

The image shows the facade of a classical building, likely a part of Tsinghua University. The building features a prominent portico with four columns and a pediment. The Chinese characters '清華學堂' (Qinghua University) are inscribed on the pediment. The building is surrounded by trees, and the overall scene is bathed in a warm, golden light, suggesting a sunset or sunrise.

清華學堂

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。

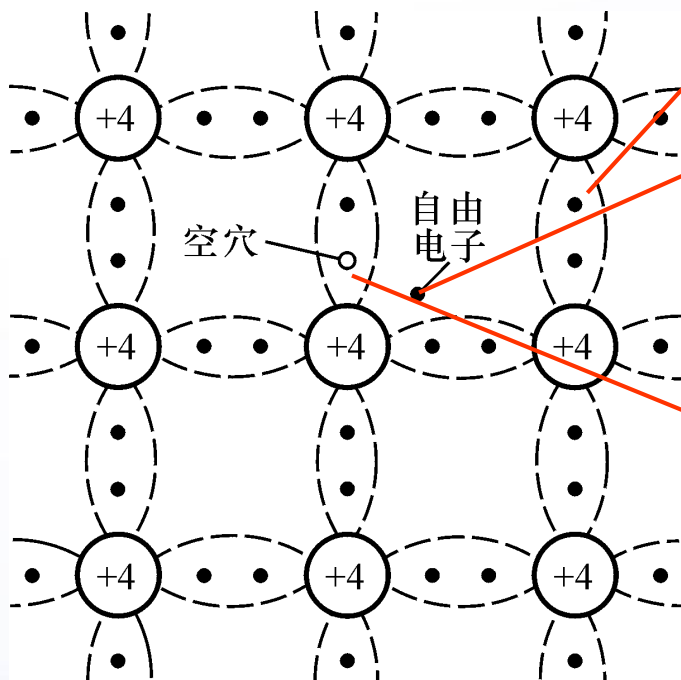
无杂质

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。

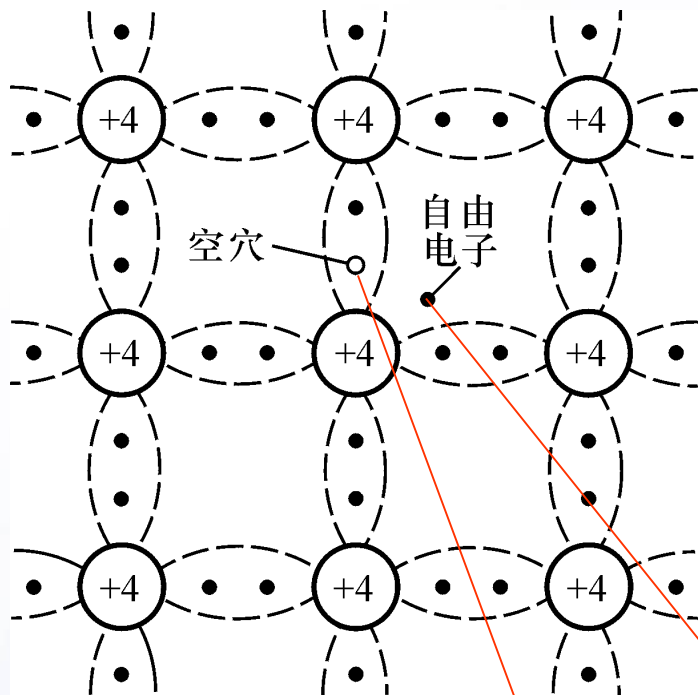
动态平衡

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

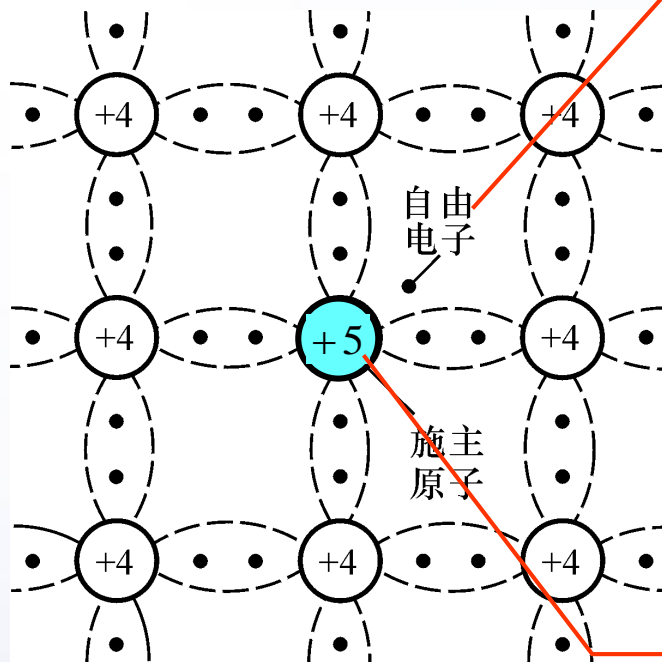
为什么要将半导体变成导电性很差的本征半导体？





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？

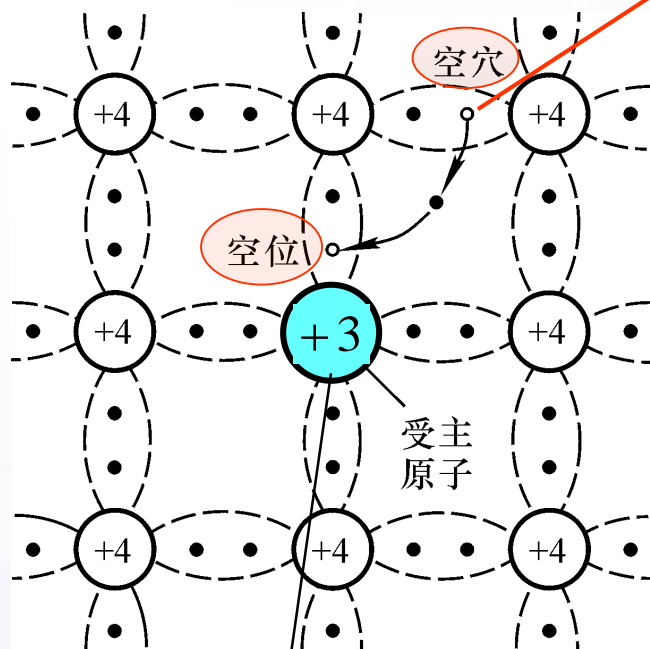
杂质半导体主要靠多数载流子导电。掺入杂质越多，多子浓度越高，导电性越强，实现导电性可控。

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？少数与多数变化的数目相同吗？少数与多数浓度的变化相同吗？

硼 (B)



