A photograph of a classical building with a red-tiled roof and stone columns, identified by the text as Tsinghua University. The building features a prominent entrance with a pediment and columns. The text '清華學堂' is visible on the upper part of the facade.

# 第一章 半导体二极管和三极管



# 第一章 半导体二极管和三极管

§ 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 半导体基础知识

- 一、本征半导体
- 二、杂质半导体
- 三、PN结的形成及其单向导电性
- 四、PN结的电容效应





# 一、本征半导体

## 1、什么是半导体？什么是本征半导体？

导电性介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体。

导体——铁、铝、铜等金属元素等低价元素，其最外层电子在外电场作用下很容易产生定向移动，形成电流。

绝缘体——惰性气体、橡胶等，其原子的最外层电子受原子核的束缚力很强，只有在外电场强到一定程度时才可能导电。

半导体——硅（Si）、锗（Ge），均为四价元素，它们原子的最外层电子受原子核的束缚力介于导体与绝缘体之间。

本征半导体是纯净的晶体结构的半导体。

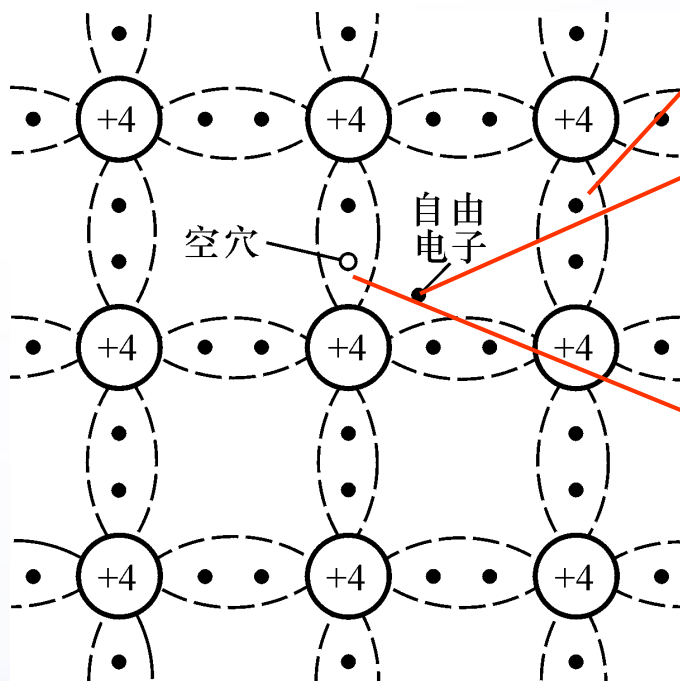
无杂质

稳定的结构





## 2、本征半导体的结构



共价键

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

自由电子的产生使共价键中留有一个空位置，称为空穴

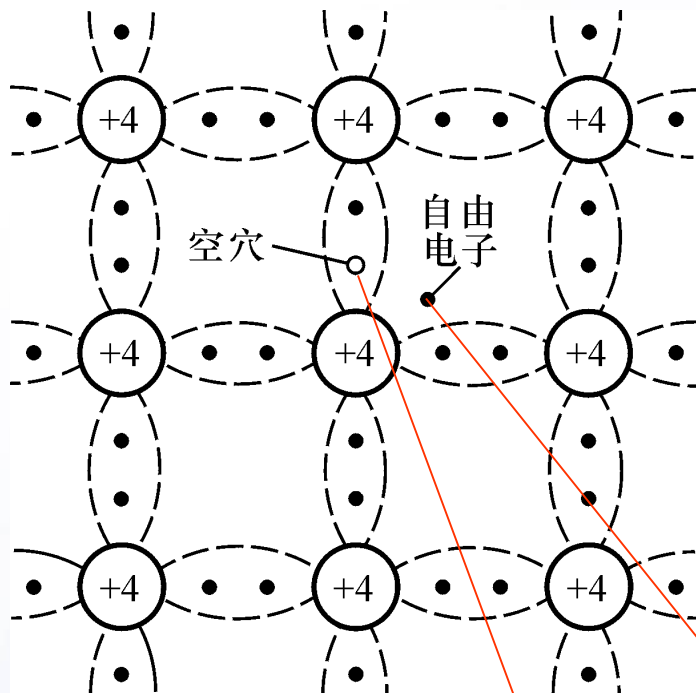
自由电子与空穴相碰同时消失，称为复合。

动态平衡

一定温度下，自由电子与空穴对的浓度一定；温度升高，热运动加剧，挣脱共价键的电子增多，自由电子与空穴对的浓度加大。



### 3. 本征半导体中的两种载流子



运载电荷的粒子称为载流子。

外加电场时，带负电的自由电子和带正电的空穴均参与导电，且运动方向相反。由于载流子数目很少，故导电性很差。

温度升高，热运动加剧，载流子浓度增大，导电性增强。

热力学温度0K时不导电。

两种载流子

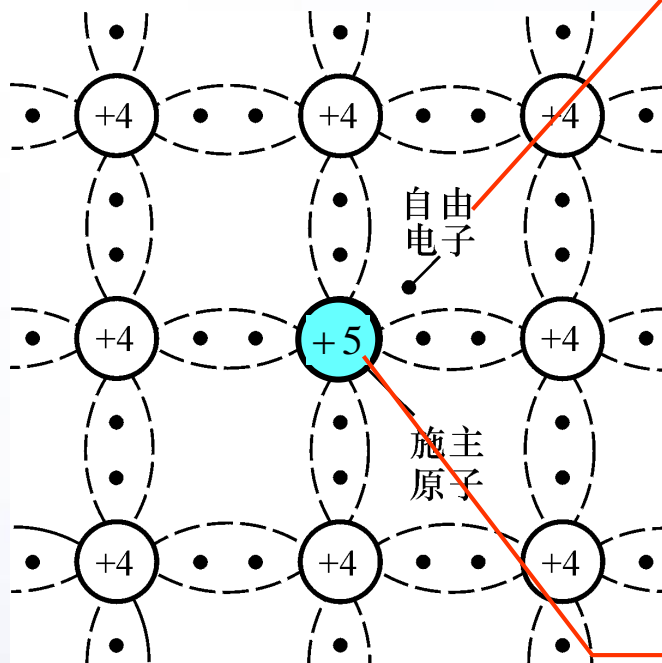
为什么要将半导体变成导电性很差的本征半导体？





## 二、杂质半导体

### 1. N型半导体



多数载流子

空穴比未加杂质时的数目多了？少了？为什么？

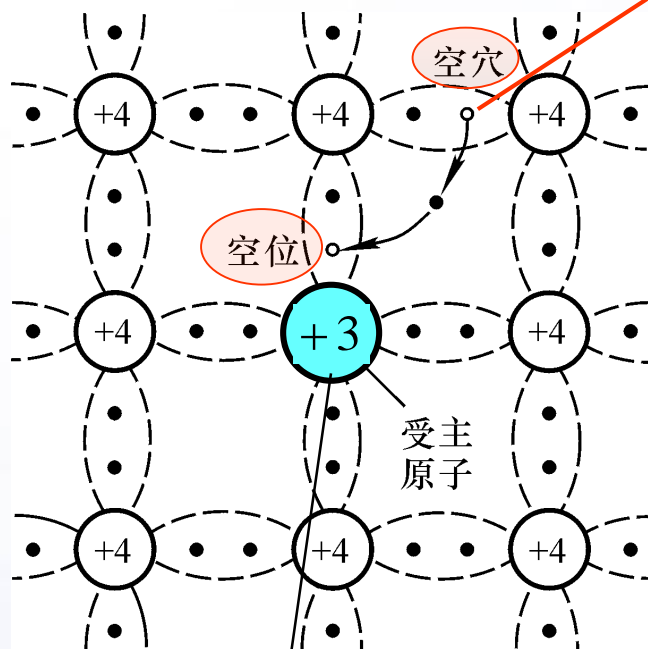
杂质半导体主要靠多数载流子导电。掺入杂质越多，多子浓度越高，导电性越强，实现导电性可控。

磷 (P)





