



清华大学  
Tsinghua University

# 模拟电子技术基础

## Fundamentals of Analog Electronic

清华大学自动化系

鲁继文

2021年2月



# 课程须知

## 1. 课程组成员

主讲教师：鲁继文：[lujiwen@tsinghua.edu.cn](mailto:lujiwen@tsinghua.edu.cn)

中央主楼626D，电话：15811217327

实验教师：任艳频：[renyp@tsinghua.edu.cn](mailto:renyp@tsinghua.edu.cn)

电话：62771787

助 教：沈 帅：[shens19@mails.tsinghua.edu.cn](mailto:shens19@mails.tsinghua.edu.cn)

电话：18813009718

赵文亮：[zhaowl20@mails.tsinghua.edu.cn](mailto:zhaowl20@mails.tsinghua.edu.cn)

电话：13051108800



# 课程须知

## 2. 课程安排

网络学堂：教学日历、课件、作业发布、通知

教学日历：教学进度、作业要求、仿真要求

答疑安排：每周二晚8:00-9:00，中央主楼626D

学风要求：坚持上课、积极思考、认真作业、及时答疑

考核要求：期中考试、期末考试、作业、实验





# 绪论

§ 0.1 基本概念

§ 0.2 关于本课程





# § 0.1 基本概念

- 一、电子学、电子技术
- 二、电信号、模拟信号与数字信号
- 三、模拟电路
- 四、电子系统







# 一、电子学、电子技术

电子学（**Electronics**）：作用于包括有源电子元器件和与之相关的无源器件电路的互联技术，利用电子讯号进行资讯的传输

电机学（**Electrical**）：处理电能的产生、分布、开关、储存和转换，通过电线、电动机、发电机等将其它形式的能量转换为电能，利用电力进行能源的传输

电子学的起源：1897年约瑟夫·汤姆森发现电子的存在

电子学与其他学科区别的标志：1906年三极管的发明



# 一、电子学、电子技术

电子技术：应用电子学的原理设计和制造电路和电子器件来解决实际问题的技术，主要研究电子的特性和行为以及电子器件的应用

## 电子技术

### 固体物理

固体物理：从微观上解释固体材料的宏观物理性质，为晶体管的制造提供理论基础

### 电子工程

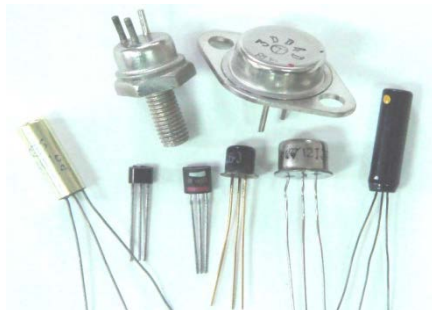
电子工程：利用电子活动的科学知识来设计、开发及测试系统或装备的一门工程学科，利用电子电路的设计和搭建来解决实际问题

# 一、电子学、电子技术

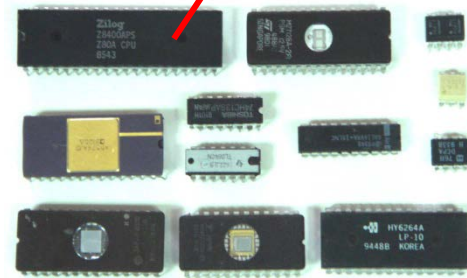
## 电子技术的发展历史（元器件的发展）



1904年  
电子管问世



1947年  
晶体管诞生



1958年集成电  
路研制成功

1969年大规模，  
1975年超大规模

电子技术的发展趋势：网络化、集成化、智能化

学习电子技术方面的课程要密切关注电子技术的发展



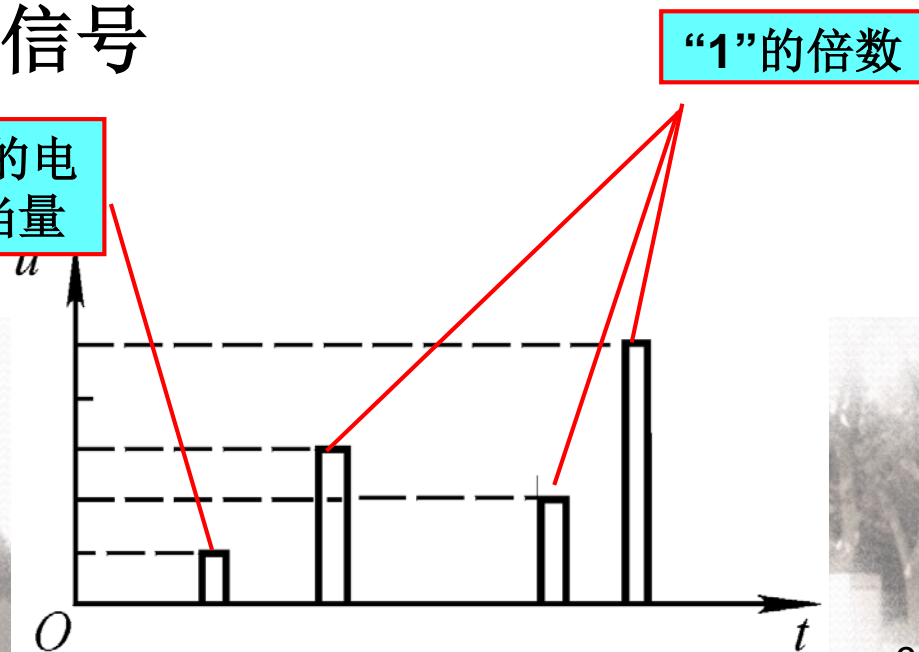
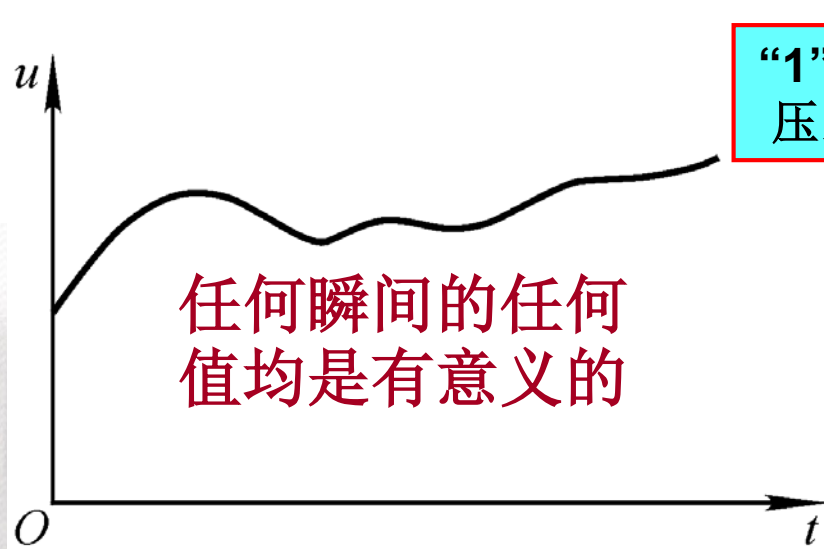


## 二、电信号、模拟信号与数字信号

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





### 三、模拟电路

模拟电路：对模拟信号进行处理的电路，**最基本的处理是对信号的放大**，有功能和性能各异的放大电路，其它模拟电路多以放大电路为基础。

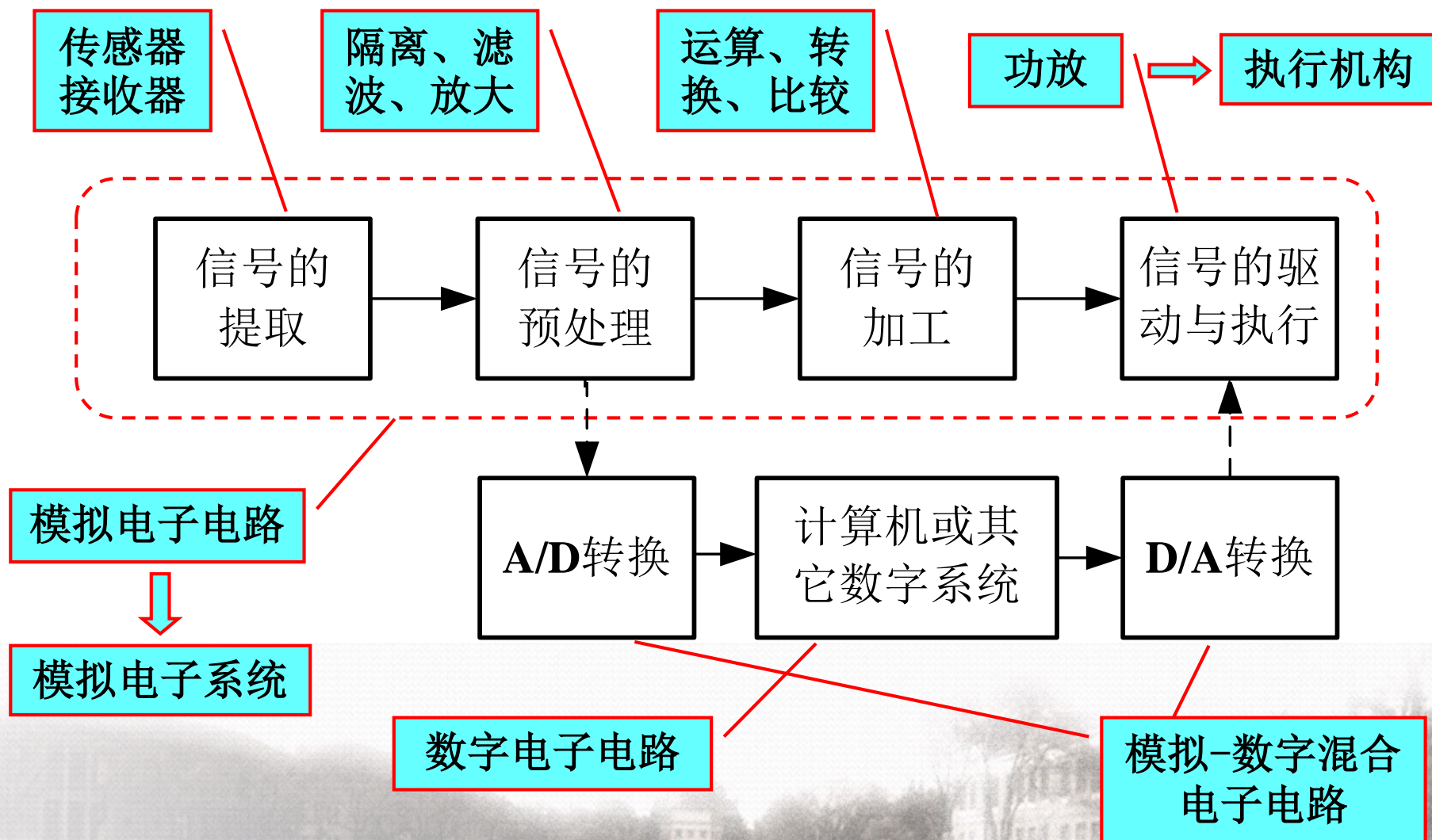
放大的本质：**能量的控制**

有源元件：**能够控制能量的元件**。如晶体管、场效应管





## 四、电子系统





# 模电 $\neq$ 魔电







## § 0.2 关于本课程

- 一、课程内容
- 二、培养目标
- 三、课程特点
- 四、学习方法



# 一、课程内容

- 半导体器件（第1章，基础）
- 放大电路（第2, 3, 4, 5章，**重点、难点**）
- 模拟电路应用（第6, 7, 8章，综合）
- 直流电源（第9章，综合）

