



清华大学  
Tsinghua University

“魔电”欢迎大家！



清华大学自动化系  
耿华

# 课程介绍

## ➤ 课程组成员及联系方式

### 主讲教师

耿华: [genghua@tsinghua.edu.cn](mailto:genghua@tsinghua.edu.cn)

中央主楼702, 电话62770559, 13810557460

### 助教

何秀强 (博4), 许志伟 (博2), 习江北 (博3)

## 研究领域

### [1] 新能源发电技术

新能源并网逆变器拓扑及控制

### [2] 微网系统的控制技术

微网系统的并网-孤岛运行技术

### [3] 电力电子技术及应用

驱动、发电用变频器设计及控制

### [4] 数字控制技术

基于DSP-FPGA的数字控制系统的软硬件设计

数字控制系统的建模及控制技术



DSP board  
FPGA &  
Analogue  
circuit

# 课程介绍

## ➤ 网络学堂

- 教学日历、课件、课外阅读资料
- 作业发布、通知
- 仿真报告提交
- 提问和讨论

## ➤ 教学日历

- 教学进度和重点
- 课程目的和要求
- 作业要求及提交
- 答疑时间
- 考试及成绩
- 参考资料

## ➤ 学习要求

- 主动思考和提问
- 上课、作业

# 绪 论

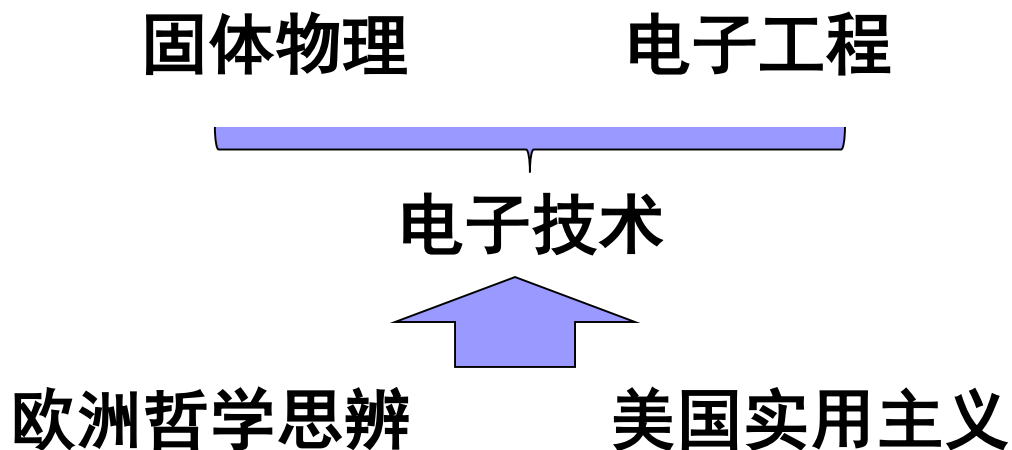
0.1 电子技术的发展及应用

0.2 关于本课程

# 0.1 电子技术的发展及应用

- 什么是电子技术？

研究电子的特性和行为以及电子器件应用的技术

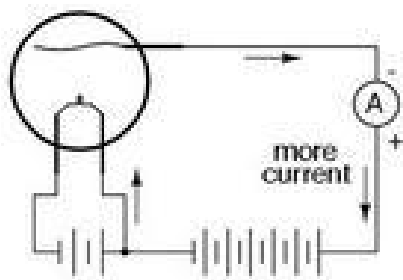


电子技术是两种思维模式(文化)碰撞的必然结果，  
体现了**理论联系实践**的魅力

## ➤ 电子技术的发展历史

### ● 前夜：

- 1888 “爱迪生效应” by Edison (美国发明大王)
- 1897 电子, by Thomson (英国物理学家, 诺贝尔物理学奖 1906)
- 1904 真空二极管, by J.A. Fleming (英国物理学家)
- 1907 真空三极管, by De Forest Lee (美国发明家)



爱迪生效应



1904 电子管



1907 真空管

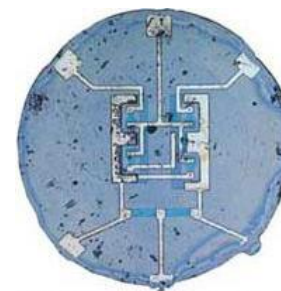
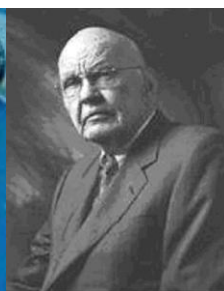
## ➤ 电子技术的发展历史

### ● 黎明:

- 1947 晶体管, by Brattain (美国实验物理学家), Bardeen (美国理论物理学家), Shockley (美国理论物理学家) (BELL Lab, 诺贝尔物理学奖1956)
- 1958 集成电路 (IC), by Kilby (TI, 诺贝尔物理学奖2000), Noyce (Fairchild, Intel创始人之一)
- 1960 金属氧化物场效应管 (MOSFET), by Kahng, Atalla (BELL Lab)



第一只晶体管的发明者



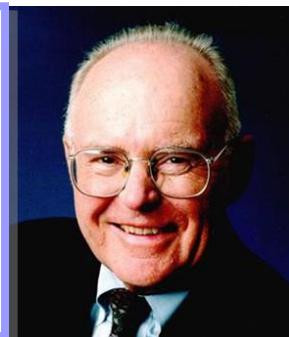
第一个集成电路及其发明者: Kilby (左), Noyce (右)

## ➤ 电子技术的发展历史

### ● 白昼：

- 1969 大规模集成电路 (LSI), 集成度达 $10^3$  器件/芯片
- 1970 VLSI(超大规模),  $10^5$  器件/芯片
- 1980's ULSI(特大规模),  $10^6$  器件/芯片
- 1995 GLSI(巨大规模, 吉规模),  $10^9$  器件/芯片
- 2010 Intel 48核芯片  $13 \times 10^9$  亿BJT/ $567\text{mm}^2$

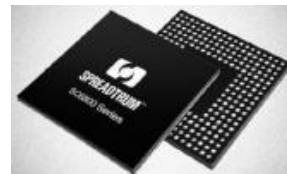
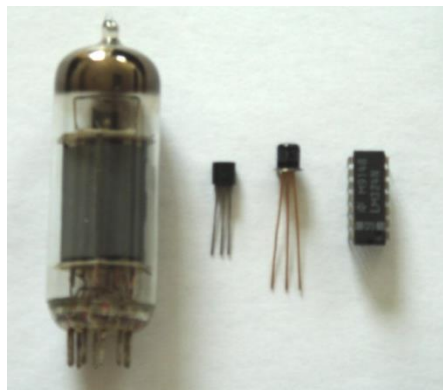
**摩尔定律：**集成电路上可容纳的晶体管数目，约每隔18个月便会增加一倍，性能也将提升一倍；2020年左右趋于饱和。—— Golden Moore (Intel CEO)



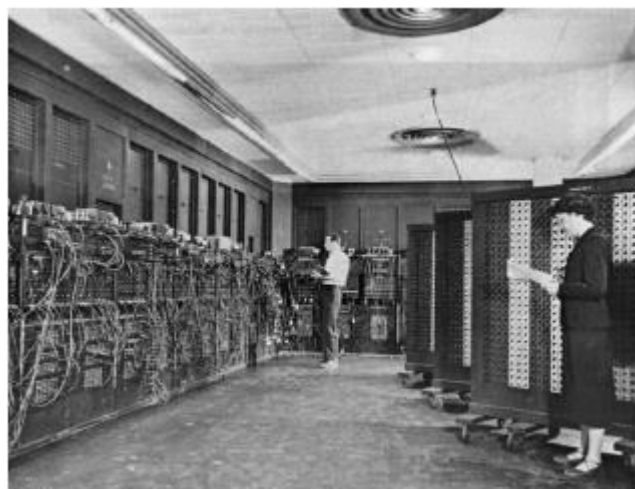
学习电子技术方面的课程需时刻关注电子技术的发展！



# 电子技术的发展：电子管→半导体管→集成电路



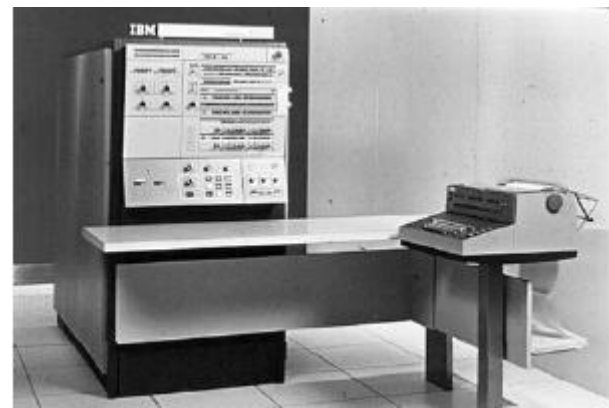
电子管、晶体管、集成电路、大规模集成电路



1946- Pennsylvania



1957- BELL Lab



1964- IBM

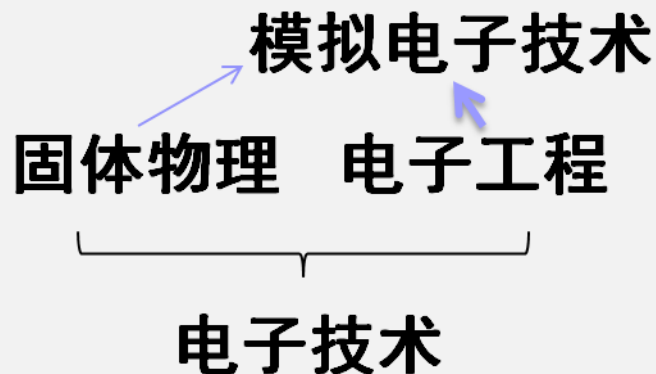
计算机：分别由电子管、晶体管、集成电路制成

## 0.2 关于本课程

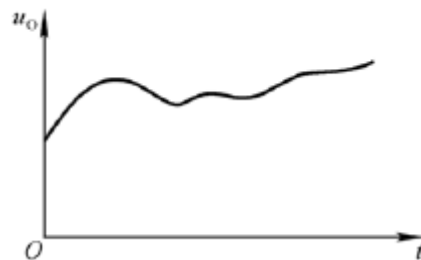
### 一、基本概念

#### ■ 电信号、模拟信号与数字信号

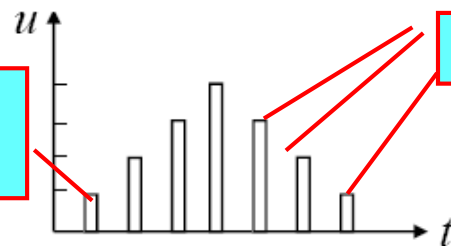
- 电信号：随时间变化的电压或电流，可用波形或函数表示
- 模拟信号(Analog Signal)：在时间和数值上均连续的电信号，如声音、亮度、颜色、温度、压力、流量等
- 数字信号(Digital Signal)：在时间或数值上均离散的电信号，如脉冲信号、开关信号