## 2. P型半导体



多数载流子

P型半导体主要靠空穴导电，  
掺入杂质越多，空穴浓度越高，  
导电性越强，

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？

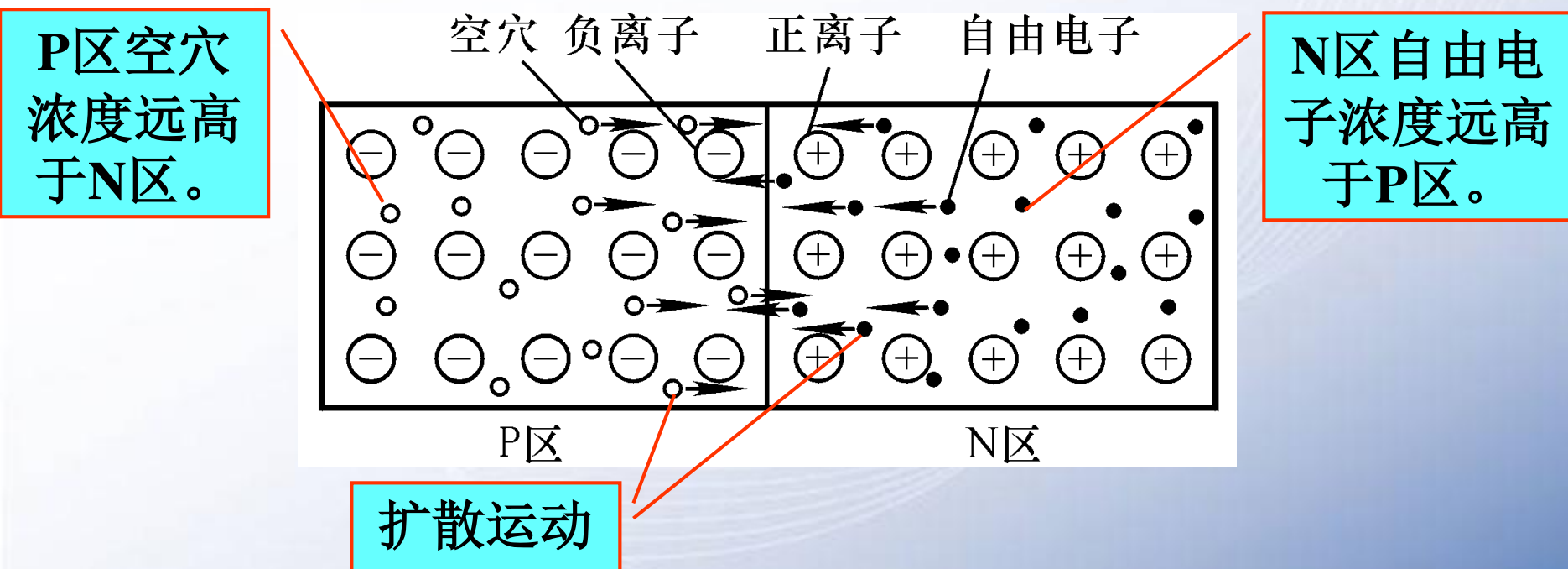
硼 (B)





### 三、PN结的形成及其单向导电性

物质因浓度差而产生的运动称为扩散运动。气体、液体、固体均有之。

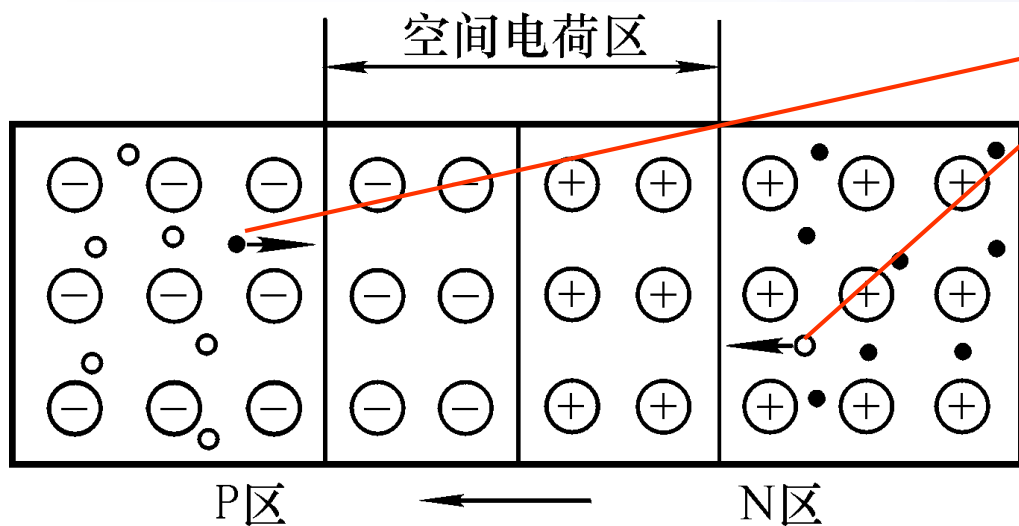


扩散运动使靠近接触面P区的空穴浓度降低、靠近接触面N区的自由电子浓度降低，产生内电场。



## PN 结的形成

由于扩散运动使P区与N区的交界面缺少多数载流子，形成内电场，从而阻止扩散运动的进行。内电场使空穴从N区向P区、自由电子从P区向N区运动。



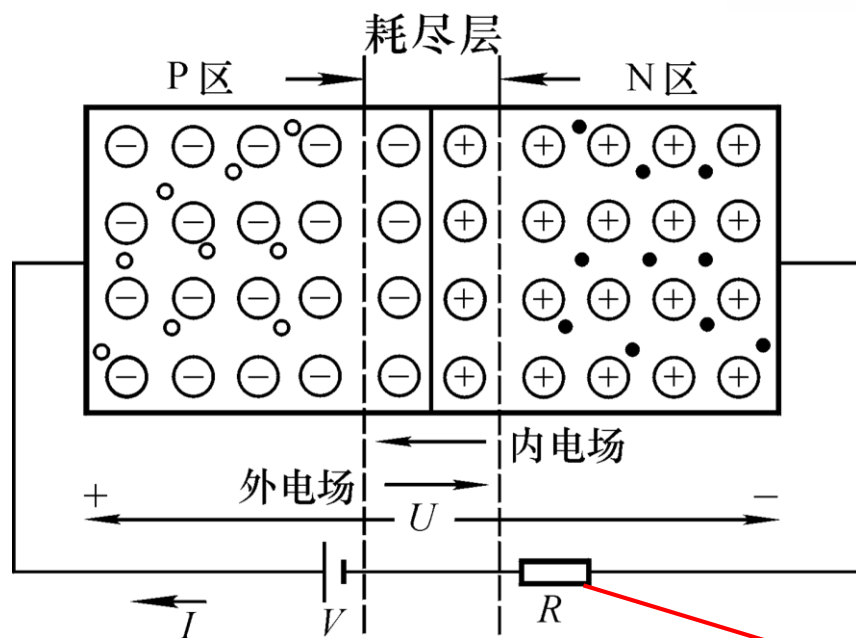
漂移运动

因电场作用所产生的运动称为漂移运动。

参与扩散运动和漂移运动的载流子数目相同，达到动态平衡，就形成了PN结。

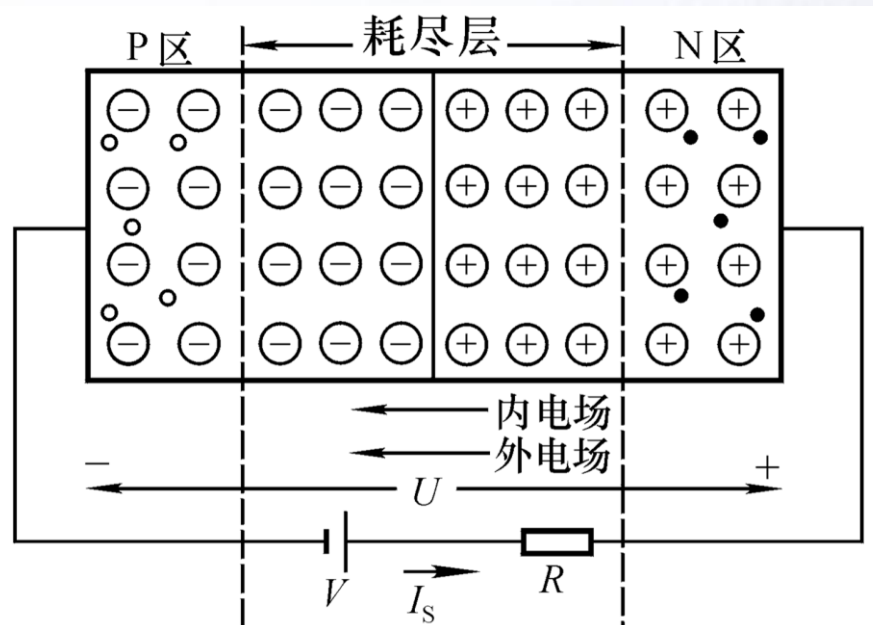


# PN 结的单向导电性



**PN结加正向电压导通：**

耗尽层变窄，扩散运动加剧，由于外电源的作用，形成扩散电流，PN结处于导通状态。



**必要吗？**

**反向电压截止：**

耗尽层变宽，阻止扩散运动，有利于漂移运动，形成漂移电流。由于电流很小，故可近似认为其截止。





## 四、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，与电容的充放电相同，其等效电容称为势垒电容 $C_b$ 。

### 2. 扩散电容

PN结外加的正向电压变化时，在扩散路程中载流子的浓度及其梯度均有变化，也有电荷的积累和释放的过程，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！若PN结外加电压频率高到一定程度，则失去单向导电性！