# 二、培养目标

- 电子技术入门性质的技术基础课
- 初步掌握模拟电子电路的基本理论、基本知识和基本技能
- 具有深入学习电子技术新发展并应用于本专业的能力

**基本技能：**会看、会选、会算、会调



## 三、课程特点

### 1. 工程性

- (1) 实际工程需要证明其可行性。强调定性分析。
- (2) 实际工程在满足基本性能指标的前提下总是容许存在一定的误差范围的。定量分析为“估算”。
- (3) 近似分析要“合理”。抓主要矛盾和矛盾的主要方面。
- (4) 电子电路归根结底是电路。不同条件下构造不同模型。

### 2. 实践性

- (1) EDA软件的应用方法
- (2) 常用电子仪器的使用方法
- (3) 电子电路的测试方法
- (4) 故障的判断与排除方法



## 四、学习方法

### ➤ 掌握基本概念、基本电路和基本分析方法

- (1) **基本概念**: 概念是不变的, 应用是灵活的。
- (2) **基本电路**: 构成的原则是不变的, 具体电路是多样的。
- (3) **基本分析方法**: 不同类型的电路有不同的性能指标和描述方法, 为获得不同的参数应采用不同的分析方法。

### ➤ 注意定性分析和近似分析的重要性

- (1) **电子器件具有非线性**: 合理近似、采用线性模型代替
- (2) **电路中交直流量共存**: 交流和直流分开来分析
- (3) **辩证全面地分析问题**: 先整体后局部
- (4) **电路原理知识的应用**: 基本的电路定理、方法的应用





# 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

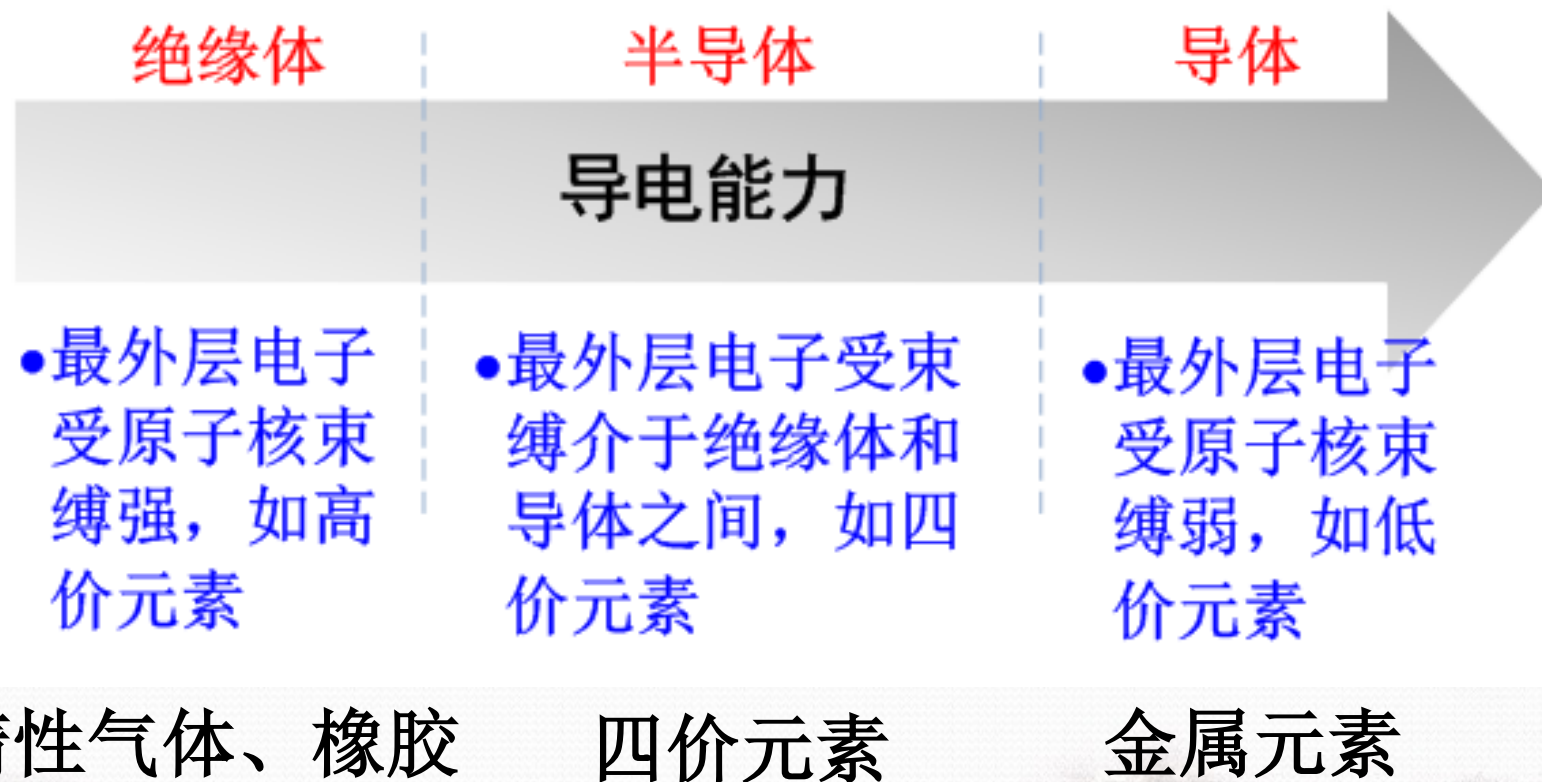
三、PN结及其单向导电性

四、PN结的电容效应



# 一、本征半导体

什么是半导体？



# 一、本征半导体

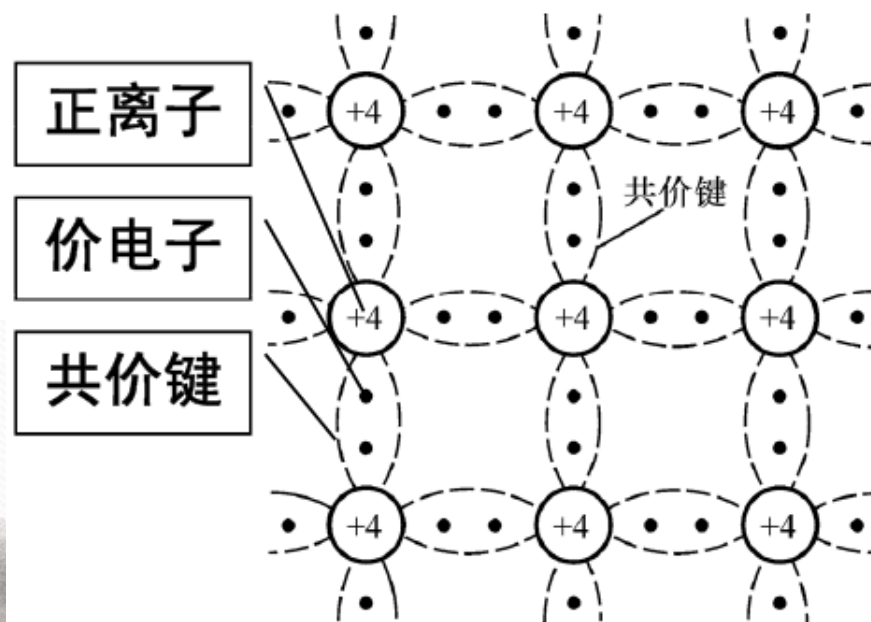
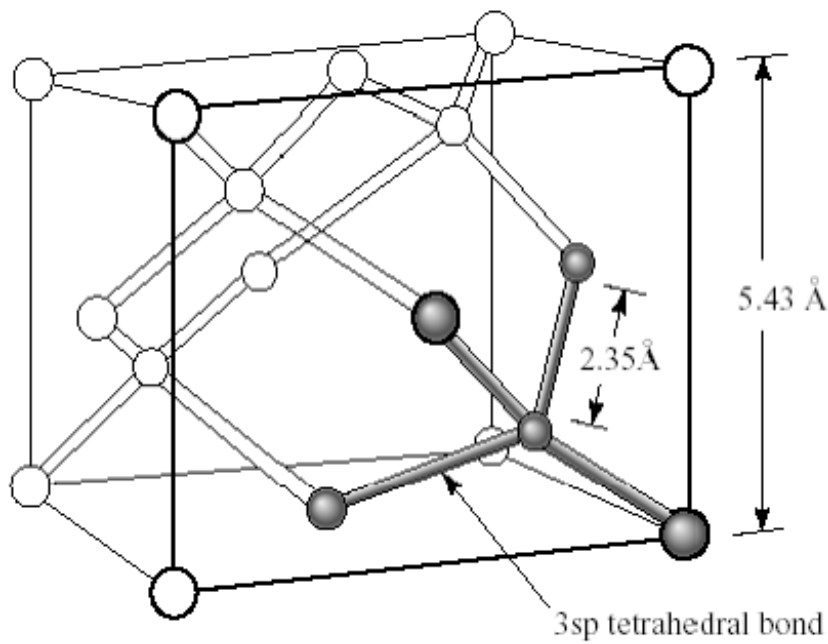
什么是本征半导体？

