



# 第一章 半导体器件基础

1.1 半导体的基本知识

1.2 半导体二极管

1.3 半导体三极管

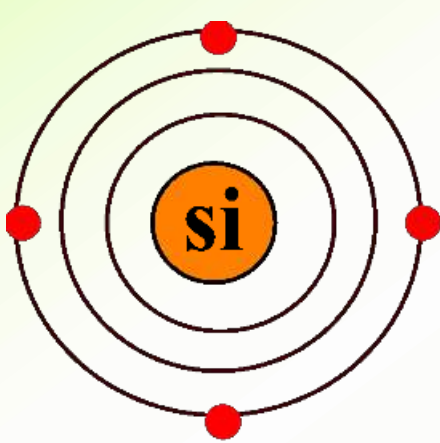
1.4 BJT模型

1.5 场效应管

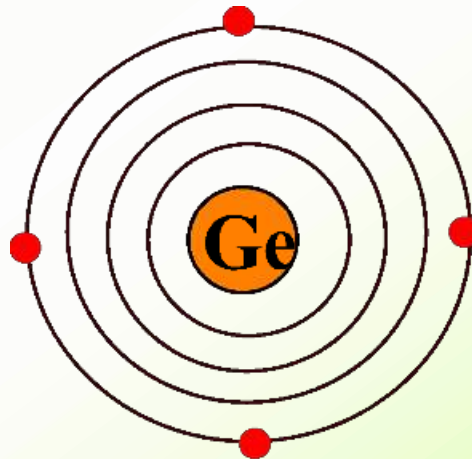
# 1.1 半导体的基本知识

在物理学中。根据材料的导电能力，能够将他们划分导体、绝缘体和半导体。

经典的半导体是**硅Si**和**锗Ge**，它们都是4价元素。



硅原子



锗原子



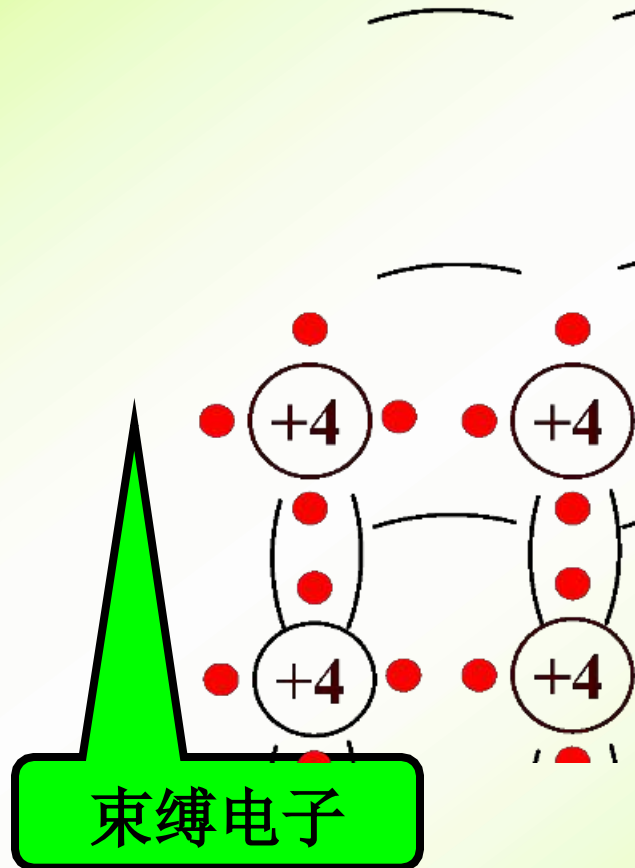