## 问题

- 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？





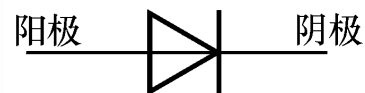


## §2 半导体二极管

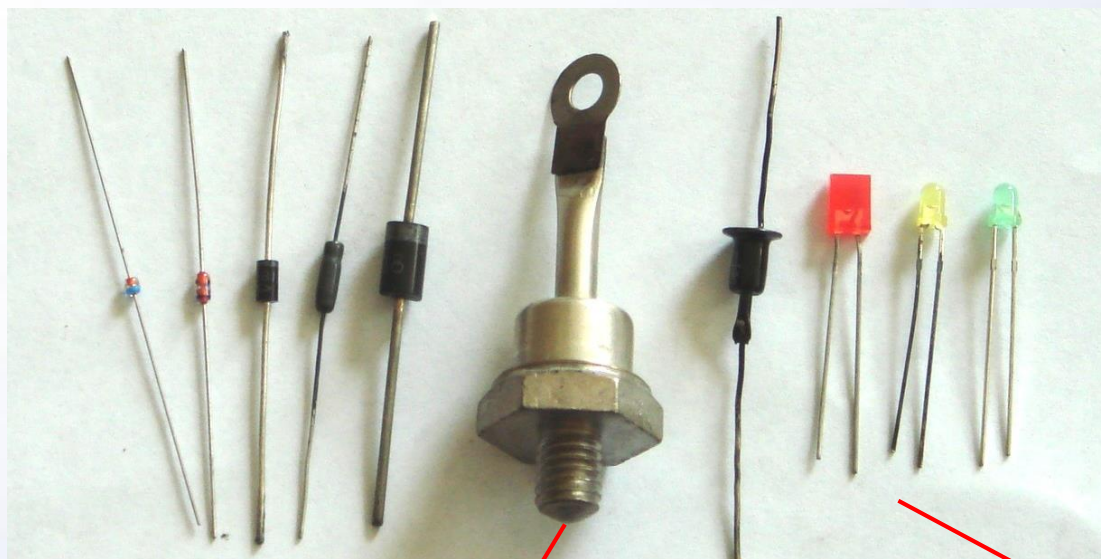
- 一、二极管的组成
- 二、二极管的伏安特性及电流方程
- 三、二极管的等效电路
- 四、二极管的主要参数
- 五、稳压二极管



# 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。



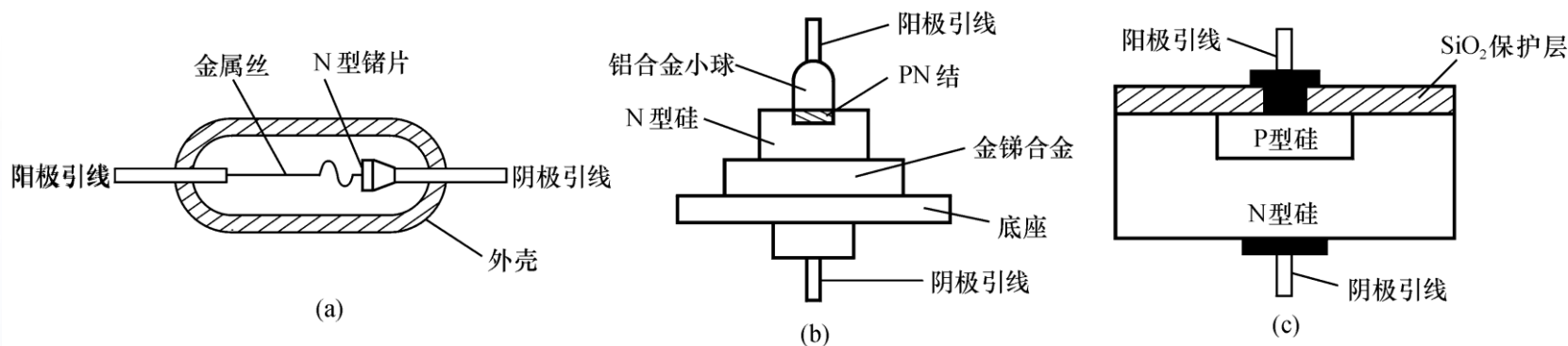
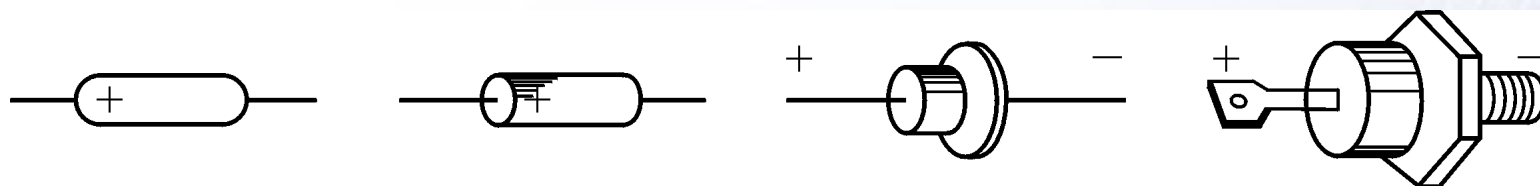
小功率  
二极管

大功率  
二极管

稳压  
二极管

发光  
二极管

# 一、二极管的组成



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。

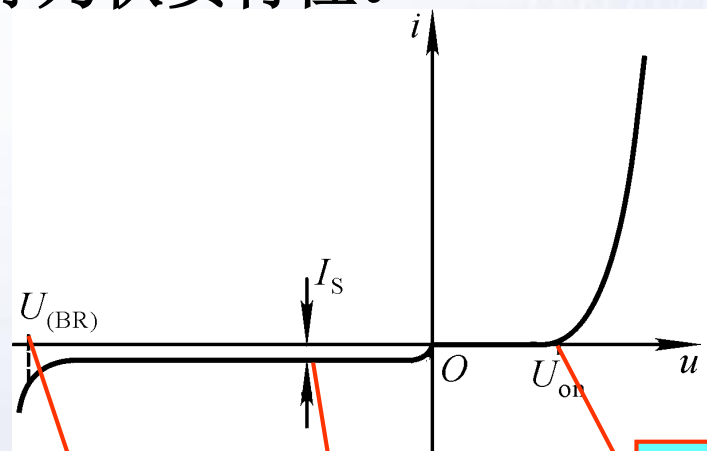
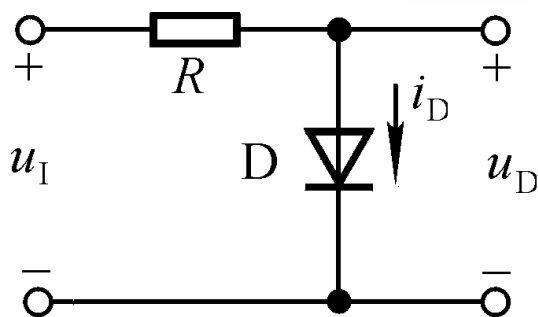
平面型：结面积可小、可大，小的工作频率高，大的结允许的电流大。



## 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。

$$i = f(u)$$



击穿电压

反向饱和电流

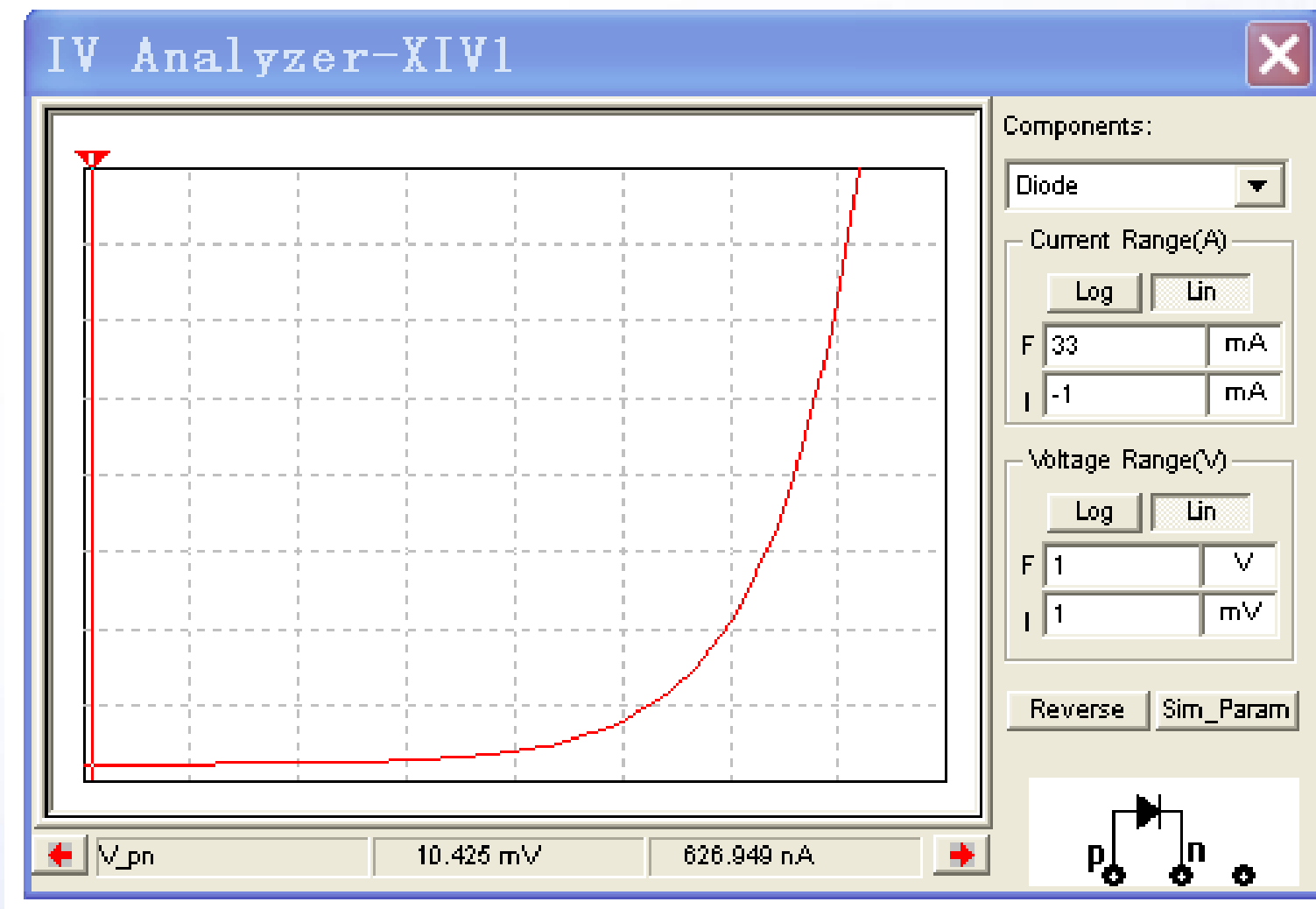
开启电压

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (\text{常温下 } U_T = 26\text{mV})$$