→ 了解半导体电子特性，着重于模拟电子器件及应用



模拟信号



“1”的电压当量

“1”的倍数

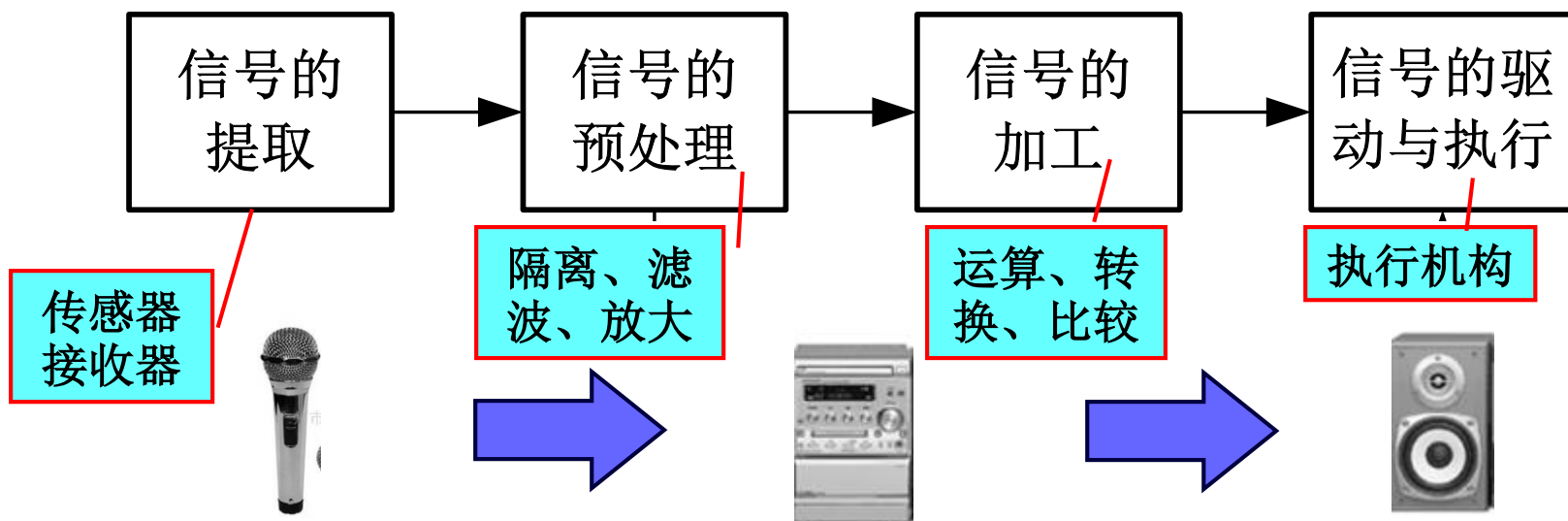
数字信号

## ■ 模拟电路 (Analog Electronic Circuit):

- 模拟电路是用于产生或处理模拟信号的电子电路，其最基本的功能为放大

## ■ 电子系统 (Electronic System):

- 由电子元件或部件组成，能产生、传输、处理电信号及信息的完整的电子装置



模拟电子系统的组成

## 二、课程特点

### ➤ 工程性

- 定性分析——证明实际工程的可行性
- 定量估算——实际工程允许误差；半导体器件具有非线性、温度敏感性和参数分散性
- 合理设计——实际工程没有最好的方案，只有最合适的方案

### ➤ 实践性

- 仿真：Multisim
- 搭建电路：面包板
- 测试电路：实验

### 三、学习方法

- 以[听课](#)为线索，抓[基本概念、基本电路、基本分析方法](#)
- 注意定性分析和近似分析的重要性
- 学会辨证、全面地分析问题
- 理论-EDA-实践缺一不可、相互验证
- 注意电路中常用定理的应用



# 第一章 半导体器件基础



§ 1.1 半导体基础知识

§ 1.2 半导体二极管

§ 1.3 晶体三极管

# § 1.1 半导体基础知识

一、本征半导体

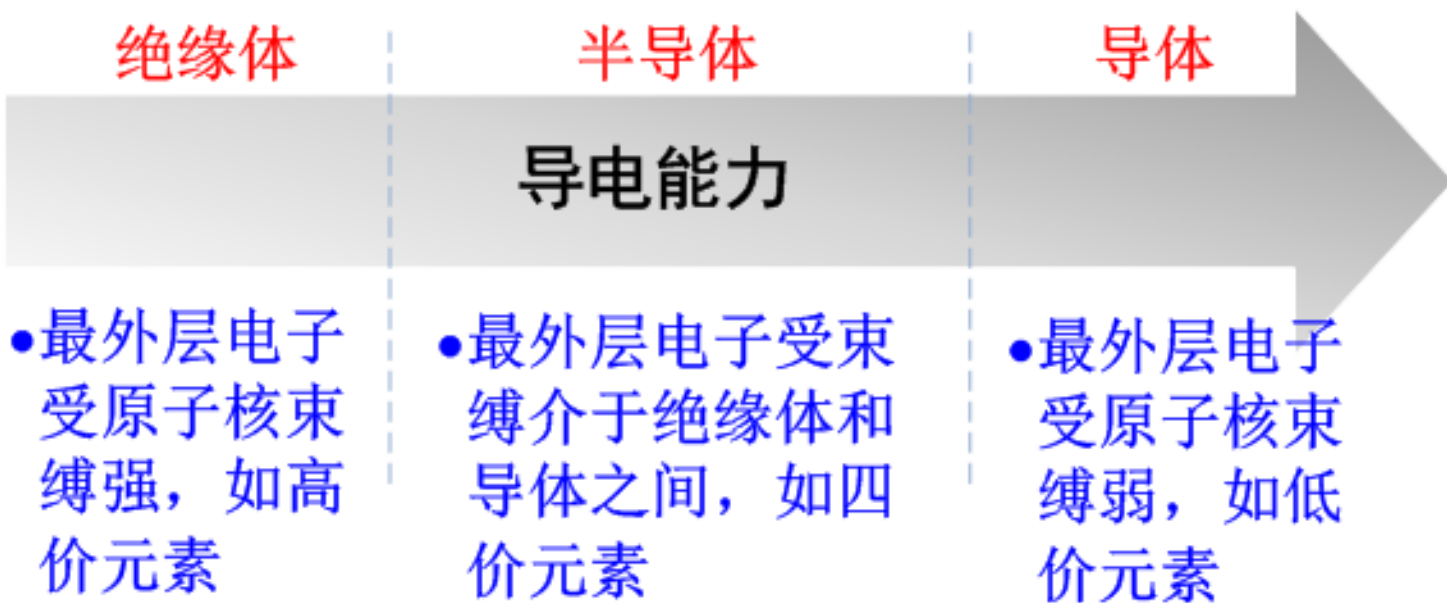
二、杂质半导体

三、PN结的形成及单向导电性

四、PN结的电容效应

# 一、本征半导体

- 什么是导体？绝缘体？半导体？
- 什么是本征半导体？



## 半导体材料

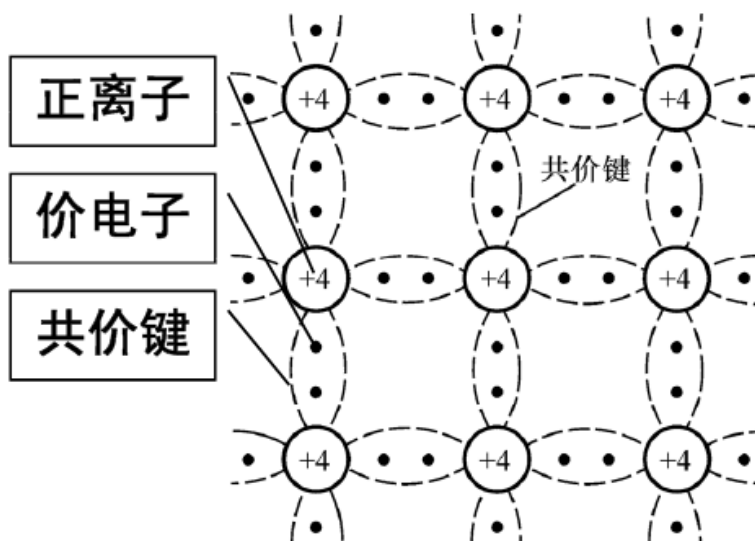
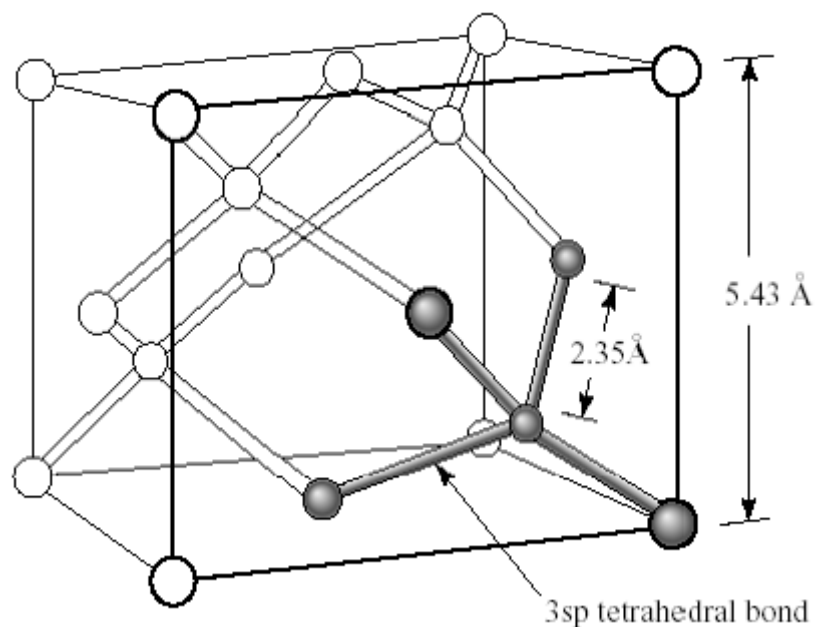
- ✓ 单质：四价元素组成，如 硅 Si，锗 Ge
- ✓ 化合物：三价和五价元素组成，如 砷化镓 (GaAs)，  
 锑化铟 (InSb)



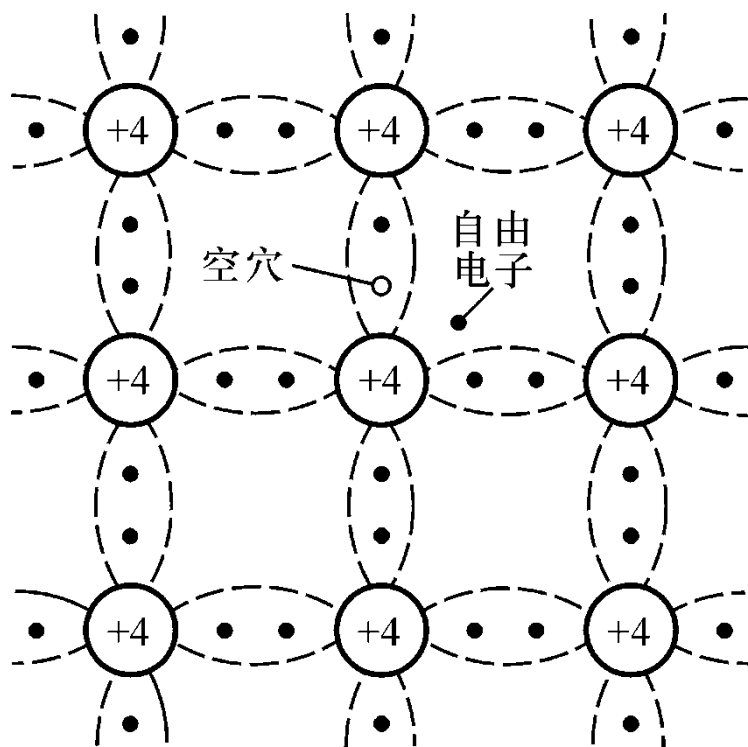
半导体→提纯→形成晶体，得本征半导体

➤ 本征半导体的结构？

▣ 本征半导体的原子结构及其共价键 (Covalent bond)