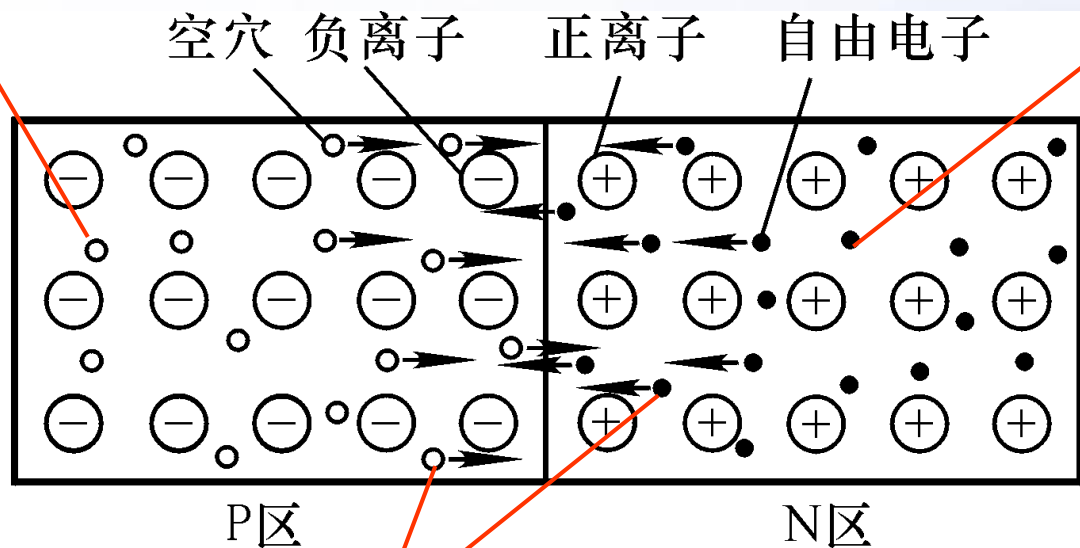


三、PN结的形成及其单向导电性

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。

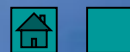
P区空穴浓度远高于N区。

N区自由电子浓度远高于P区。



扩散运动

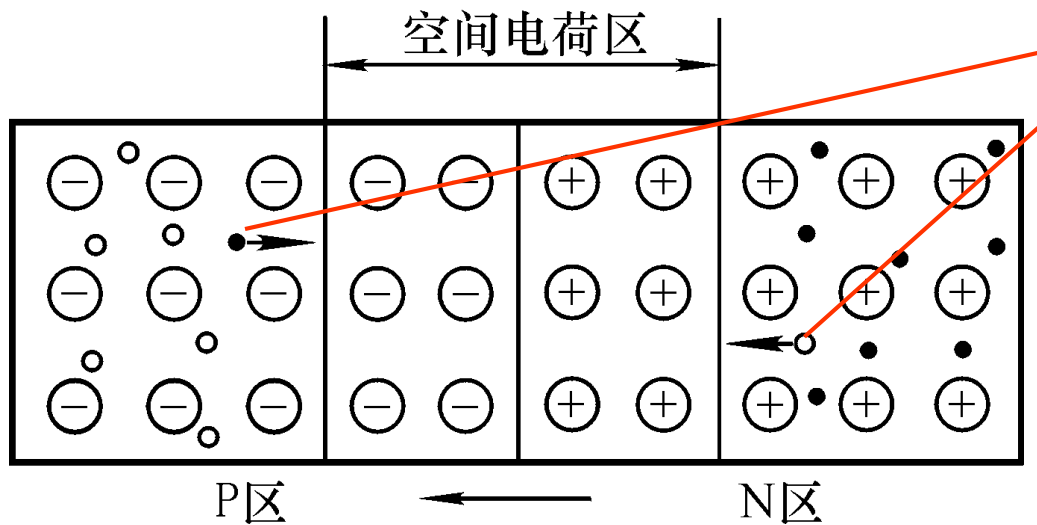
扩散运动使靠近接触面P区的空穴浓度降低、靠近接触面N区的自由电子浓度降低，产生内电场。





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。

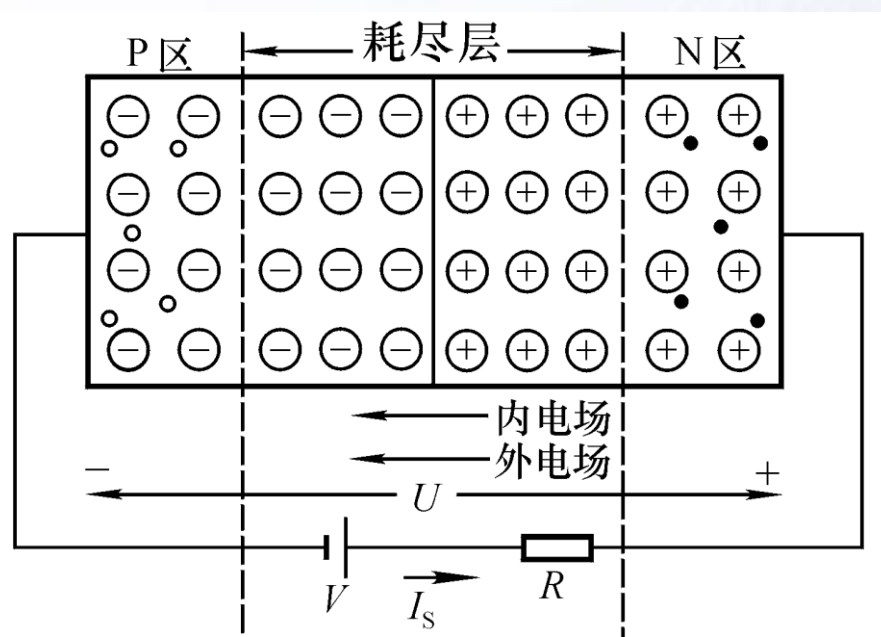
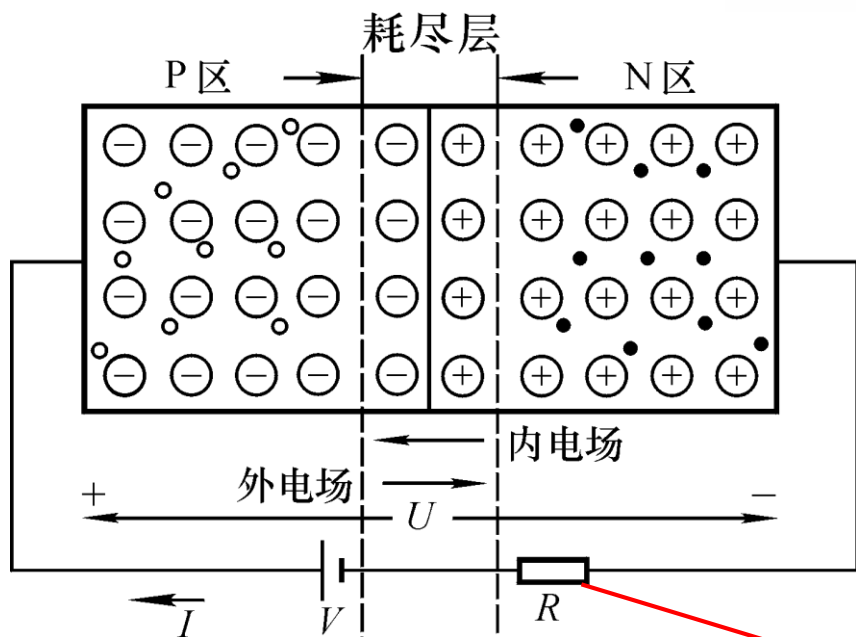


因电场作用所产生的运动称为漂移运动。

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

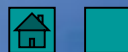
- 为什么将自然界导电性能中等的半导体材料制成本征半导体，导电性能极差，又将其掺杂，改善导电性能？
- 为什么半导体器件的温度稳定性差？是多子还是少子是影响温度稳定性的主要因素？
- 为什么半导体器件有最高工作频率？





§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

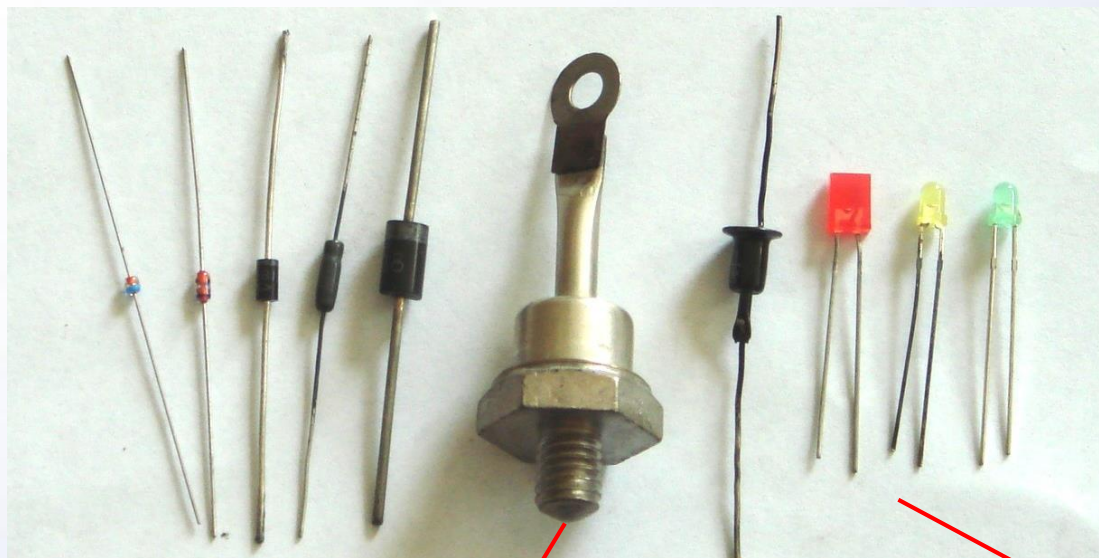




一、二极管的组成



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

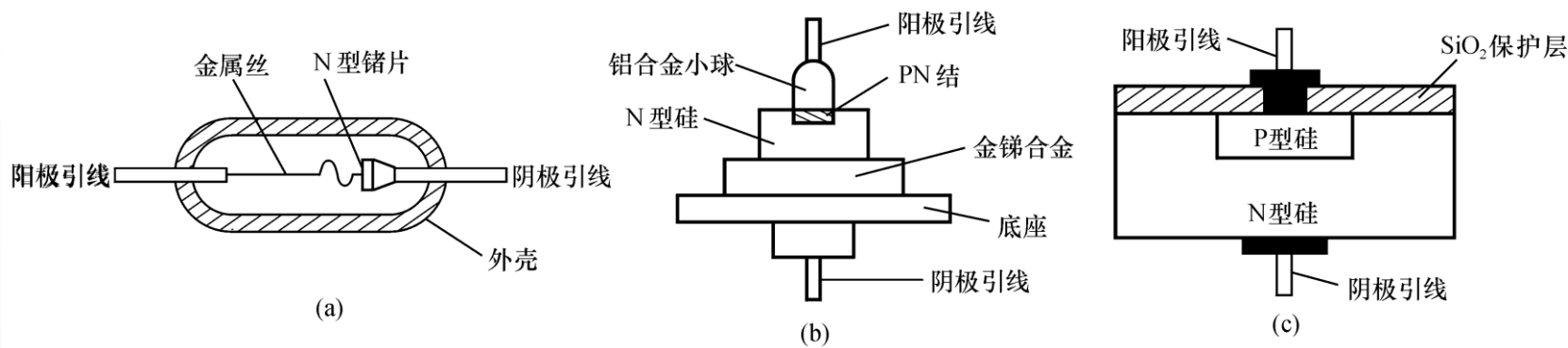
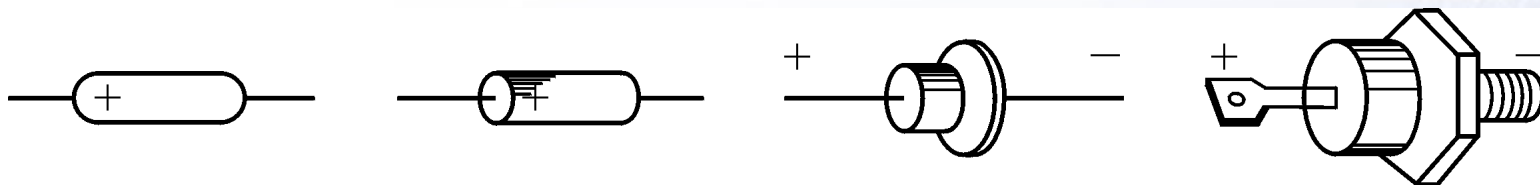
稳压二极管