硅和锗最外层轨道上的四个电子称为**价电子**。

# 一. 本征半导体

本征半导体——化学成份纯净的半导体晶体。

制造半导体器件的半导体材料的纯度要到达99.9999999%，常称为“九个9”。

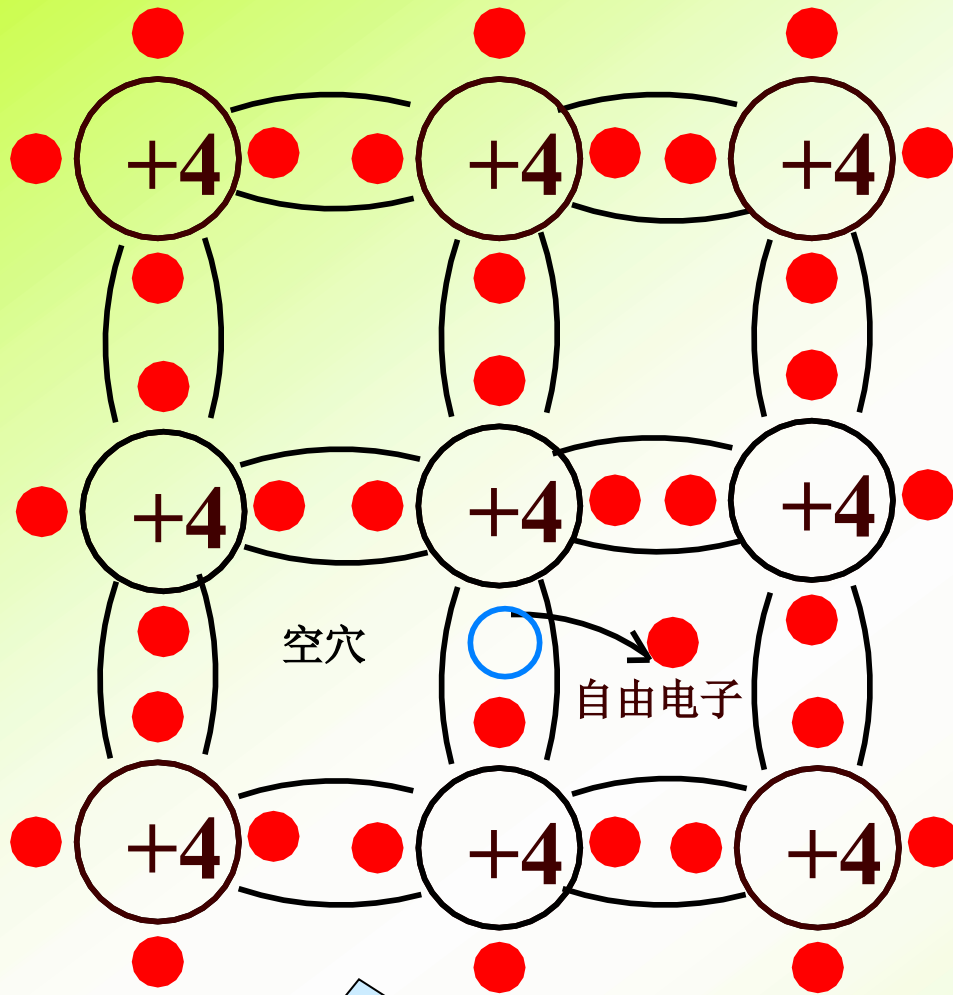
## 本征半导体的共价键构造



在绝对温度 $T=0K$ 时，全部的价电子都被共价键紧紧束缚在共价键中，不会成为自由电子，所以本征半导体的导电能力很弱，接近绝缘体。

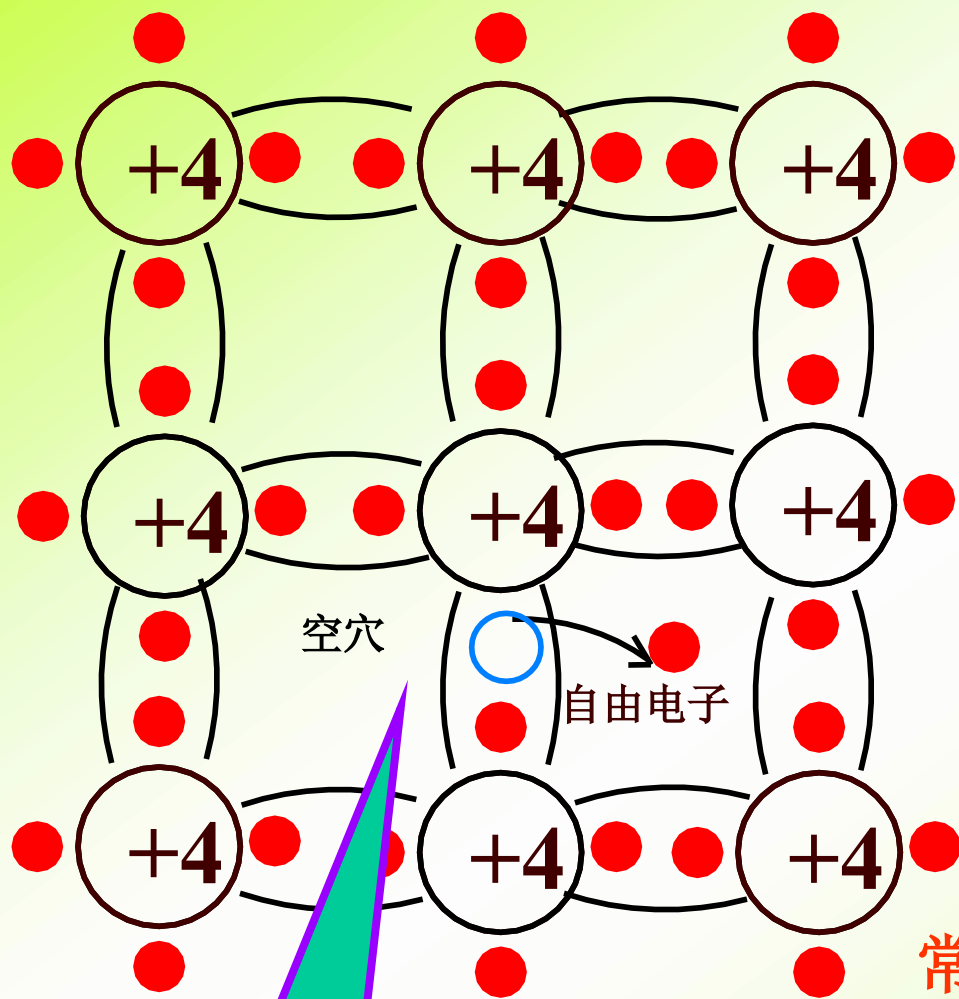
当温度升高或受到光的照射时，束缚电子能量增高，有的电子能够摆脱原子核的束缚，而参加导电，成为**自由电子**。

