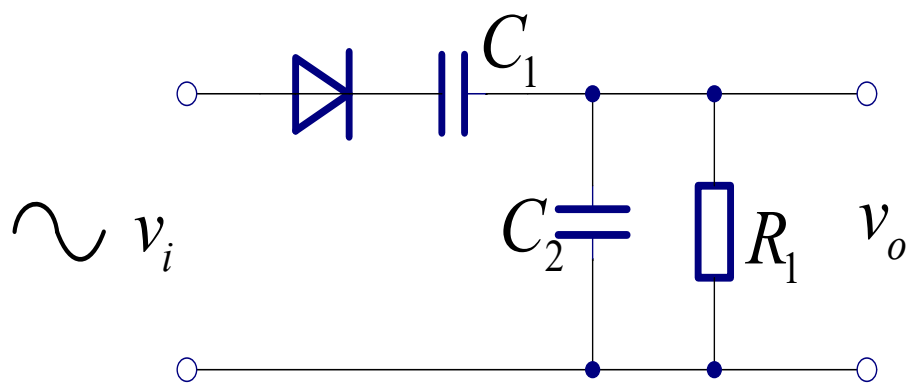
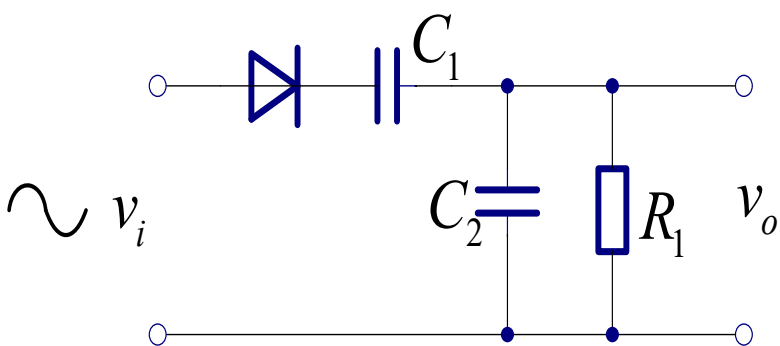


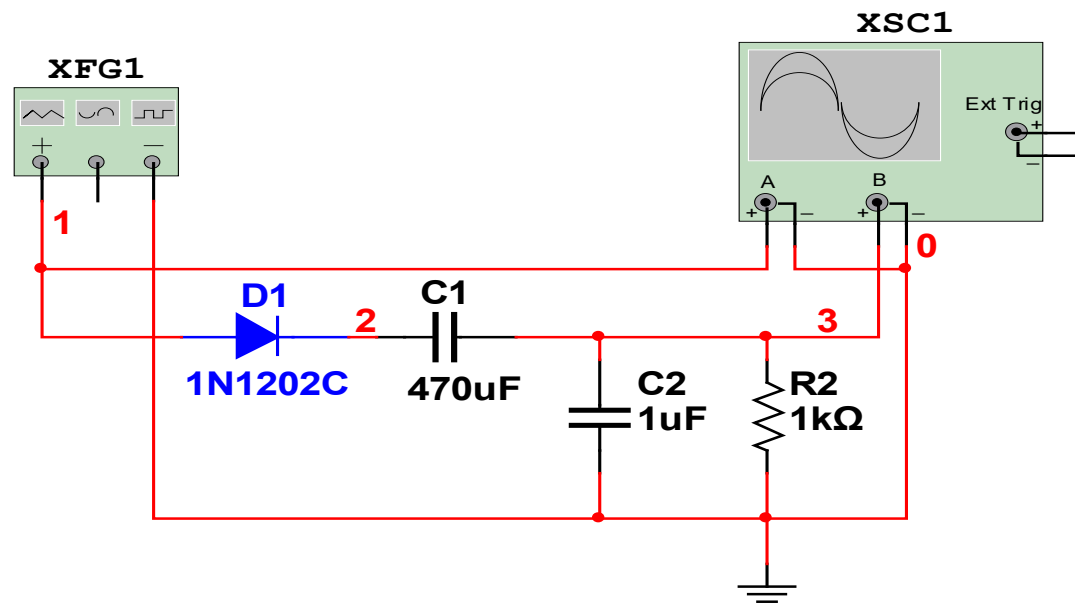
图5-2-5 一个二极管电路

解：

在Multisim中按照图5-2-5连接电路，如图5-2-6（a）所示，其中二极管选用1N1202C。输入正弦交流信号采用信号发生器输出的正弦交流信号，其频率为20 Hz，振幅为3 V。用示波器观察输入和输出信号。



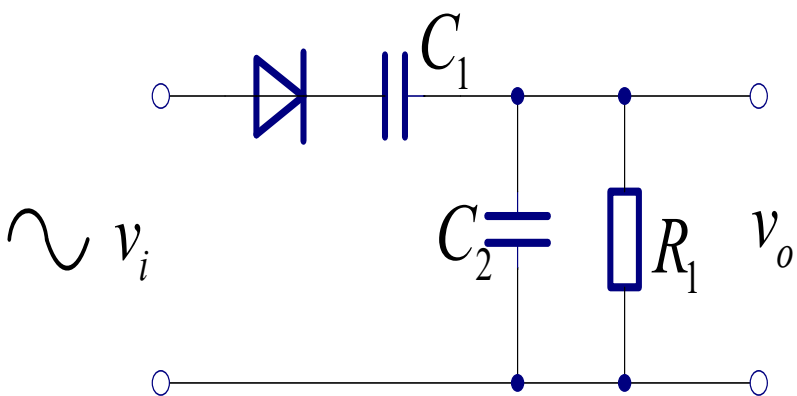
二极管电路



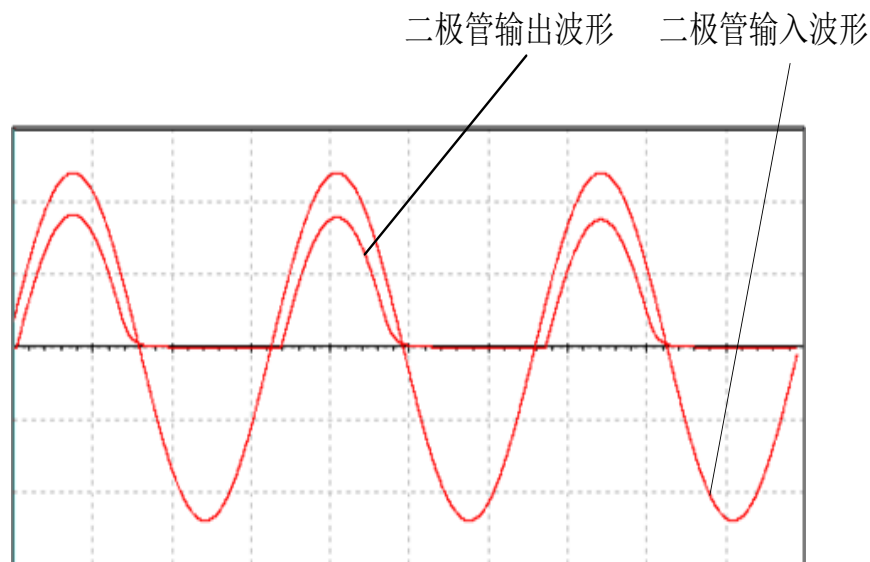
Multisim中的仿真实验电路

解续

从示波器观察到的信号可以看出，输入信号是完整的正弦波，输出信号则是幅度比输入信号低、频率相同的半波（没有正弦波的负半周）。这说明了二极管的单向导电特性。



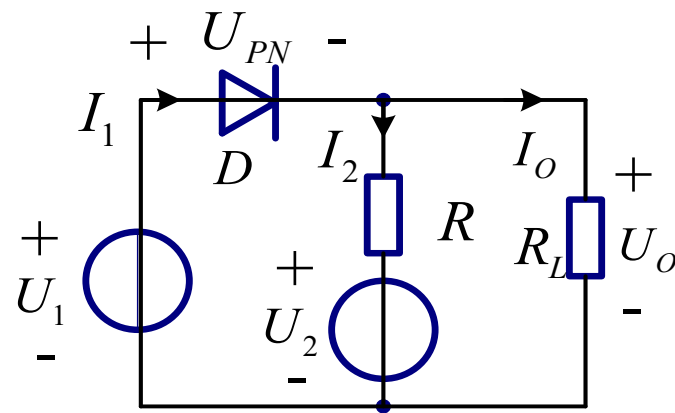
二极管电路



Multisim仿真实验结果

例5-3

试求如图硅二极管电路中电流 I_1 、 I_2 、 I_o 和输出电压 U_o 值。电路中 $R=1k\Omega$ 、 $R_L=3k\Omega$ 、 $U_1=15V$ 、 $U_2=12V$ 。



解： 假设二极管断开，则有 R_L 端电压 U_N ：

$$U_N = \frac{R_L}{R_L + R} \times U_2 = \frac{3}{3+1} \times 12V = 9V$$

由此可知二极管的端电压 $U_{PN} > 0.7V$ ，二极管导通，可以等效为 $0.7V$ 的恒压源

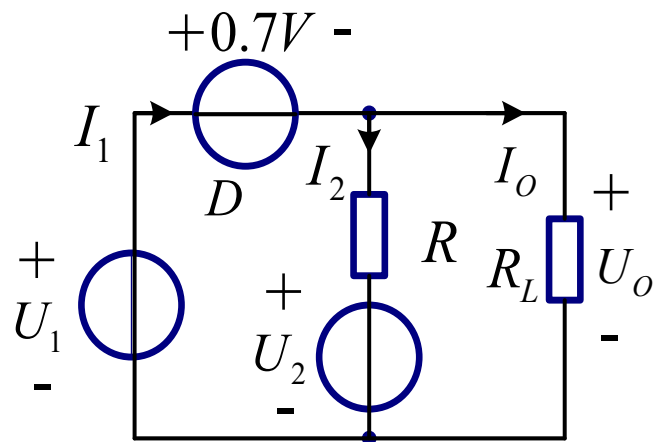
解续

$$U_O = U_1 - U_{PN} = 15 - 0.7 = 14.3V$$

$$I_O = \frac{U_O}{R_L} = \frac{14.3}{3} = 4.8mA$$

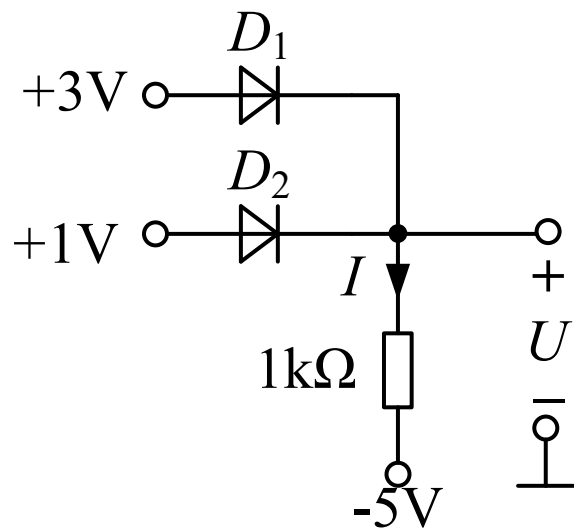
$$I_2 = \frac{U_O - U_2}{R} = \frac{14.3 - 12}{1} = 2.3mA$$