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。

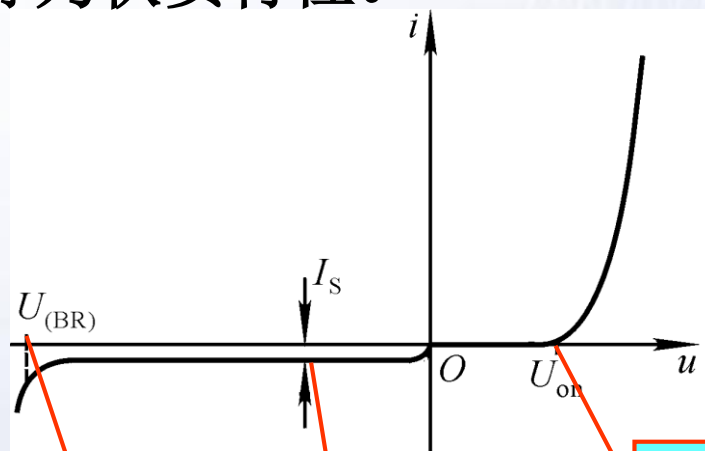
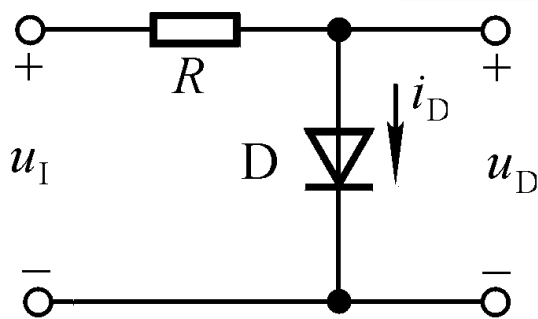