无杂质

稳定，形成共价键

本征半导体是纯净的晶体结构的半导体。两种载流子，自由电子带负电，空穴带正电。

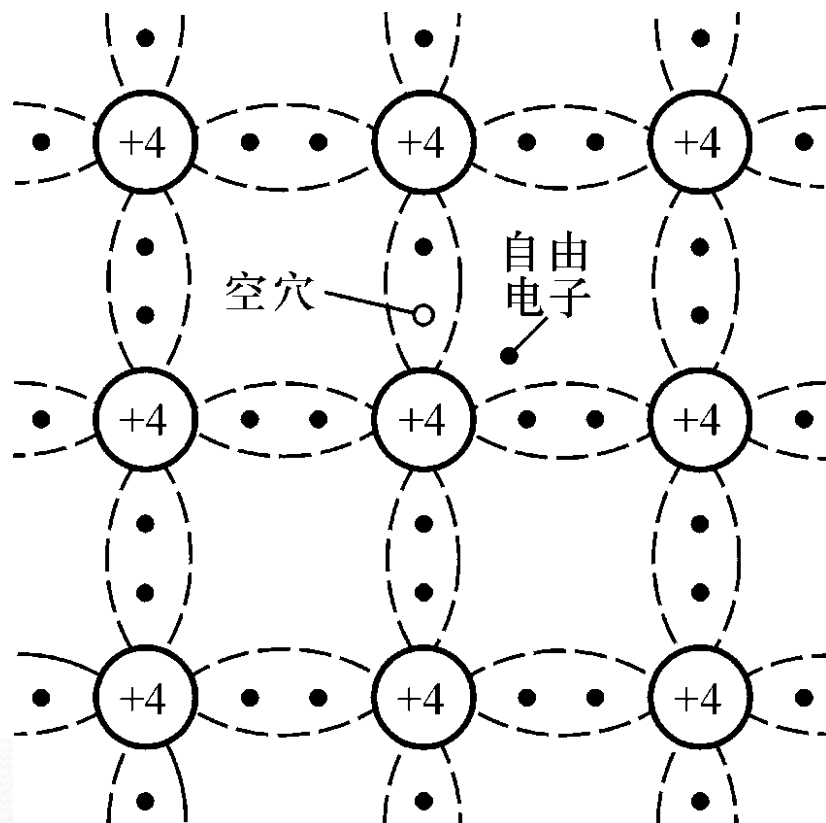
导电性能差，与温度有关；一定温度下载流子的浓度一定。





# 一、本征半导体

## 本征半导体中的两种载流子



为什么要将半导体变成导电性很差的本征半导体？

### 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：

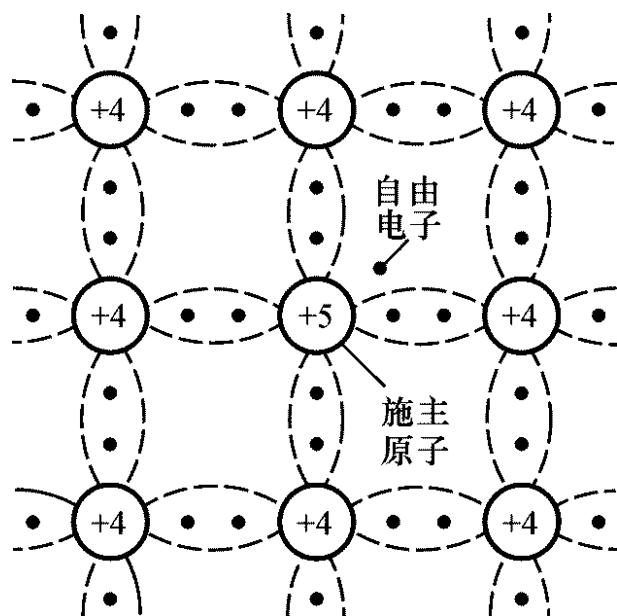
✓ 本征半导体载流子浓度很低，温度升高时，由于热运动加剧，其浓度增加

✓ 外加电场时，自由电子和空穴均参与导电，其运动方向相反

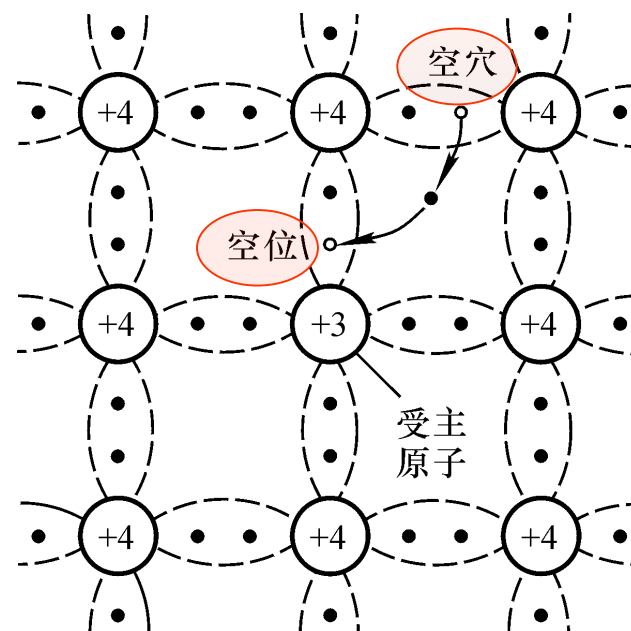
✓ 由于载流子数目很少，其导电性很差

## 二、杂质半导体

在本征半导体中掺入微量其它元素，改善和控制导电性能



**N型半导体：加P**

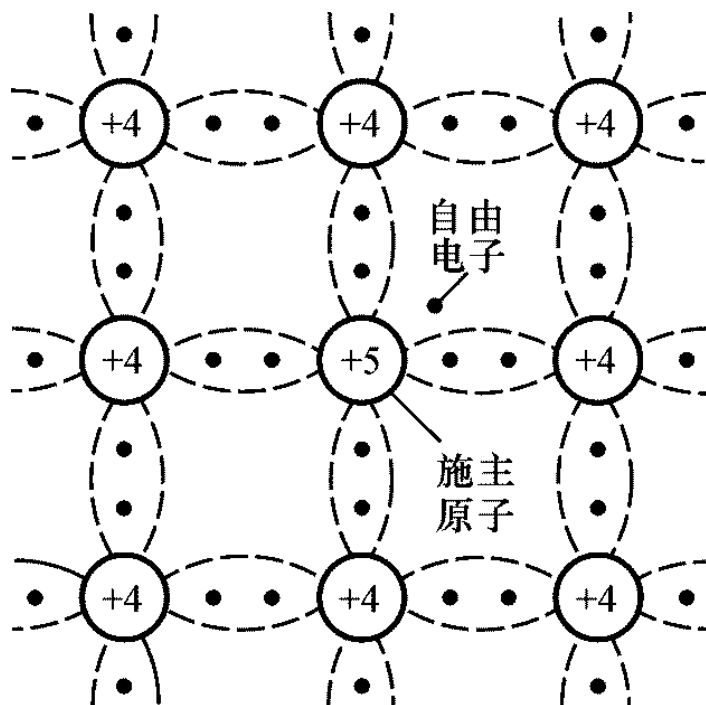


**P型半导体：加B**

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



## 二、杂质半导体



在杂质半导体中，温度变化时，载流子的数目变化吗？  
少子与多子变化的数目相同吗？少子与多子浓度的变化相同吗？

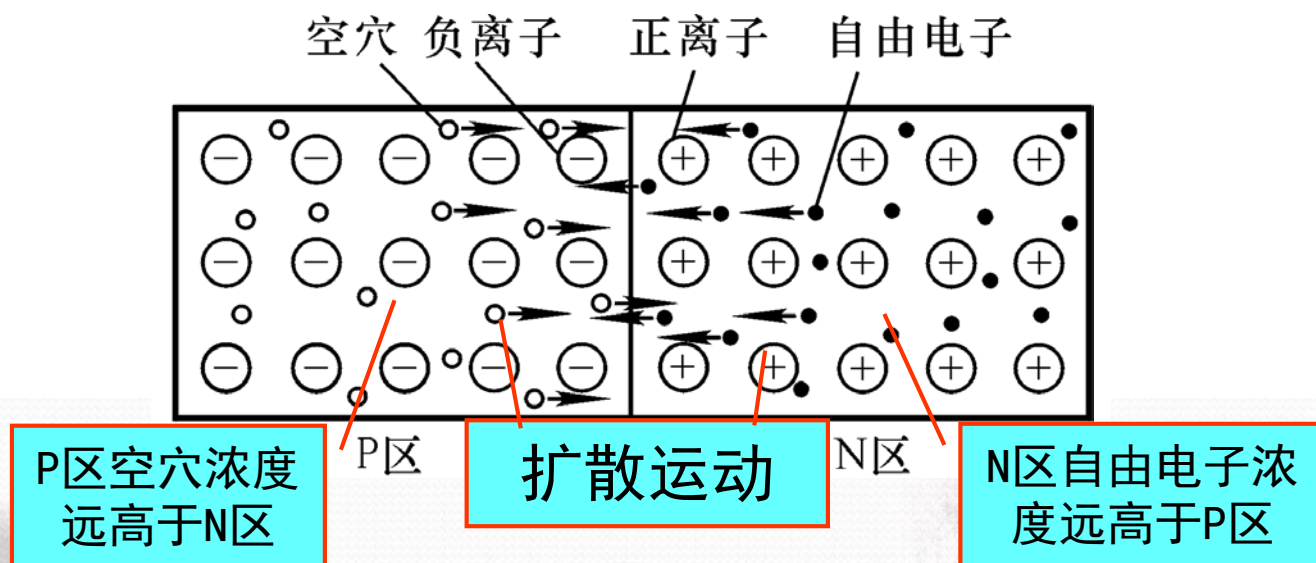


# 三、PN结及其单向导电性

## 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

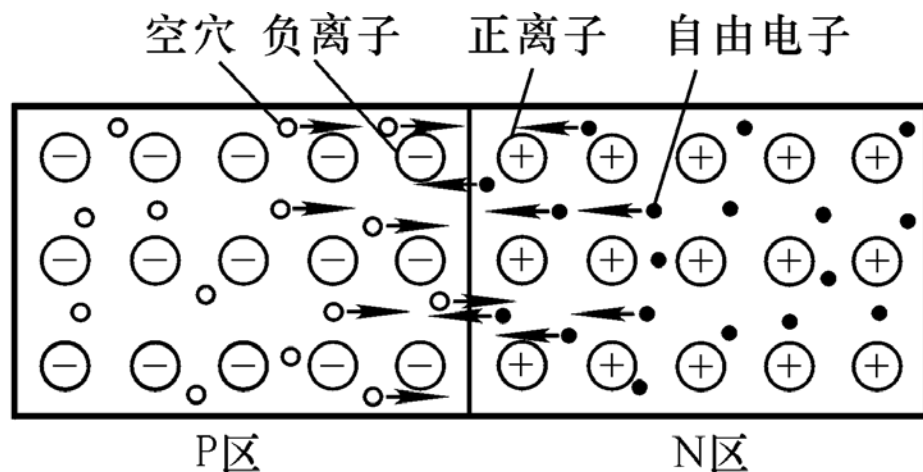
**物理过程：**多子扩散 → 形成空间电荷区 (耗尽层) → 产生内电场 → 阻止多子扩散，利于少子漂移，达动态平衡，形成PN结



**扩散运动：因浓度差而产生的多子运动**



# 三、PN结及其单向导电性

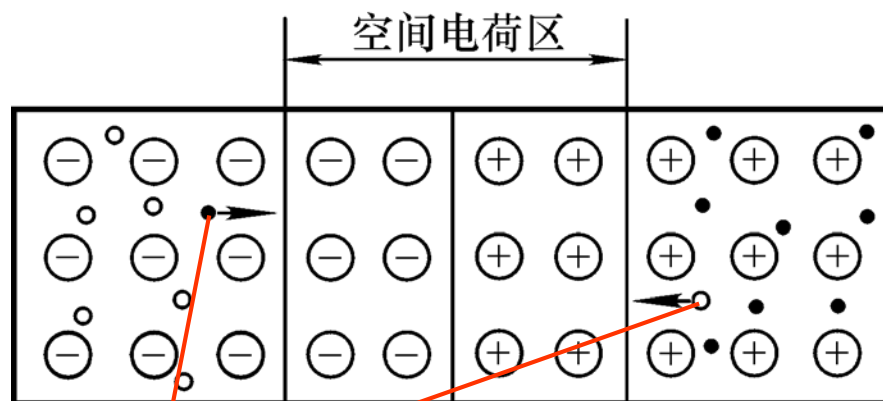


多子扩散

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)