$$I_1 = I_O + I_2 = 4.8 + 2.3 = 7.1mA$$



等效电路

计算 U 和 I



如图 5 所示电路，设两个二极管的正向压降均为 0.6V ，分析二极管 $D1$ 和 $D2$ 工作在导通还是截止状态，并计算电压 U_o 。

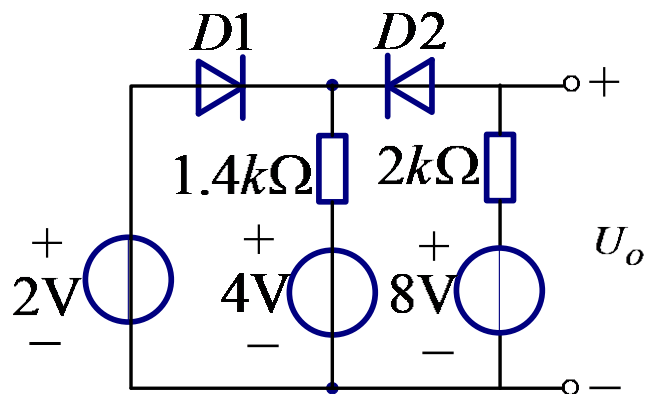


图 5

假设二极管 $D1$ 和 $D2$ 断开，判断得到：

$D1$ 截至；（2 分）

$D2$ 导通；（2 分）

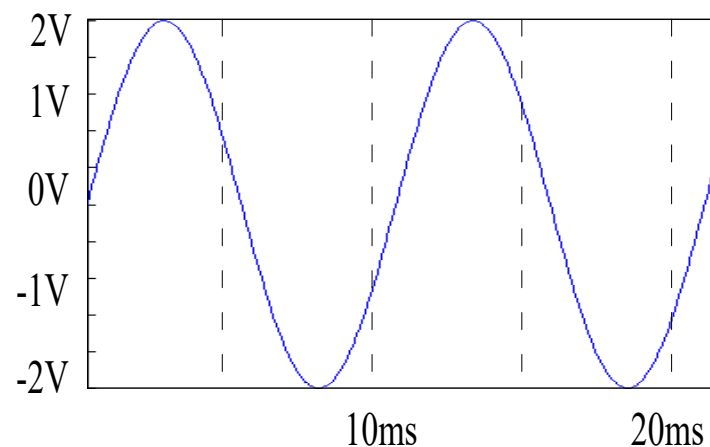
$$U_o = 8 - 2 \times \frac{8 - 4 - 0.6}{2 + 1.4} = 6\text{V} \quad (2 \text{ 分})$$

例5-4

某电路的交流信号为正弦波，峰峰值为4V，偏置电压为0V，频率为100Hz。电路的电源电源（二极管可能遇到的最大反向电压）为16V，电路要求经过二极管的信号幅度损失不大于0.7V。试画出此正弦波的波形图，并确定选择二极管时主要参数的选择范围。

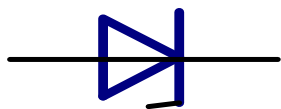
解：根据题意要求，选择二极管时应当参考以下参数：

- ① 最大反向击穿电压大于16V
- ② 工作频率高于100Hz
- ③ PN结压降小于0.7V
- ④ 正弦波形右图所示。



5.二极管的分类

- ① 通用二极管 (General purpose diode)
- ② 高频二极管 (High frequency diode)
- ③ 稳压二极管 (齐纳二极管 Zener diode)

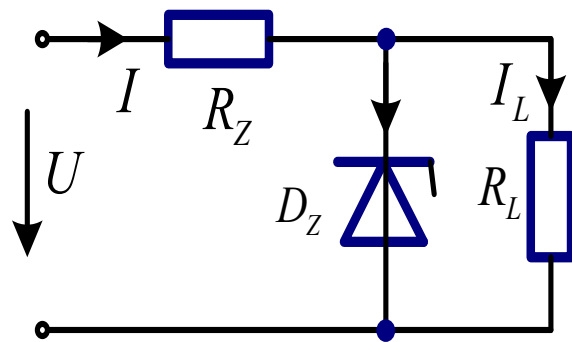


稳压二极管的电路符号

- 稳压二极管工作在击穿区。由于齐纳击穿效应，在维持一定的电流条件下，二极管的反向偏置电压会稳定在一个固定数值上，当反向偏置电压撤销后，能恢复原来状态。
- 主要用于电压限制和调整，也可以作为电路的过电压保护器件

例5-5

图示稳压电路，电源电压 $U=12V$ ，稳压管的稳定电压为 $U_Z=6V$ ，最大稳定电流 $I_{Z_{\max}}=18mA$ ， $R_Z=1k\Omega$ ， $R_L=5k\Omega$ 。试求 I_L ， I_Z 的值，并分析电压稳定过程。



解：先判断稳压管的工作情况，断开稳压管 D_Z ，则支路 R_L 上的电压为

$$U_{RL} = \frac{U}{R_Z + R_L} \times R_L = \frac{12}{5+1} \times 5 = 10V$$

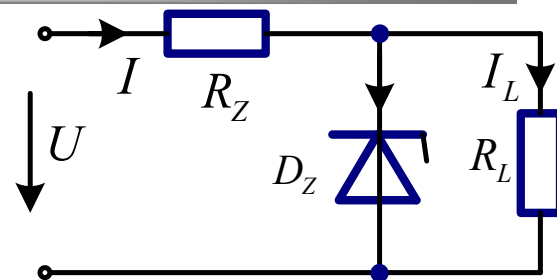
因为 $U_{RL} > U_Z$ ，说明稳压管被击穿，因此电阻 R_L 两端的电压被限制在 $6V$ 。则

$$I_L = \frac{U_Z}{R_L} = \frac{6}{5} = 1.2mA$$

$$I = \frac{U - U_Z}{R_Z} = \frac{12 - 6}{1} = 6mA$$

于是

$$I_Z = I - I_L = 6 - 1.2 = 4.8 \text{mA}$$



由于 $I_Z < I_{Z\max}$ ，稳压管处在正常工作状态。

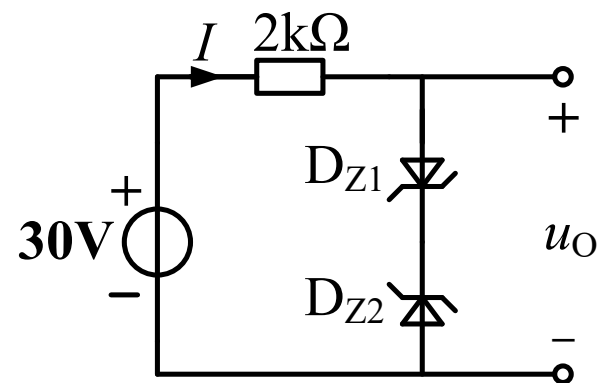
稳压管稳压过程如下：

$$U \uparrow \rightarrow U_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow U_{RZ} \uparrow \rightarrow U_Z \downarrow$$

当电源电压下降时，上述过程相反。

上述分析表明，稳压管的稳压作用是通过限流电阻 R_Z 的电流调节作用实现的。

电路如图 9 所示，稳压管 D_{Z1} 与 D_{Z2} 的稳压值分别 6V 和 9V，稳定电流是 5mA，正向压降为 0.7V，求电压 u_O 及电流 I



5.二极管的分类

④ 功率二极管 (Power diode)

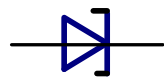
- 允许通过大电流，对电源系统实现整流。由于需要通过大电流，所以功率二极管的结面积比较大，因此不适合于高频条件下使用。

⑤ 肖特基二极管 (Schottky diode)

- 利用金属与半导体接触所形成的势垒来对电流进行控制。特点：具有较低的正向压降（0.3 V至0.6 V）；多数载流子参与导电，有更快的反应速度。

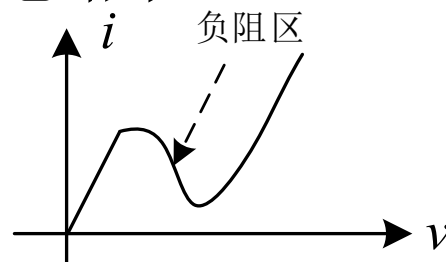
⑥ 隧道二极管 (Tunnel diode)

- 隧道二极管比齐纳二极管具有更大的电压降，可以实现快速击穿。从 $V-A$ 特性可以看出，隧道二极管具有一段负电阻区，可用在高频电路中。



电路符号

隧道二极管的电路符号



$V-A$ 特性

二极管等效

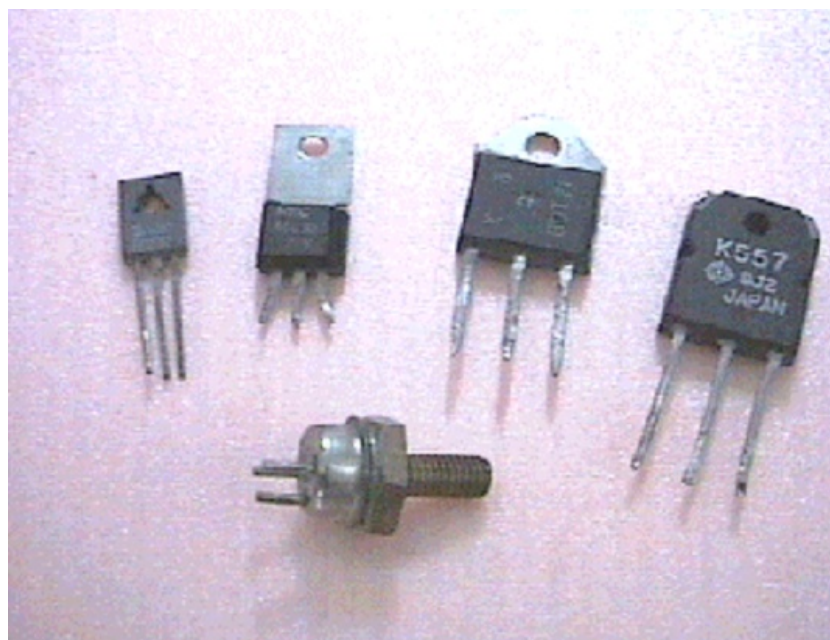
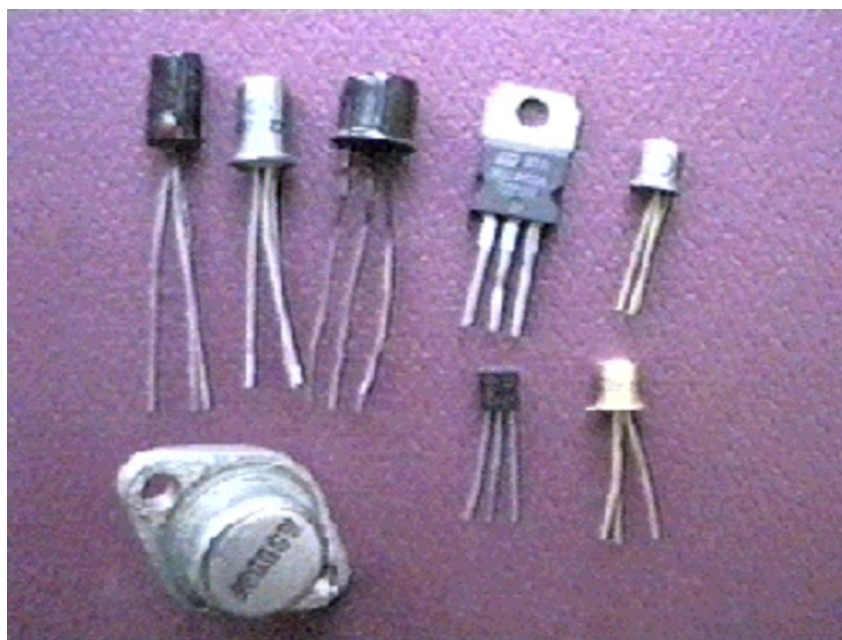
- 一阶等效到三阶等效
- 二极管故障
 - 正反向电阻都很大或很小
- 正向直流电阻随着电流增大而减小
 - 反向直流电阻接近击穿电压时减小
- 手册