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	1μA以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	几十μA

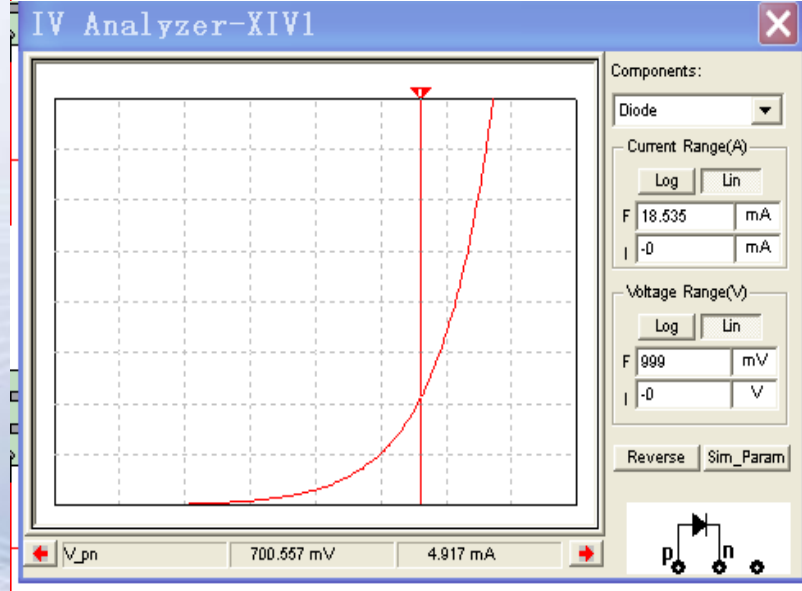
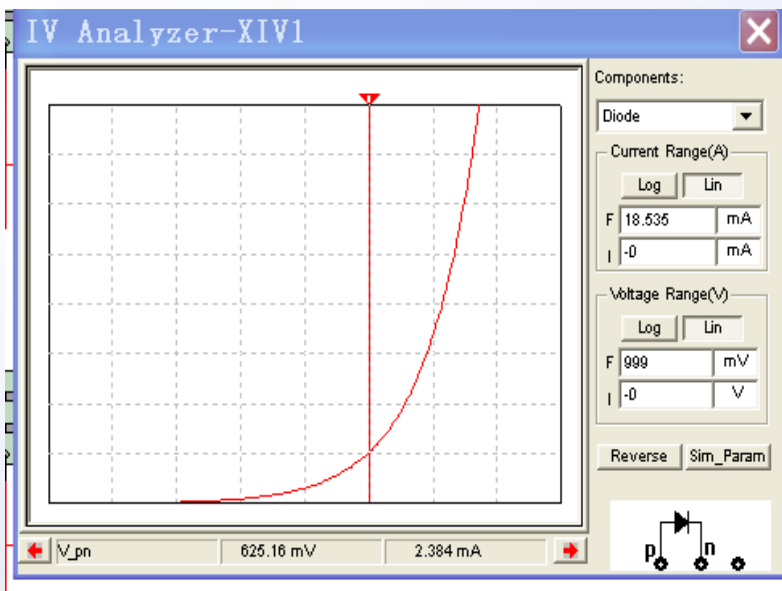
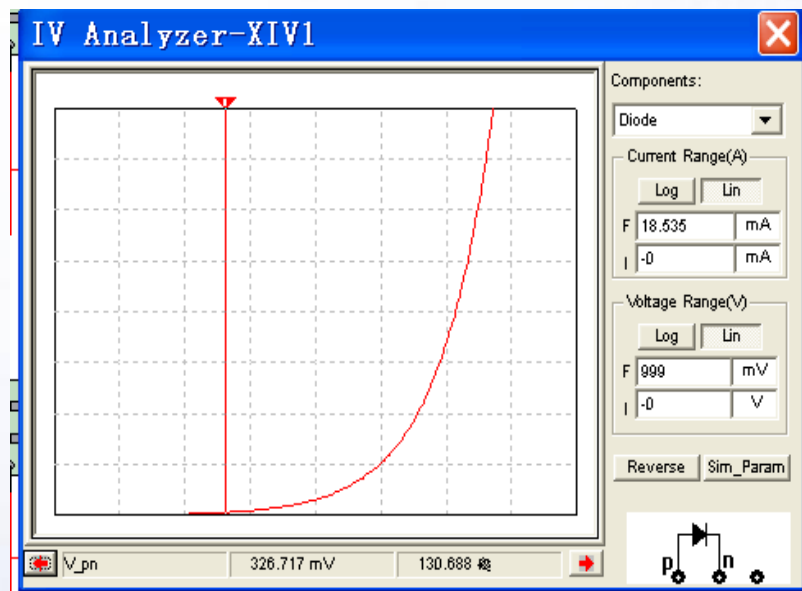
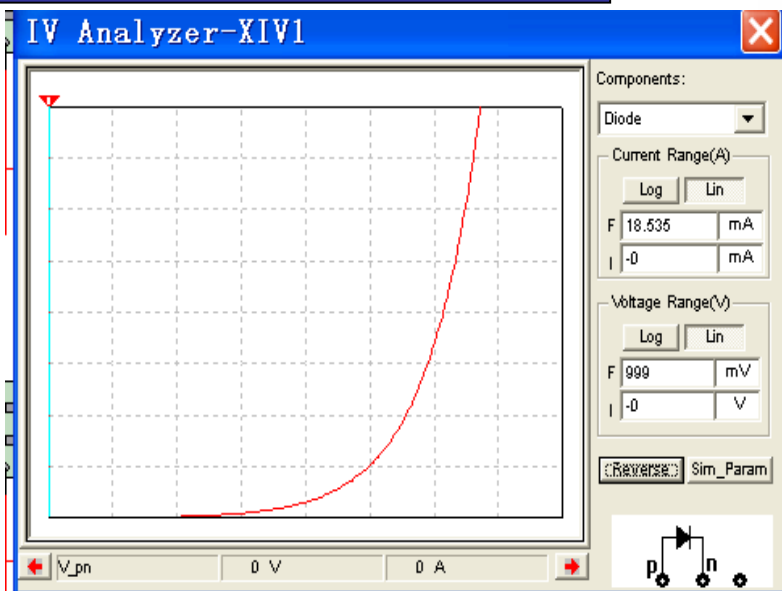








# 利用 Multisim 测试二极管伏安特性



从二极管的伏安特性可以反映出：

## 1. 单向导电性

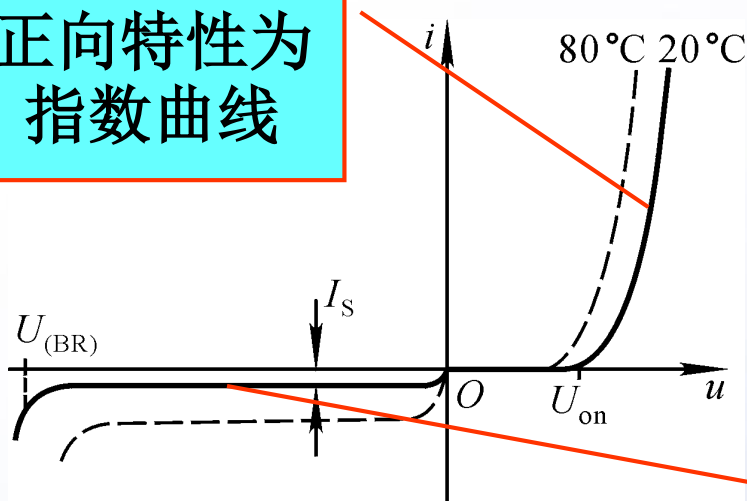
正向特性为指数曲线

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

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  $i \approx -I_S$

反向特性为横轴的平行线



## 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  $u \downarrow$

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

增大1倍/ $10^{\circ}\text{C}$

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

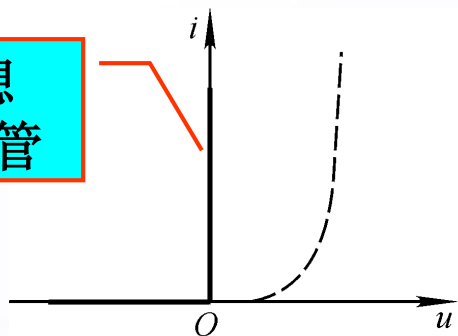


# 三、二极管的等效电路

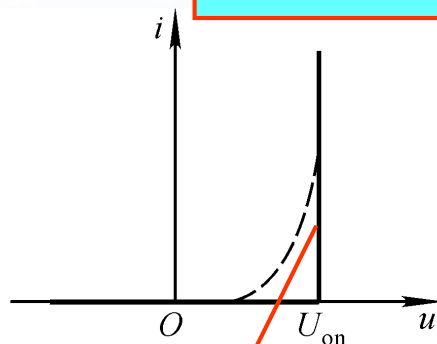
## 1. 将伏安特性折线化

导通时  $\Delta i$  与  $\Delta u$  成线性关系

理想二极管

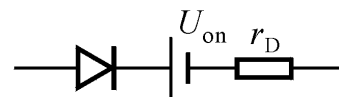
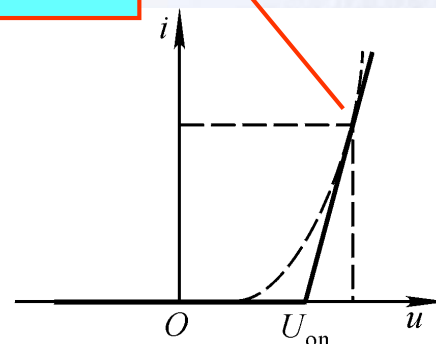