二、二极管的伏安特性及电流方程

二极管的电流与其端电压的关系称为伏安特性。

$$i = f(u)$$



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

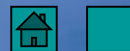
击穿电压

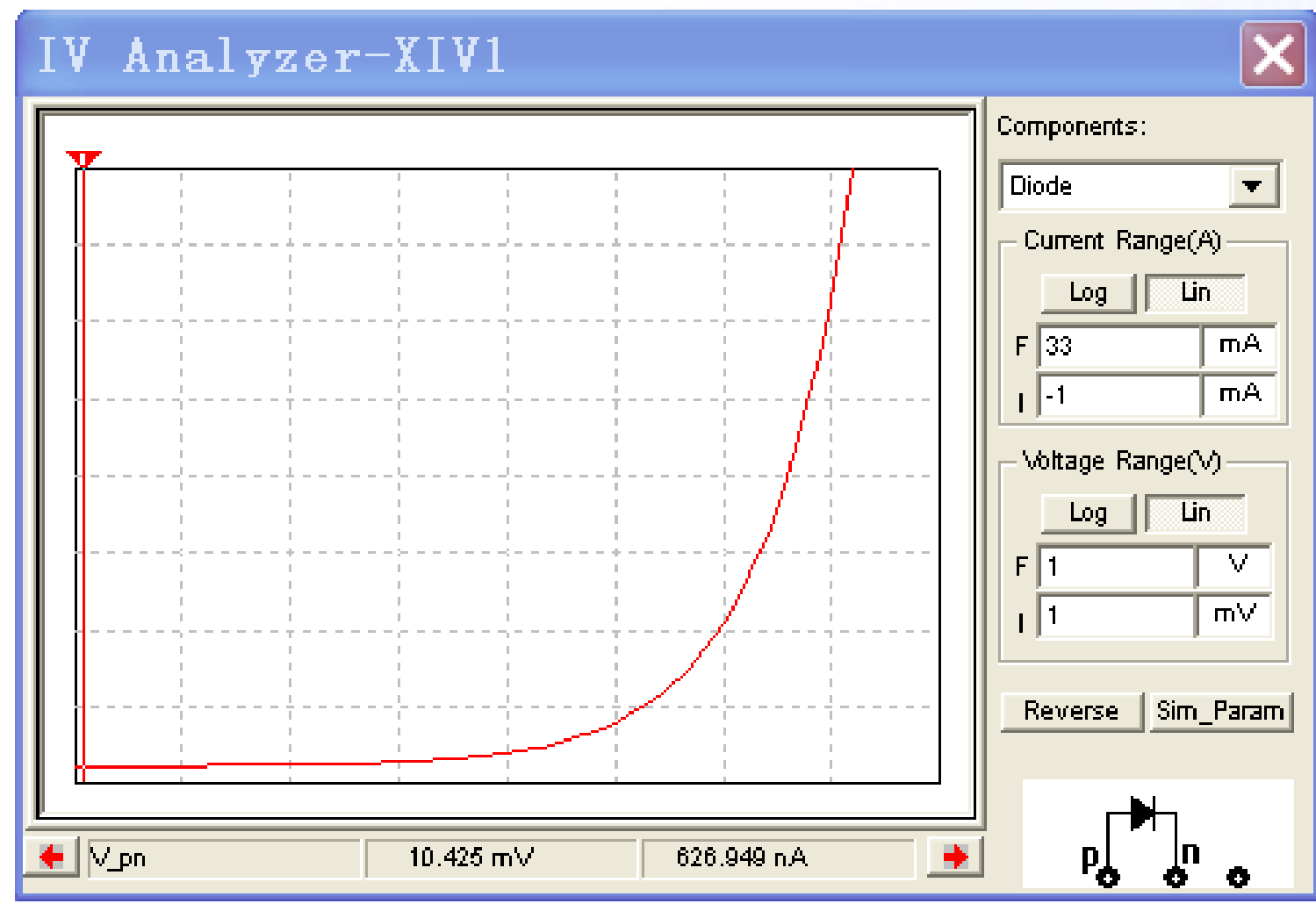
反向饱和电流

开启电压

温度的电压当量

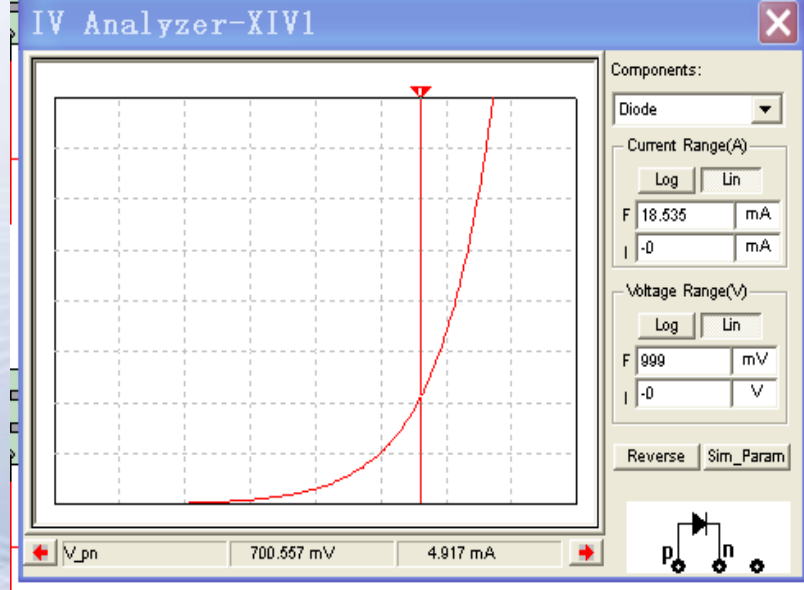
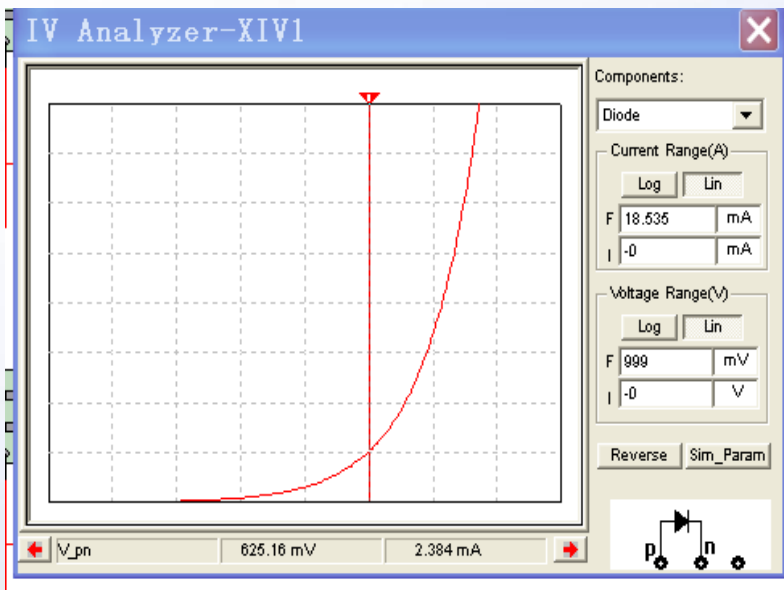
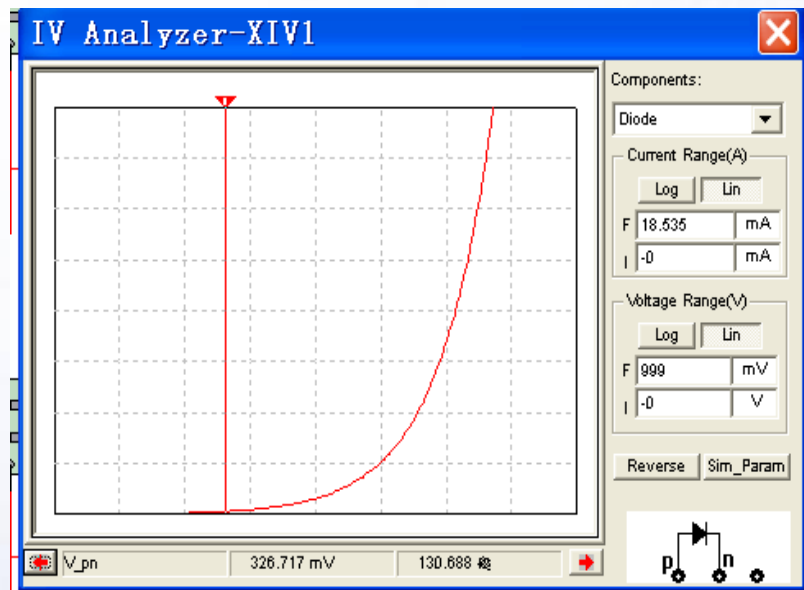
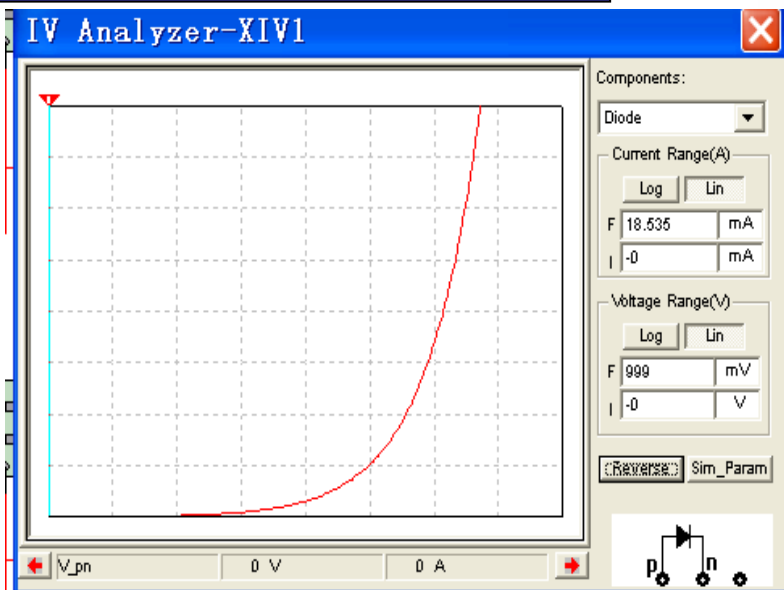
材料	开启电压	导通电压	反向饱和电流
硅Si	0.5V	0.5~0.8V	1μA以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	几十μA







利用 Multisim 测试二极管伏安特性

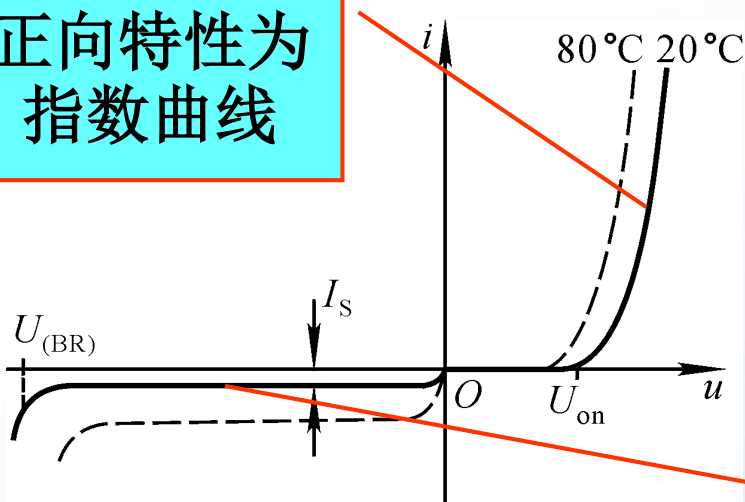




从二极管的伏安特性可以反映出:

1. 单向导电性

正向特性为指数曲线



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

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

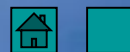
2. 伏安特性受温度影响

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

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

增大1倍/ 10°C

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



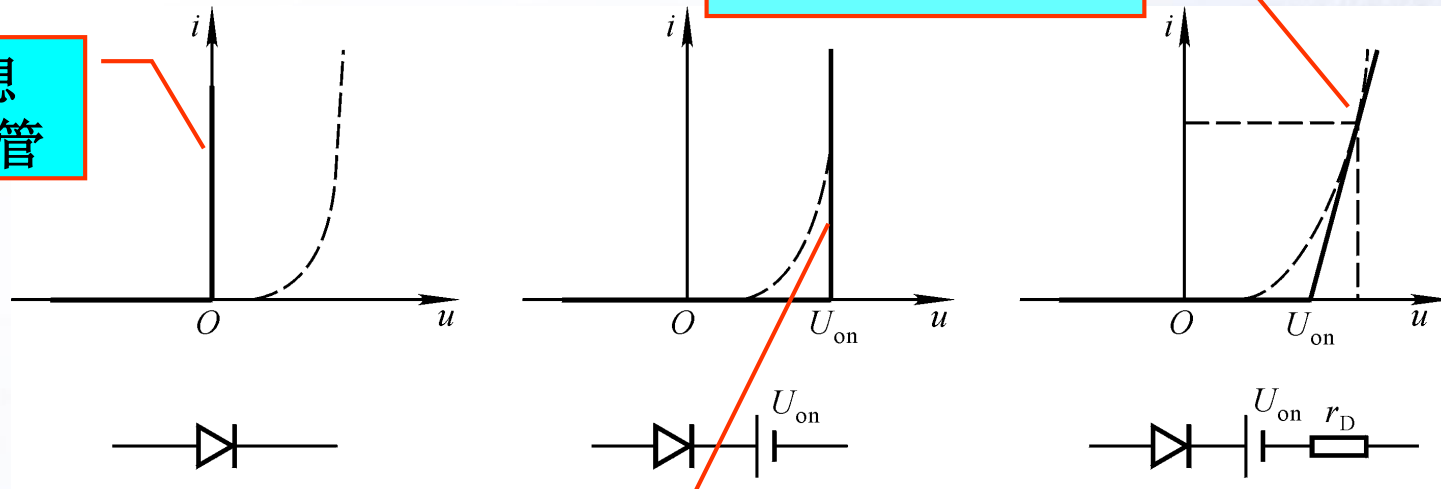


三、二极管的等效电路

1. 将伏安特性折线化

导通时 Δi 与 Δu 成线性关系

理想二极管



理想开关
导通时 $U_D = 0$
截止时 $I_S = 0$

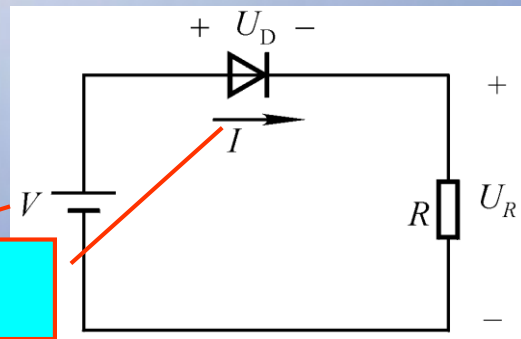
近似分析中最常用

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！

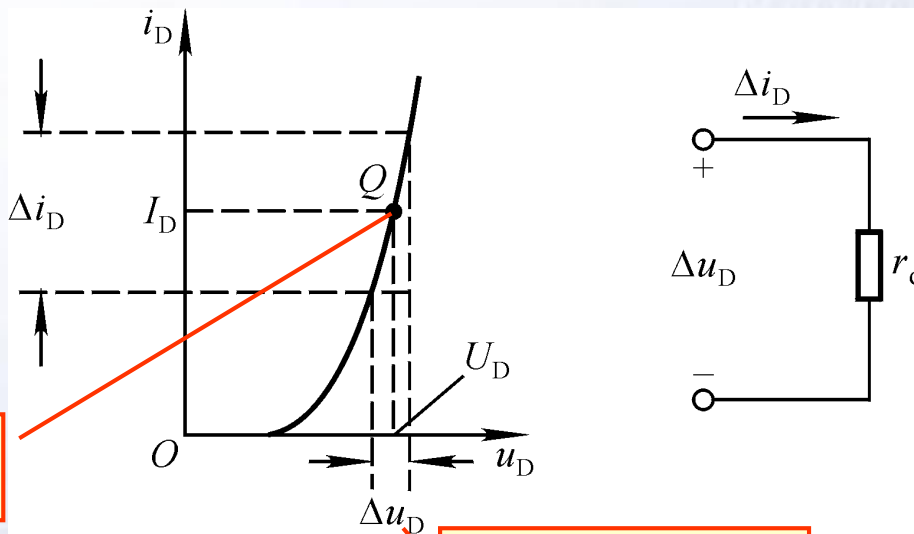
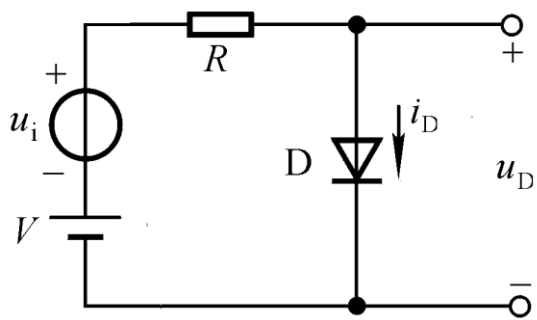
100V? 5V? 1V?

?



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

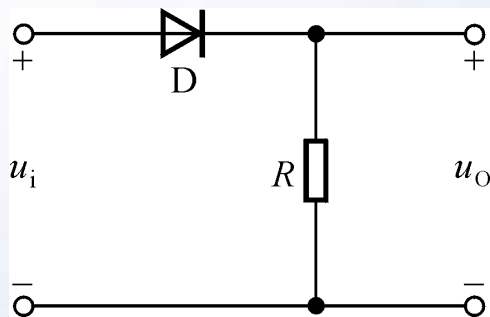
Q 越高， r_d 越小。

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



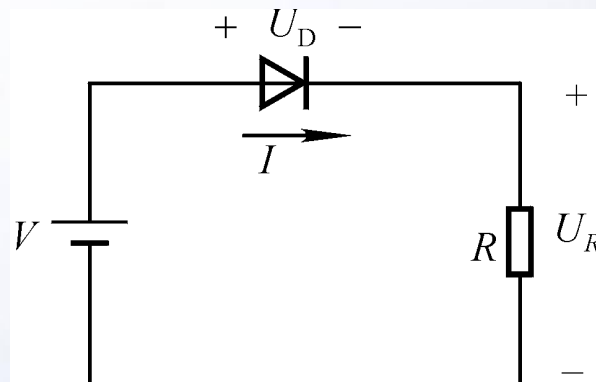
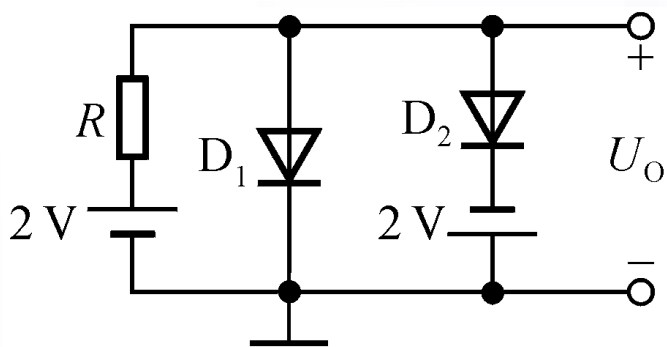
第四版——P20