5-3 双极型晶体三极管

主要内容：

1. 三极管工作原理
2. 三极管的特性曲线
3. 三极管基本参数
4. 三极管分类
5. 三极管的低频小信号电路模型

双极型晶体管简称晶体管或三极管，是对信号具有放大作用的三端半导体器件，广泛应用与各种电子电路中。



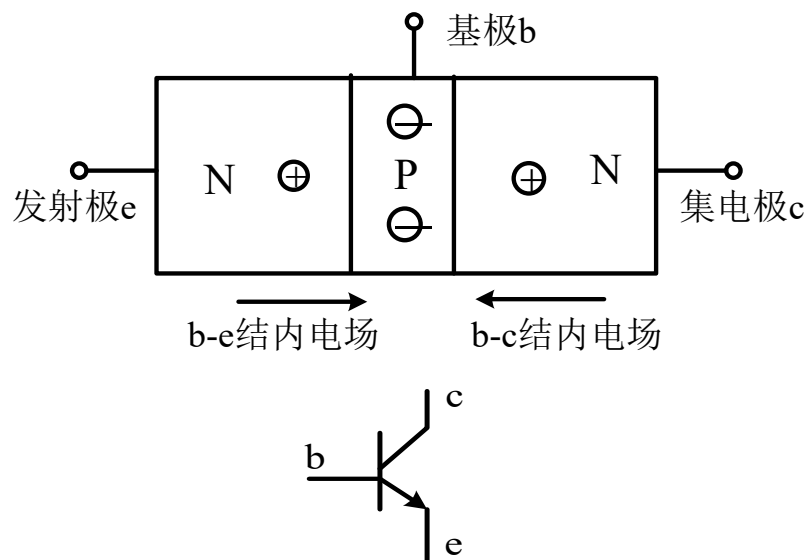
5-3-1 三极管的工作原理

三极管是由两个背靠背的**PN**结组成，有三个电极：基极**b**、集电极**c**和发射极**e**
三极管是通过两种载流子（空穴和电子）导电的，所以叫双极型晶体三极管