理想开关  
导通时  $U_D = 0$   
截止时  $I_S = 0$



近似分析  
中最常用

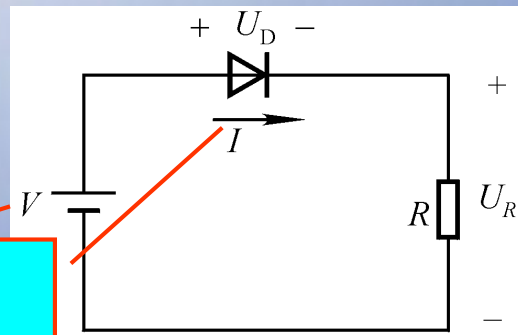
导通时  $U_D = U_{on}$   
截止时  $I_S = 0$



应根据不同情况选择不同的等效电路！

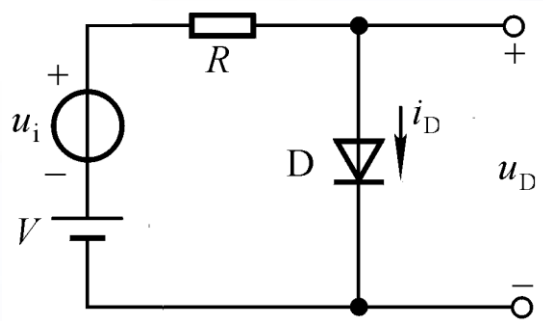
100V? 5V? 1V?

?

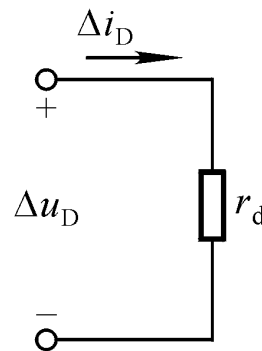
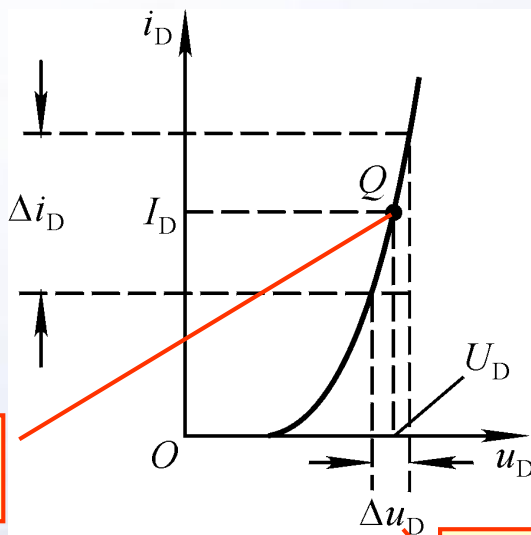


## 2. 微变等效电路

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



小信号作用

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

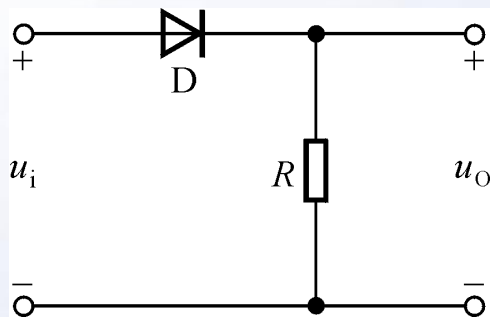
$Q$ 越高， $r_d$ 越小。

静态电流



## 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



第四版——P20

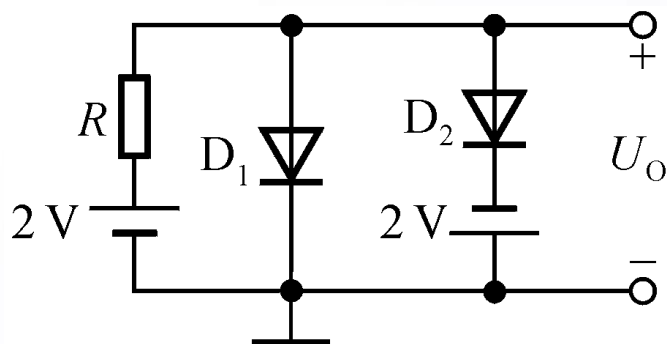




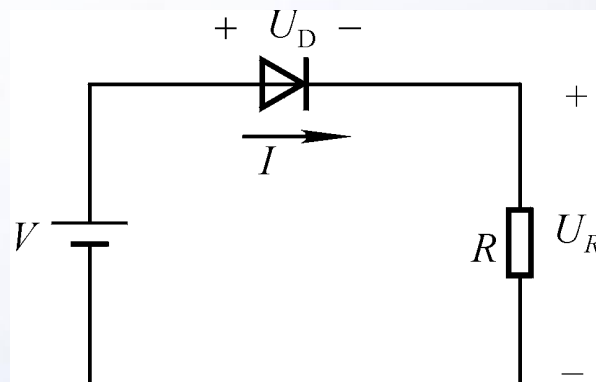
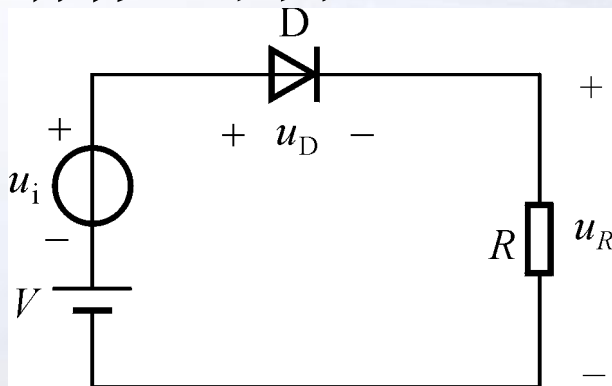


## 讨论：解决两个问题

- 如何判断二极管的工作状态？
- 什么情况下应选用二极管的什么等效电路？

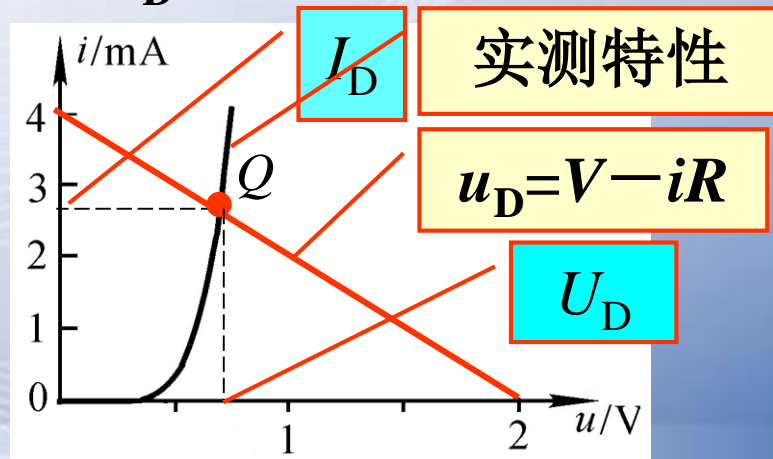


对 $V$ 和 $U_i$ 二极管的模型有什么不同？



$$i_D = \frac{V - u_D}{R}$$

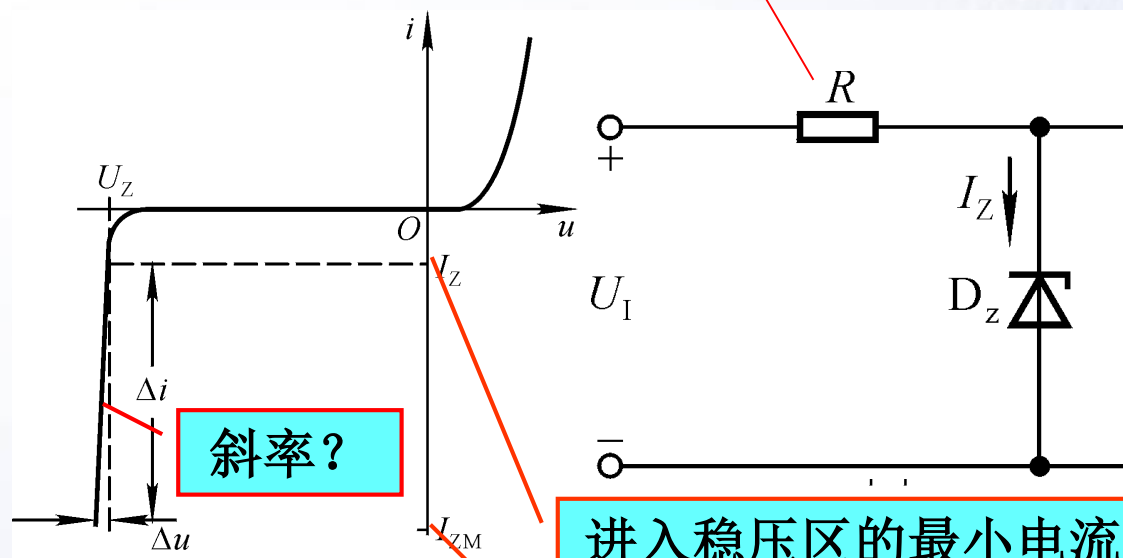
$V$ 与 $u_D$ 可比，则需图解：



## 五、稳压二极管

### 1. 伏安特性

由一个PN结组成，反向击穿后在一定的电流范围内端电压基本不变，为稳定电压。



限流电阻

斜率?