## ➤ 本征半导体中的两种载流子



### ➤ 几个概念：

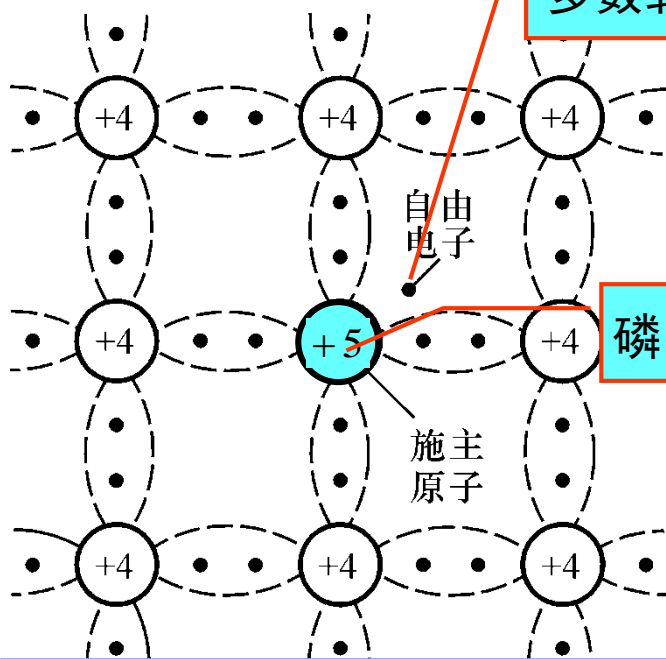
- ✓ **载流子**：运载电荷的粒子
- ✓ **自由电子**：由于热运动，具有足够能量的价电子挣脱共价键的束缚而成为自由电子，其带负电
- ✓ **空穴**：自由电子的产生使共价键中留有一个空位置，称为空穴，其带正电
- ✓ **本征激发**：热激发下产生自由电子和空穴对的现象
- ✓ **复合**：自由电子和空穴相碰同时消失

### ➤ 几个特点：

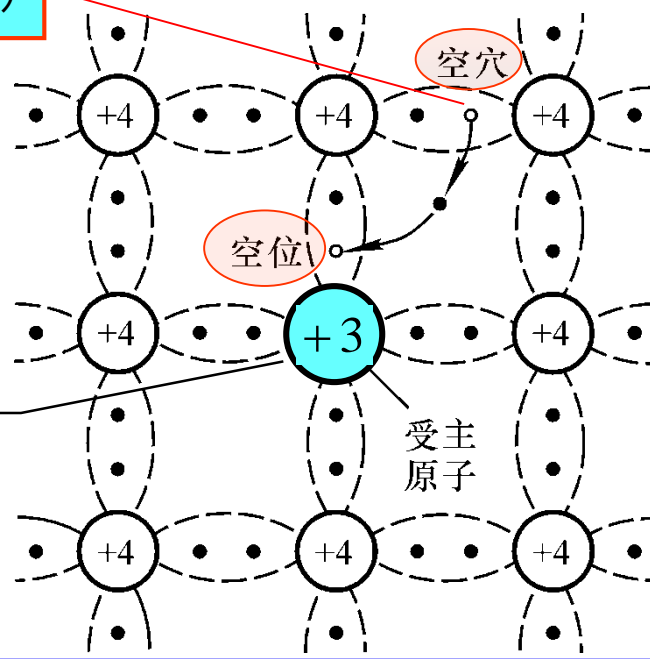
- ✓ 本征半导体载流子浓度很低，温度升高时，由于热运动加剧，其浓度增加
- ✓ 外加电场时，自由电子和空穴均参与导电，其运动方向相反
- ✓ 由于载流子数目很少，其导电性很差

## 二、杂质半导体

### ➤ N型半导体



### ➤ P型半导体



□ 杂质半导体主要靠多数载流子导电，掺入杂质越多，多子浓度越高，导电性越强，实现导电性可控

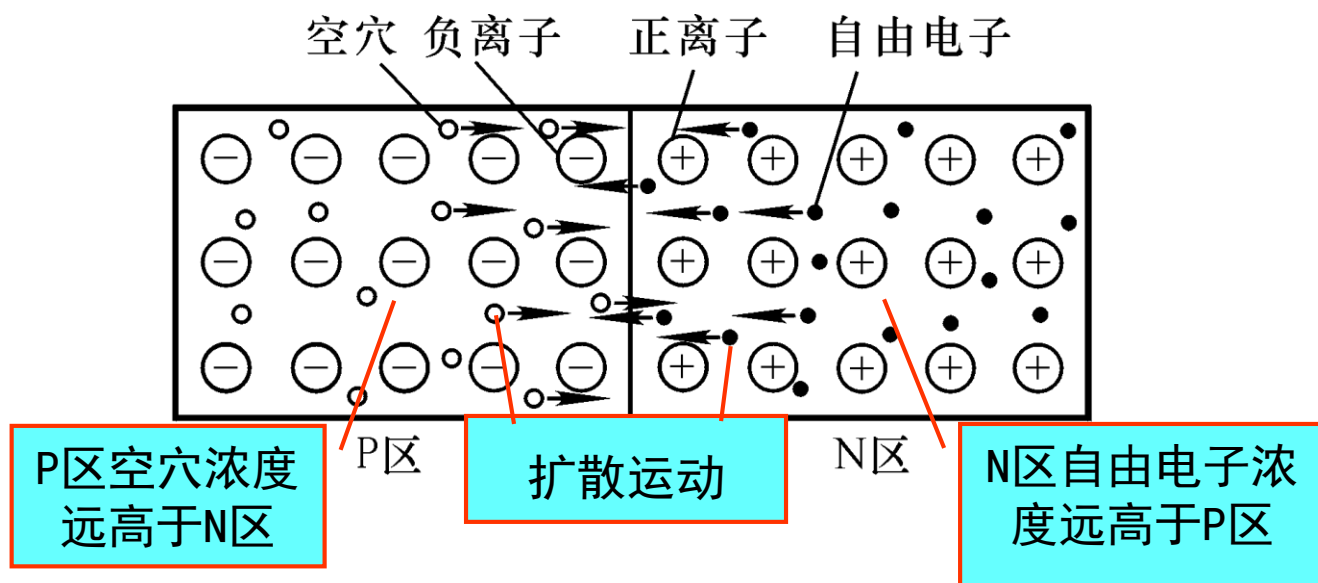


增加掺杂浓度后，多子和少子数目如何变化？  
温度变化时，载流子的数目如何变化？  
少子与多子浓度的变化相同吗？

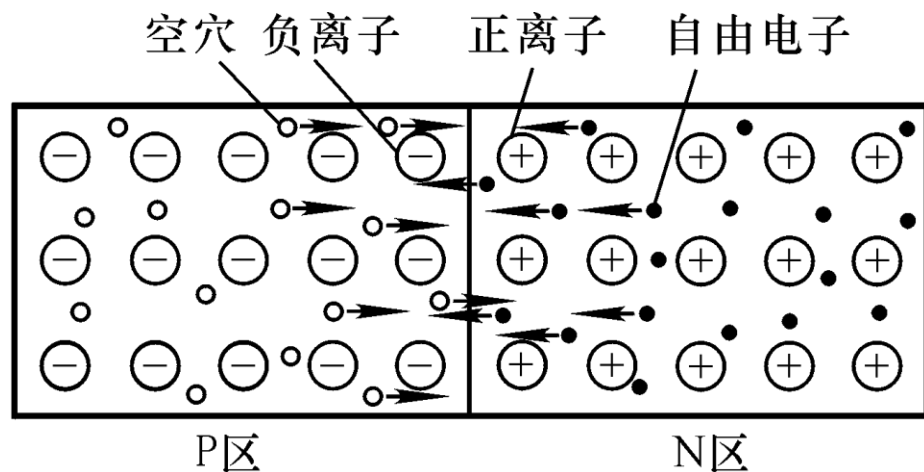
### 三、PN结的形成及单向导电性

#### ➤ PN结的形成

- 制作方式：采用不同掺杂工艺，将P型半导体与N型半导体制作在同一块硅片上，在其交界面形成PN结
- 物理过程：多子扩散 → 形成空间电荷区 (耗尽层) → 产生内电场 → 阻止多子扩散，利于少子漂移，达动态平衡，形成PN结



◆ 扩散运动：因浓度差而产生的多子运动

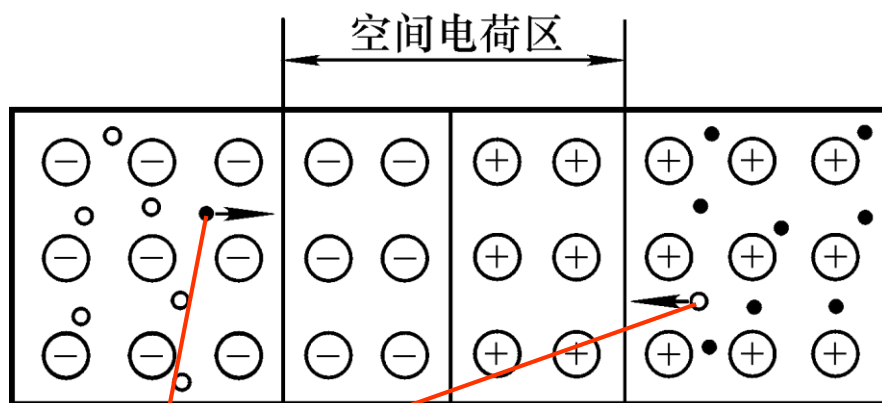


多子扩散

参与扩散运动和漂移运动的载流子数目相同

→ 达动态平衡 (多子与少子电流和为零)

→ 形成PN结



形成空间电荷区  
(耗尽层)