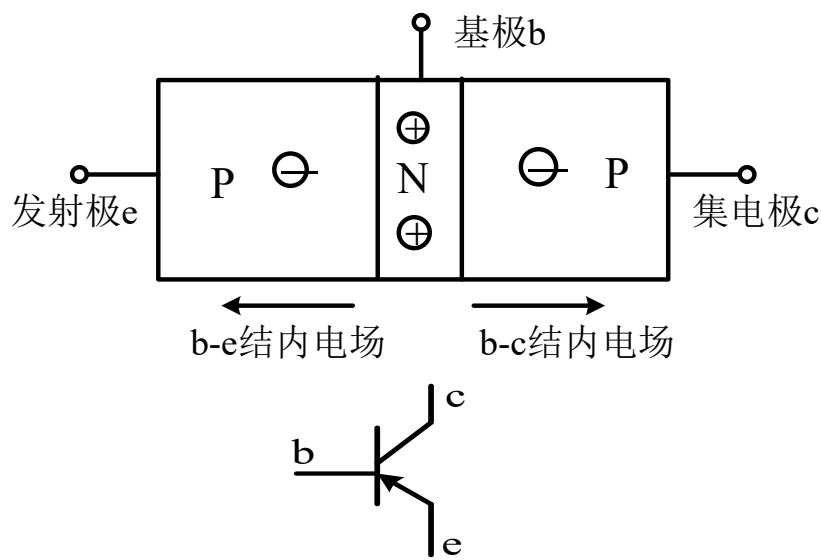
三极管的主要类型 (1) 根据结构分为：NPN型和PNP型

(2) 根据使用的半导体材料分为：硅管和锗管

硅管多为NPN型晶体管，NPN型晶体管最常用

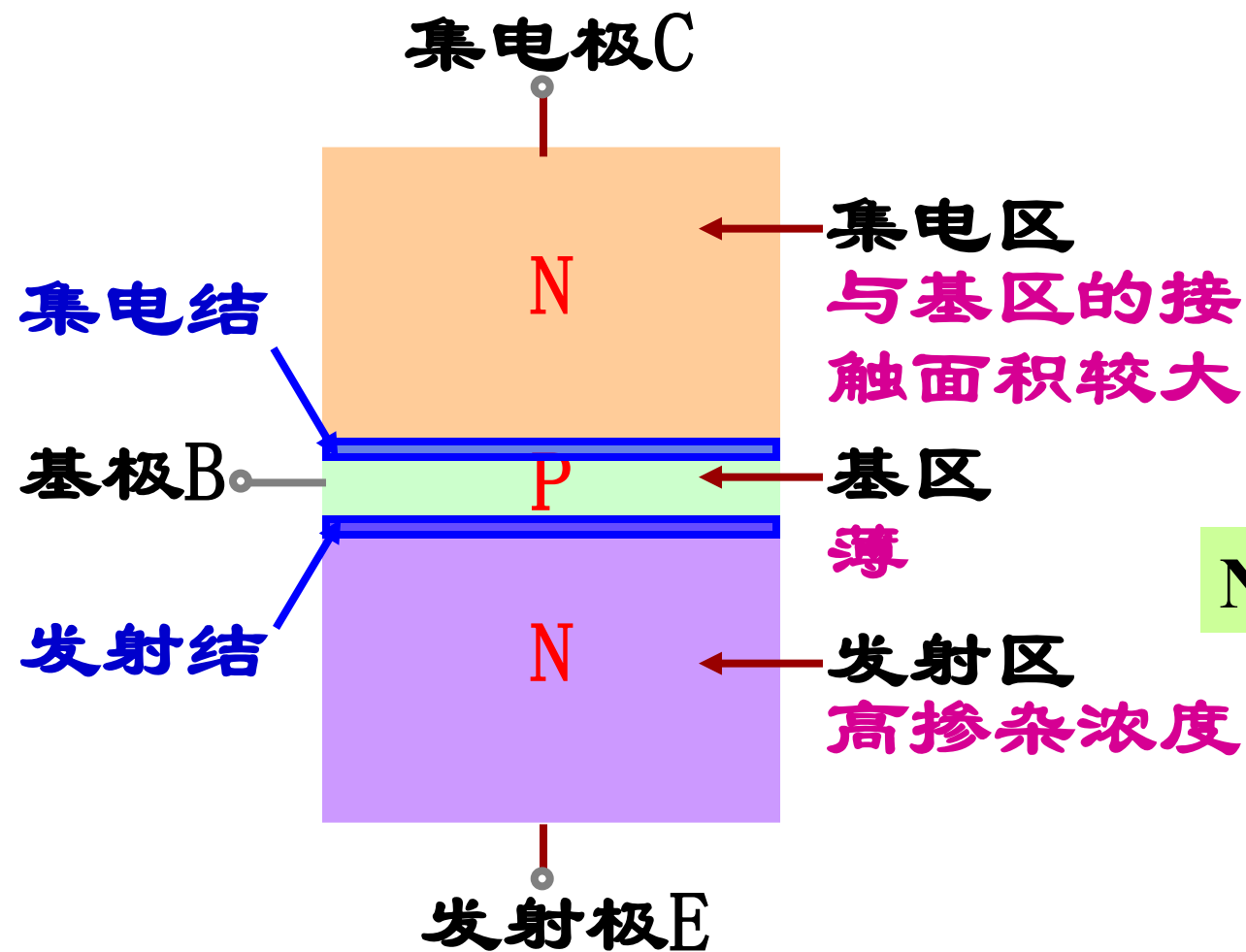


NPN型三极管结构示意图与电路符号

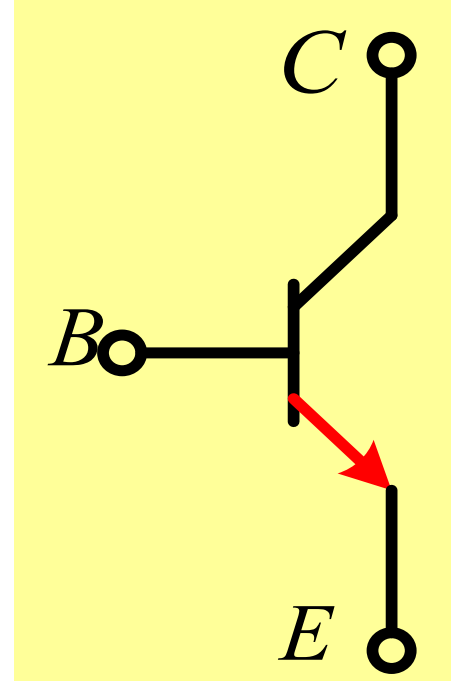


PNP型三极管结构示意图与电路符号

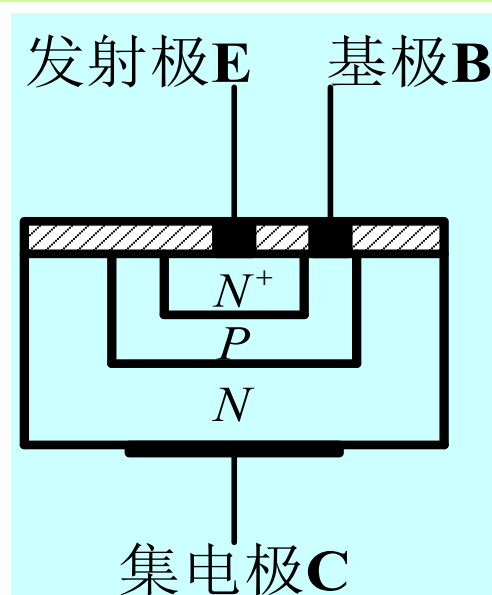
一. 结构特点



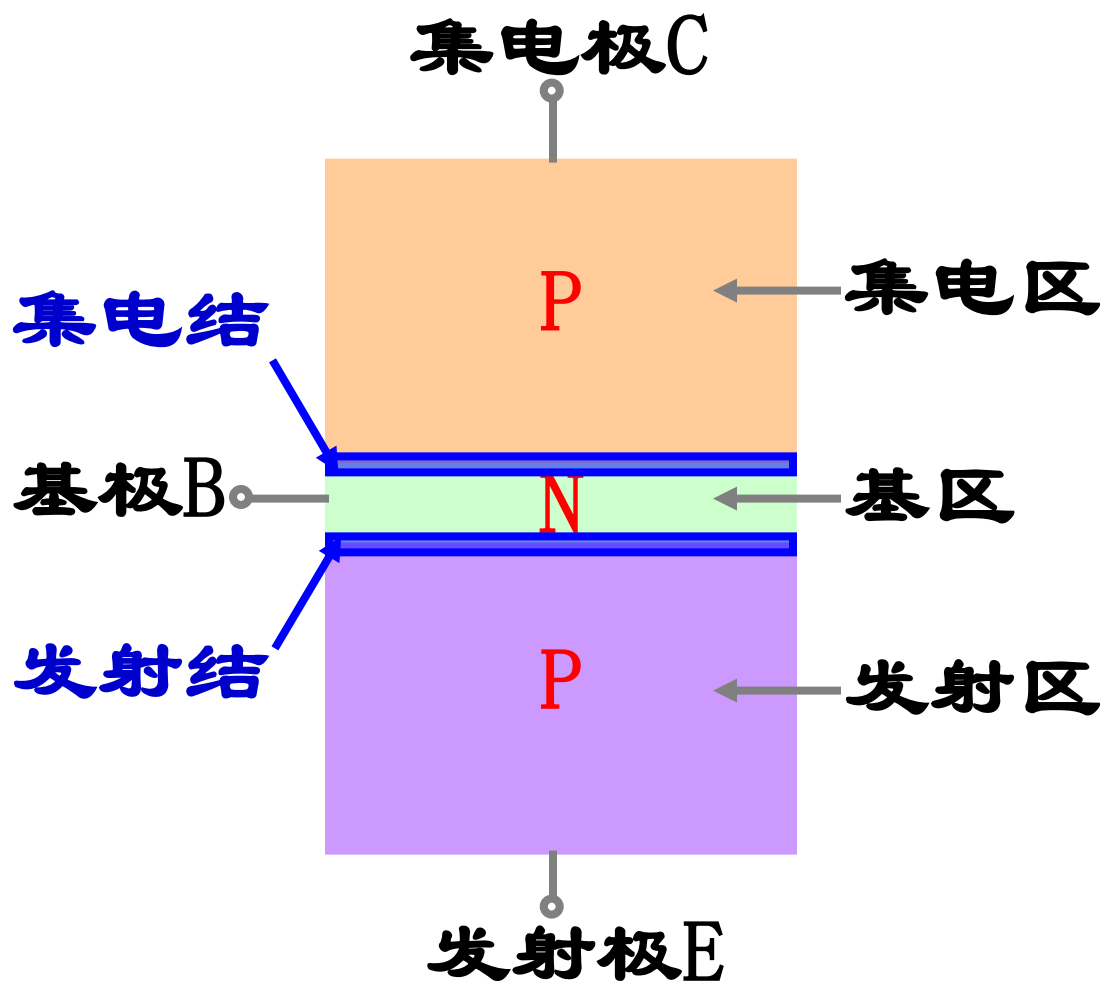
NPN型三极管的结构



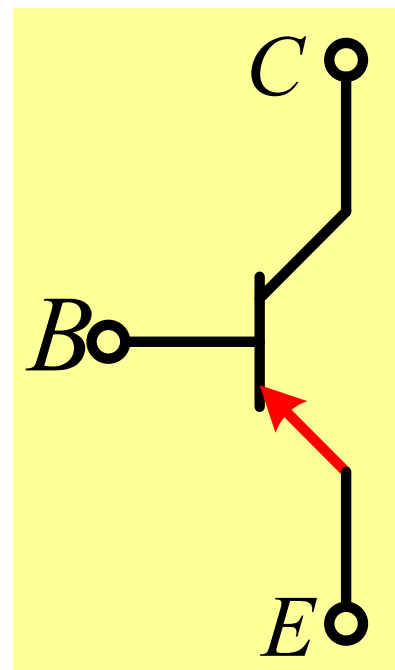
NPN管的电路符号



一. 结构特点



PNP型三极管的结构

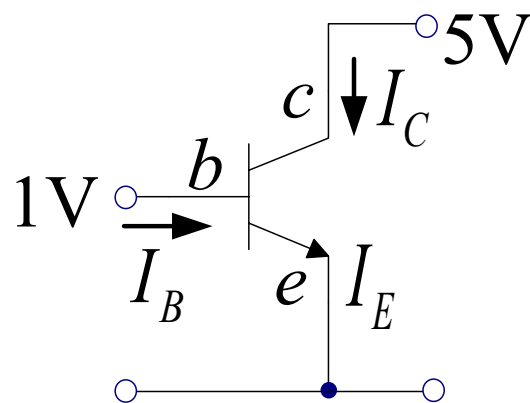
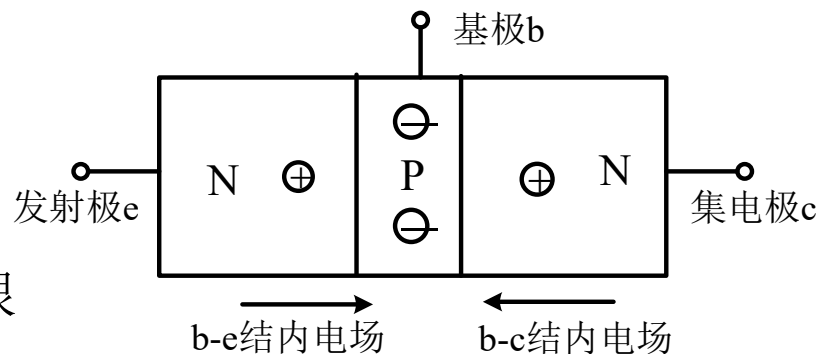


PNP管的电路符号

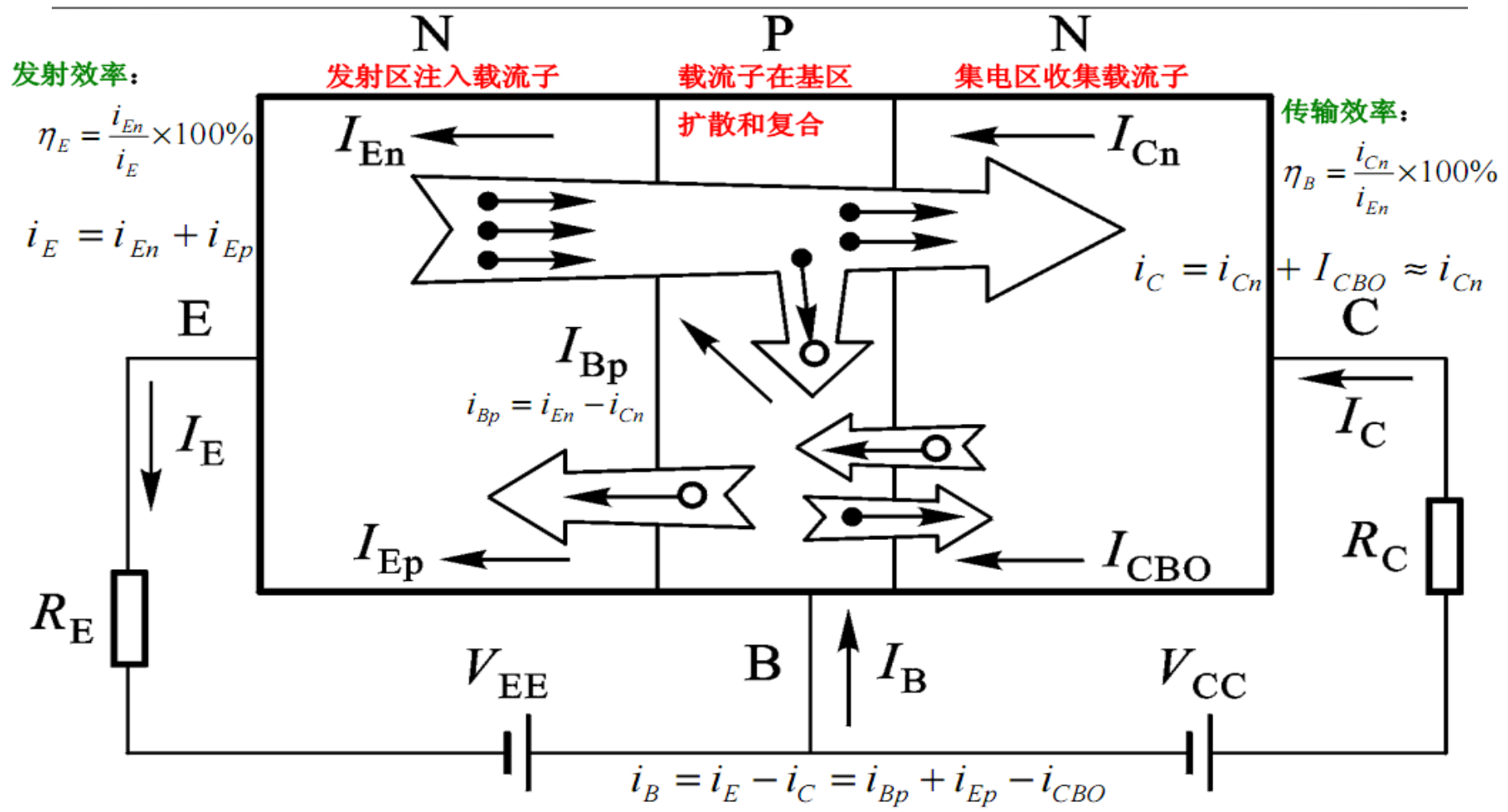
5-3-1 三极管的工作原理

以NPN型三极管为例

- 对**b-e**结施加正向偏置电压，**b-e**结导通，产生由**e**向**b**的电子流。发射区不断从电源得到电子，形成发射极电流 I_E 。
- 对**c-b**结设置成反向偏置，集电极就具有很强的电子吸收能力。
- 由于基区很薄，由发射区到达基区的电子小部分被基极空穴复合，电源向基区提供空穴，形成基极电流 I_B 。
- 大部分电子会在集电极电场吸引下跃过基区进入集电极 I_C 。由于所收集的电子数大于进入基极的电子数，因此集电极电流大于基极电流。
- 在一定范围内，集电极电流与基极电流保持了比较固定的比例关系，即三极管的基极电流控制了集电极电流。