进入稳压区的最小电流

不至于损坏的最大电流

### 2. 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  $r_z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$

若稳压管的电流太小则不稳压，若稳压管的电流太大则会因功耗过大而损坏，因而稳压管电路中必需有限制稳压管电流的限流电阻！



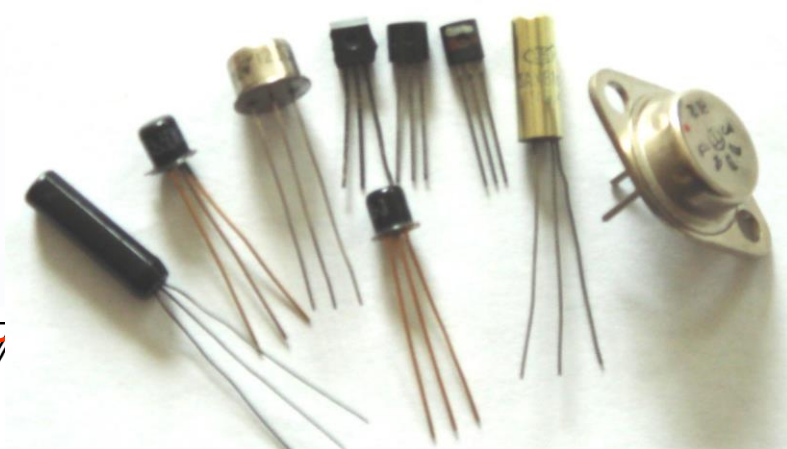
## § 1.3 晶体三极管

- 一、晶体管的结构和符号
- 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





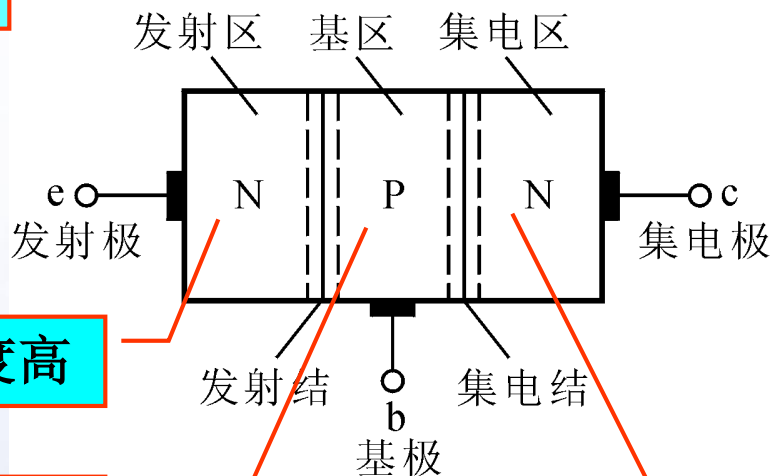
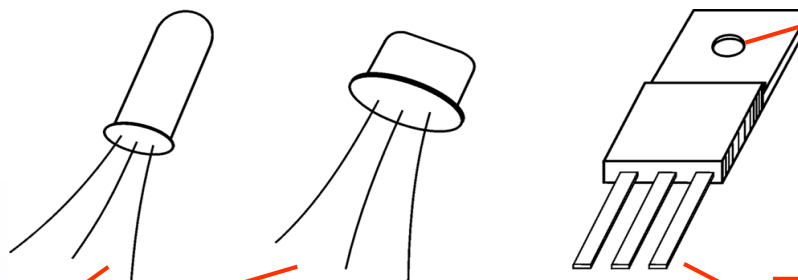
# 一、晶体管的结构和符号