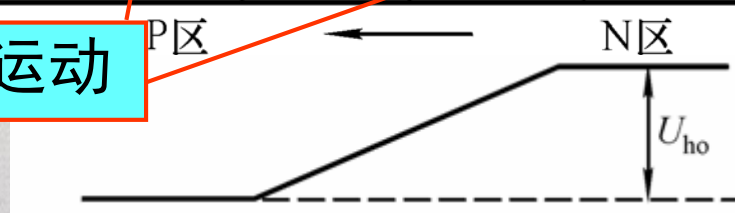


产生内电场



阻止多子扩散  
利于少子漂移

漂移运动

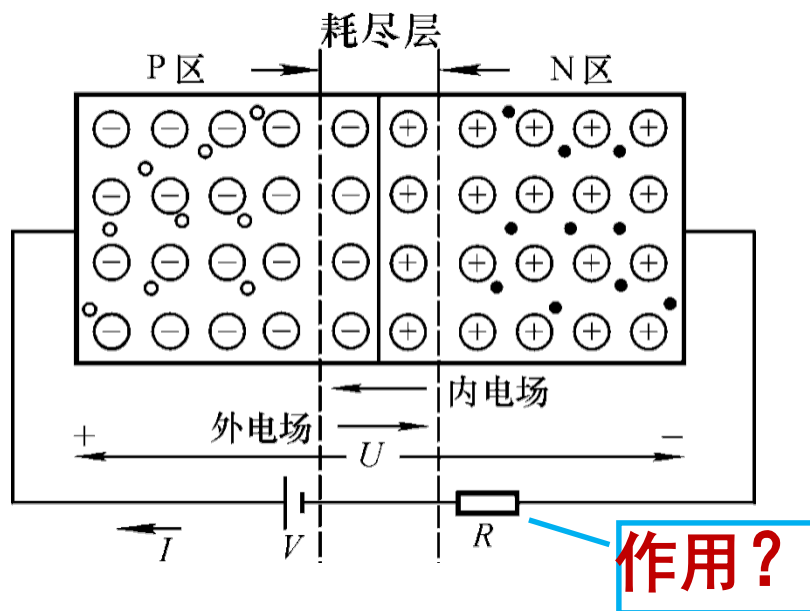


漂移运动：在电场力作用下少子的运动



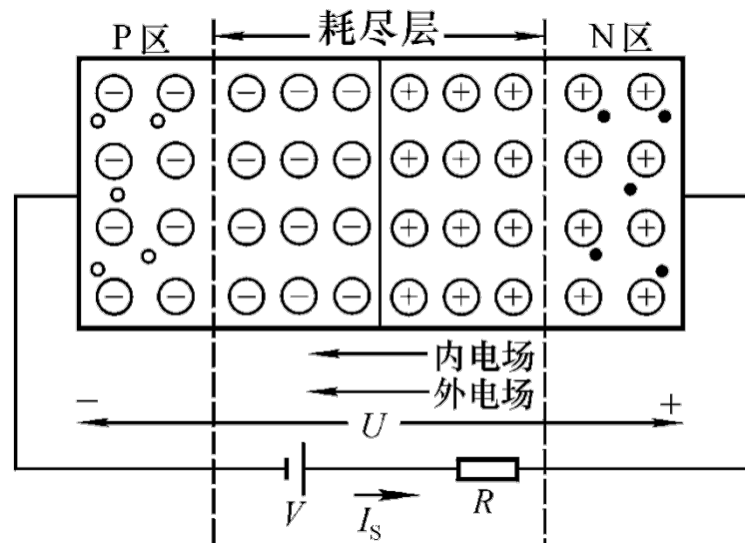
# 三、PN结及其单向导电性

## 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，反向饱和电流小
- ❑ PN结近似为截止状态



## 四、PN结的电容效应

### PN结的单向导电性

#### ➤ 势垒电容 $C_b$

□ 电路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： $C_j = C_b + C_d$

- ✓ 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



# 讨论

- 1、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？
- 2、为什么半导体器件的温度稳定性差？是多子还是少子是对温度稳定性影响大？
- 3、为什么半导体器件有最高工作频率？





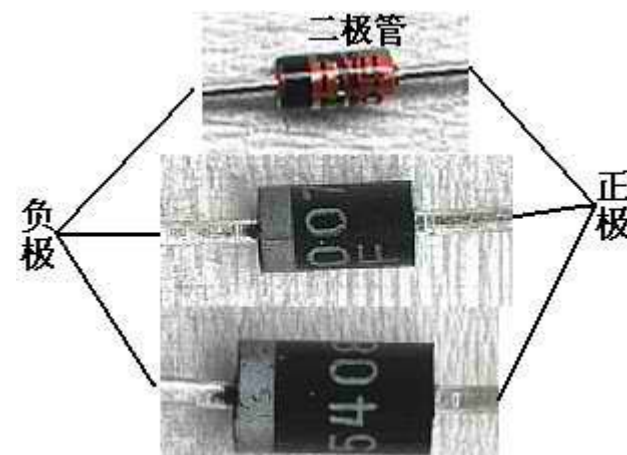
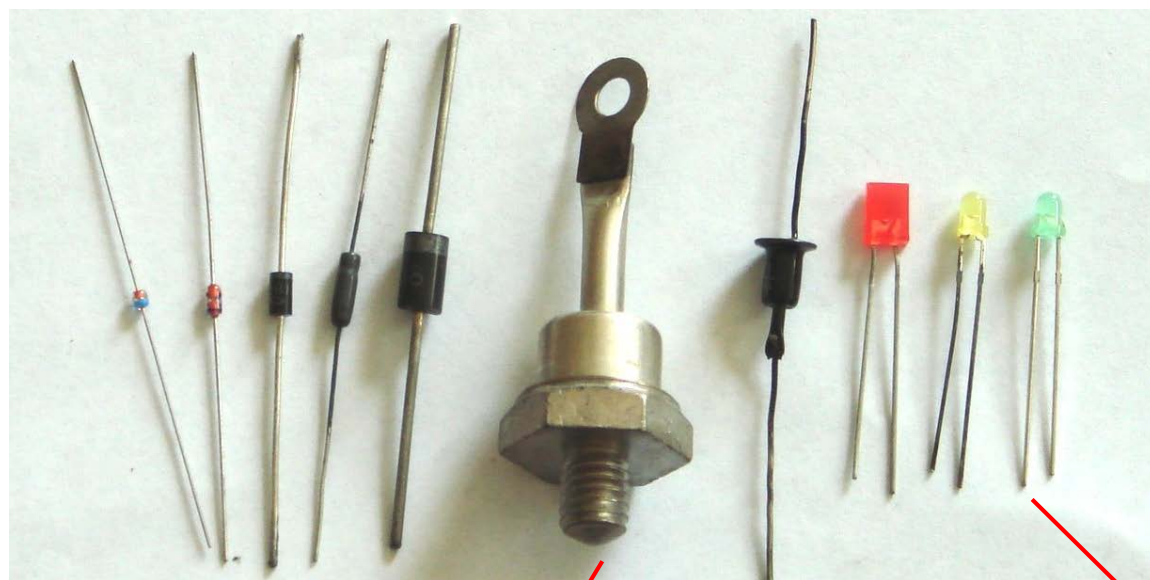
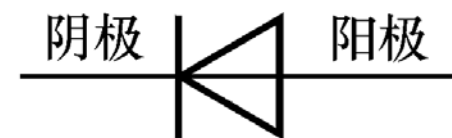
## § 1.2 半导体二极管