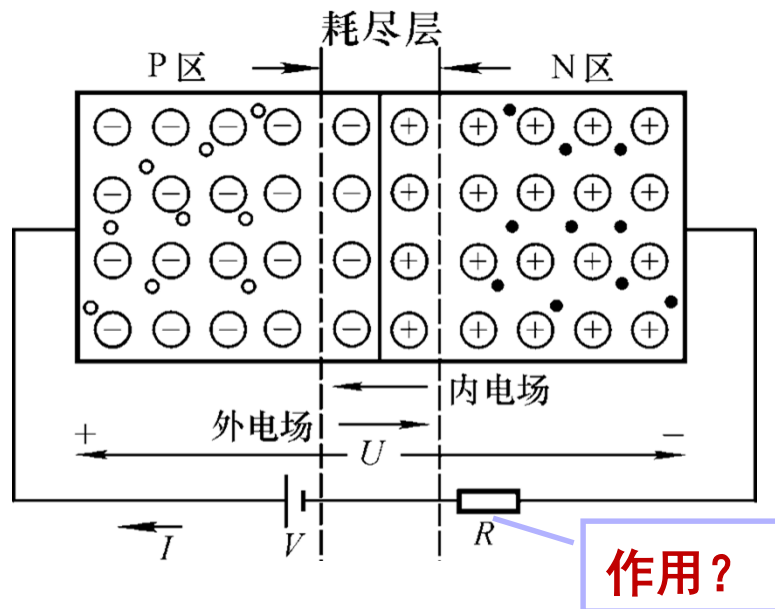
产生内电场

✓ 阻止多子扩散  
✓ 利于少子漂移

漂移运动

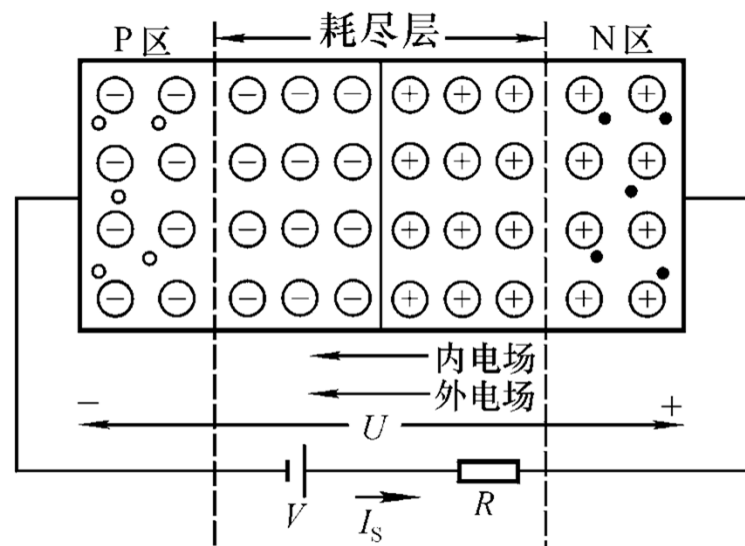
◆ 漂移运动：在电场力作用下少子的运动

## ➤ PN结的单向导电性



正向偏置 (PN结加正向电压):

- ▣ 扩散运动加剧
- ▣ 耗尽层变窄
- ▣ 呈现小电阻，扩散电流大
- ▣ PN结处于导通状态



反向偏置 (PN结加反向电压):

- ▣ 漂移运动加剧
- ▣ 耗尽层变宽
- ▣ 呈现大电阻，反向饱和 (漂移) 电流小
- ▣ PN结近似为截止状态

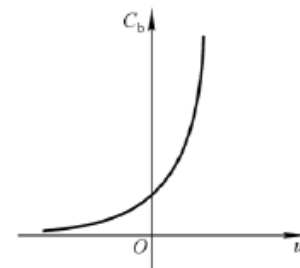
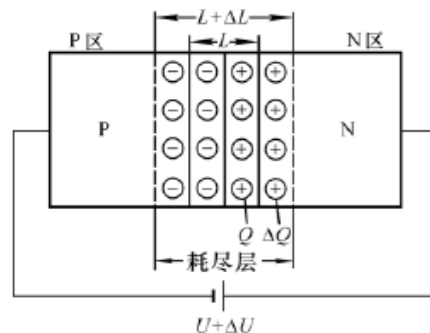


PN结的导通、关断需要时间么？

## 四、PN结的电容效应

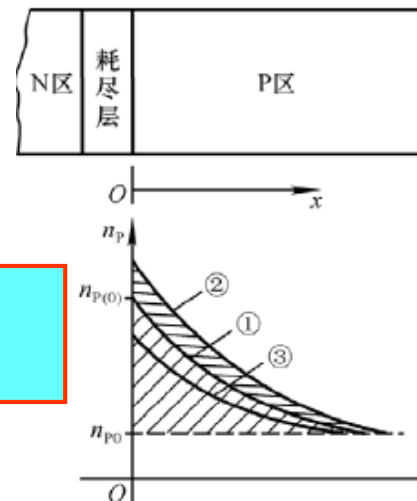
### ➤ 势垒电容 $C_b$

- 空间电荷区的宽度随PN结外加电压而变化，伴随电荷的积累和释放，等效得到的电容



### ➤ 扩散电容 $C_d$

- PN结正向偏置时，扩散路程中载流子浓度的梯度随外加电压而变化，伴随电荷的积累和释放，等效得到的电容



结电容：

$$C_j = C_b + C_d$$

1~几百pF，  
非常量！

- ✓ 正向偏置以  $C_d$  为主，反向偏置以  $C_b$  为主
- ✓ PN结外加高频电压时，失去单向导电性

### ➤ 反向恢复时间 $t_{rr}$

- 高频时影响开关电路的重要参数

### ➤ 讨论

- 为什么将自然界导电性能中等的半导体材料制成本征半导体，导电性能极差，又将其掺杂，改善导电性能？
- 为什么半导体器件的温度稳定性差？是多子还是少子是影响温度稳定性的主要因素？
- 为什么半导体器件有最高工作频率？

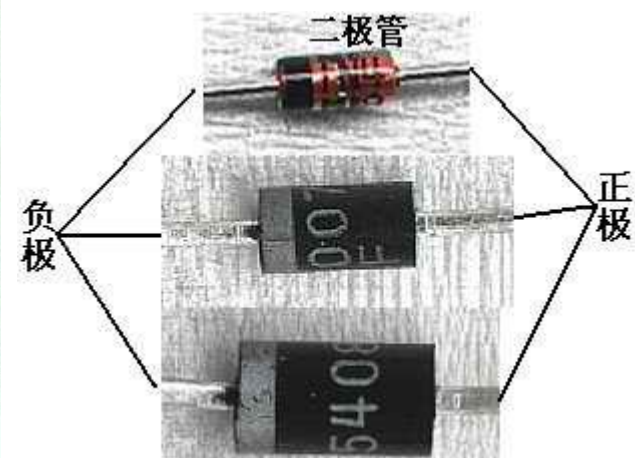
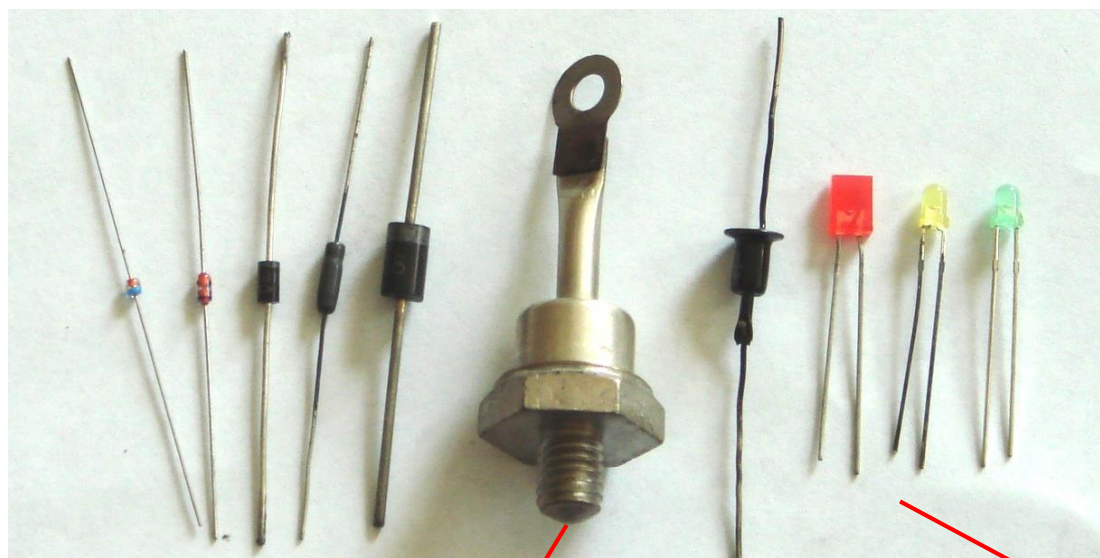
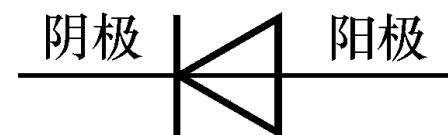


## § 1.2 半导体二极管

- 一、二极管的组成
- 二、二极管的伏安特性及电流方程
- 三、二极管的等效电路
- 四、二极管的主要参数
- 五、稳压二极管

# 一、二极管的组成

- 将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管



小功率  
二极管

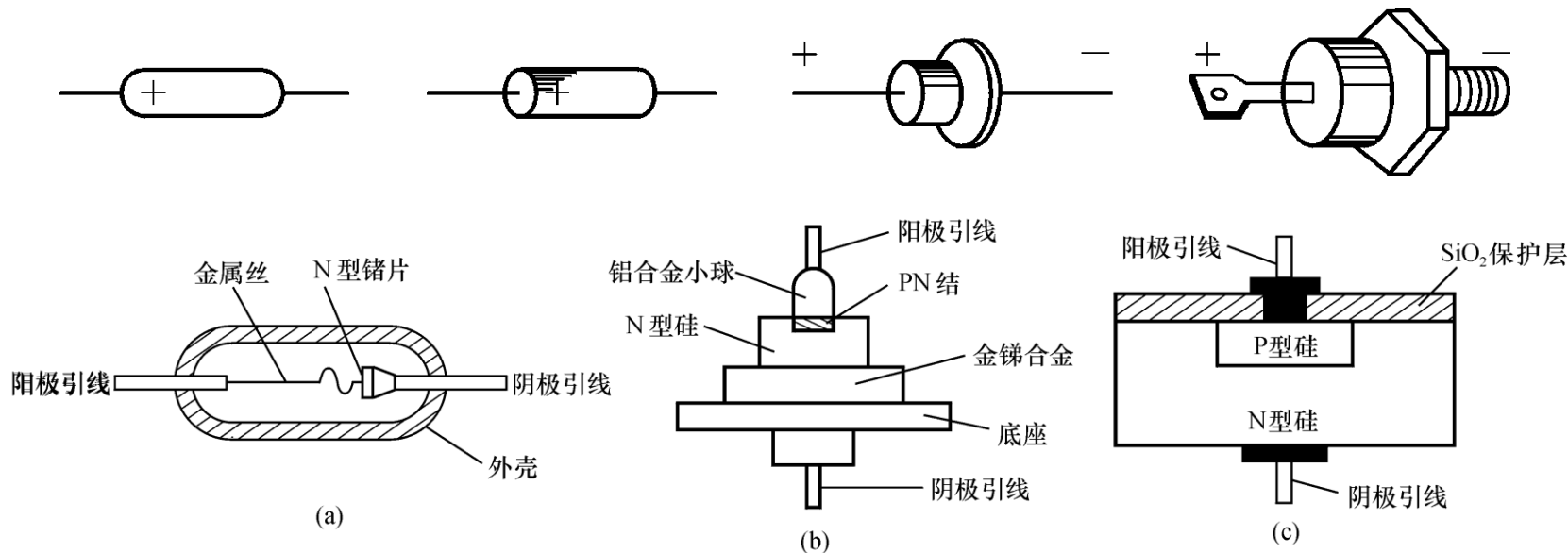
大功率  
二极管

稳压  
二极管

发光  
二极管

✓ 特点和用途不同!