小功率管

中功率管

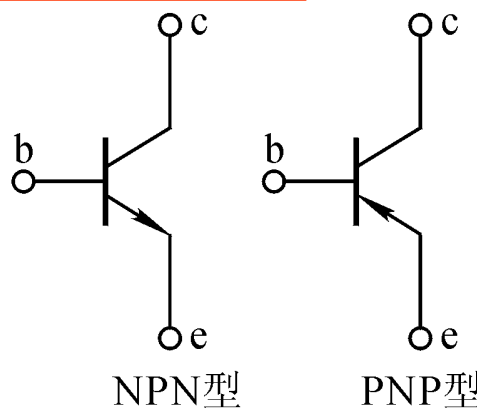
大功率管



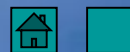
多子浓度高

多子浓度很低，且很薄

面积大

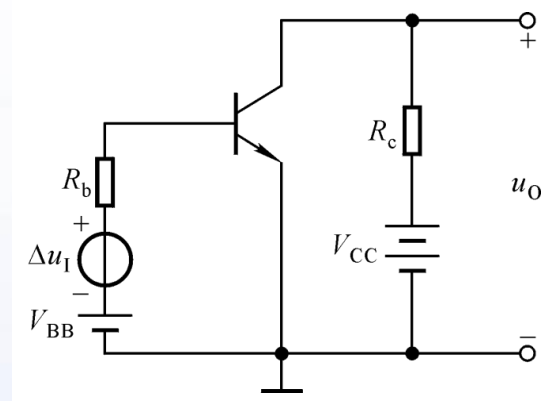


晶体管有三个极、三个区、两个PN结。

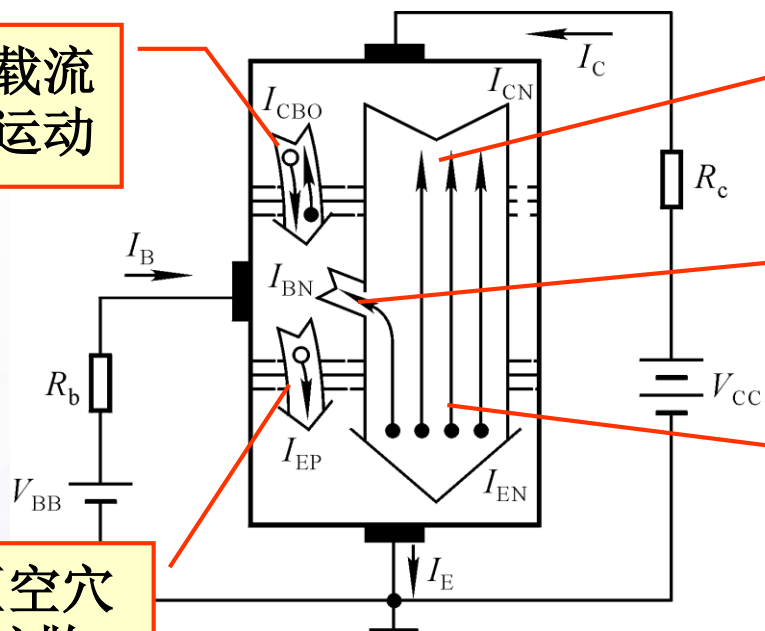


## 二、晶体管的放大原理

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



少数载流子的运动



基区空穴的扩散

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，使极少数扩散到基区的电子与空穴复合

因发射区多子浓度高使大量电子从发射区扩散到基区

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  $I_C$ 。



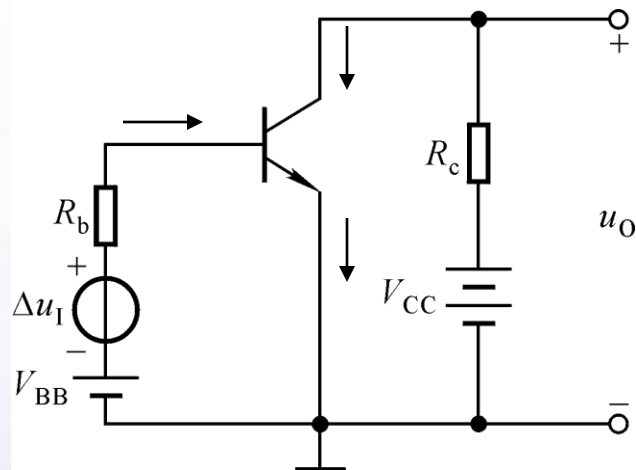


# • 电流分配: $I_E = I_B + I_C$

$I_E$ —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



直流电流  
放大系数

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

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

交流电流放大系数

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

穿透电流

集电结反向电流

为什么基极开路集电极回路会有穿透电流？

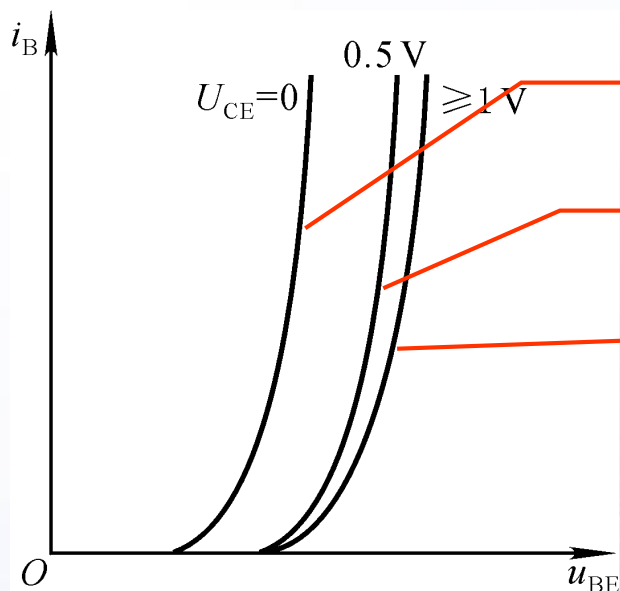




### 三、晶体管的共射输入特性和输出特性

#### 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。

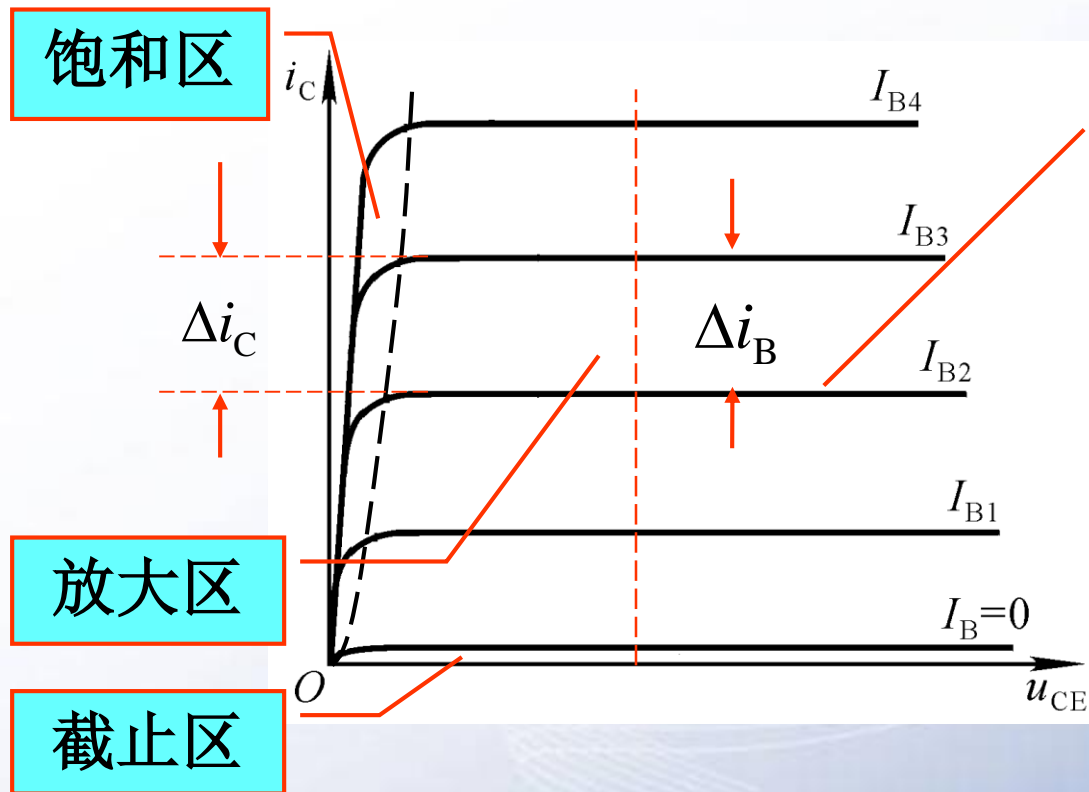




## 2. 输出特性

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

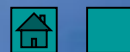
对应于一个  $I_B$  就有一条  $i_C$  随  $u_{CE}$  变化的曲线。



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？

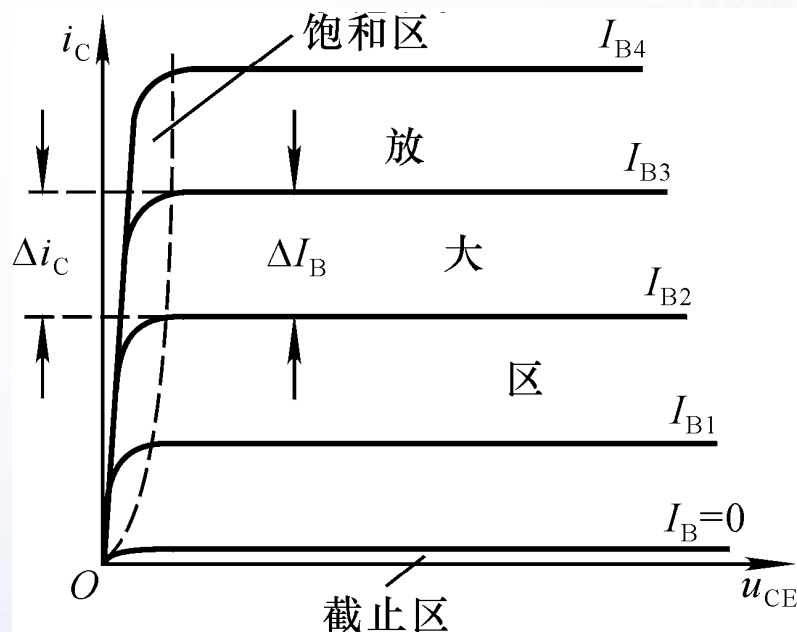
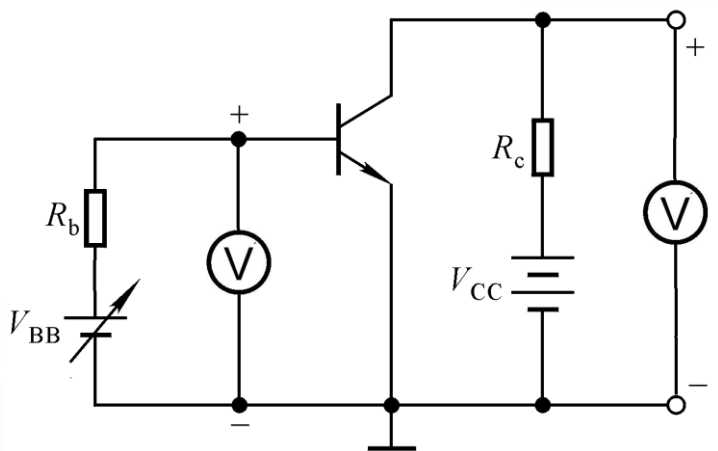
$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \Big|_{U_{CE}=\text{常量}}$$

$\beta$  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



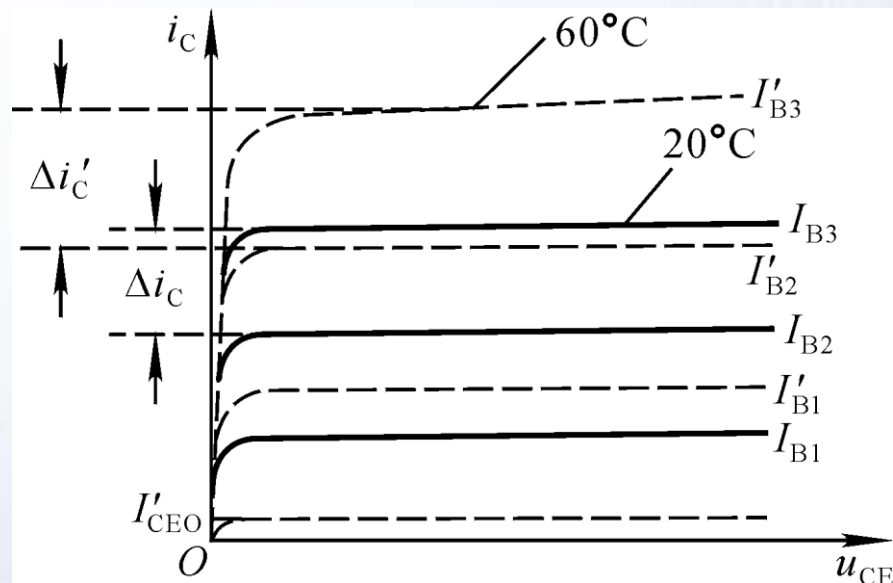
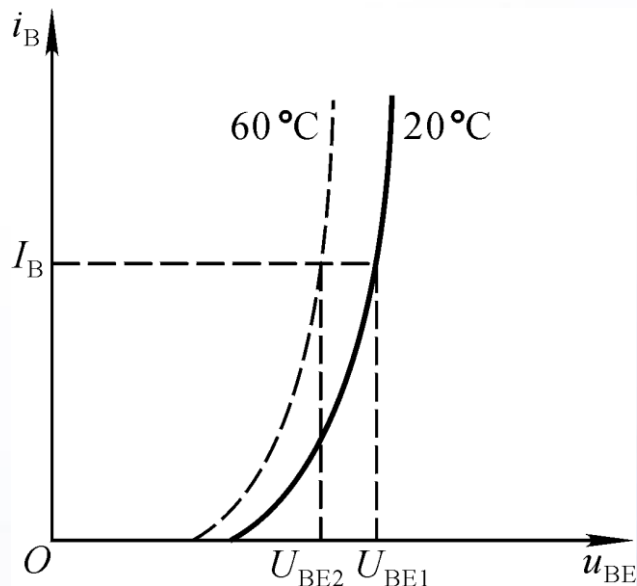
状态	$u_{BE}$	$i_C$	$u_{CE}$
截止	$< U_{on}$	$I_{CEO}$	$V_{CC}$
放大	$\geq U_{on}$	$\beta i_B$	$\geq u_{BE}$
饱和	$\geq U_{on}$	$< \beta i_B$	$\leq u_{BE}$