- 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

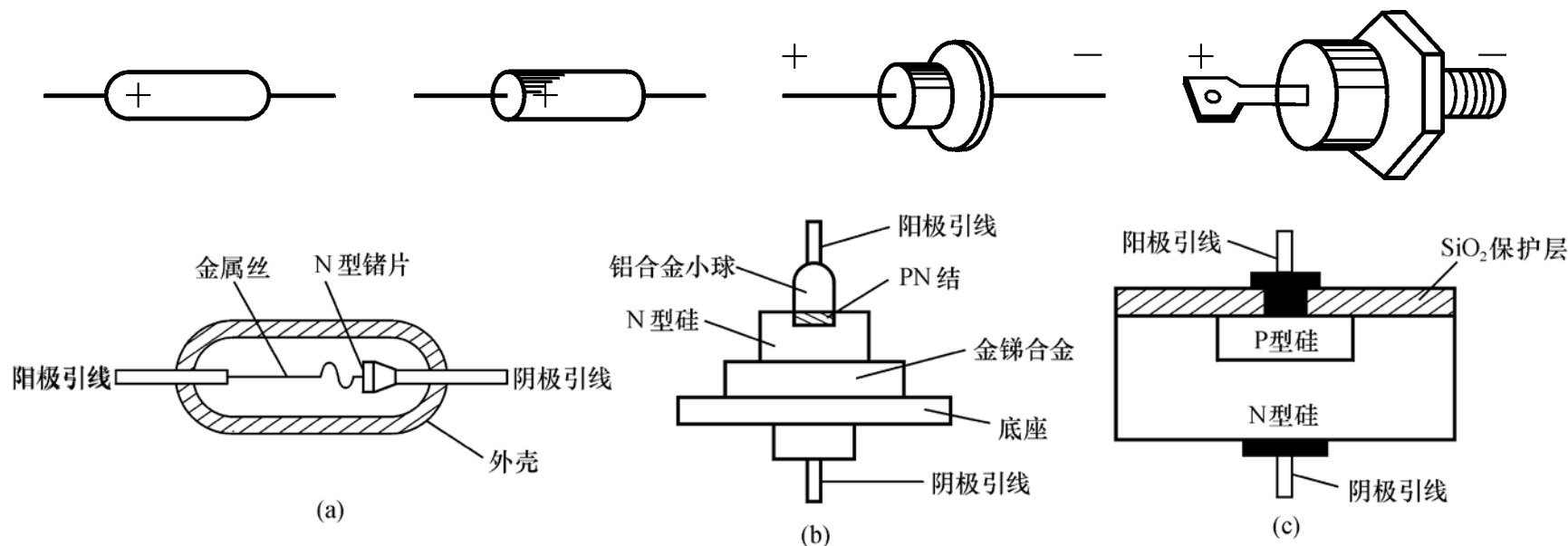
稳压  
二极管

发光  
二极管

特点和用途不同！

# 一、二极管的组成

## 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。

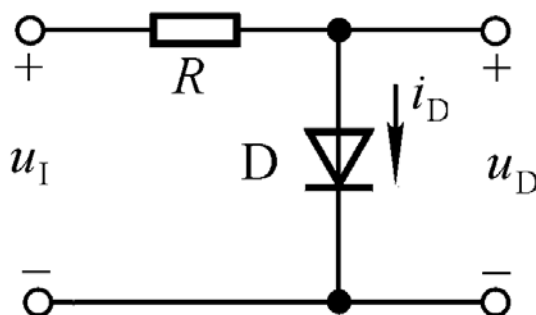




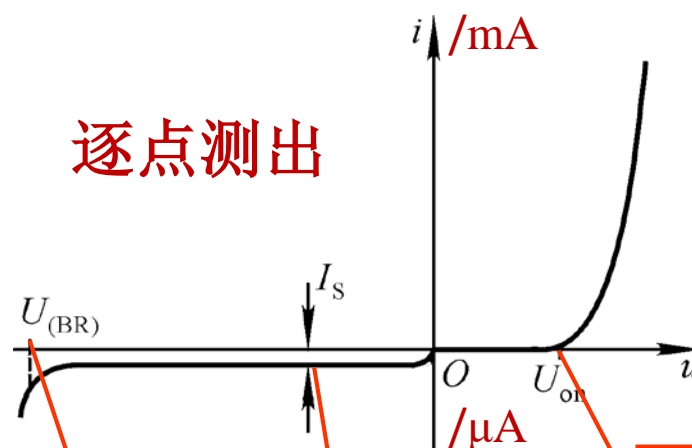
## 二、二极管的伏安特性及电流方程

二极管的电流与其端电压的关系称为伏安特性。

$$i = f(u)$$



逐点测出



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

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

$q$ : 电子的电量  
 $k$ : 波尔兹曼常数  
 $T$ : 热力学温度

击穿电压

反向饱和和电流

开启电压

常温下  $U_T = 26\text{mV}$

温度的  
电压当量

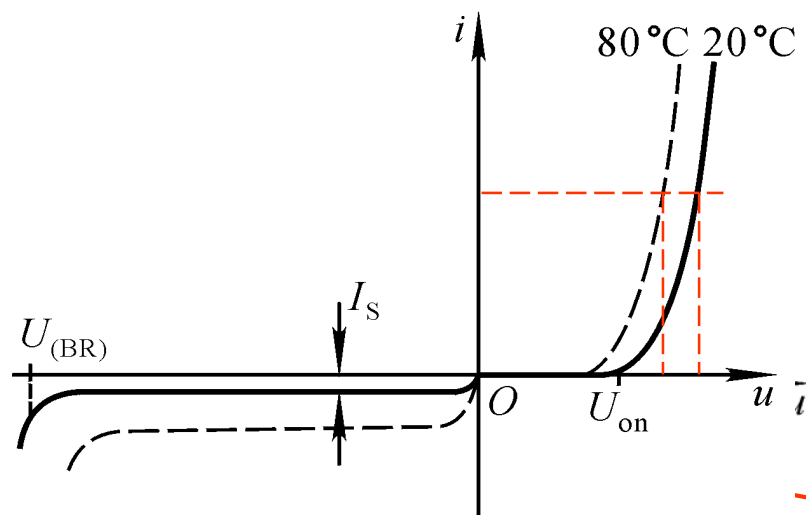
| 材料  | 开启电压 | 导通电压     | 反向饱和电流             |
|-----|------|----------|--------------------|
| 硅Si | 0.5V | 0.5~0.8V | 1 $\mu\text{A}$ 以下 |
| 锗Ge | 0.1V | 0.1~0.3V | 几十 $\mu\text{A}$   |



## 二、二极管的伏安特性及电流方程

从二极管的伏安特性可以反映出：

### 1. 单向导电性



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

若正向电压  $u \gg U_T$ , 则  $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$

若反向电压  $|u| \gg U_T$ , 则  $i \approx -I_S$

反向特性几乎是横轴的平行线

### 2. 伏安特性受温度影响

$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow$  在电流不变情况下管压降  $u \downarrow$

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

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

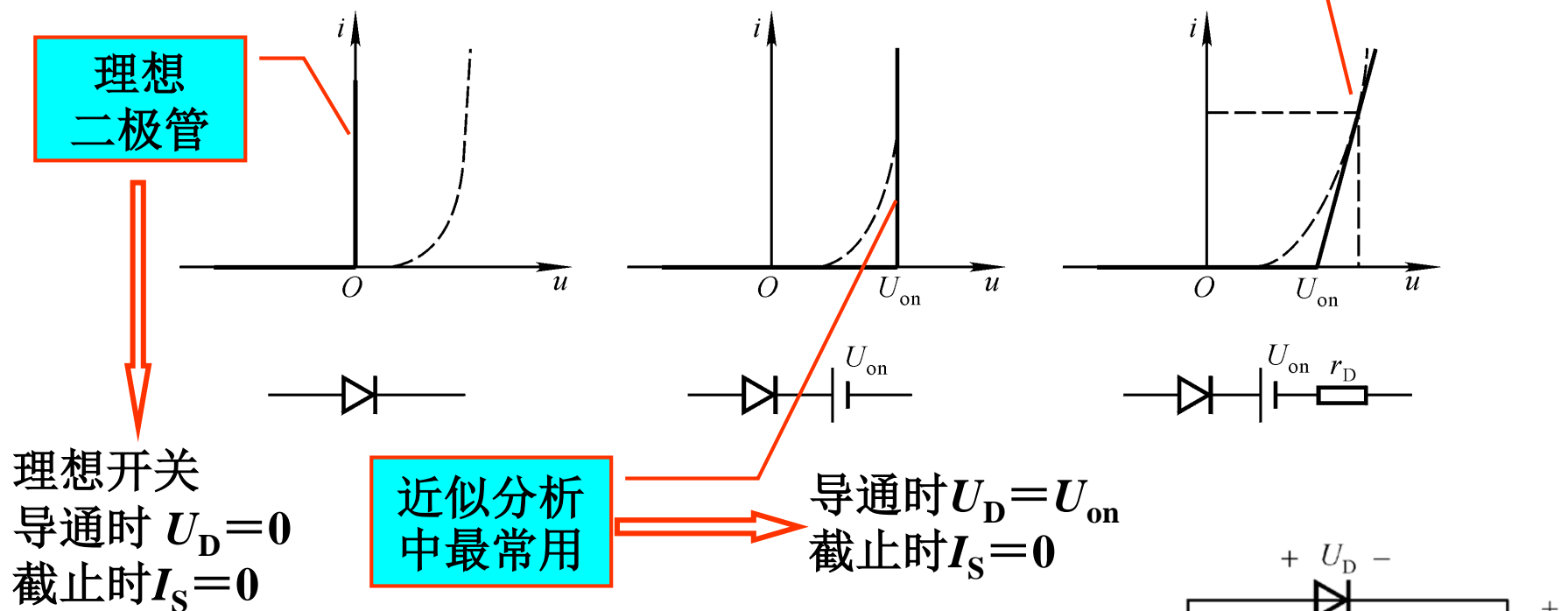
增大  $1 \text{ 倍}/10^{\circ}\text{C}$

$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow$  正向特性左移, 反向特性下移

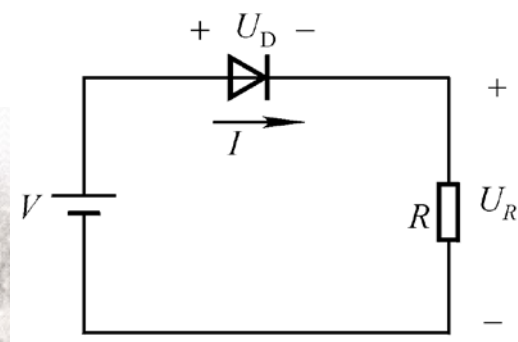
# 三、二极管的等效电路

导通时 $i$ 与 $u$   
成线性关系

## 1. 将伏安特性折线化—直流模型（静态模型）



应根据不同情况选择不同的等效电路！

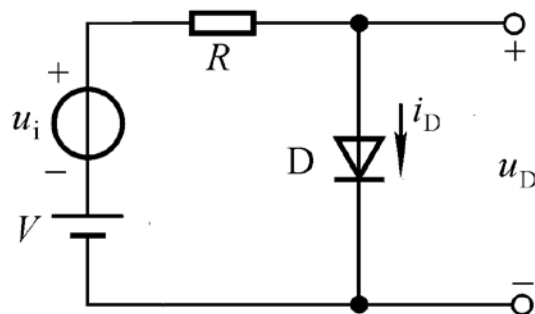




# 三、二极管的等效电路

## 2. 微变等效电路—交流模型（动态模型）

当二极管在静态基础上有一动态信号作用时，则可将二极管等效为一个电阻，称为动态电阻，也就是微变等效电路。



$u_i=0$ 时直流电源作用，  
称静态工作点

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

低频小信号作用

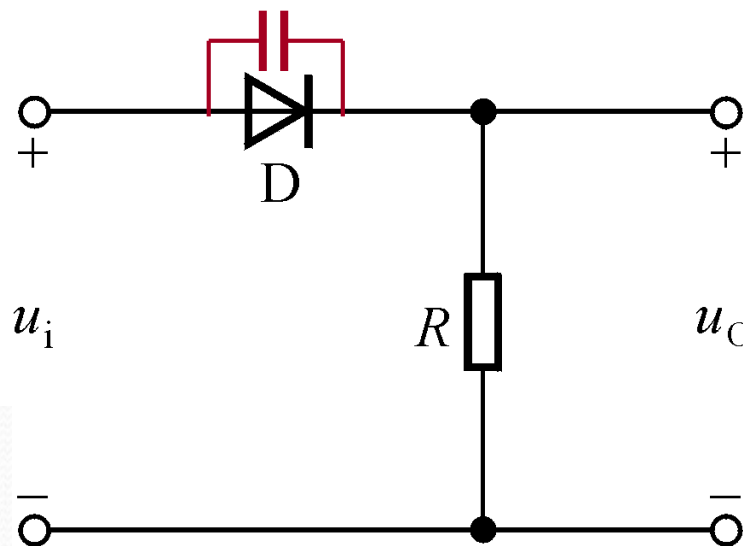
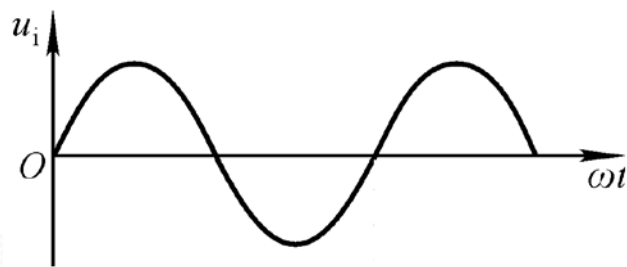
静态电流

$Q$ 越高， $r_d$ 越小。



## 四、二极管的主要参数

- 最大整流电流 $I_F$ ：最大平均值
- 最大反向工作电压 $U_R$ ：最大瞬时值
- 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