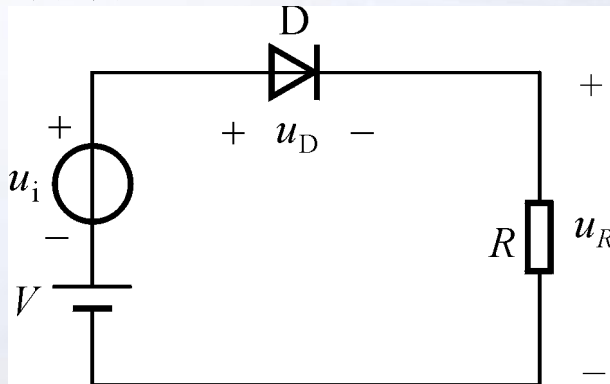
讨论：解决两个问题

- 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？

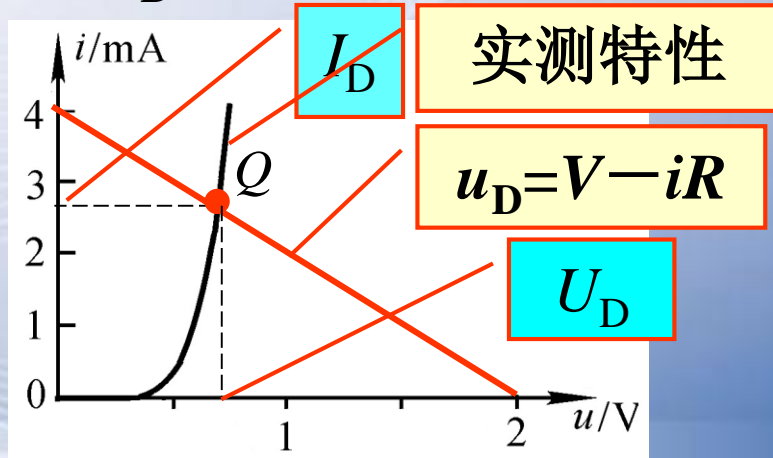


$$i_D = \frac{V - u_D}{R}$$

对 V 和 U_i 二极管的模型有什么不同？



V 与 u_D 可比，则需图解：

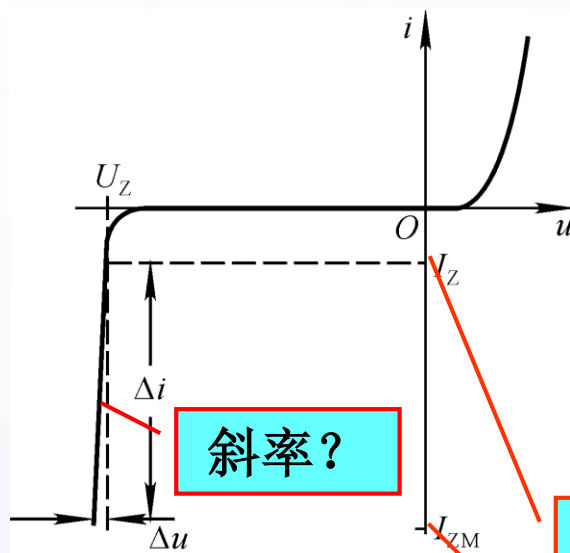




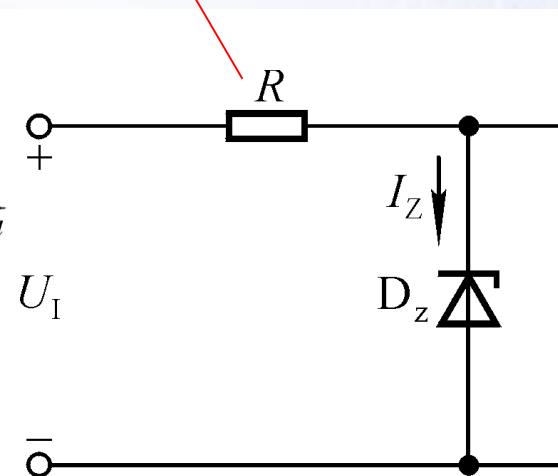
五、稳压二极管

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



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！



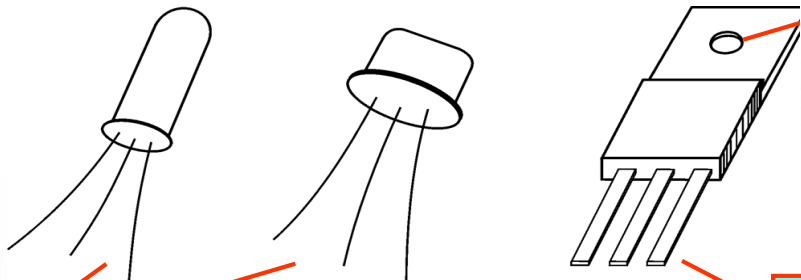
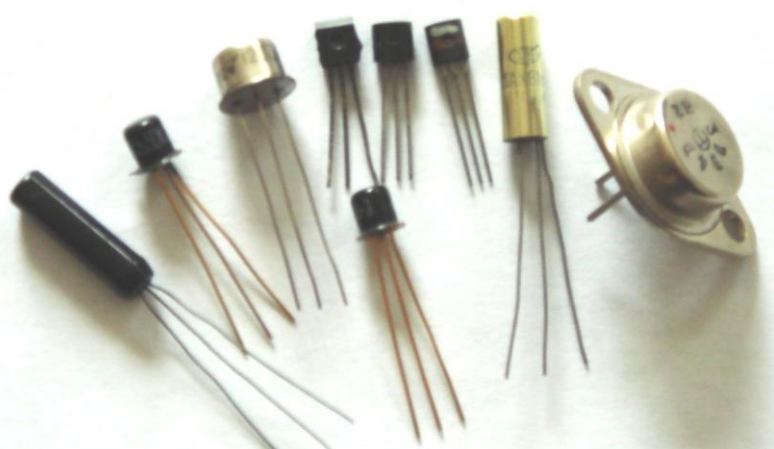
§ 1.3 晶体三极管

- 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





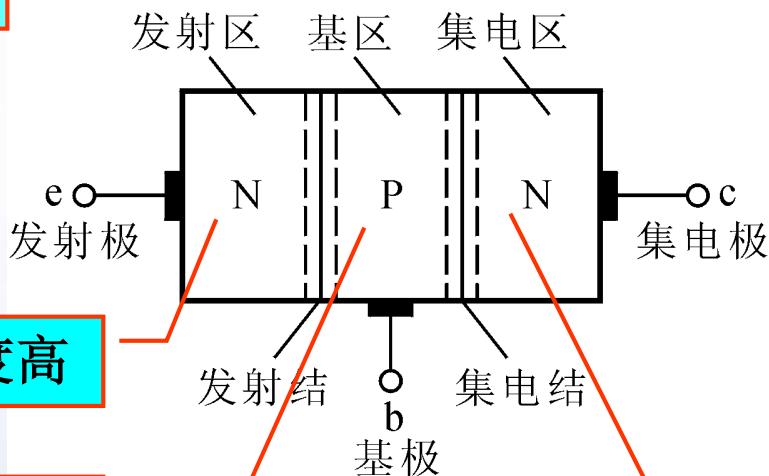
一、晶体管的结构和符号



小功率管

中功率管

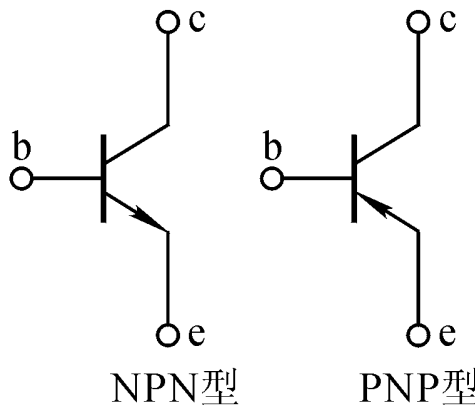
大功率管



多子浓度高

多子浓度很低，且很薄

面积大



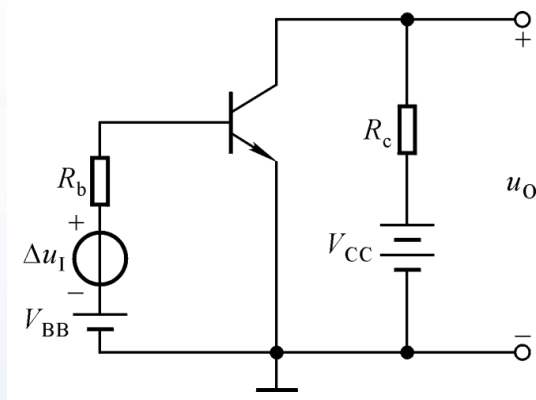
晶体管有三个极、三个区、两个PN结。



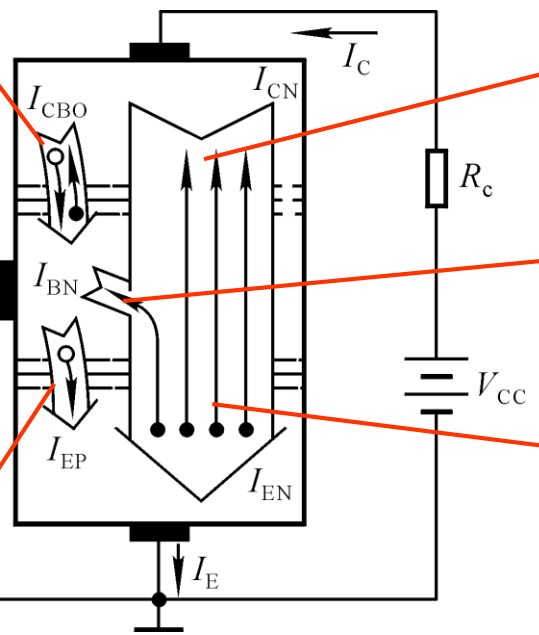


二、晶体管的放大原理

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



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

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 。



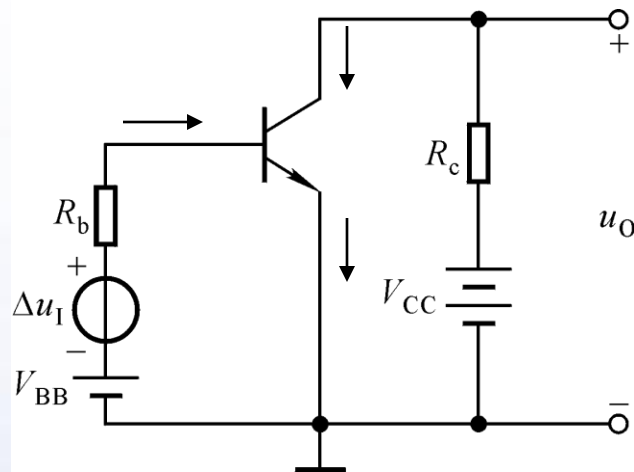


• 电流分配: $I_E = I_B + I_C$

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

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad \beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

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?