自由电子产生的同步，在其原来的共价键中就出现了一种空位，称为**空穴**。



这一现象称为**本征激发**，也称**热激发**。

## 动画演示



可见本征激发同步产生电子空穴对。

外加能量越高（温度越高），产生的电子空穴对越多。

## 与本征激发相反的现象——复合

在一定温度下，本征激发和复合同时进行，达到动态平衡。电子空穴对的浓度一定。

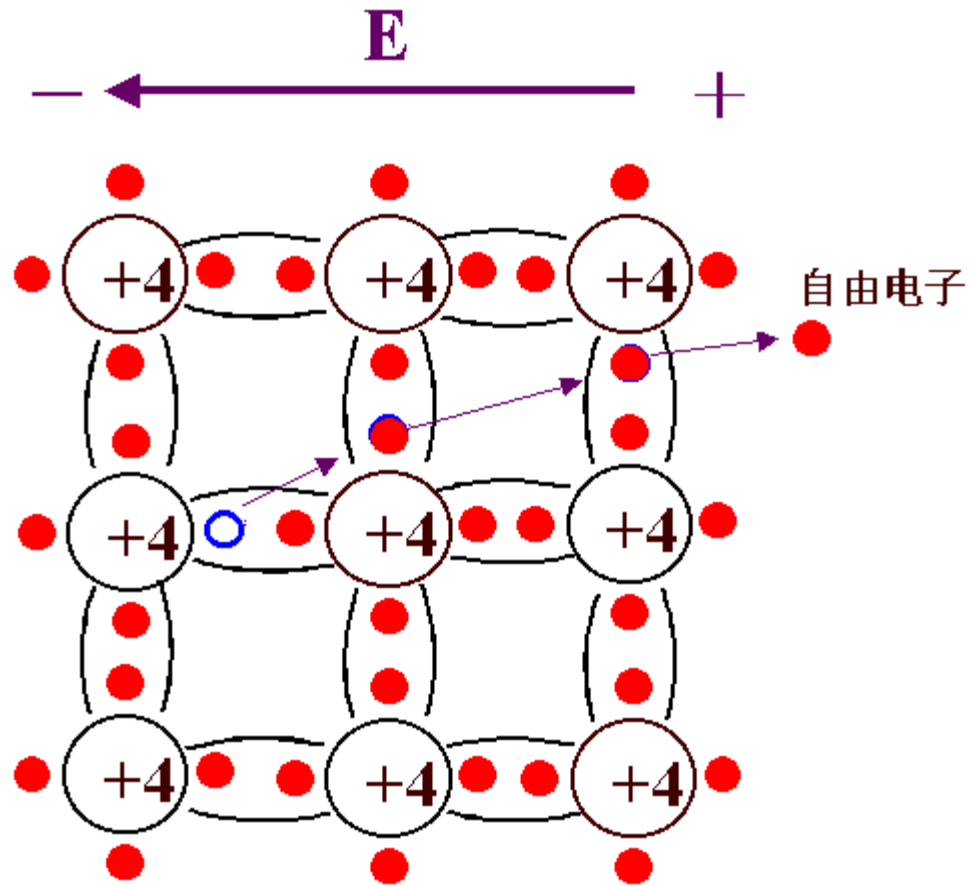
常温300K时：

电子空穴对的浓度  $\left\{ \begin{array}{l} \text{硅: } 1.4 \times 10^{10} / \text{cm}^3 \\ \text{锗: } 2.5 \times 10^{13} / \text{cm}^3 \end{array} \right.$

电子空穴对

# 导电机制

动画演示



载流子 { 自由电子 带负电荷 电子流  
空穴 带正电荷 空穴流 } + 总电流

本征半导体的导电性取决于外加能量:

温度变化, 导电性变化; 光照变化, 导电性变化。

## 二. 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量杂质元素后的半导体称为**杂质半导体**。

### 1. N型半导体

在本征半导体中掺入五价杂质元素，例如磷，砷等，称为**N型半导体**。



# N型半导体

硅原子

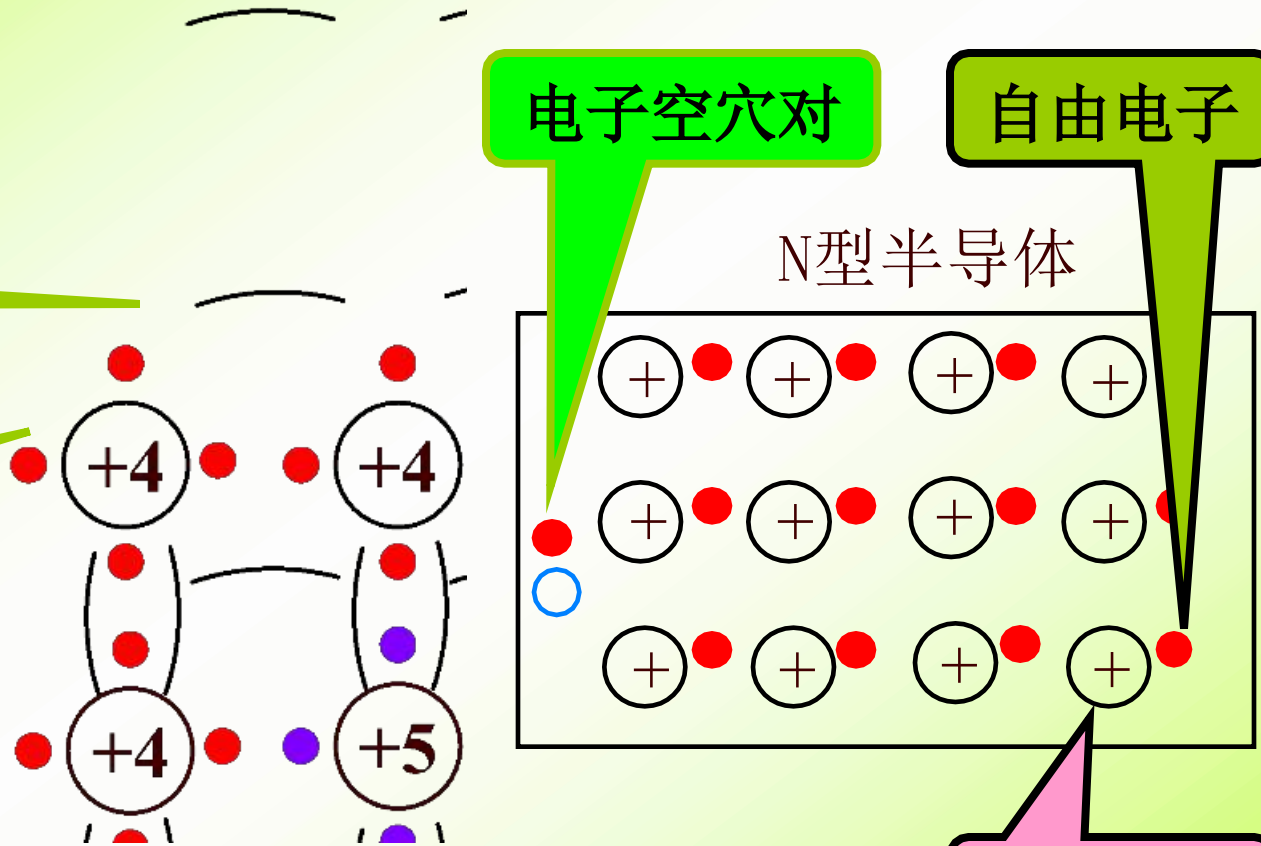
多出电子

磷原子

电子空穴对

自由电子

N型半导体



施主离子

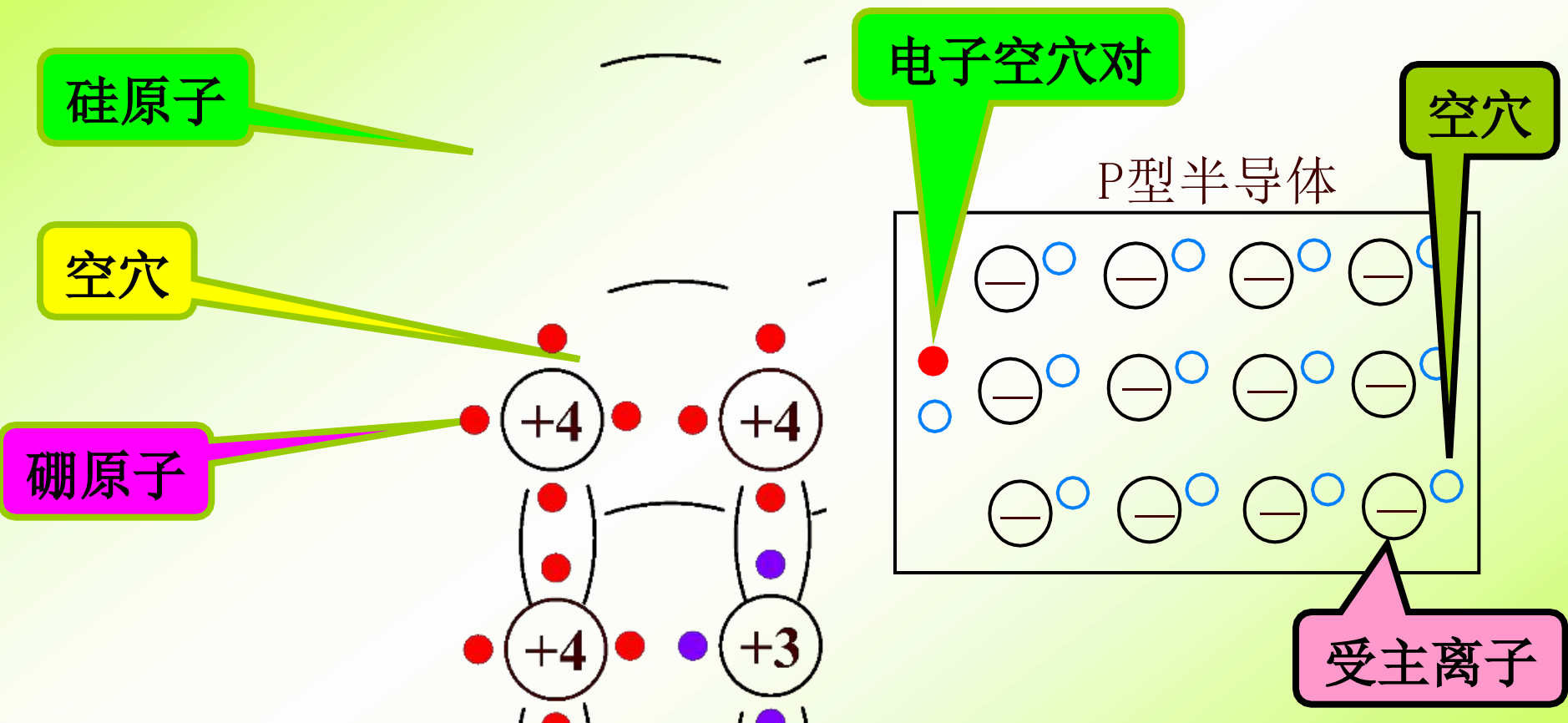
多数载流子——自由电子

少数载流子——空穴