# 五、稳压二极管

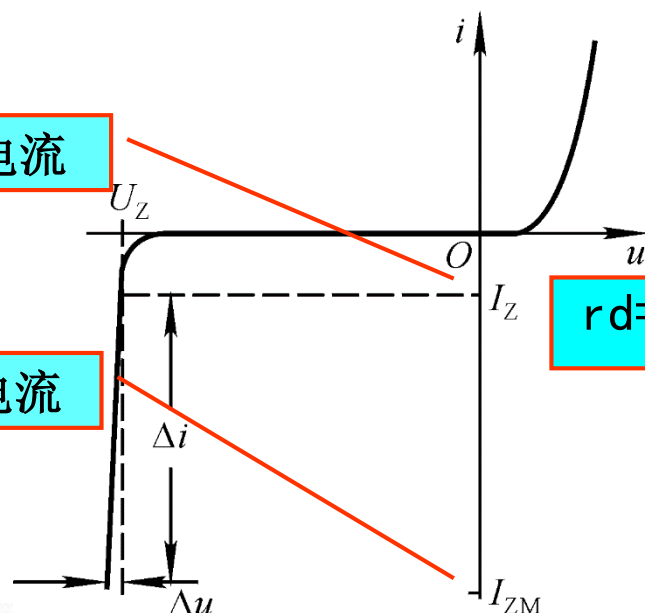
面接触型

- 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

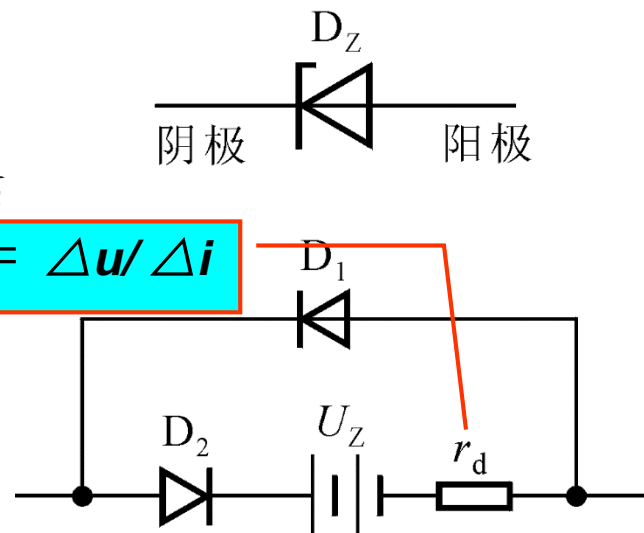
加限流电阻

进入稳压区的最小电流

不至于损坏的最大电流



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



## 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  $\alpha = \Delta U_Z / \Delta T$



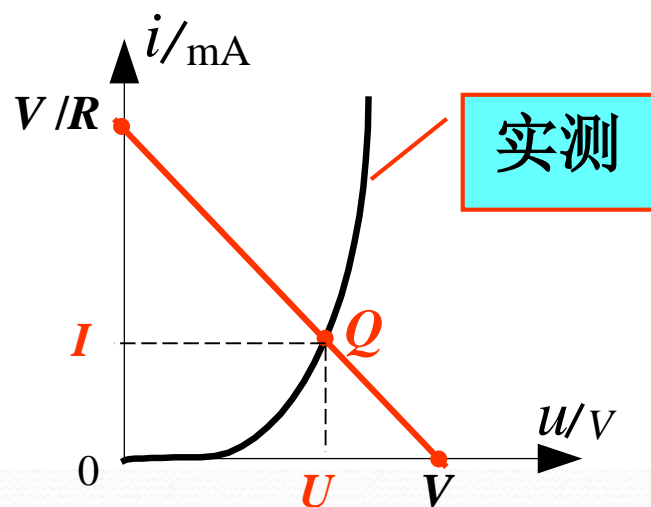
# 讨论一

- 电源电压值不同时如何求解回路电流

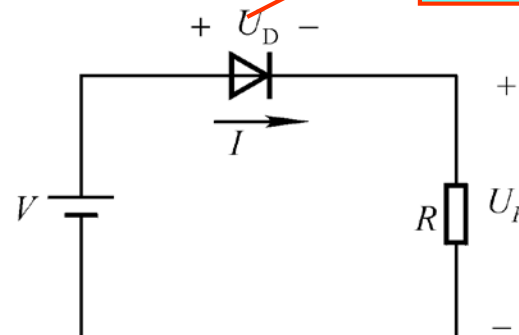
100V? 5V? 2V? 1V?

Si

图解法:



?



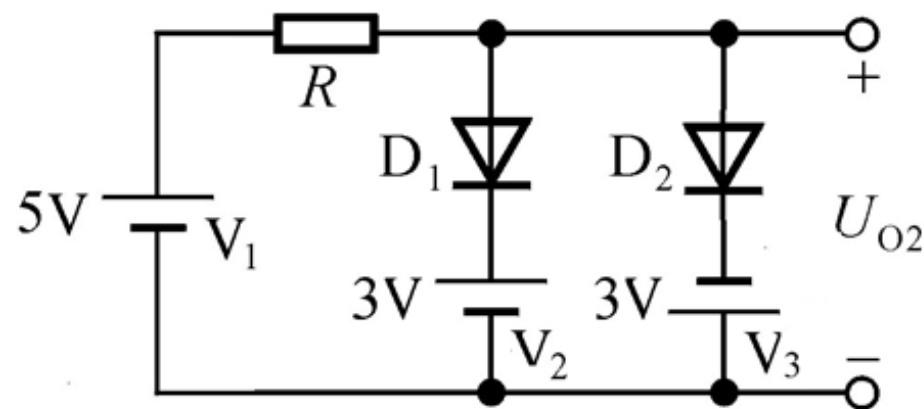
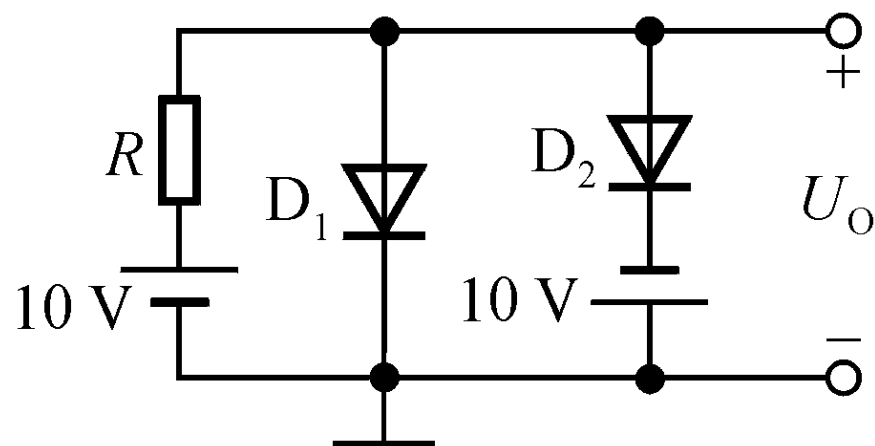
$$u_D = V - iR$$

应根据不同情况选择不同的等效电路，采用不同方法！



## 讨论二

- 如何判断二极管的工作状态？

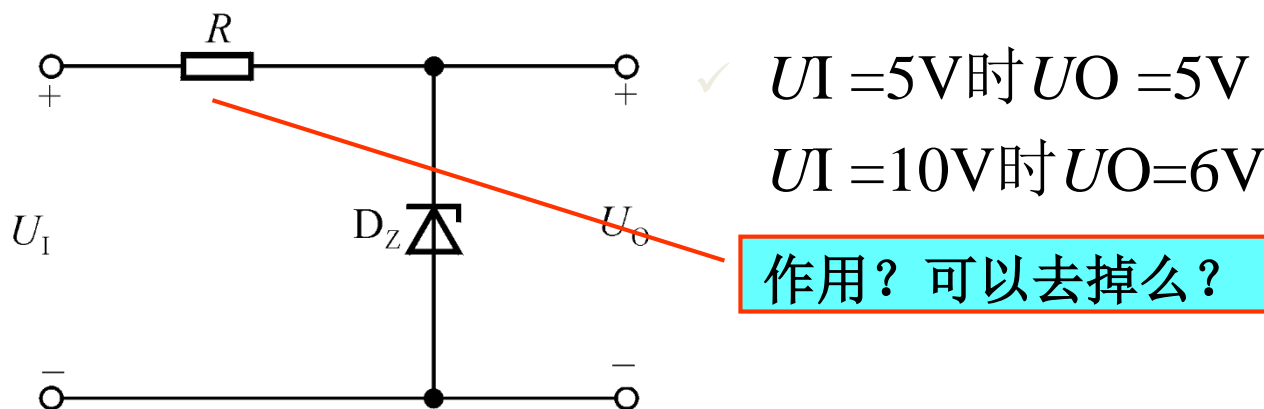




# 讨论三

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。



✓ 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

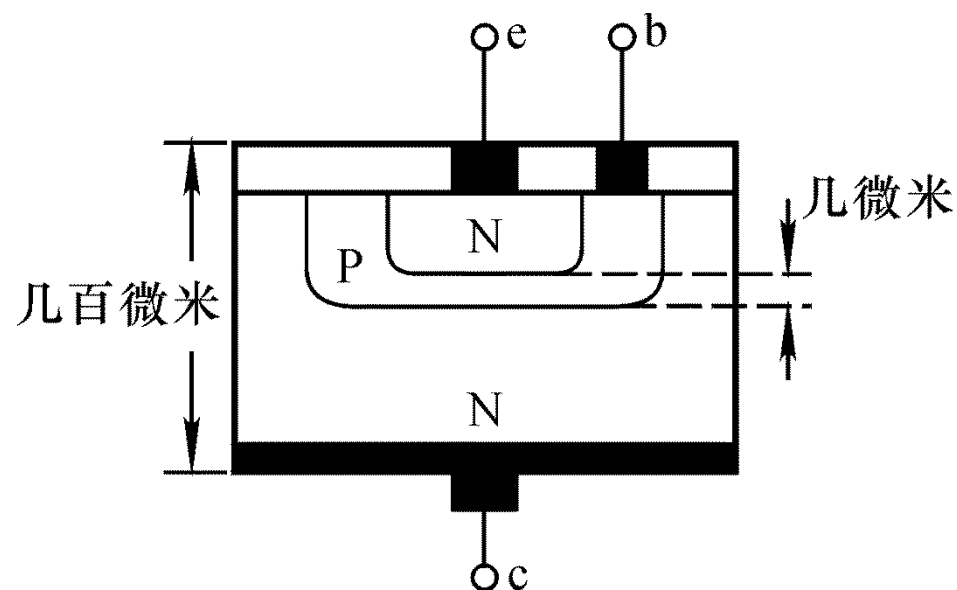
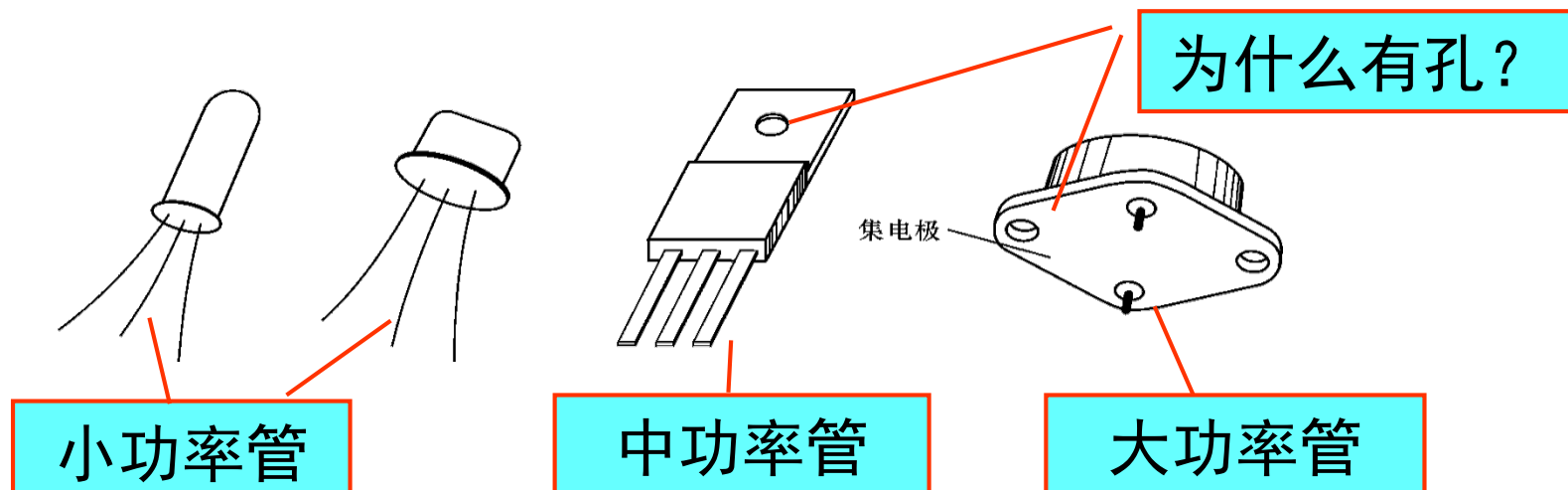