二. 晶体管的四种工作状态（放大状态的讨论）



三极管内有两种载流子(自由电子和空穴)参与导电，故称为双极型三极管。或BJT (Bipolar Junction Transistor)。

5-3-2 双极性晶体管的特性曲线

2、输入特性曲线

以共射极连接方式组成的放大电路为例

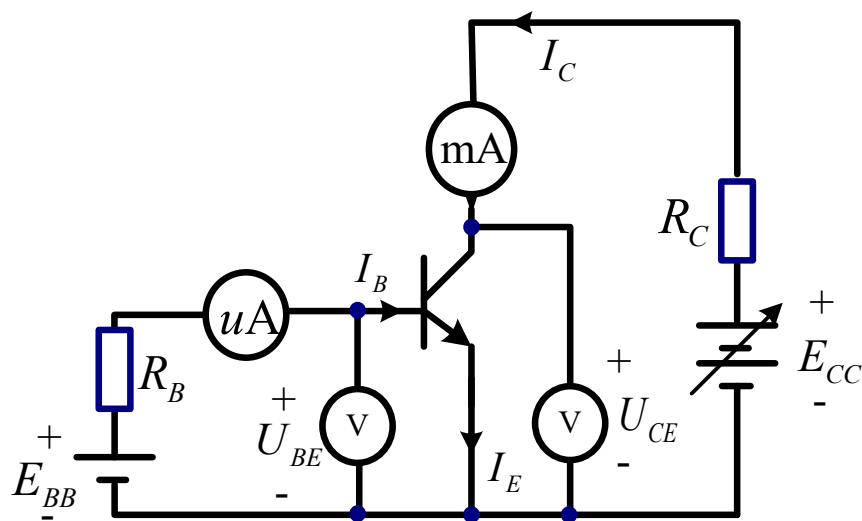


图 5-3-5 三极管共射极放大测试电路

$$I_B = f(U_{BE}) \mid U_{CE} = \text{常数}$$

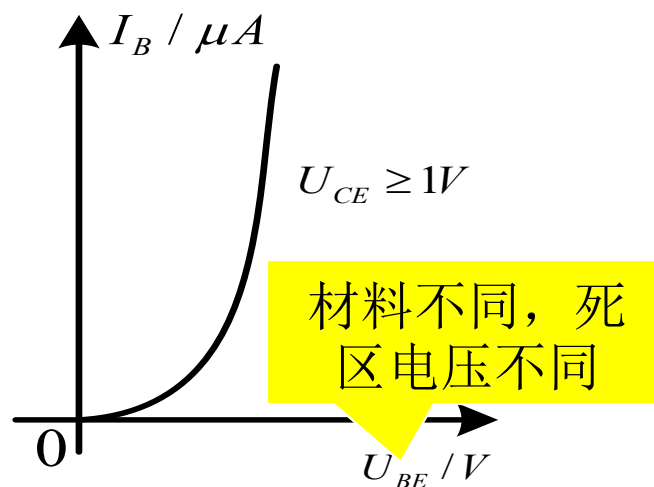
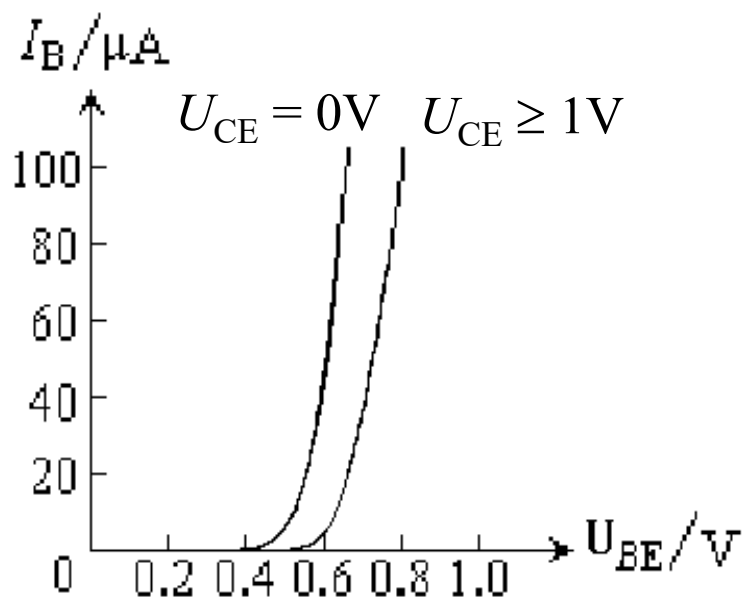


图 5-3-6 三极管输入特性曲线

(1) 当 $U_{CE}=0V$ 时，发射极与集电极短路，相当于并联的两个二极管正向特性曲线。

(2) 当 $U_{CE} \geq 1V$ 时， $U_{CB}=U_{CE}-U_{BE} > 0$ ，集电结已进入反偏状态，开始收集电子，基区复合减少，同样的 U_{BE} 下 I_B 减小，特性曲线右移。

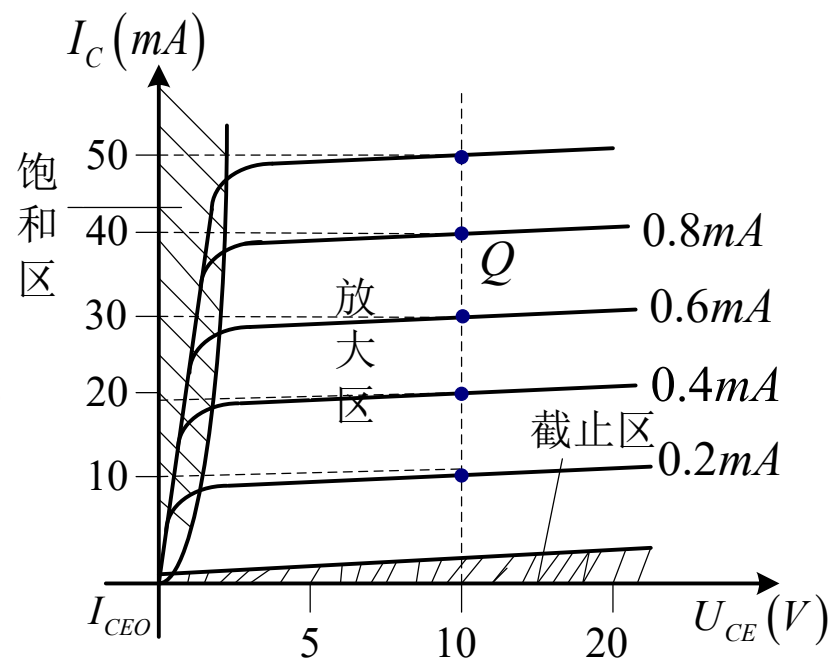


5-3-2 双极性晶体管的特性曲线

3、输出特性曲线 $I_C = g(U_{CE}) | I_B = \text{常数}$

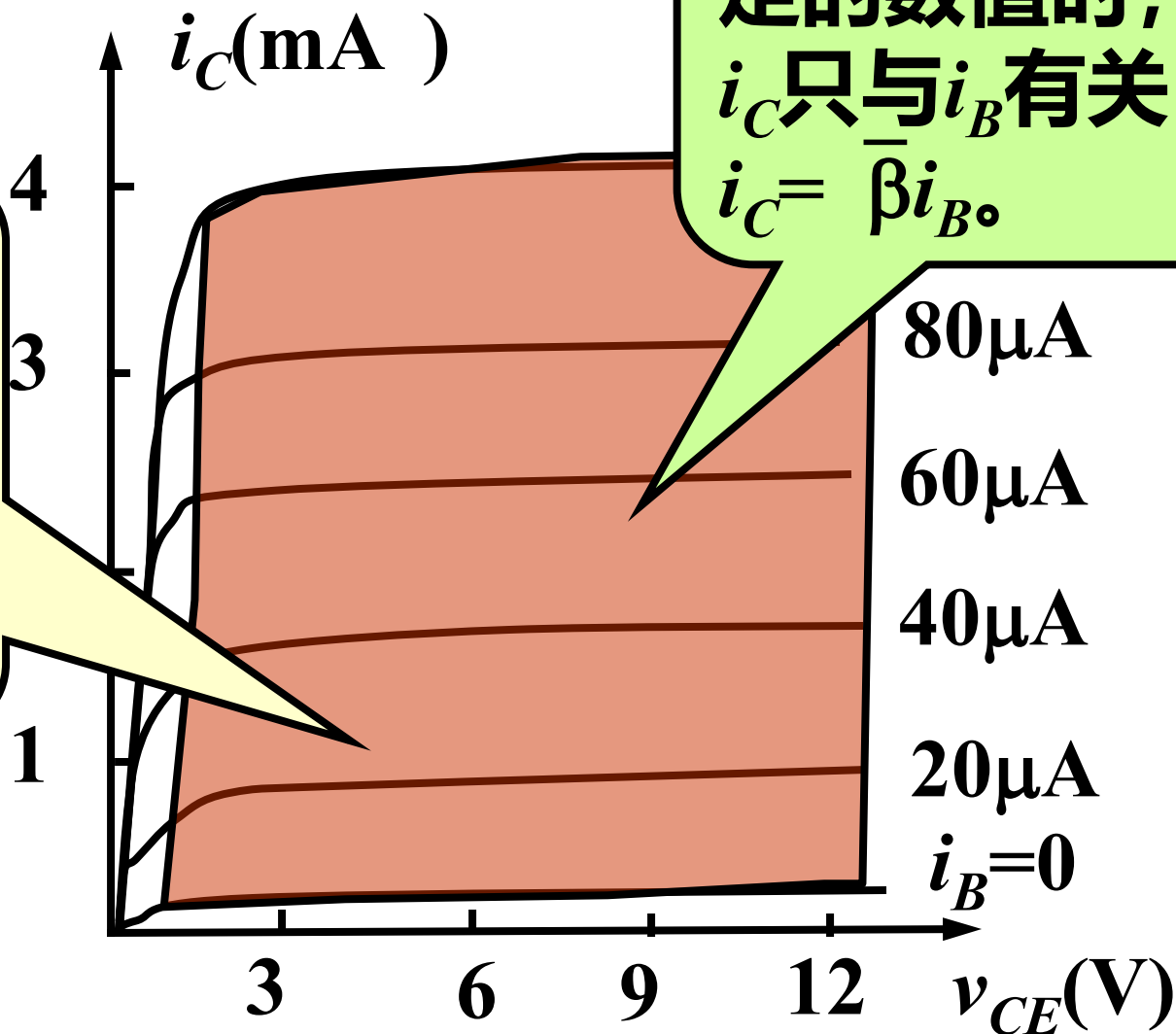
输出特性曲线的三个区域:

放大区: i_C 平行于 U_{CE} 轴的区域, 曲线基本平行等距。此时, 发射结正偏, 集电结反偏。



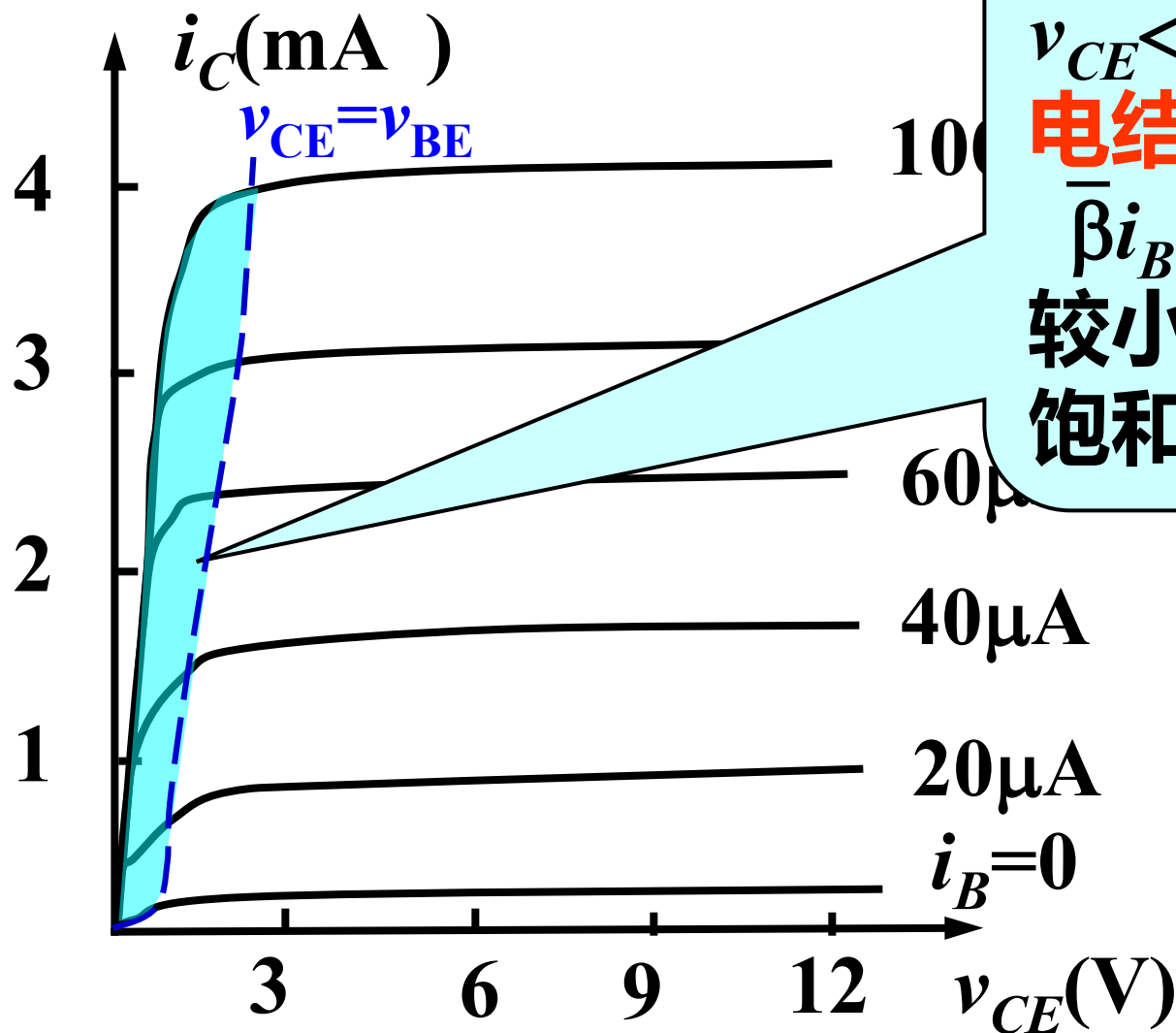
二. 共射输出特性曲线

此区域满足 $i_C = \bar{\beta} i_B$ 称为线性区（放大区）。



输出特性

二. 共射输出特性曲线

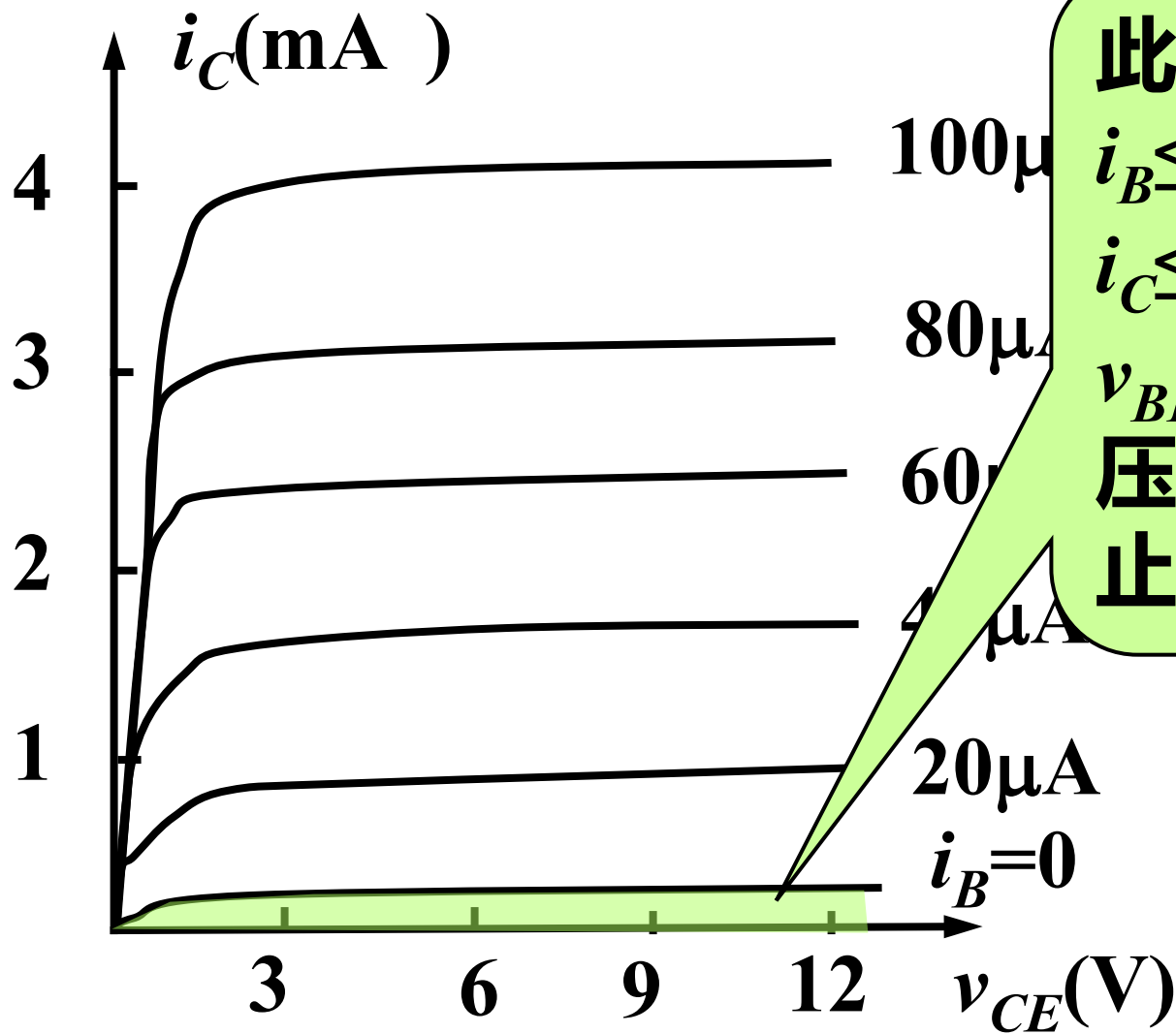


此区域中

$v_{CE} < v_{BE}$, **集电结正偏**,

$\beta i_B > i_C$, v_{CE} 较小, 称为饱和区。

二. 共射输出特性曲线



此区域中：

$$i_B \leq 0,$$

$$i_C \leq I_{CEO},$$

$v_{BE} < \text{死区电压}$, 称为截止区。

二. 共射输出特性曲线

输出特性三个工作区域的特点:

(1) 放大区: 发射结正偏, 集电结反偏。

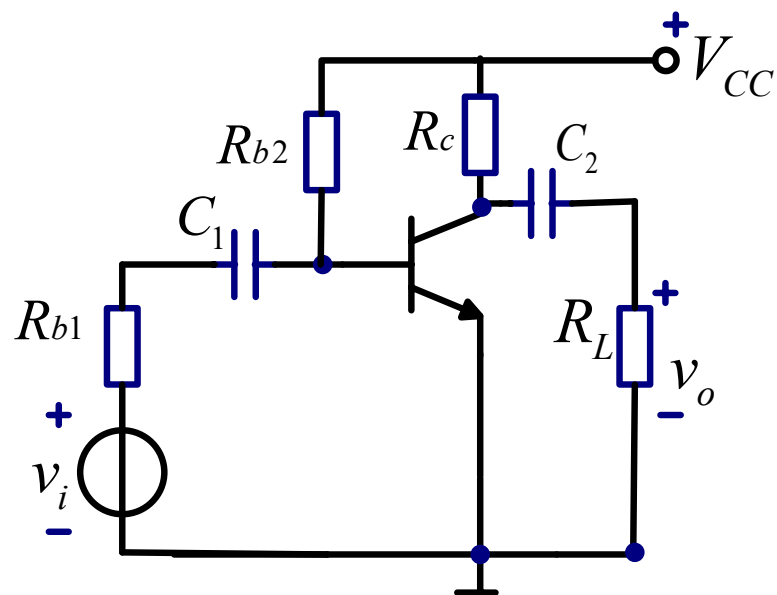
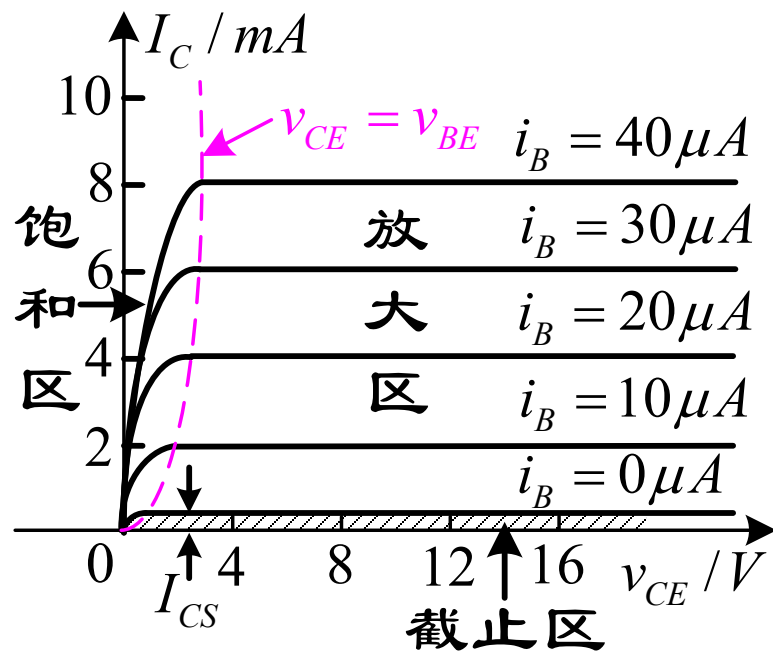
即: $i_C \approx \bar{\beta} i_B$, 且 $\Delta I_C = \beta \Delta I_B$

(2) 饱和区: 发射结正偏, 集电结正偏。

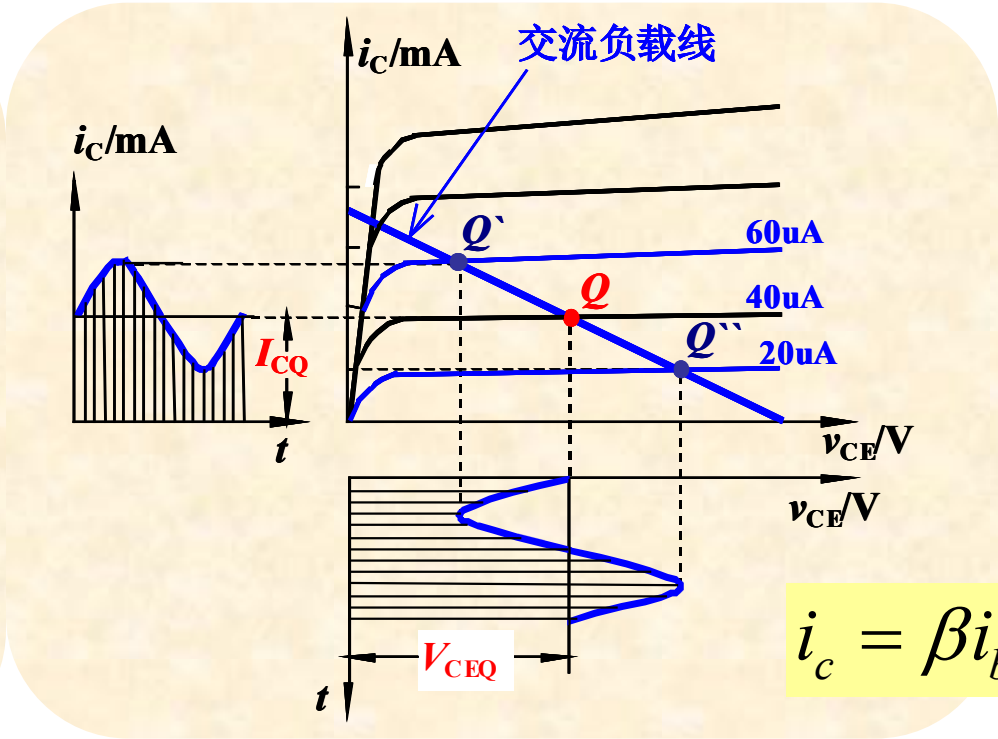
即: $v_{CE} < v_{BE}$, $\bar{\beta} i_B > i_C$, $v_{CE} \approx 0-0.3V$