## 2. P型半导体

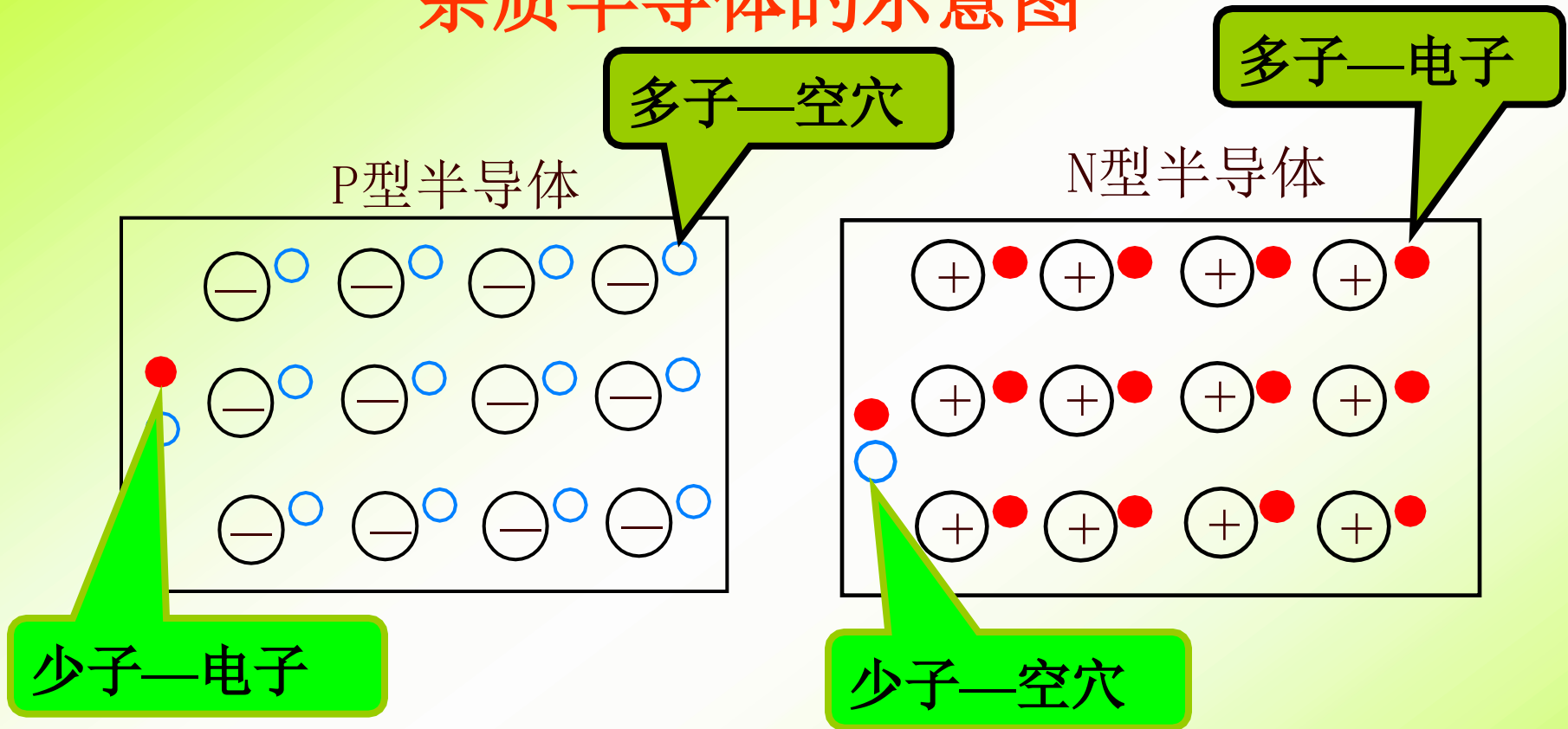
在本征半导体中掺入三价杂质元素，如硼、镓等。



多数载流子——空穴

少数载流子——自由电子

# 杂质半导体的示意图



少子浓度——与温度有关

多子浓度——与温度无关

# 三. PN结及其单向导电性

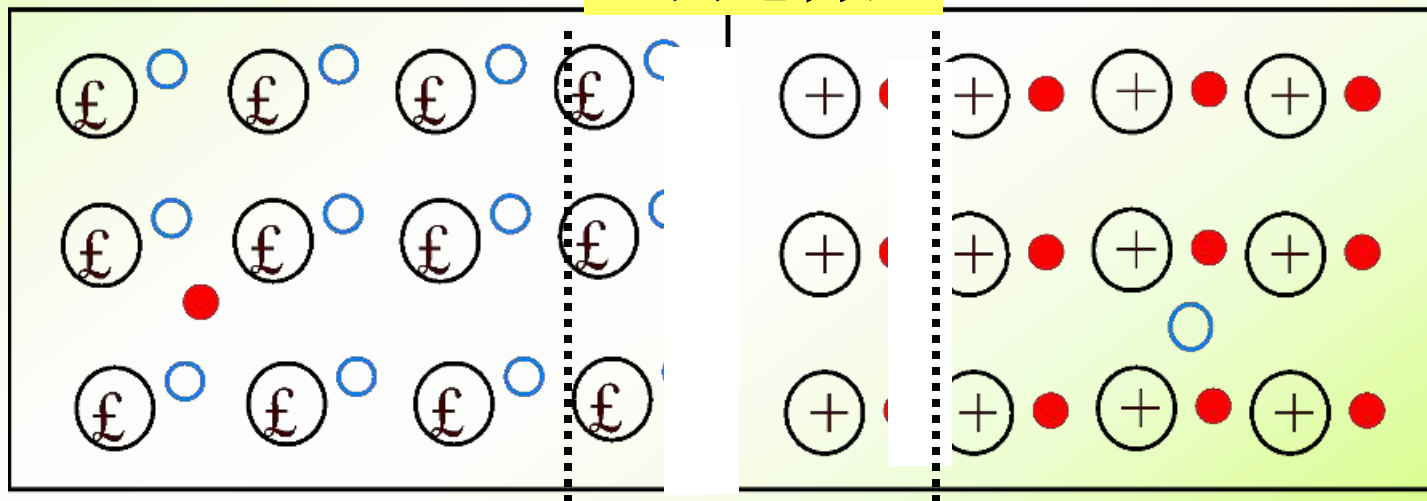
## 1. PN结的形成

PN结合 → 因多子浓度差 → 多子的扩散 → 空间电荷区

→ 形成内电场 → 阻止多子扩散，促使少子漂移。

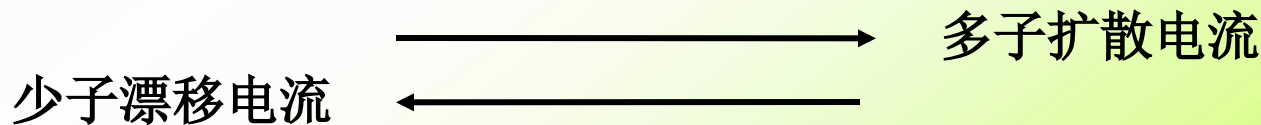
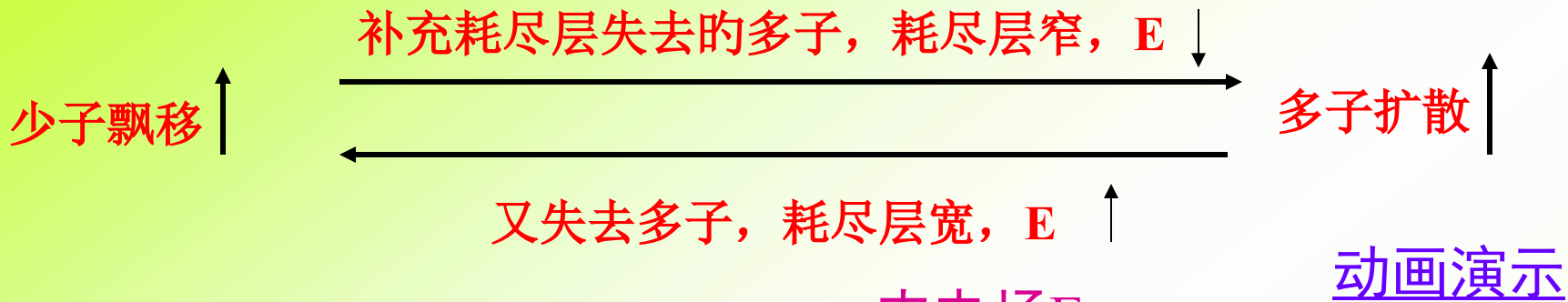
← 内电场E