## § 1.3 晶体三极管

- 一、晶体管的结构与符号
- 二、晶体管的放大原理
- 三、晶体管的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

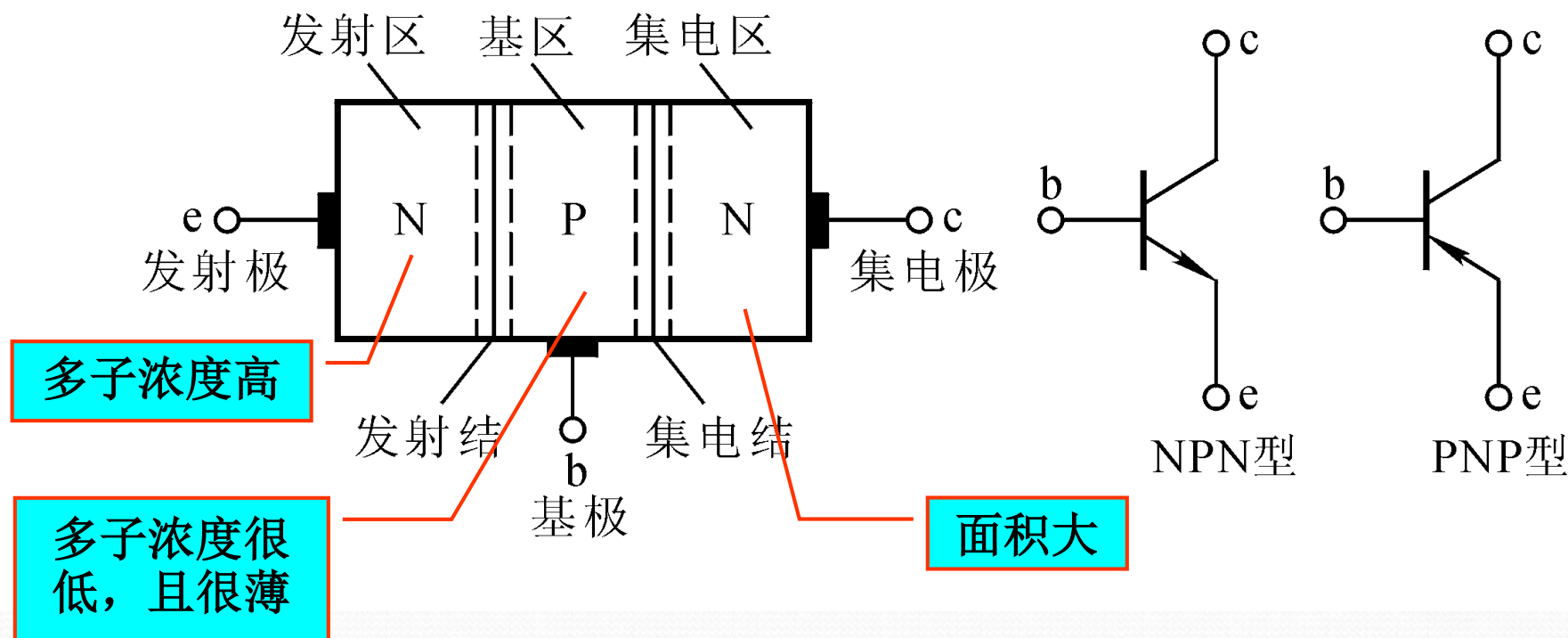
# 一、晶体管的结构与符号





# 一、晶体管的结构与符号

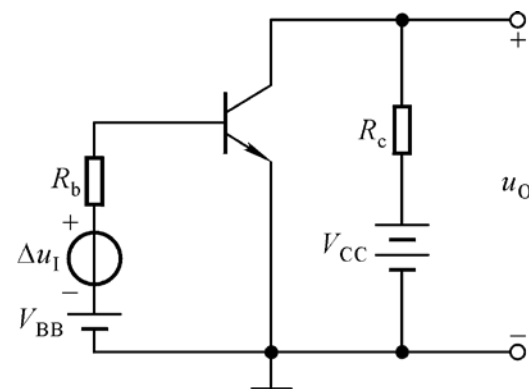
结构示意图：



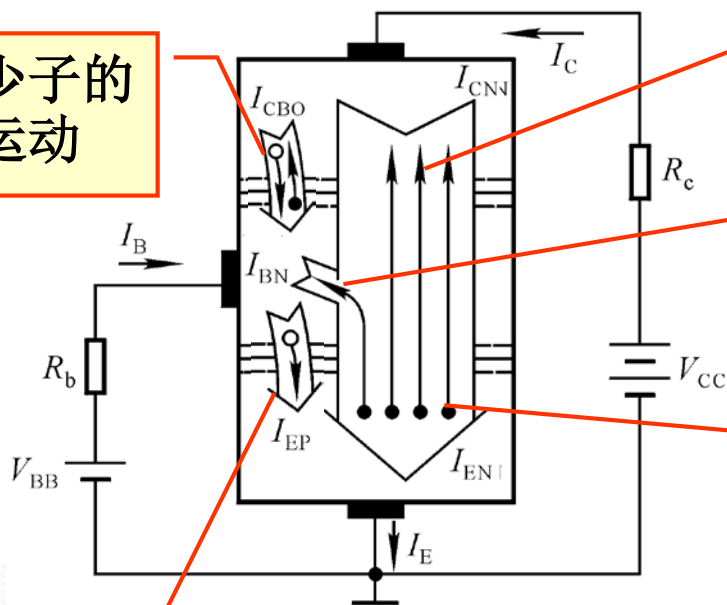
晶体管有三个极、三个区、两个PN结。

## 二、晶体管的放大原理

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



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 $I_C$ ， $I_E = I_C + I_B$ 。





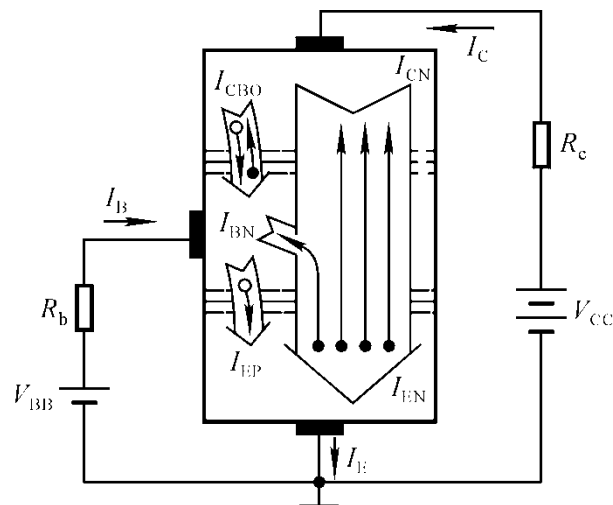
## 二、晶体管的放大原理

➤ **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

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

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

共射交流电  
流放大系数

集电结反向  
饱和电流

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

穿透电流

共基直流电  
流放大系数

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

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

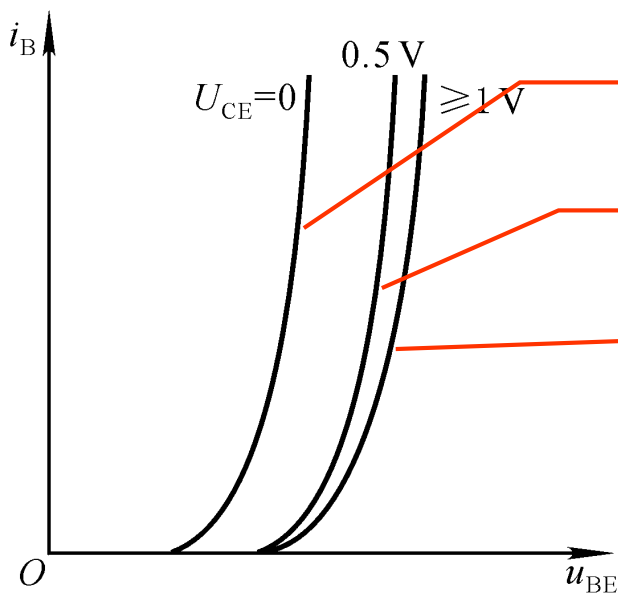
共基交流电  
流放大系数

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？

对于小功率晶体管， $U_{CE}$  大于1V的一条输入特性曲线可以取代  $U_{CE}$  大于1V的所有输入特性曲线。

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

对应于一个 $I_B$ 就有一条 $i_C$ 随 $u_{CE}$ 变化的曲线。


$$\Delta i_{\text{C}}$$

# 放大区

## 截止区

## 实际的三极管 $\beta$ 不是常量!

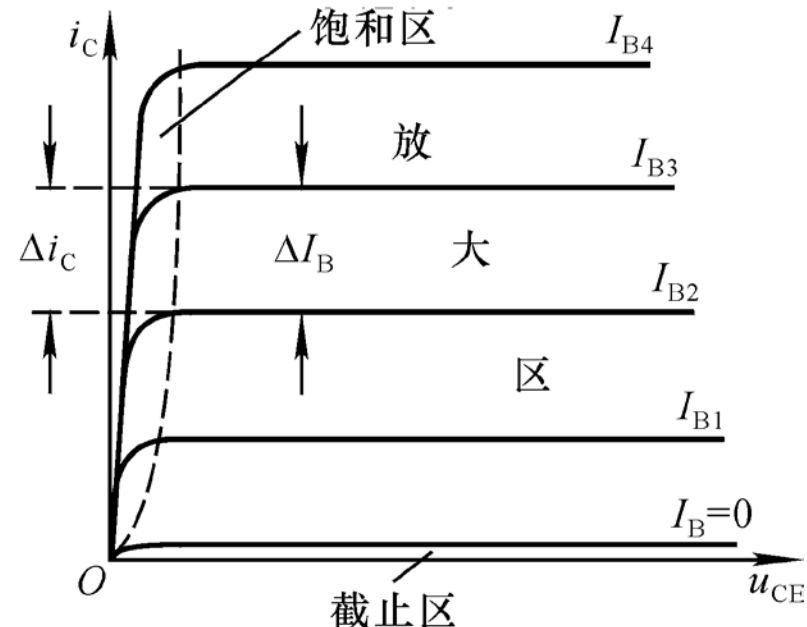
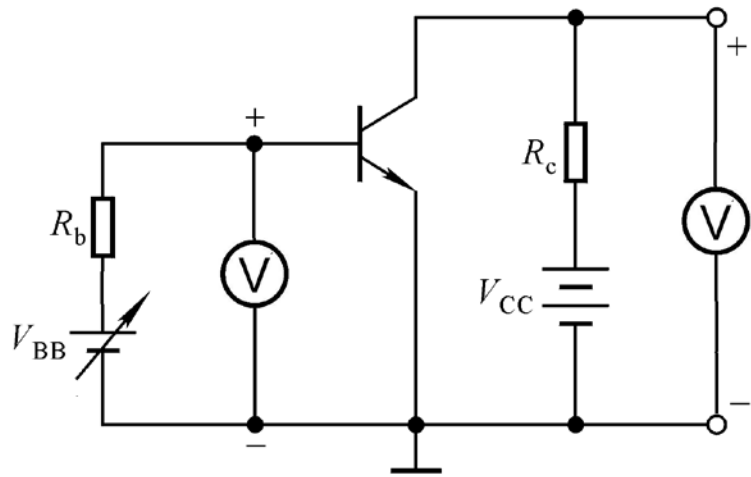
为什么 $u_{CE}$ 较小时 $i_C$ 随 $u_{CE}$ 变化很大？为什么进入放大状态曲线几乎是横轴的平行线？