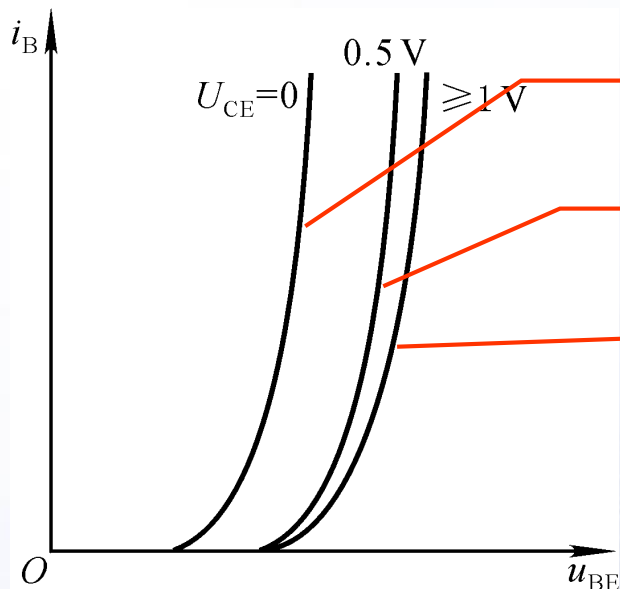




三、晶体管的共射输入特性和输出特性

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。

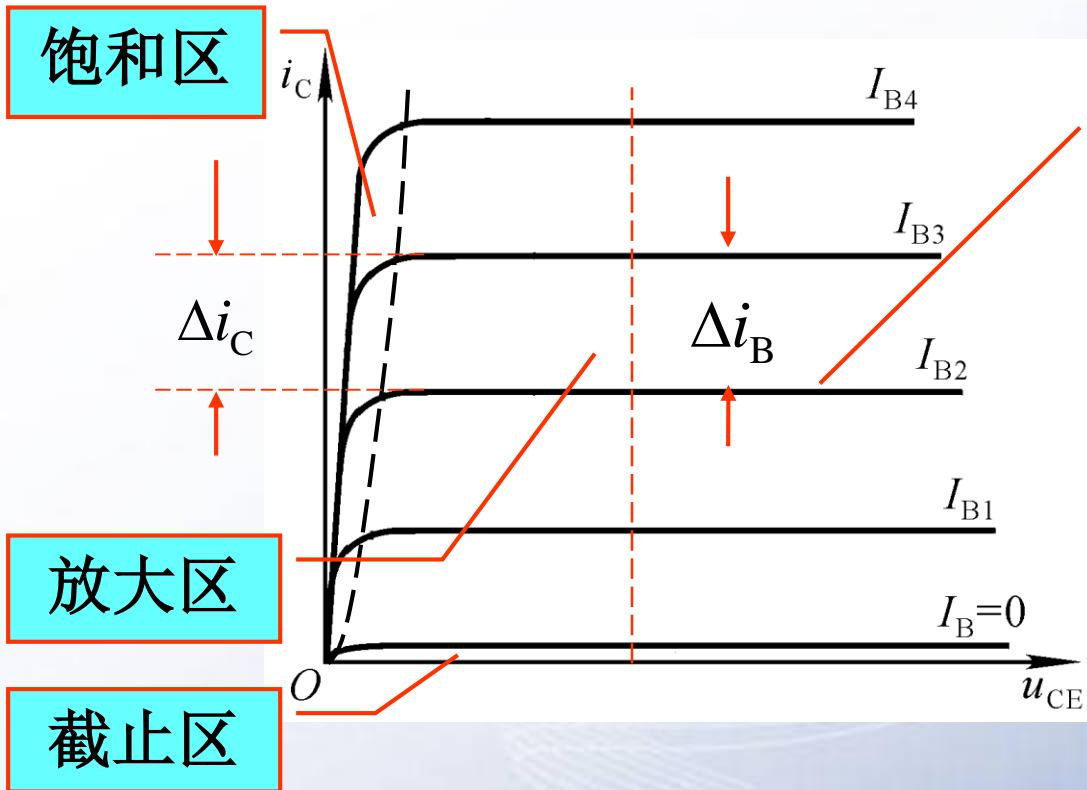




2. 输出特性

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

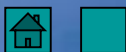
对应于一个 I_B 就有一条 i_C 随 u_{CE} 变化的曲线。



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？

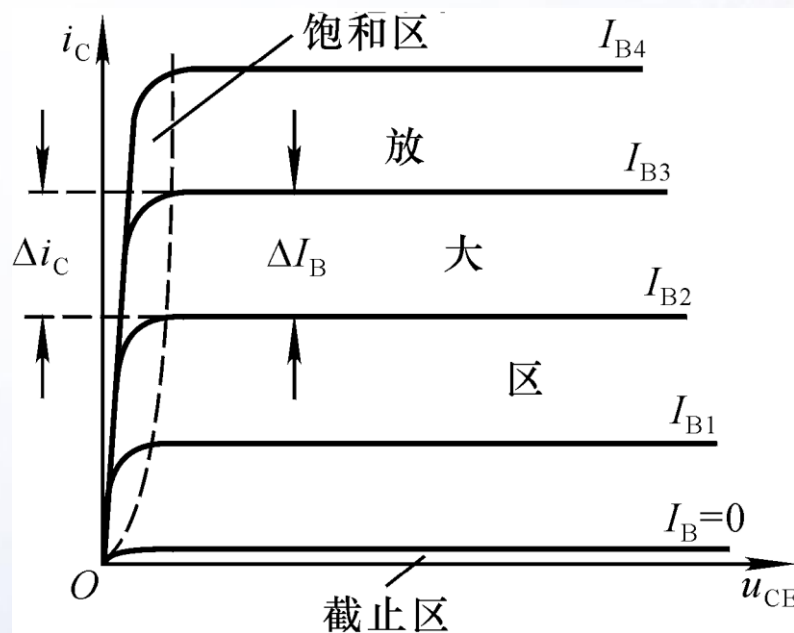
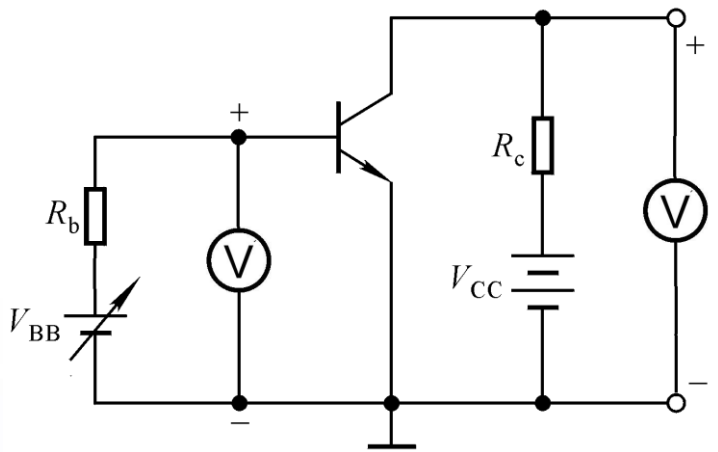
$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \Big|_{U_{CE} = \text{常量}}$$

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



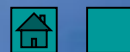


晶体管的三个工作区域



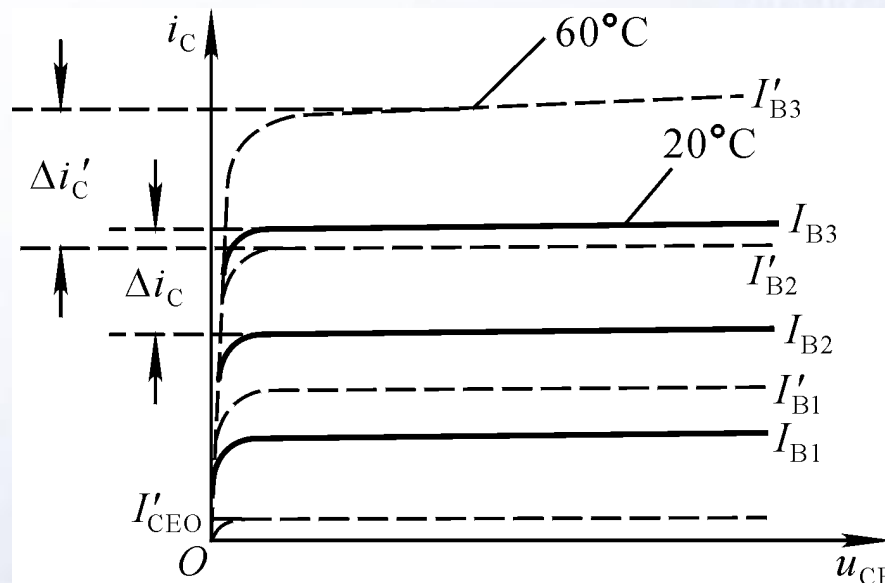
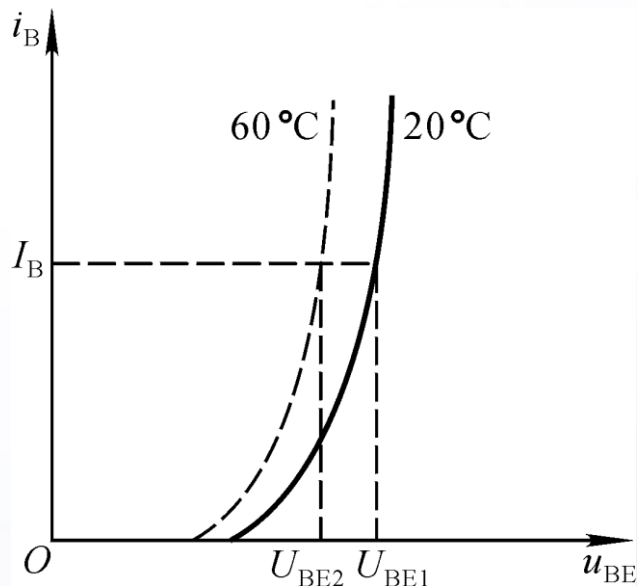
状态	u_{BE}	i_C	u_{CE}
截止	$< U_{on}$	I_{CEO}	V_{CC}
放大	$\geq U_{on}$	βi_B	$\geq u_{BE}$
饱和	$\geq U_{on}$	$< \beta i_B$	$\leq u_{BE}$