P型半导体 空间电荷区 N型半导体



耗尽层

少子漂移电流 ← → 多子扩散电流



动态平衡： 扩散电流 = 漂移电流      总电流 = 0

势垒  $U_0$  { 硅 0.5V  
                  锗 0.1V

## 2. PN结的单向导电性

(1) 加正向电压（正偏）——电源正极接P区，负极接N区  
外电场的方向与内电场方向相反。

外电场减弱内电场 → 耗尽层变窄 → 扩散运动 > 漂移运动

→ 多子扩散形成正向电流  $I_F$



## (2) 加反向电压——电源正极接N区，负极接P区

外电场的方向与内电场方向相同。

外电场加强内电场 → 耗尽层变宽 → 漂移运动 > 扩散运动

→ 少子漂移形成反向电流  $I_R$

P

N

在一定的温度下，由本征激发产生的少子浓度是一定的，故  $I_R$  基本上与外加反压的大小无关，所以称为**反向饱和电流**。但  $I_R$  与温度有关。



PN结加正向电压时，具有较大的正向扩散电流，呈现低电阻，PN结导通；

PN结加反向电压时，具有很小的反向漂移电流，呈现高电阻，PN结截止。

由此能够得出结论：PN结具有单向导电性。

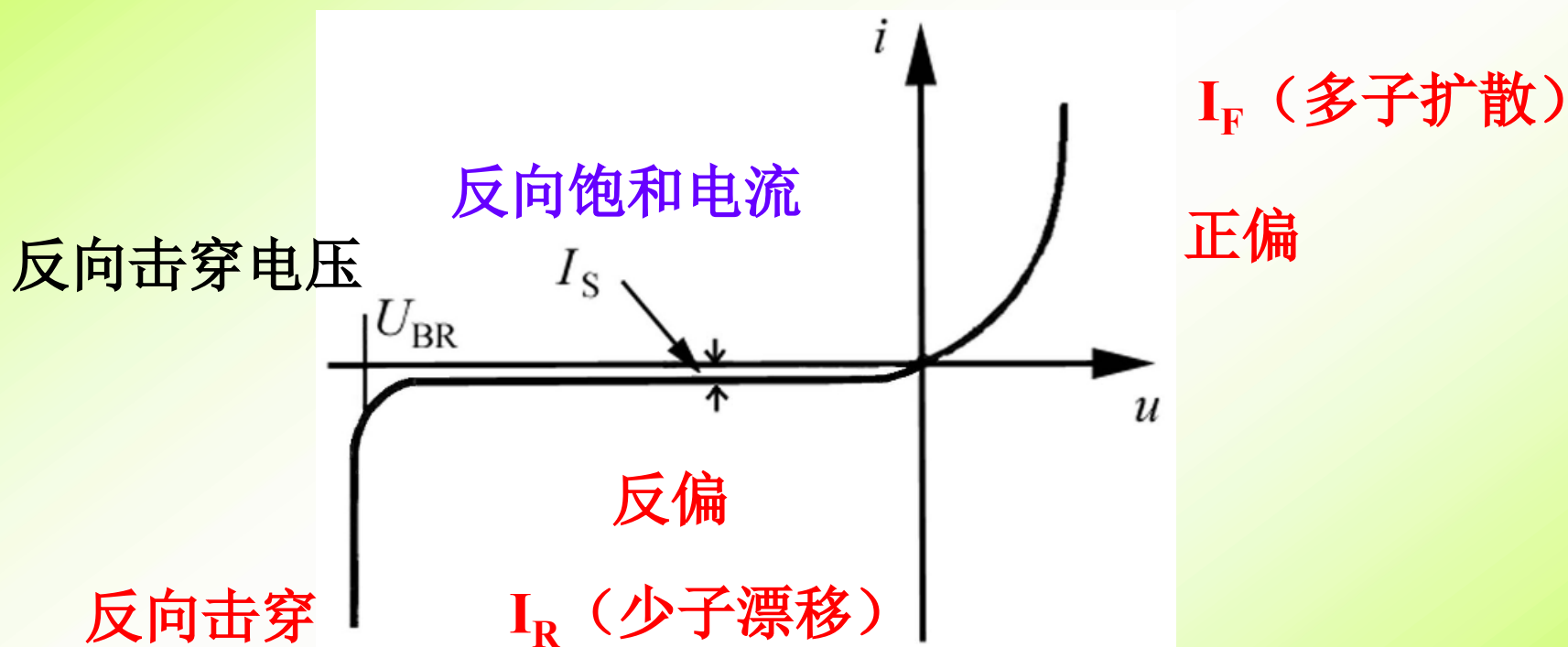
[动画演示1](#)

[动画演示2](#)