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



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

$$\rightarrow \beta \uparrow$$

$$\rightarrow u_{BE} \text{ 不变时 } i_B \uparrow, \text{ 即 } i_B \text{ 不变时 } u_{BE} \downarrow$$





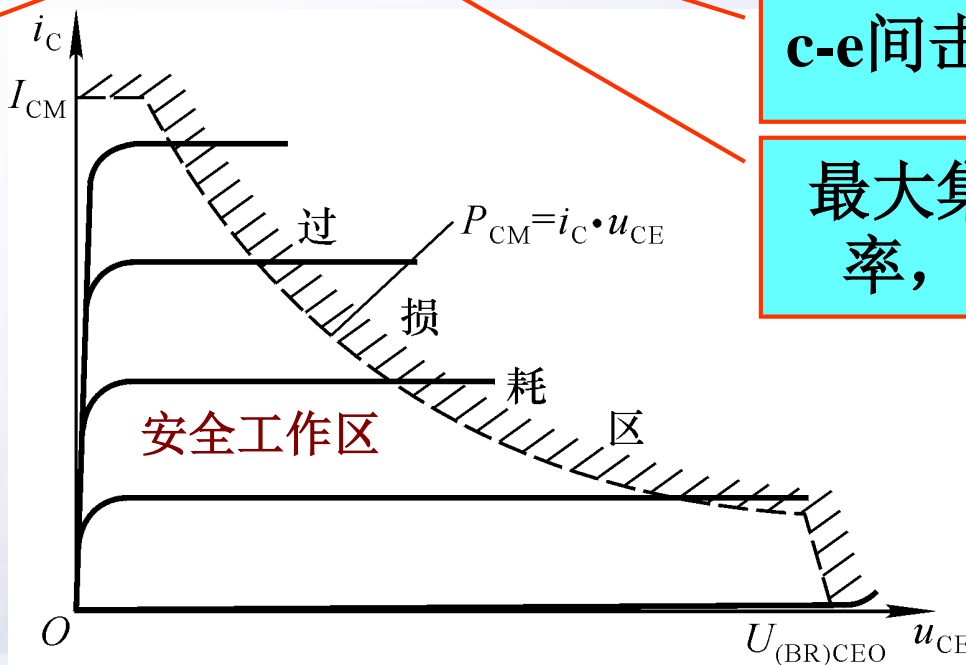
## 五、主要参数

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

$$\bar{\alpha} = I_C / I_E$$

$$\alpha = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

最大集电极电流



c-e间击穿电压

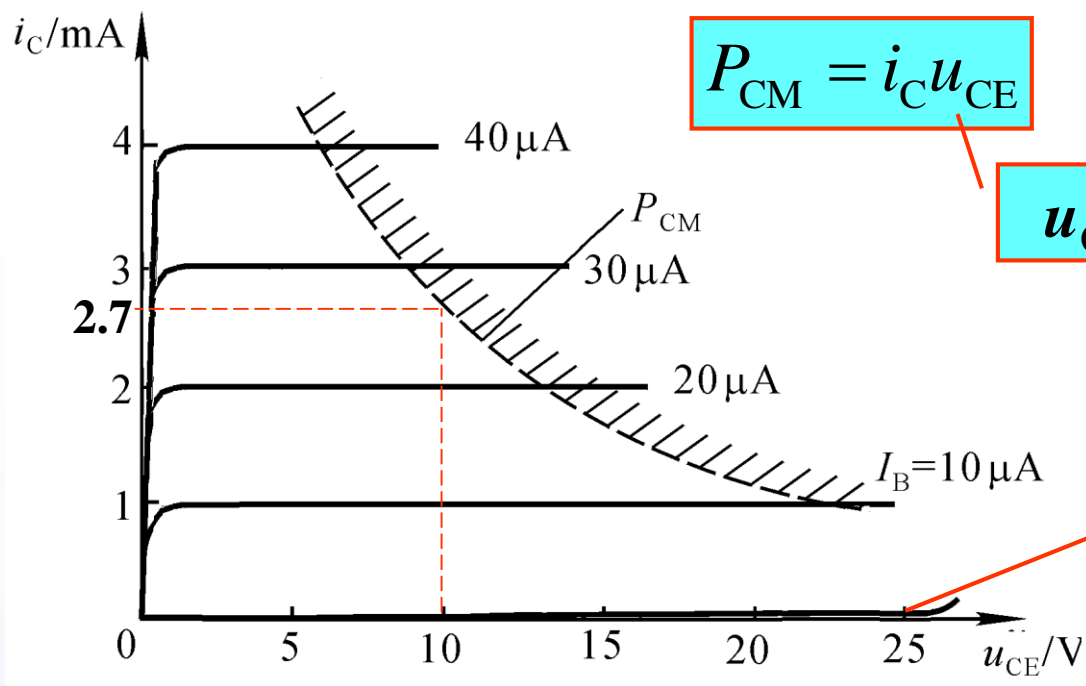
最大集电极耗散功率,  $P_{CM} = i_C u_{CE}$







# 讨论一



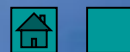
$$P_{CM} = i_C u_{CE}$$

$u_{CE}=1V$ 时的 $i_C$ 就是 $I_{CM}$

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

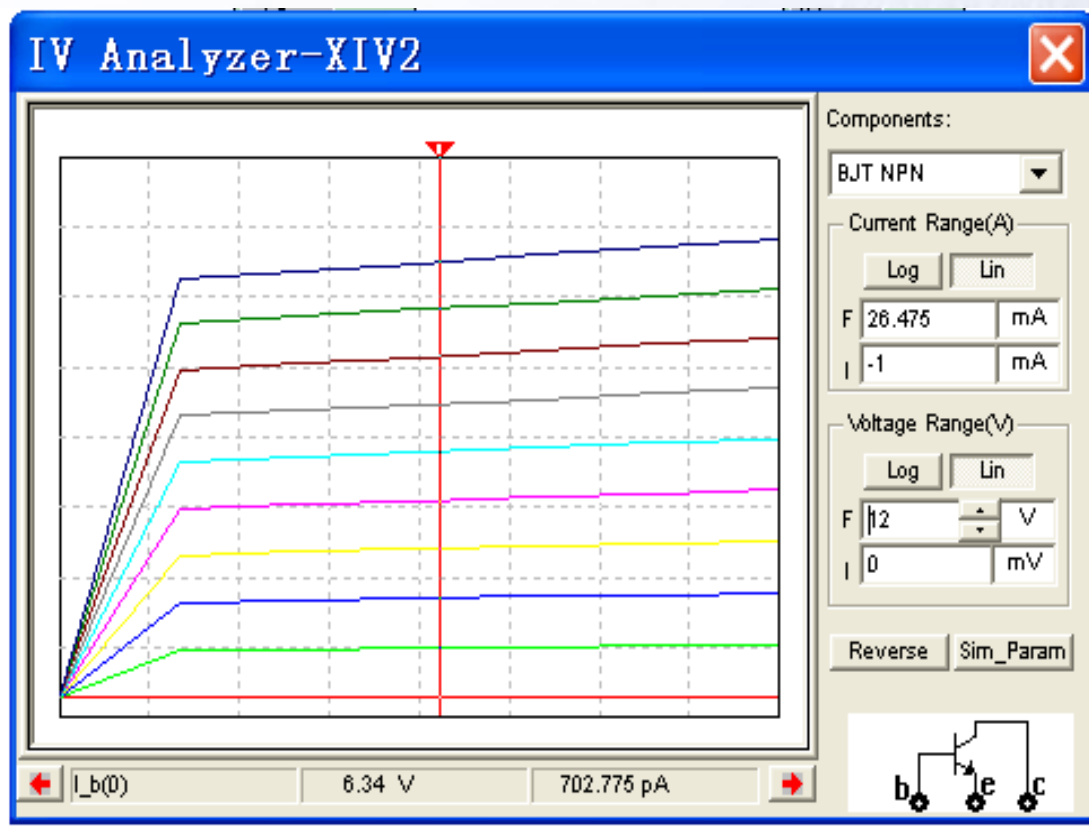
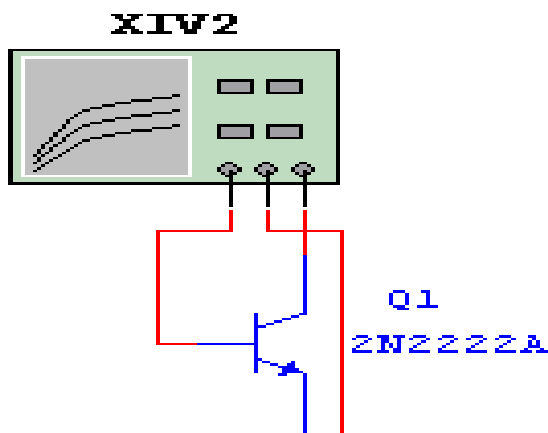
$U_{(BR)CEO}$

由图示特性求出 $P_{CM}$ 、 $I_{CM}$ 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 $\beta$ 。





## 讨论二：利用Multisim测试晶体管的输出特性



## 讨论三

- 利用Multisim分析图示电路在V2小于何值时晶体管截止、大于何值时晶体管饱和。

以V2作为输入、以节点1作为输出，采用直流扫描的方法可得！

约小于0.5V时  
截止

描述输出电压与输出电压之间函数关系的曲线，称为电压传输特性。