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 。





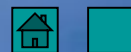
四、温度对晶体管特性的影响



$$T(^{\circ}\text{C}) \uparrow \rightarrow I_{CE0} \uparrow$$

$$\rightarrow \beta \uparrow$$

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





五、主要参数

• 直流参数: $\bar{\beta}$ 、 $\bar{\alpha}$ 、 I_{CBO} 、 I_{CEO}

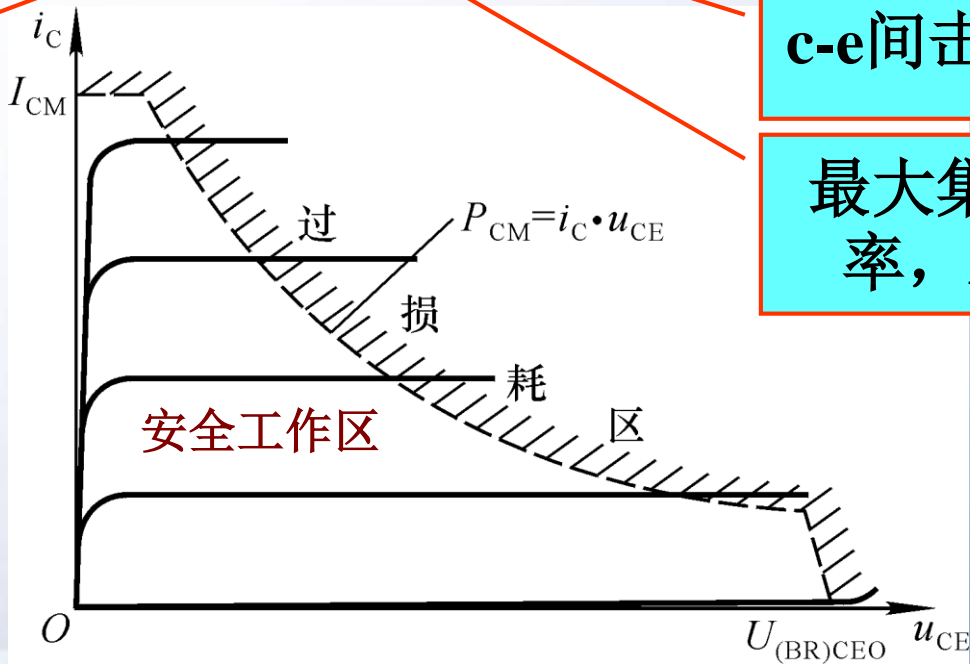
$$\bar{\alpha} = I_C / I_E$$

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

• 交流参数: β 、 α 、 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



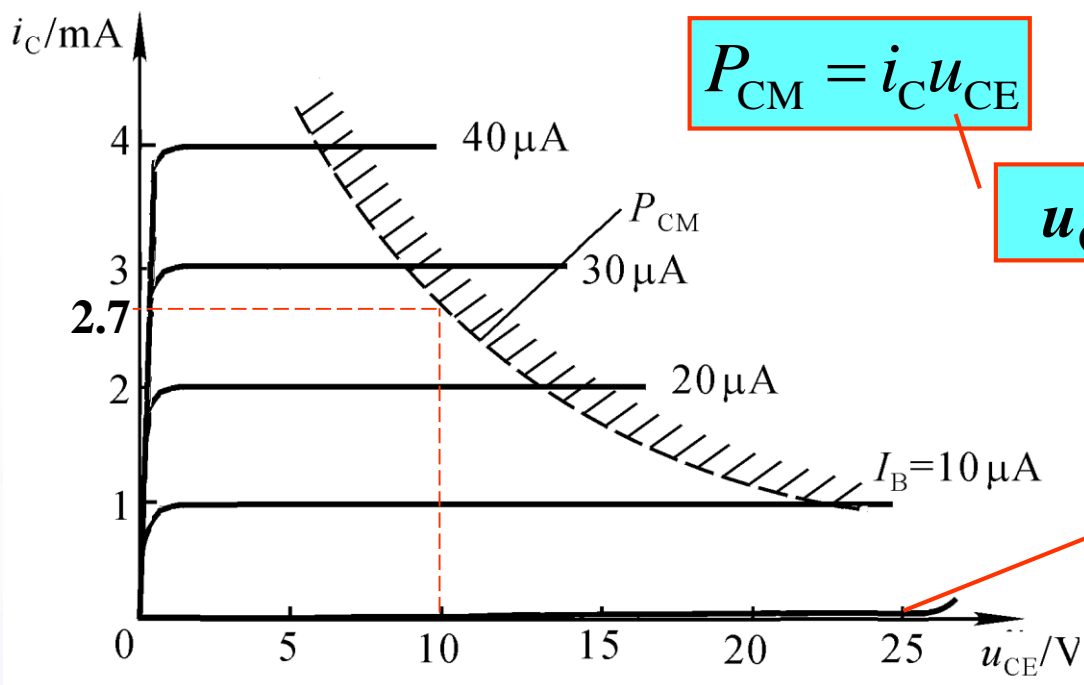
c-e间击穿电压

最大集电极耗散功率, $P_{CM} = i_C u_{CE}$





讨论一



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

$u_{CE} = 1V$ 时的 i_C 就是 I_{CM}

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

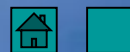
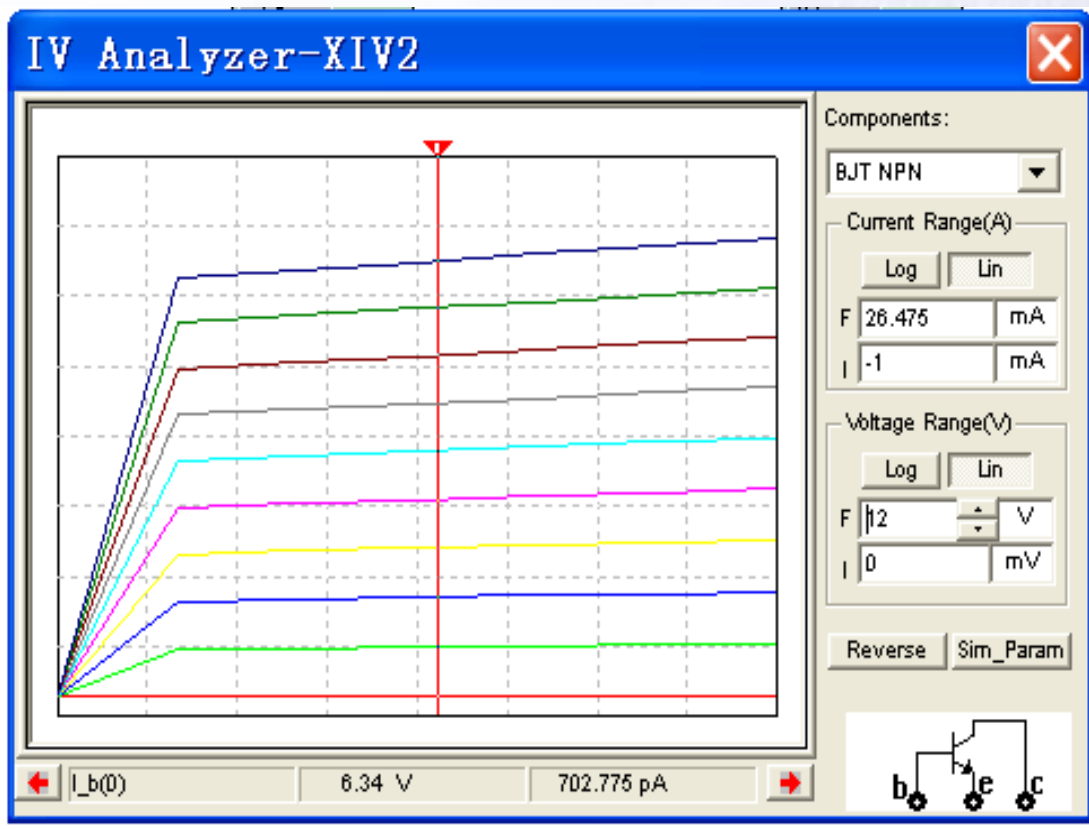
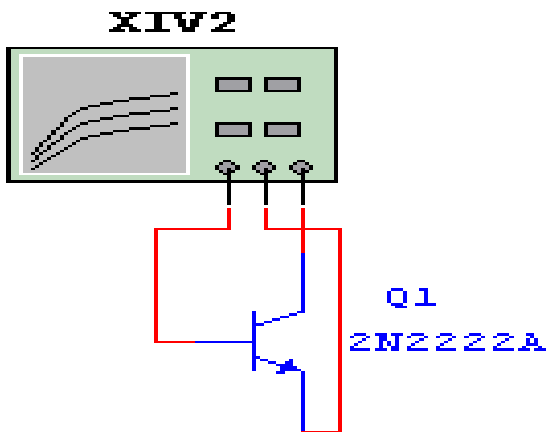
$U_{(BR)CEO}$

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





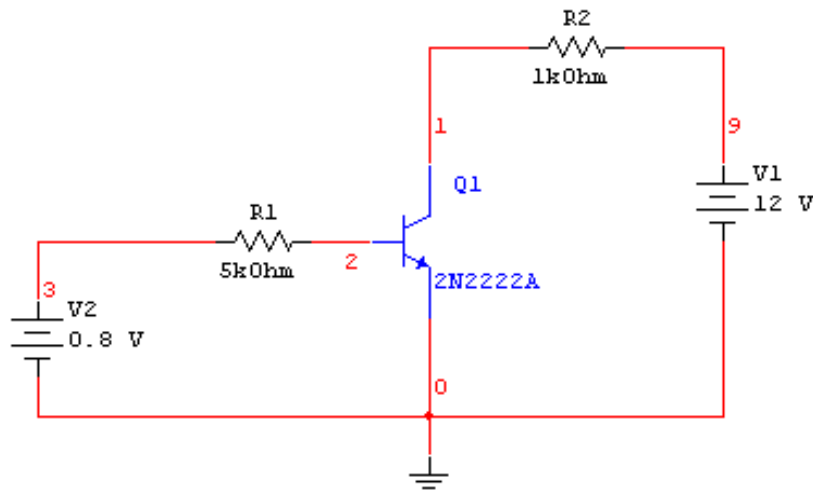
讨论二：利用Multisim测试晶体管的输出特性





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

约大于1V时饱和

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。