## ➤ 二极管的类型



**点接触型：**结面积小，结电容小，故结允许的电流小，最高工作频率高

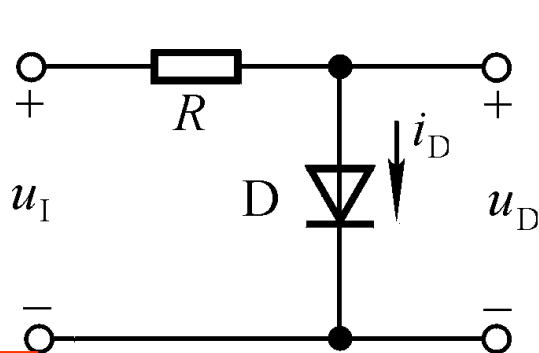
**面接触型：**结面积大，结电容大，故结允许的电流大，最高工作频率低

**平面型：**结面积可小、可大，小的工作频率高，大的结允许的电流大

✓ **结构不同！**

## 二、二极管的伏安(I-V)特性及电流方程

➤ 二极管的伏安特性：其电流与端电压的关系



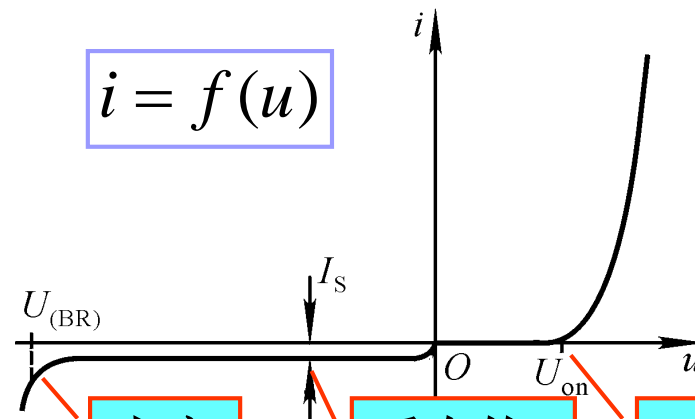
反向饱和  
和电流

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

二极管  
端电压

$$U_T = kT/q$$

温度电压当量  
(常温27°C时为  
26mV)



击穿  
电压

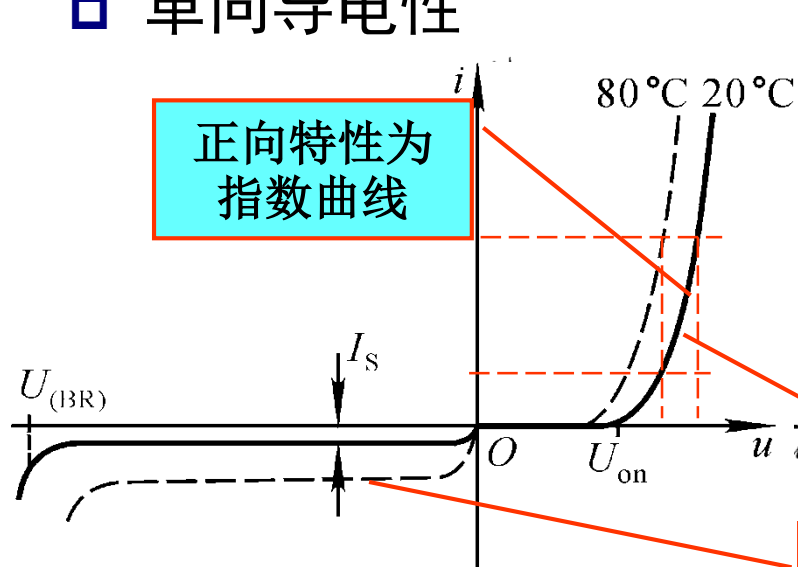
反向饱  
和电流

开启  
电压

材料	开启电压	导通电压	反向饱和 和电流	击穿电压
硅Si	0.5V	0.5~0.8V	10pA	高
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	1μA	低
GaAs	1.0V	1.0~1.2V	1pA	较高

## ➤ 二极管的伏安特性 (外特性)

### □ 单向导电性



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

$$U_T = kT/q$$

- ✓ 若正向电压  $u_D \gg U_T$ , 则  $i \approx I_S e^{\frac{u_D}{U_T}}$
- ✓ 若反向电压  $|u_D| \gg U_T$ , 则  $i \approx -I_S$

导通时  $u_D$  非恒定值

反向特性为横轴的平行线

### □ 伏安特性受温度影响

$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow$



在电流不变情况下管压降  $U \downarrow$



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

$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow$

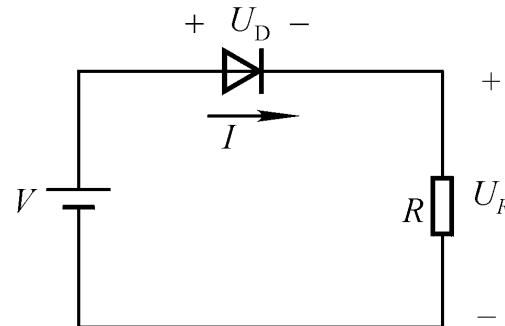


正向特性左移, 反向特性下移

2-2.5mV/ $1^\circ\text{C}$

1倍/ $10^\circ\text{C}$

### 三、二极管的等效电路



#### ➤ 1. 折线化等效电路 (线性化)

##### ✓理想等效

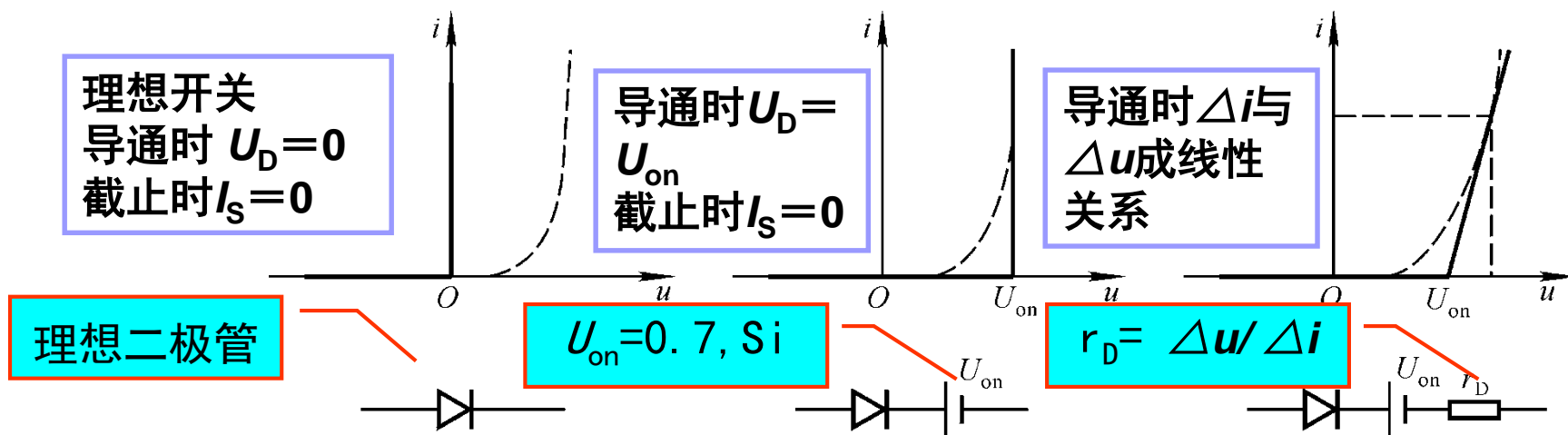
条件：二极管电路外加电压幅值较大  
( $V > 7V$ , Si)

##### ✓恒压等效

条件：二极管电路外加电压幅值大  
( $V > 2V$ , Si)

##### ✓线性等效

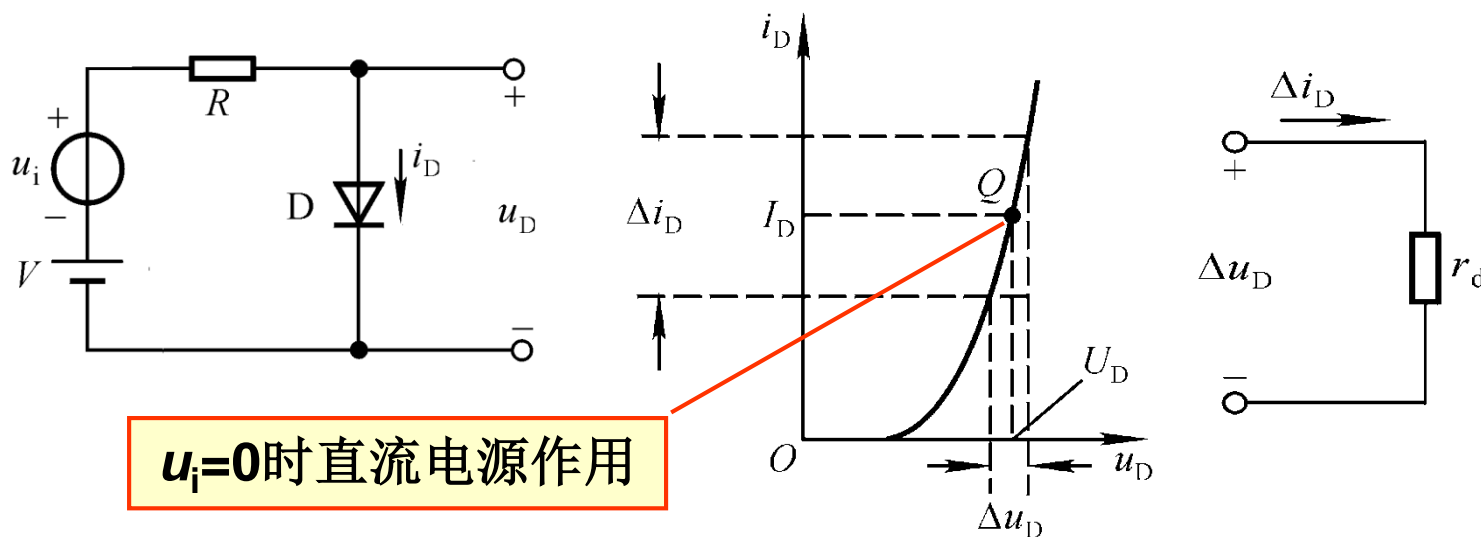
条件：二极管电路外加电压幅值较小  
( $V < 2V$ , Si)