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

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

# 三、晶体管的共射输入特性和输出特性

## 晶体管的三个工作区域



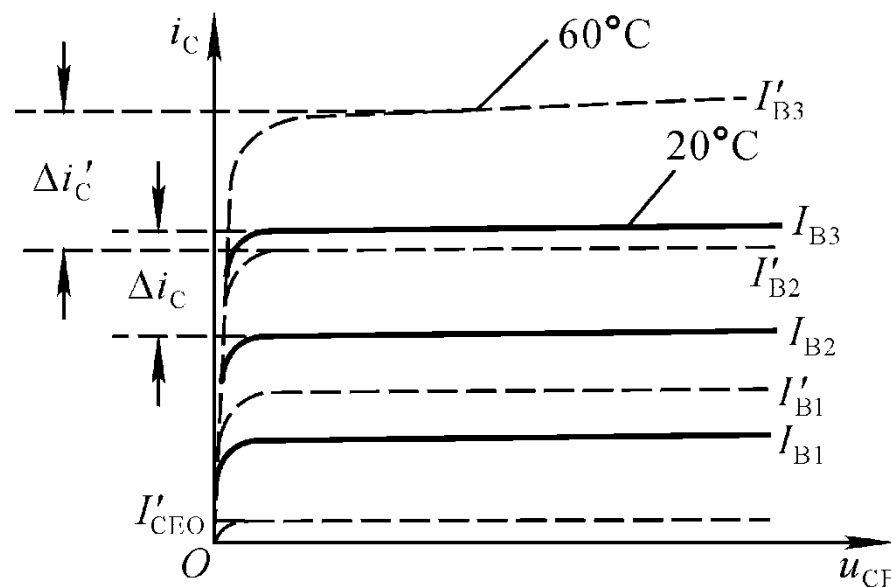
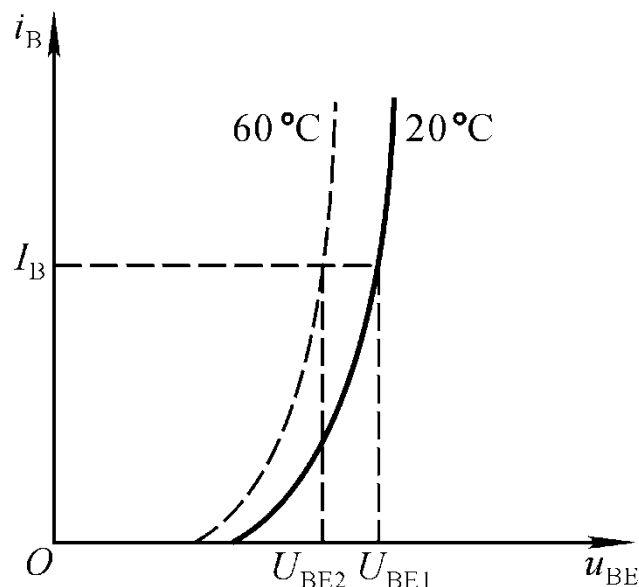
| 状态 | $u_{BE}$      | $i_C$         | $u_{CE}$      |
|----|---------------|---------------|---------------|
| 截止 | $\leq U_{on}$ | $I_{CEO}$     | $V_{CC}$      |
| 放大 | $> U_{on}$    | $\beta i_B$   | $\geq u_{BE}$ |
| 饱和 | $> U_{on}$    | $< \beta i_B$ | $< u_{BE}$    |

晶体管工作在放大状态时，输出回路的电流  $i_C$  几乎仅仅决定于输入回路的电流  $i_B$ ，即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  $u_{BE} \downarrow$



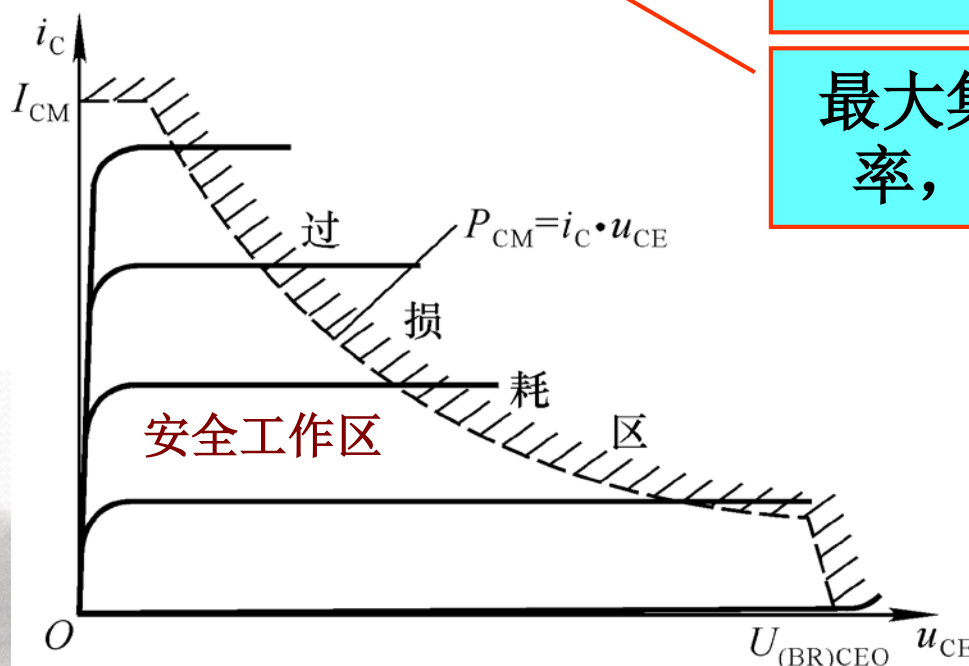
## 五、主要参数

- 直流参数:  $\bar{\beta}$ 、 $\bar{\alpha}$ 、 $I_{CBO}$ 、 $I_{CEO}$   $\bar{\alpha} = I_C / I_E$   $\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \frac{\beta}{1 + \beta}$
- 交流参数:  $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $f_T$  (使 $\beta=1$ 的信号频率)
- 极限参数:  $I_{CM}$ 、 $P_{CM}$ 、 $U_{(BR)CEO}$

最大集电极电流

c-e间击穿电压

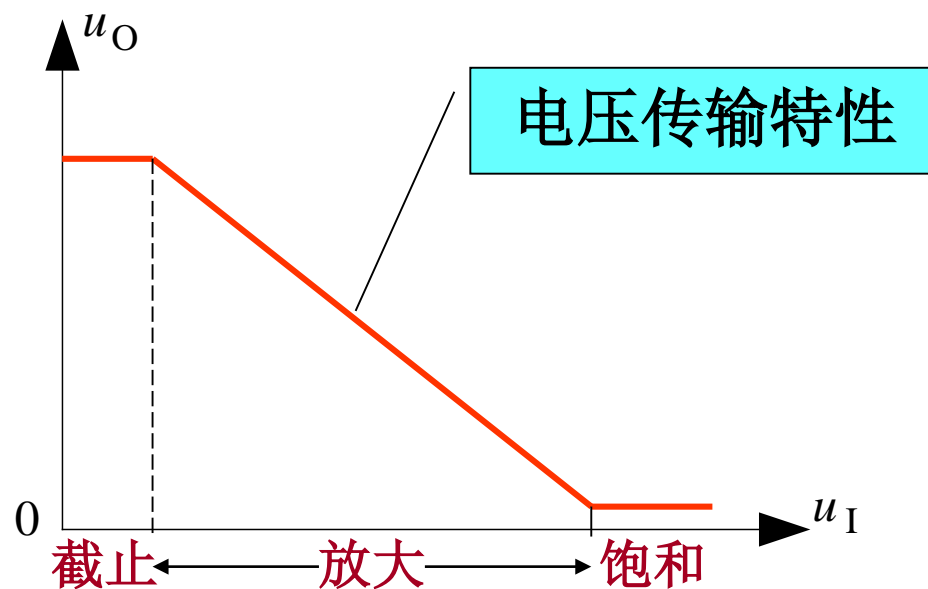
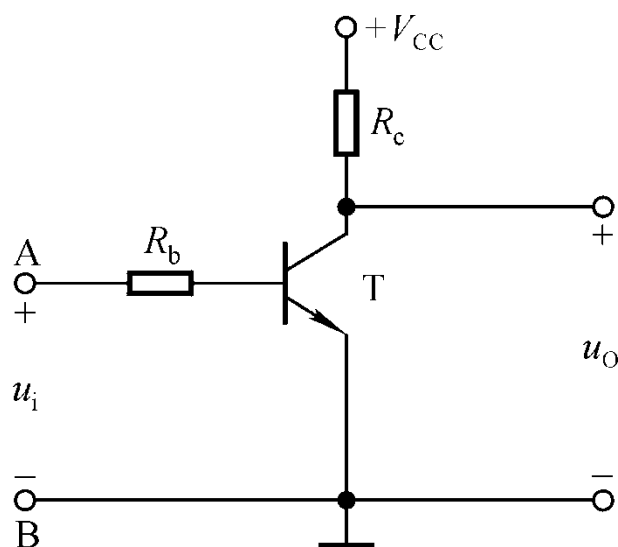
最大集电极耗散功率,  $P_{CM} = i_C u_{CE}$





# 讨论一

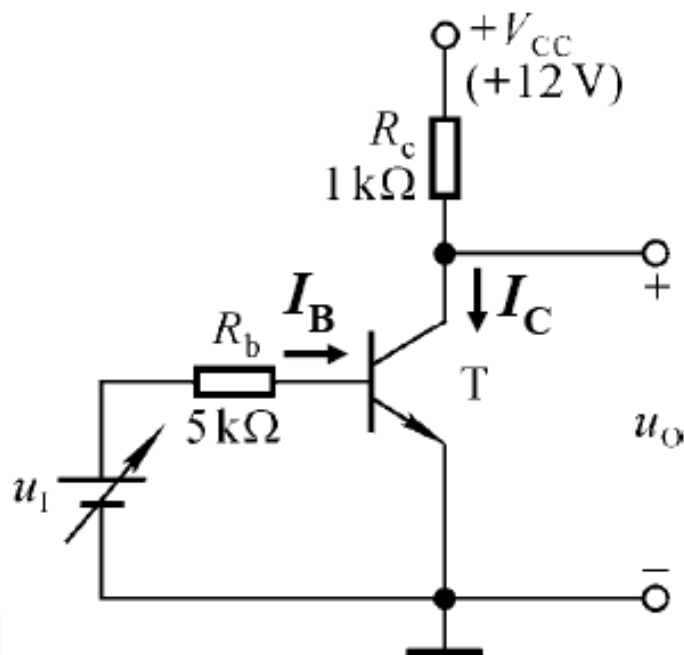
- 图示电路中电压分别为多少时三极管工作在截止区、放大区、饱和区？





## 讨论二

- 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

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

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

则假设成立;