(3) 截止区: $v_{BE} < \text{死区电压}$, $i_B \leq 0$, $i_C \leq I_{CEO} \approx 0$

二. 共射输出特性曲线



信託目的の範囲



$$i_c = \beta i_b$$

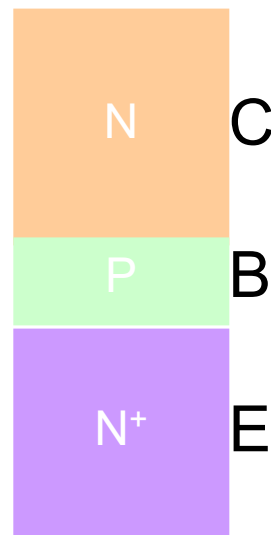
5-3-2 双极性晶体管的特性曲线

输出特性曲线几点认识

- 三极管工作在放大区时，若改变 I_B 的大小， I_C 的大小随着改变，对应曲线平坦部分上下移动。放大区体现了基极电流 I_B 对集电极电流 I_C 的控制作用。
- 三极管具有恒流特性，对应不同值的 I_B 的每一条输出特性曲线都经过原点，即 U_{CE} 等于零， I_C 也等于零。增大 U_{CE} ，开始时 I_C 迅速上升。当 U_{CE} 达到某个数值后，若再增大 U_{CE} ， I_C 也不会有明显的上升，对应于曲线的平坦部分，这时的 I_C 基本恒定，这就是三极管的恒流特性。
- 三极管电流放大作用能力的大小，反映在输出特性曲线平坦部分间隔的大小上。间隔大，即 ΔI_C 大，因而放大能力也大。

二. 晶体管的四种工作状态

晶体管的四种工作状态：两个PN结的状态决定晶体管的工作状态， V_{CC} 和 V_{EE} 看作外部条件示意



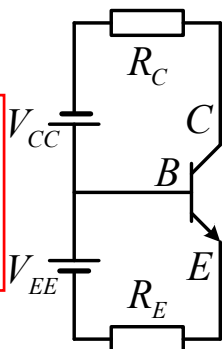
集电结
发射结

正偏（不要
求导通）

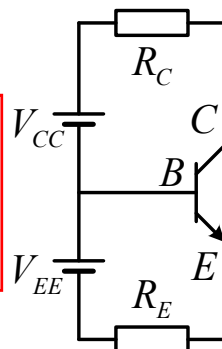
反偏

正偏（应处于导
通状态）

饱和



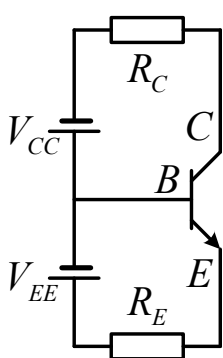
放大



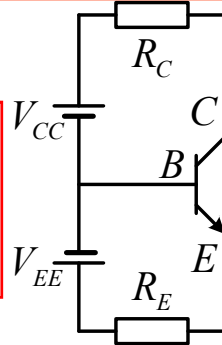
$$v_{BC} < 0$$
$$v_{BE} > 0$$

反偏

倒置



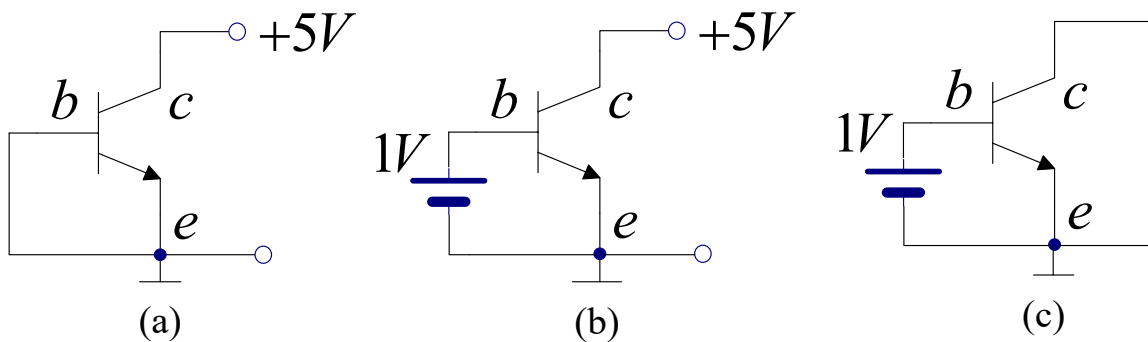
截止



if (PNP)?

例5-6

判别下图所示电路能否具有电流放大功能，说明原因。



解： (a) (c) 2个电路不能满足偏置条件，所以不具备电流放大能力（截止、饱和）。 (b) 电路满足偏置条件（ $1V$ 最好改成 $0.7V$ ），所以具有电流放大能力。

例题：工作状态判断

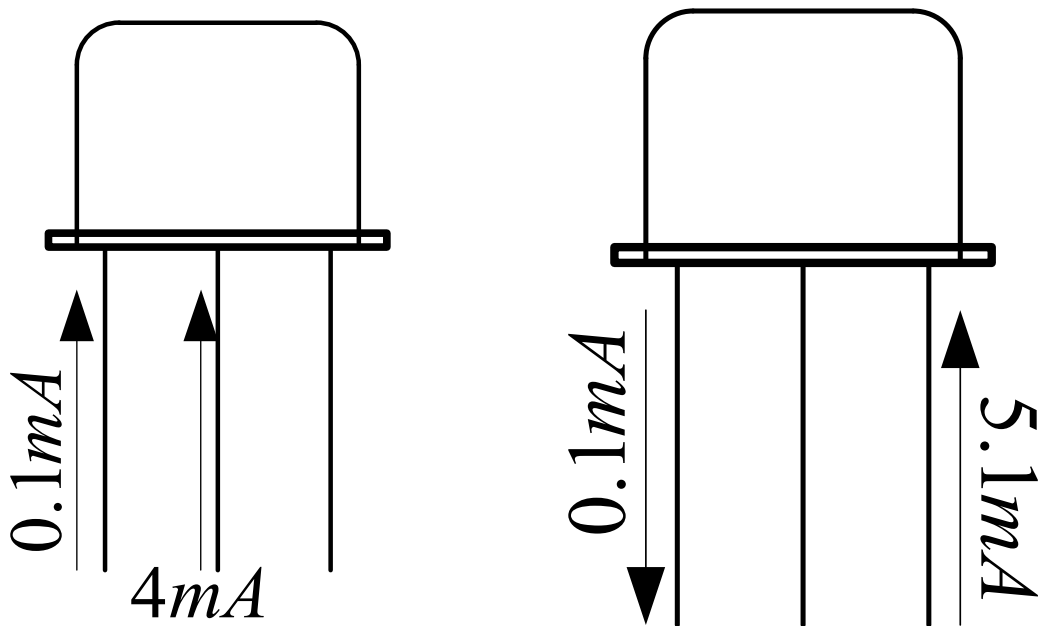
三只硅NPN晶体管的极间电压 V_{BE} 、 V_{CE} 如下表所示。试分析其工作状态(放大、截止或饱和)，填入表中

	V_{BE} / V	V_{CE} / V	V_{BC} / V	
	-6	5	-11	截止
	0.7	0.1	0.6	饱和
	0.7	5	-4.3	放大

例题：管脚判断

测得工作在放大状态下的两个晶体管的两个电极无交流信号输入时的电流大小及流向如下图所示。求：

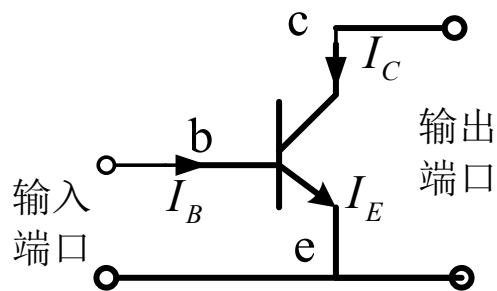
- 另一个电极电流，并标出实际方向
- 标出三个管脚各是什么管脚
- 判断它们各是NPN型还是PNP型，并估算其 $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$



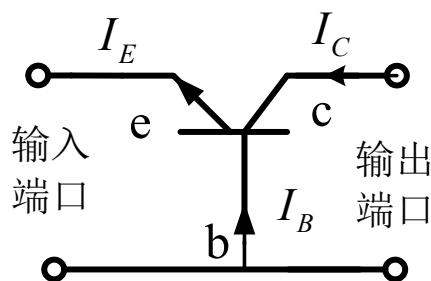
5-3-2 三极管的特性曲线

1、三极管的三种连接方式（交流组态）

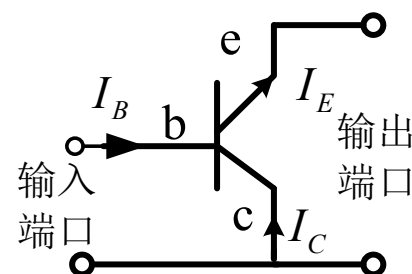
三极管有三个电极，其中一个作为输入端，一个作为输出端，另外一个电极是输入回路和输出回路的公共端。



(a)共发射极



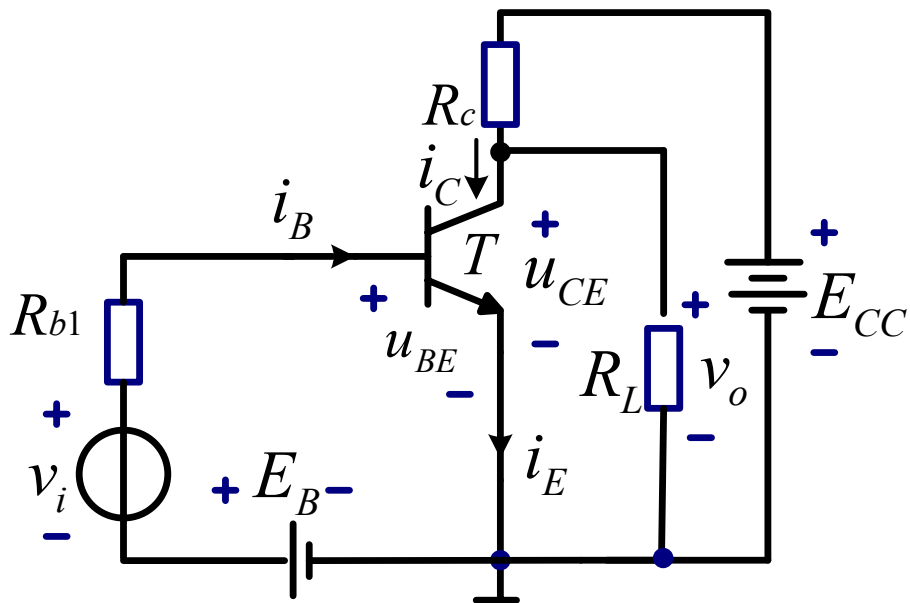
(b)共基极



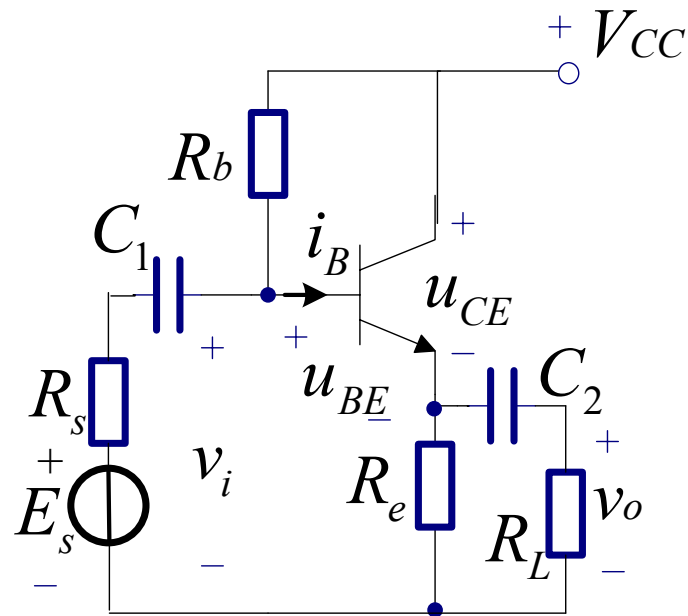
(c)共集电极

对于三极管在电路中无论采取何种连接方式，都可以看成是一个广义节点，满足基尔霍夫电流定律，即 $I_E = I_C + I_B$

三极管放大电路(放大工作状态+不同的（交流信号）组态)