- ✓ 第二种最常用，第三种最精确
- ✓ 应根据不同情况选择不同的等效电路！

## ➤ 2. 微变等效电路

- 二极管在静态基础上有一动态信号作用时，可将二极管等效为一个电阻，称为动态电阻，即为微变等效电路



$u_i=0$ 时直流电源作用

$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} = \frac{du_D}{di_D} \approx \frac{U_T}{I_D}$$

小信号作用

Q越高， $r_d$ 越小！

静态电流

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

## 四、二极管的主要参数

- 最大整流电流 $I_F$ ：最大正向电流平均值
- 最大反向工作电压 $U_R$ ：最大瞬时值， $=1/2 U_{(BR)}$
- 反向电流 $I_R$ ：即 $I_S$
- 最高工作频率 $f_M$ ：因 $PN$ 结有电容效应  
结电容为扩散电容（ $C_d$ ）与势垒电容（ $C_b$ ）之和

✓ 参数具有分散性！

- 选用时注意上下限值、测试条件



## 五、稳压二极管

面接触型

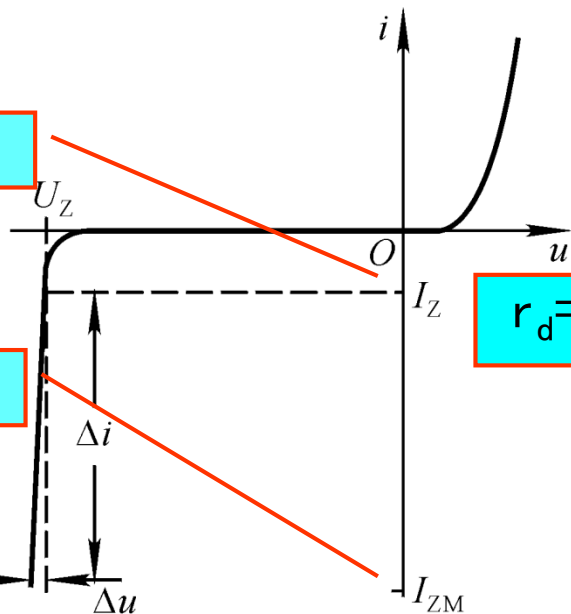
- 利用PN结的反向特性 (第三象限)
- 稳压二极管又称为齐纳二极管或简称稳压管
- 稳压管外加反向击穿电压时，在一定的电流范围内稳压

加限流电阻

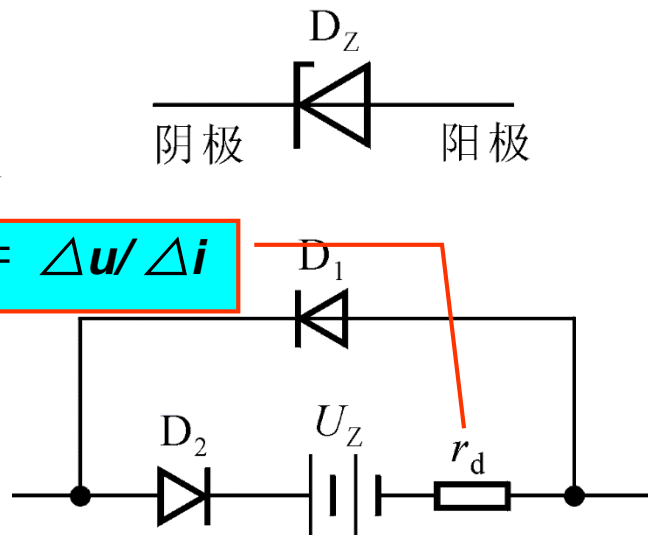
进入稳压区的最小电流

不至于损坏的最大电流

□ 主要参数：

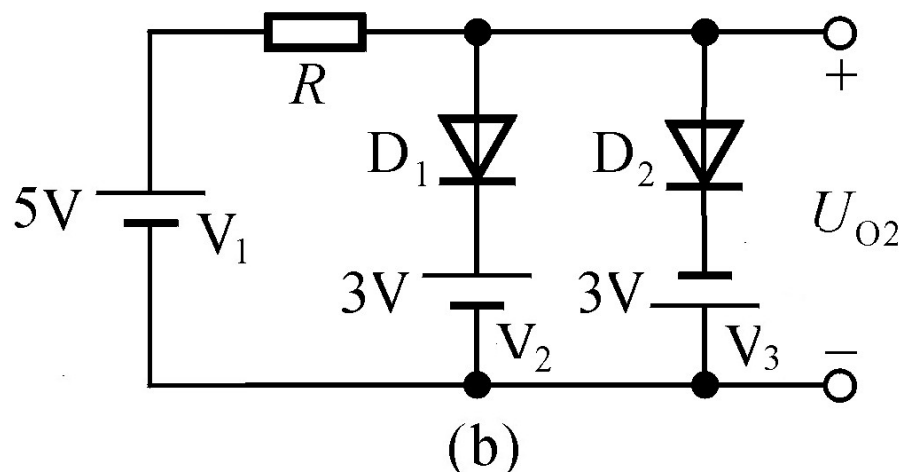
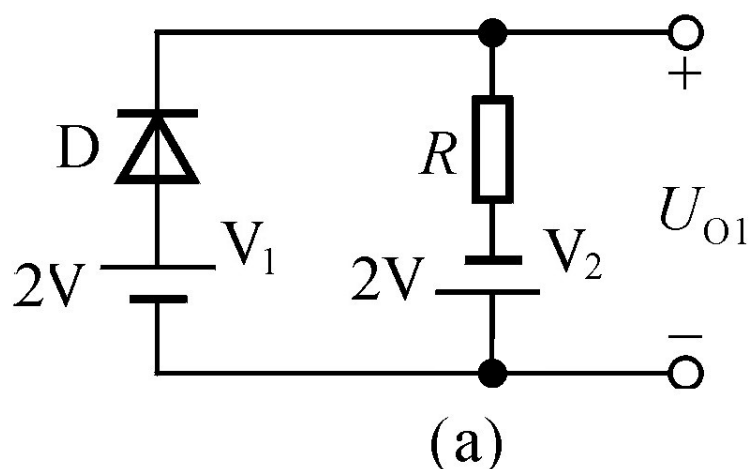
✓ 稳定电压  $U_Z$ ✓ 稳定电流  $I_Z$ ✓ 最大稳定电流  $I_{ZM}$ ✓ 额定功耗  $P_{ZM} = U_Z * I_{ZM}$ ✓ 动态电阻  $r_z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$ ，几到几十欧✓ 温度系数  $\alpha = \Delta U_Z / \Delta T$ 

$$r_d = \Delta u / \Delta i$$



### ➤ 讨论1:

□ 判断电路中二极管的工作状态，求解输出电压。

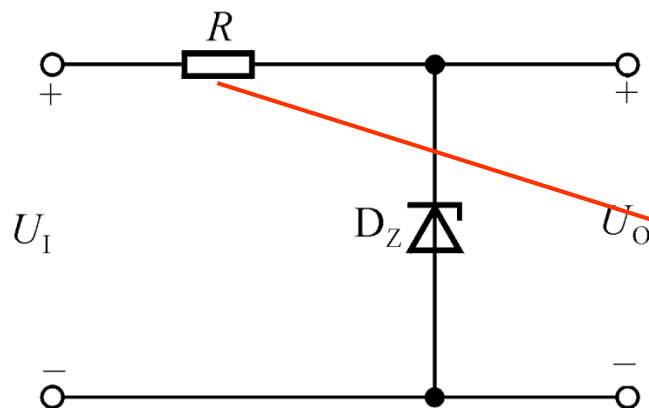


- ✓ 二极管采用何种等效电路？
- ✓ 判断二极管工作状态的方法？

## 讨论2:

□ 已知稳压管的  $U_Z=6V$ ,  $I_Z=5mA$ ,  $I_{ZM}=30mA$ 。

1. 设电阻  $R$  取值合适, 求  $U_I$  分别为  $5V$ 、 $10V$  时  $U_O$  的值;
2. 设  $U_I=10V$ , 求使稳压管正常稳压时限流电阻  $R$  的范围。



✓  $U_I=5V$  时  $U_O=5V$   
 $U_I=10V$  时  $U_O=6V$

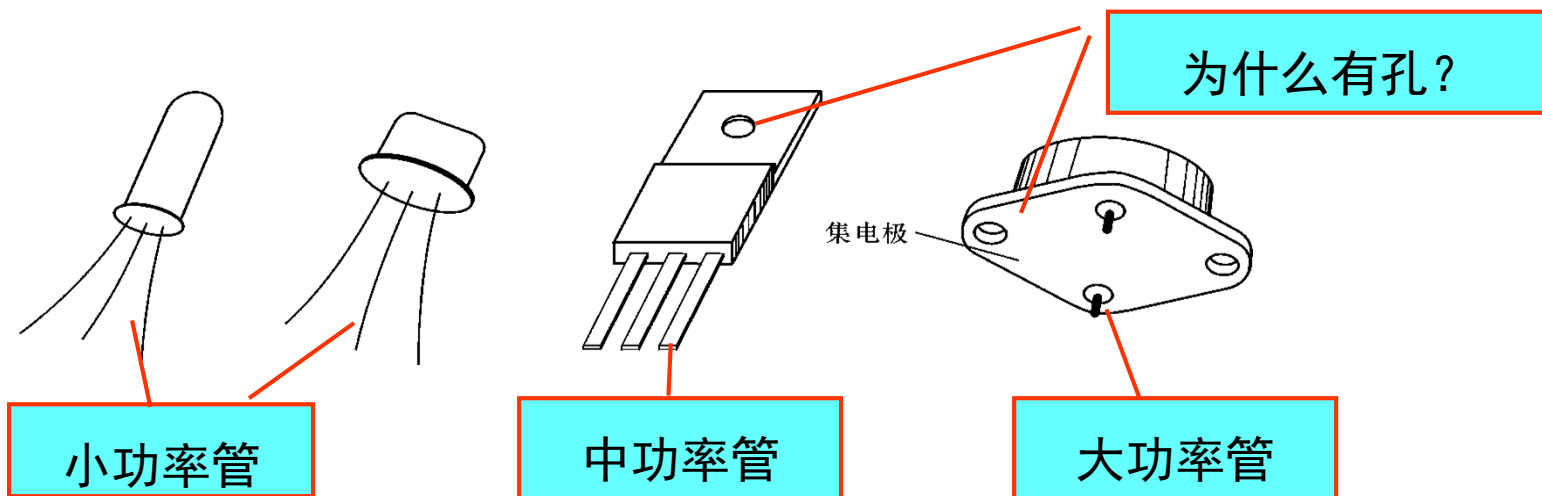
作用? 可以去掉么?