### 3. PN结的伏安特征曲线及体现式

根据理论推导，PN结的伏安特征曲线如图



电击穿——可逆

热击穿——烧坏PN结

根据理论分析： $i = I_S (e^{u/U_T} - 1)$

当  $u > 0$   $u \gg U_T$  时  $e^{u/U_T} \gg 1$

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

当  $u < 0$   $|u| \gg |U_T|$  时  $e^{-u/U_T} \ll 1$

$$i \approx -I_S$$

$u$  为PN结两端的电压降

$i$  为流过PN结的电流

$I_S$  为反向饱和电流

$$U_T = kT/q$$

称为温度的电压当量

其中  $k$  为玻耳兹曼常数

$$1.38 \times 10^{-23}$$

$q$  为电子电荷量  $1.6 \times 10^{-19}$

$T$  为热力学温度

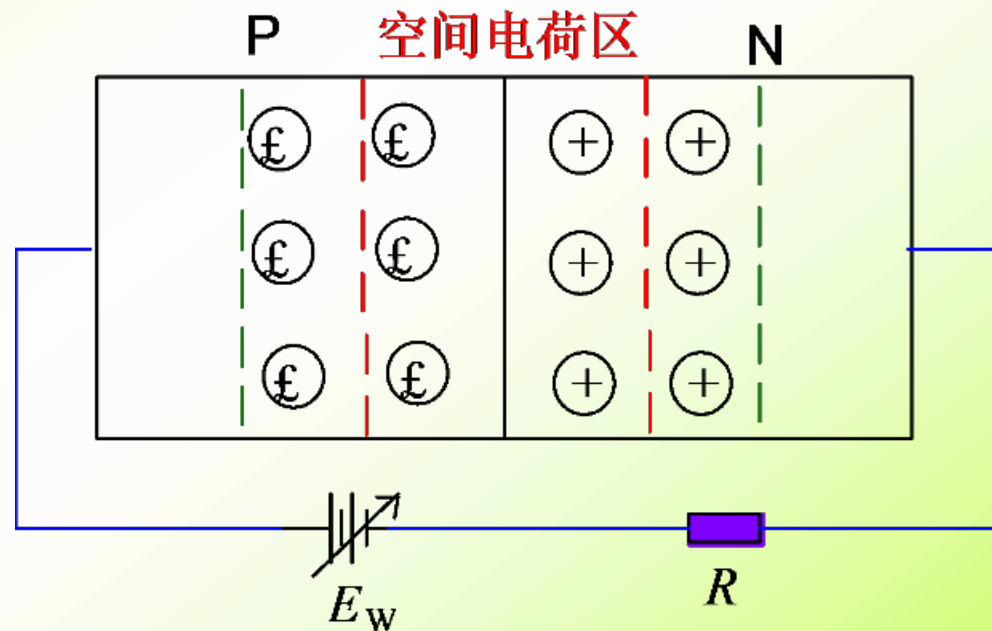
对于室温（相当  $T=300$  K）

则有  $U_T=26$  mV。

## 4. PN结的电容效应

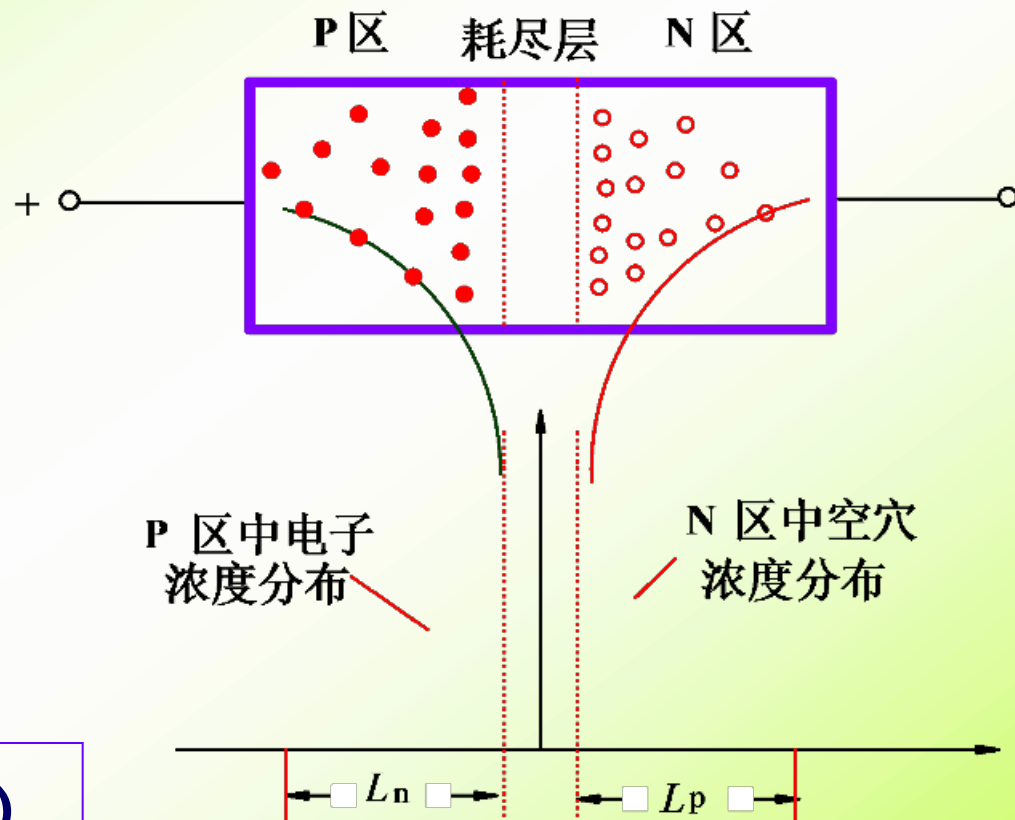