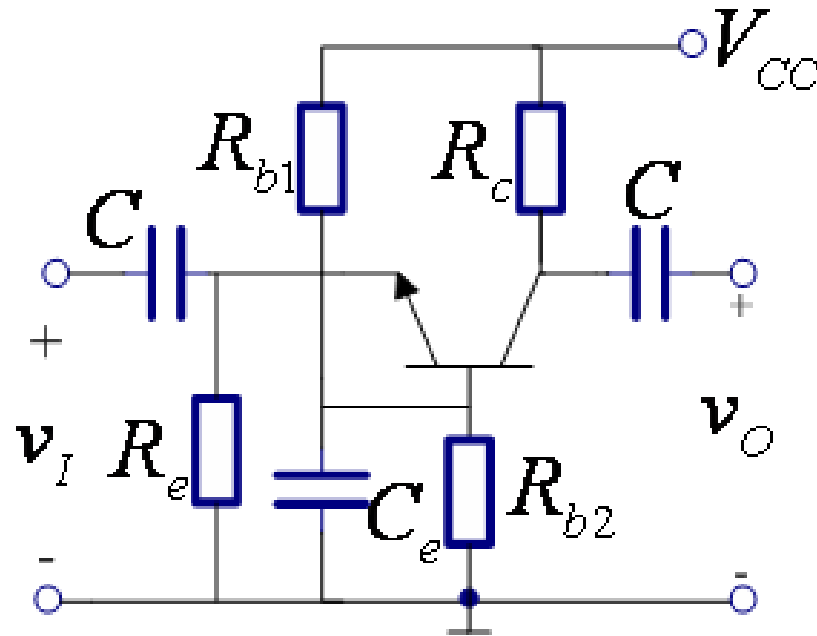


共射极放大电路（直接耦合）



射极输出器

三极管放大电路(放大工作状态+不同的（交流信号）组态)



(a)电路原理

共基极放大电路

5-3-3 三极管基本参数

1. 基极与集电极电流放大系数

在三极管的共射极放大电路中，电流放大系数是在 U_{CE} 固定时，集电极电流与基极电流之比，即

$$\beta = \frac{i_C}{i_B}$$

此外，根据KCL

$$I_E = I_B + I_C$$

2. 集-基极反向饱和电流 I_{CBO}

发射极开路时，集电极与基极间的反向电流。

它是集电结反向偏置时，集电区和基区中的少数载流子漂移运动所形成的电流。 I_{CBO} 的数值很小，但是受温度影响很大。在室温下，小功率锗管的 I_{CBO} 一般在几微安到几十微安，硅管则在一微安以下。由于 I_{CBO} 是集电极电流的一部分，因此会影响三极管的放大性能， I_{CBO} 越小越好。

5-3-3 三极管基本参数

3. 集-射极穿透电流 I_{CEO}

I_{CEO} 是在基极开路时，从集电极直接穿透三极管而到达发射极的电流，故称穿透电流。

根据三极管电流分配关系，到达集电区的电子数为在基区复合掉的 $\bar{\beta}$ 倍，故

$$I_{CEO} = \bar{\beta} I_{CBO} + I_{CBO}$$

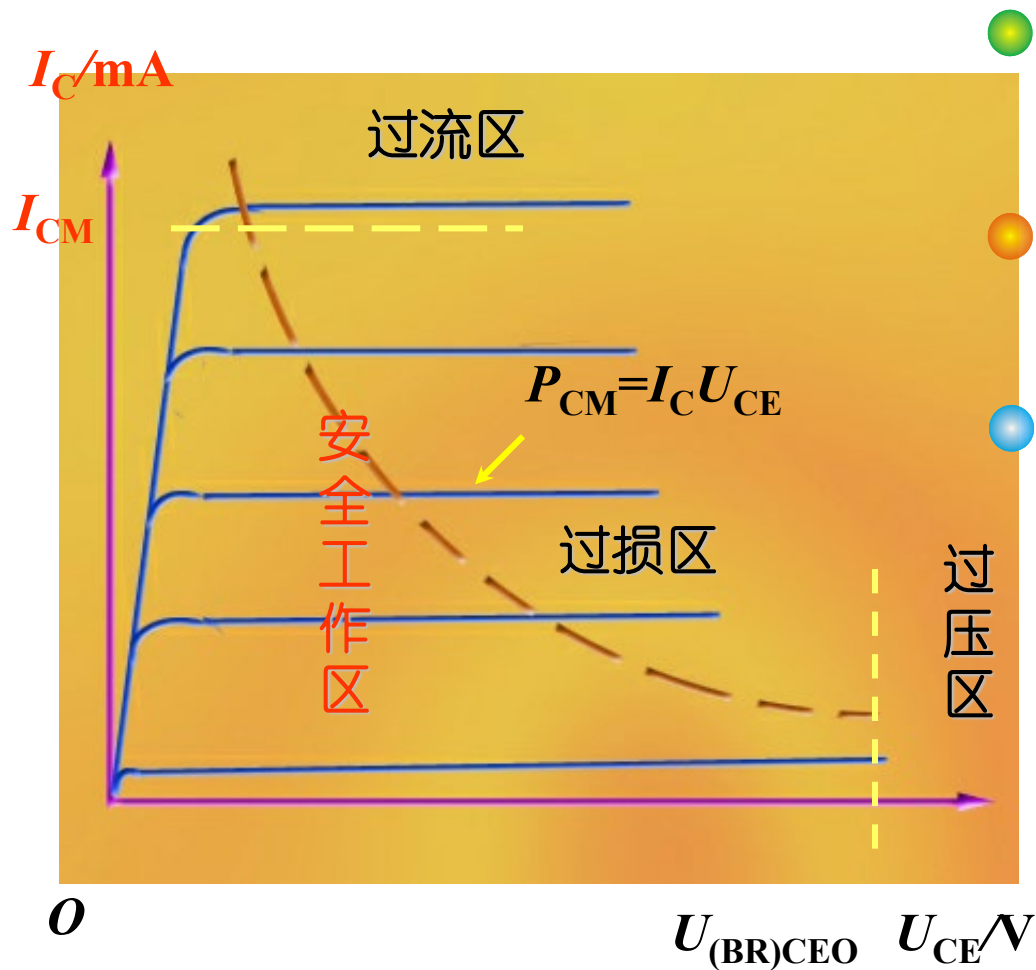
由于 I_{CBO} 受温度影响很大，所以 I_{CEO} 受温度影响也很大，也就是说温度稳定性很差。特别是 I_{CEO} 越大， $\bar{\beta}$ 越高的管子，温度稳定性更差。

4. 频率特性

三极管的频率特性是一项重要的技术性能指标，是指三极管电流放大能力与工作频率之间的关系。频率特性一般以最高工作频率的数据方式给出，对于重要的三极管也以曲线方式给出。

最高工作频率是使三极管开始失去电流放大能力时的信号频率的二分之一。

5. 三极管的极限参数



● 集电极最大允许电流 I_{CM}

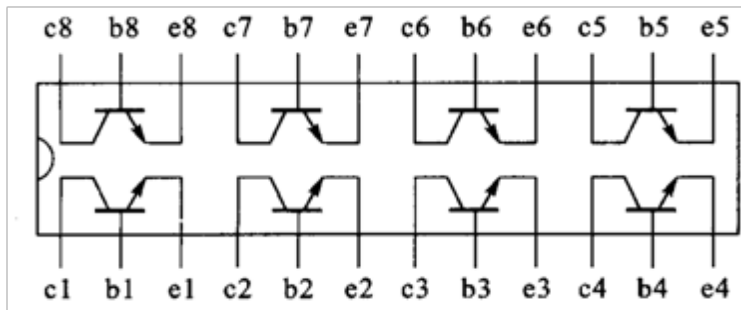
● 集-射反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$

● 集电极最大允许耗散功率 P_{CM}

使用时不允许超过这些极限参数.

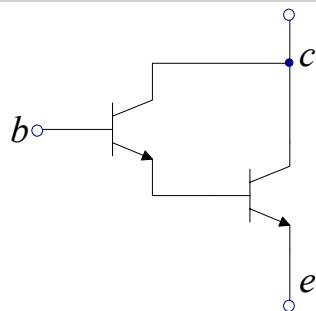
5-3-4 三极管分类

1. 按照结构工艺分类，有PNP和NPN型
2. 按照制造材料分类，有锗管和硅管
3. 按照工作频率分类，有低频管和高频管
4. 按照允许耗散的功率大小分类，有小功率管和大功率管
5. 多管阵列

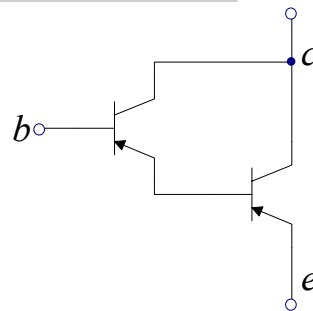


6. 达林顿管

7. 光敏三极管



NPN型达林顿管



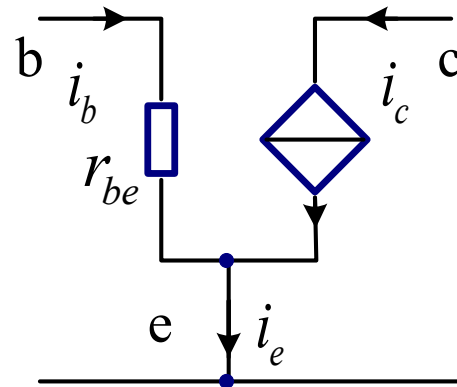
PNP型达林顿管

5-3-5 三极管的低频小信号电路模型

低频小信号模型是分析三极管电路的简化方法，该方法需要满足两个前提条件：

低频——电路信号频率远小于三极管工作频率。三极管的结电容忽略不计。

小信号——一是输入信号电压幅度的变化使三极管基极电流动态变化的范围较小，处于放大区，基极电流的变化可近似为线性。二是小信号时三极管的输入和输出特性可以被看成是线性的，三极管近似成一个线性器件。



三极管工作在放大状态时，低频小信号模型如图所示：

其中， r_{be} 是**b-e**结导通电阻，对于低频小功率管可用下式进行估算：

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_E(mA)} \quad \text{一般为几百欧姆到几千欧姆}$$



例5-9

如图电路，设所使用的三极管工作频率为150 MHz，最高工作电压为12V，设输入信号为正弦波，其峰-峰值为6V，频率为10kHz。能否用三极管低频小信号模型代替三极管？绘制等效电路模型。

解： 根据题中所给条件可知，信号频率远小于三极管的工作频率，同时，输入信号的幅度也远小于所使用的电源电压幅度，可以使用三极管低频小信号模型。得到电路的等效电路如图所示。