✓ 限流电阻必须保证稳压管电流在  $I_Z$  和  $I_{ZM}$  之间

由  $I_Z < I_{DZ} = \frac{U_I - U_Z}{R} < I_{ZM}$ , 求出限流电阻  $R$  的范围

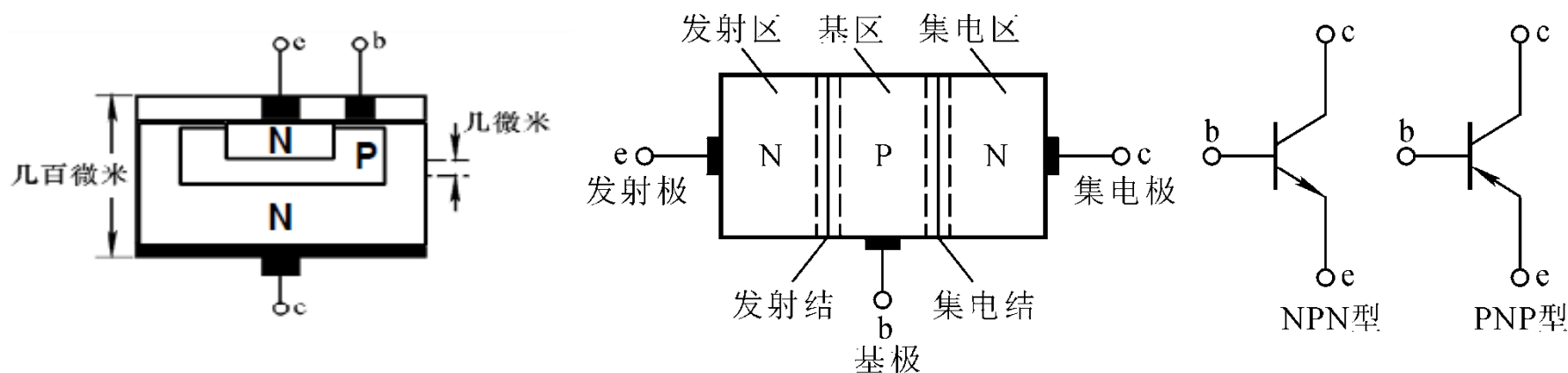
## § 1.3 晶体三极管

- 一、结构和符号
- 二、晶体管的放大原理
- 三、共射输入特性和输出特性
- 四、温度对晶体管特性的影响
- 五、主要参数



# 一、晶体管的结构和符号

- 采用不同掺杂方式在同一硅片上制造出三个区，形成两个PN结，引出三个电极，构成晶体管



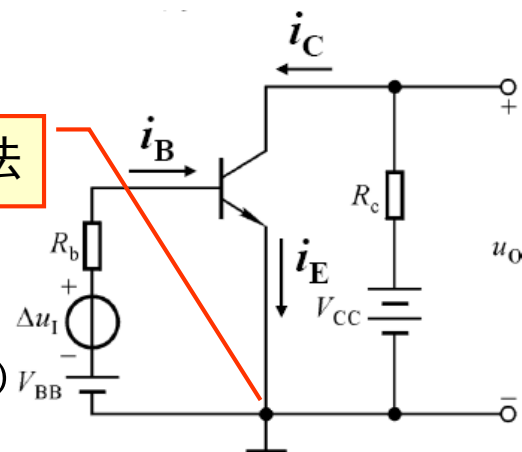
- ✓ **晶体管三个区的特点：**
- 发射区--掺杂浓度很高
  - 基区--很薄 (对于分立元件，1至几微米)
  - 集电区--结面积大

## 二、晶体管的放大原理

### ➤ 放大原理

放大的条件  $\begin{cases} u_{BE} > U_{on} \text{ (发射结正偏)} \\ u_{CB} \geq 0, \text{ 即 } u_{CE} \geq u_{BE} \text{ (集电结反偏)} \end{cases}$

共射接法



平衡少子的  
漂移运动

因集电区面积大，在外电场作用下大部分扩散到基区的电子漂移到集电区

因基区薄且多子浓度低，使扩散到基区的电子（非平衡少子）中的极少数与空穴复合

因发射区多子浓度高使大量电子从发射区扩散到基区

基区空穴的  
扩散

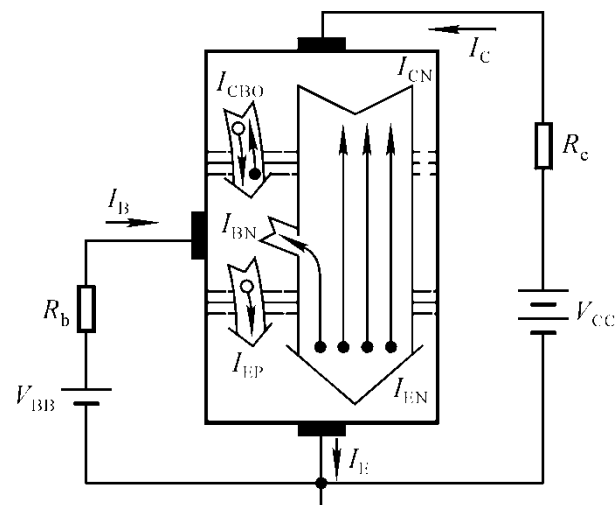
✓ 扩散运动形成发射极电流  $I_E$ ，复合运动形成基极电流  $I_B$ ，漂移运动形成集电极电流  $I_C$ ， $I_E = I_C + I_B$

➤ **电流分配:**  $I_E = I_B + I_C$

$I_E$  — 扩散运动形成的电流

$I_B$  — 复合运动形成的电流

$I_C$  — 漂移运动形成的电流



共射直流电  
流放大系数

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

共射交流电  
流放大系数

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

穿透电流

集电结反向  
饱和电流

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

共基交流电  
流放大系数

共基直流电  
流放大系数

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

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



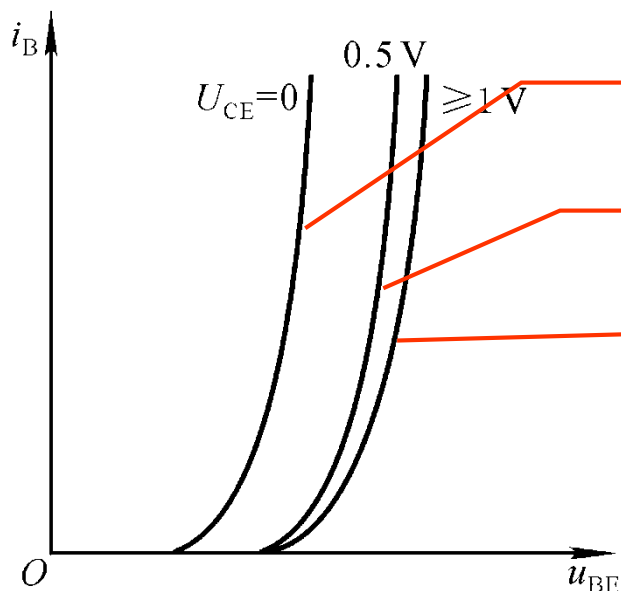
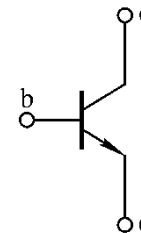
为什么基极开路集电极回路会有穿透电流？



### 三、晶体管的共射输入特性和输出特性

#### ➤ 1. 输入特性

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



为什么像PN结的伏安特性？

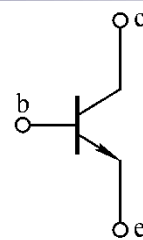
为什么  $U_{CE}$  增大曲线右移？

为什么  $U_{CE}$  增大到一定值曲线右移就不明显了？

## ➤ 2. 输出特性

临界饱和  
和/放大

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



为什么  $u_{CE}$  较小时  $i_C$  随  $u_{CE}$  变化很大？为什么进入放大状态曲线几乎是横轴的平行线？

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

截止区

$$u_{BE} \leq U_{on}$$

$$u_{CE} > u_{BE}$$

$$i_C \approx i_B \approx 0$$

饱和区

$$u_{BE} > U_{on}$$

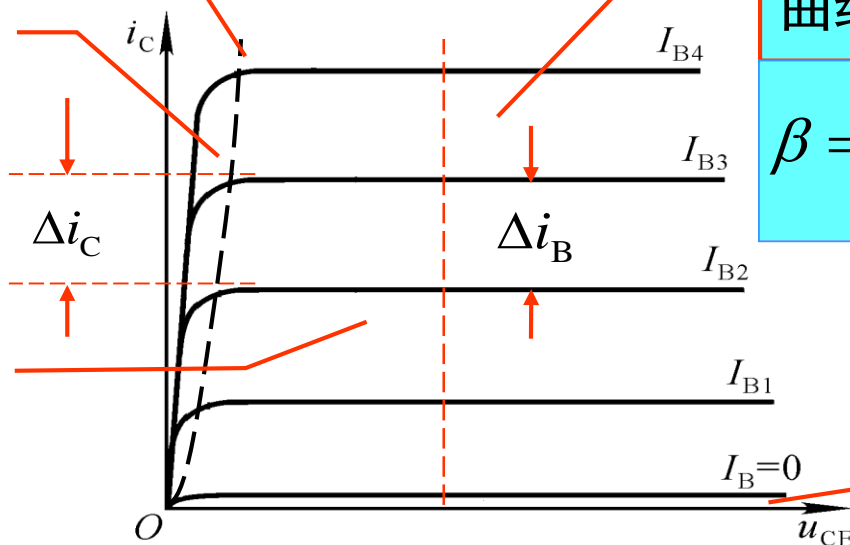
$$u_{BE} > u_{CE} > 0$$

$$i_C < \bar{\beta} i_B$$

放大区

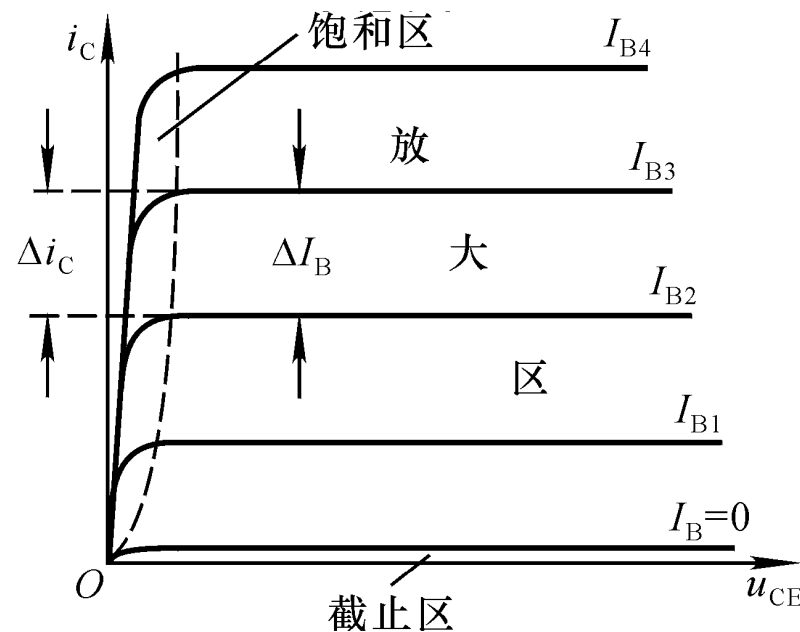
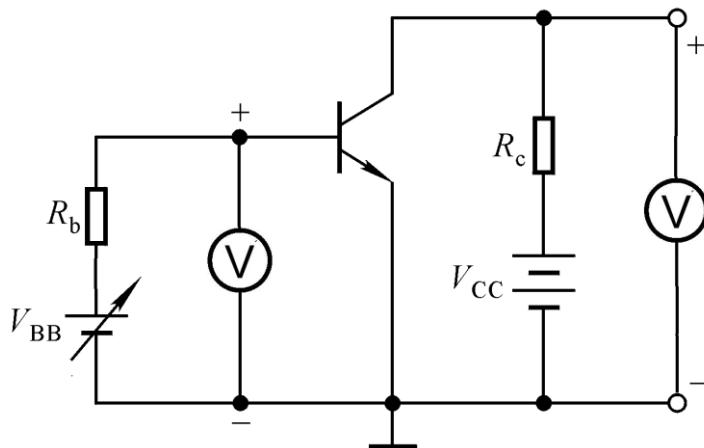
$$u_{CE} > u_{BE} > U_{on}$$

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



✓  $\beta$  是常数吗？什么是理想晶体管？什么情况下  $\beta = \bar{\beta}$  ？

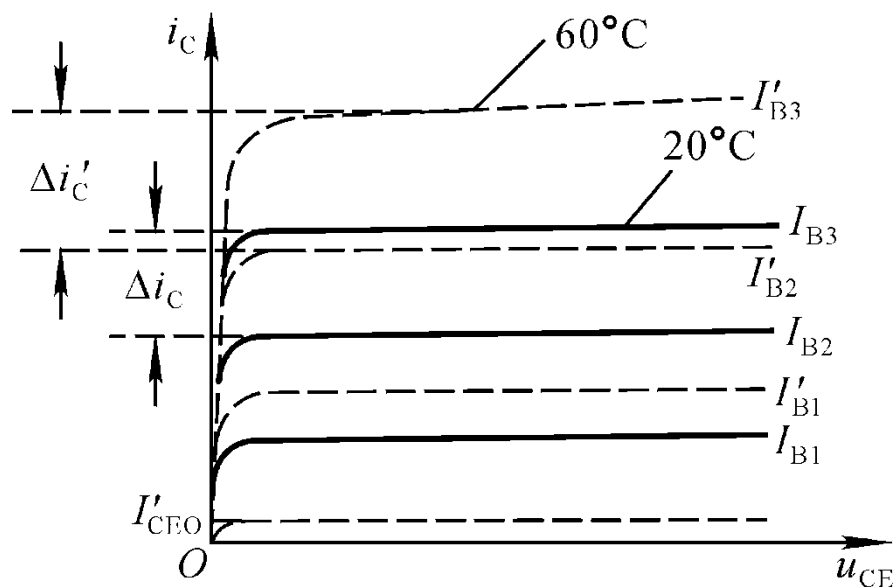
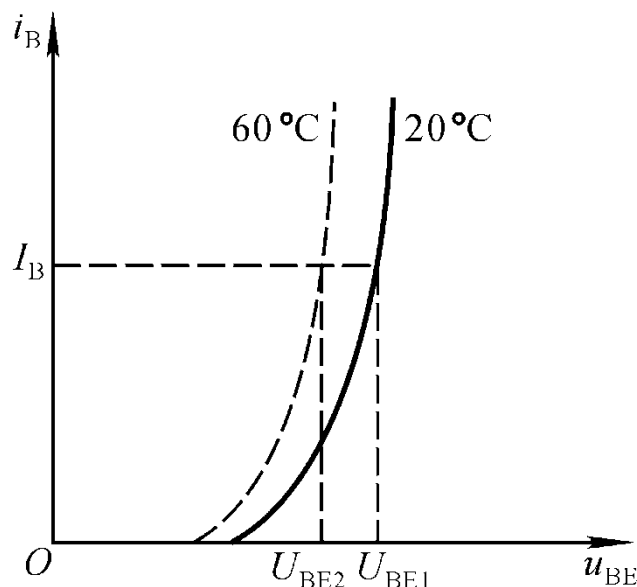
## ➤ 晶体管的三个工作区域



状态	$u_{BE}$	$i_C$	$u_{CE}$
截止	$< U_{on}$	$I_{CEO}$	$V_{CC}$
放大	$\geq U_{on}$	$\beta i_B$	$\geq u_{BE}$
饱和	$\geq U_{on}$	$< \beta i_B$	$< u_{BE}$

✓放大区：输出回路电流  $i_C$  几乎仅决定于输入回路电流  $i_B$ ，可将输出回路等效为电流  $i_B$  控制的电流源  $i_C$

## 四、温度对晶体管特性的影响



✓输入特性:  $T \uparrow \rightarrow$  特性曲线左移

✓输出特性:  $T \uparrow \Rightarrow \beta \uparrow, I_{CBO} \uparrow, I_{CEO} \uparrow$   
 $\rightarrow$  特性曲线上移, 间距加大

$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow u_{BE}$  不变时  $i_B \uparrow$ , 即  $i_B$  不变时  $u_{BE} \downarrow$

## 五、主要参数

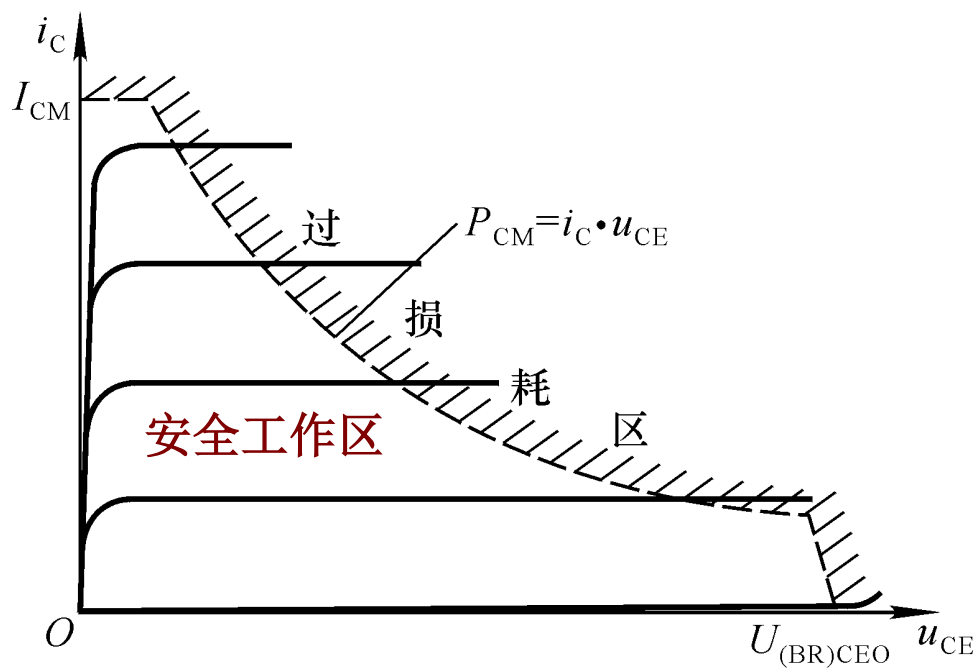
$$\bar{\alpha} = \frac{I_C}{I_E}, \alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

- 直流参数： $\bar{\alpha}$ 、 $\bar{\beta}$ 、 $I_{CBO}$ 、 $I_{CEO}$ 、 $U_{CES}$
- 交流参数： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $f_T$ （使 $\beta=1$ 的信号频率）
- 极限参数： $I_{CM}$ 、 $P_{CM}$ 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 $U_{(BR)CBO}$ 、 $U_{(BR)EBO}$

最大集电极  
电流

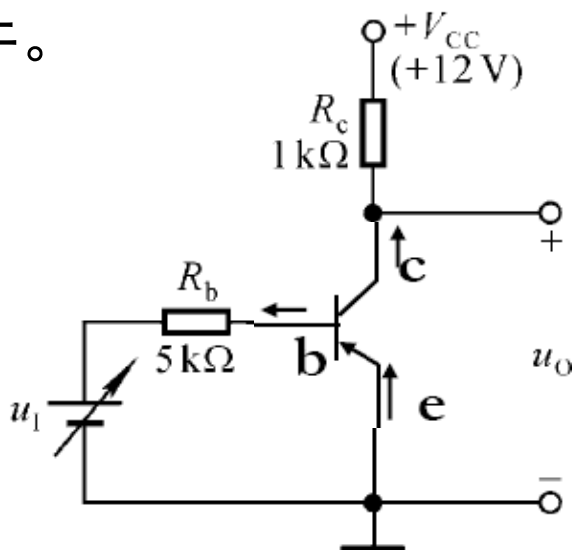
最大集电极耗散功率，  
 $P_{CM} = i_C u_{CE}$

c-e间击穿电压



## ➤ 讨论1

1. 试分析晶体管T是否可能处于放大状态；
2. 若晶体管T改为PNP型管，试分析使其工作在放大状态的必要条件。



1、可能放大的必要条件：

$$u_I > U_{on}$$

2、必要条件：

$$V_{CC} < 0, u_I < 0$$

方法：已知电源极性和电路结构：

✓  $U_{BE} < U_{on}$  (NPN) ,  $U_{EB} < U_{on}$  (PNP) 截止状态

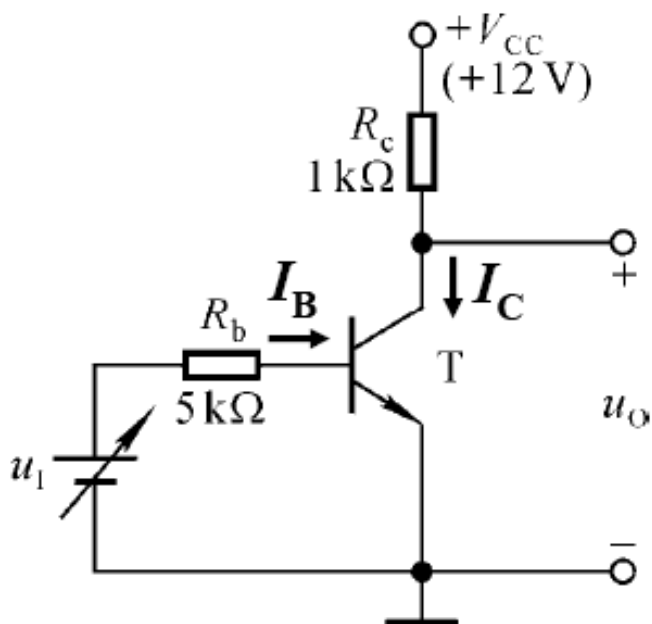
✓  $U_{BE} > U_{on}$  (NPN) ,  $U_{EB} > U_{on}$  (PNP)

NPN:  $U_C > U_B > U_E$  放大状态

PNP:  $U_E > U_B > U_C$  放大状态

## ➤ 讨论2

- 已知晶体管发射结导通时  $U_{BE}=0.7V$ ,  $\beta=100$ , 试分析  $u_I=-1$ 、 $1$ 、 $5V$  时 T 的工作状态



$u_I = -1$  时, 截止;

$u_I = 1$  时,

假设 T 处于放大状态

$$I_B = \frac{u_I - U_{BE}}{R_b} = \frac{1 - 0.7}{5000} = 0.06 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = V_{cc} - R_c \beta I_B = 6 \text{ V} > U_{BE}$$

则假设成立;

# 第一章 半导体器件基础

## 半导体及器件结构图