### (1) 势垒电容 $C_B$

当外加电压发生变化时，耗尽层的宽度要相应地随之变化，即PN结中存储的电荷量要随之变化，就像电容充放电一样。



## (2) 扩散电容 $C_D$

当外加正向电压不同步，PN结两侧堆积的少子的数量及浓度梯度也不同，这就相当电容的充放电过程。



极间电容（结电容）

电容效应在交流信号作用下才会明显体现出来

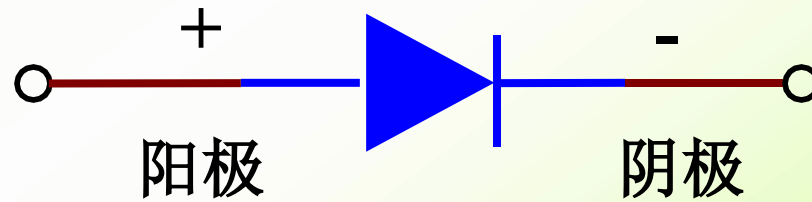
## 1.2 半导体二极管

构造

二极管 = PN结 + 管壳 + 引线



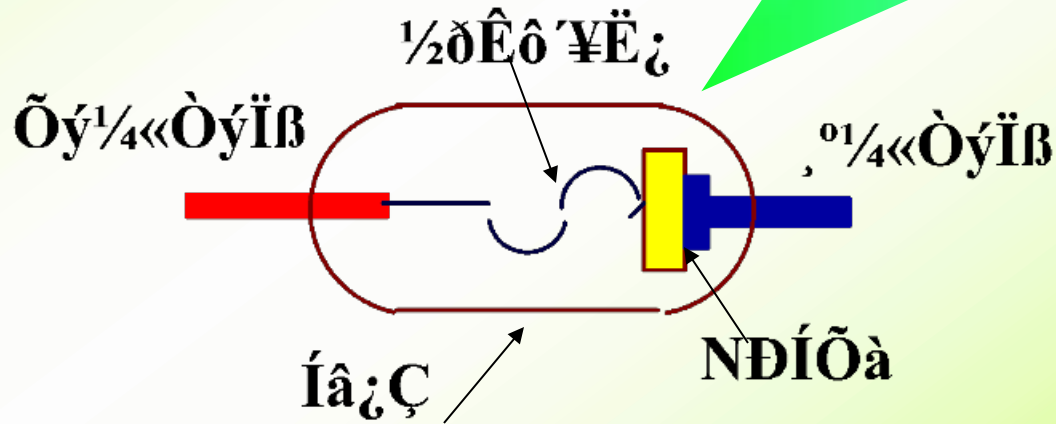
符号



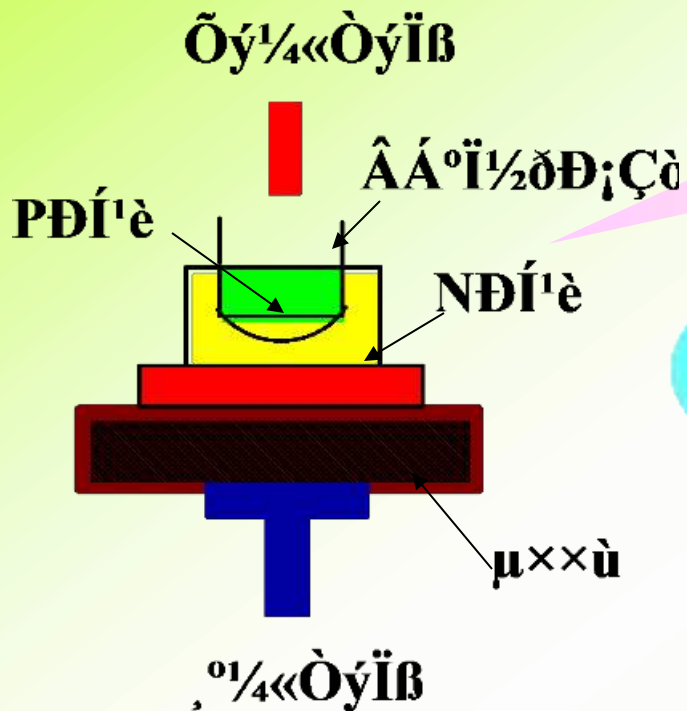
# 二极管按构造分三大类:

## (1) 点接触型二极管

PN结面积小，结电容小，  
用于检波和变频等高频电路。



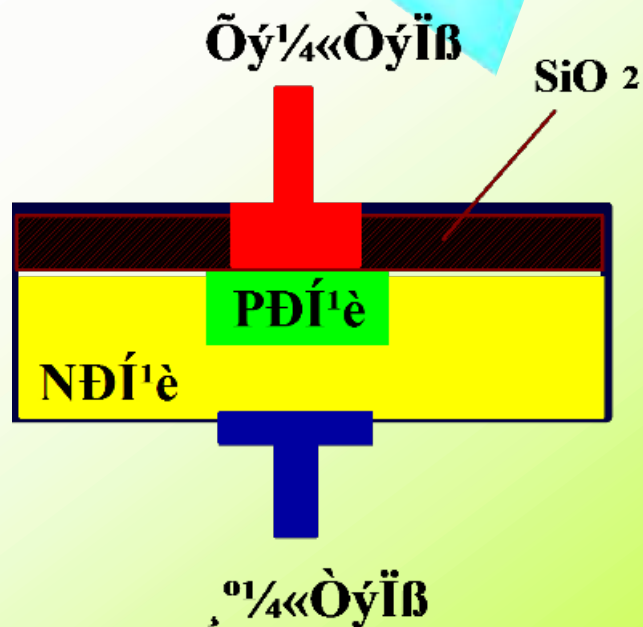
## (2) 面接触型二极管



PN结面积大，用于工频大电流整流电路。

用于集成电路制造工艺中。PN结面积可大可小，用于高频整流和开关电路中。

## (3) 平面型二极管





# 半导体二极管的型号

国家原则对半导体器件型号的命名举例如下：

**2AP9**

用数字代表同类器件的不同规格。

代表器件的类型，P为一般管，Z为整流管，K为开关管。

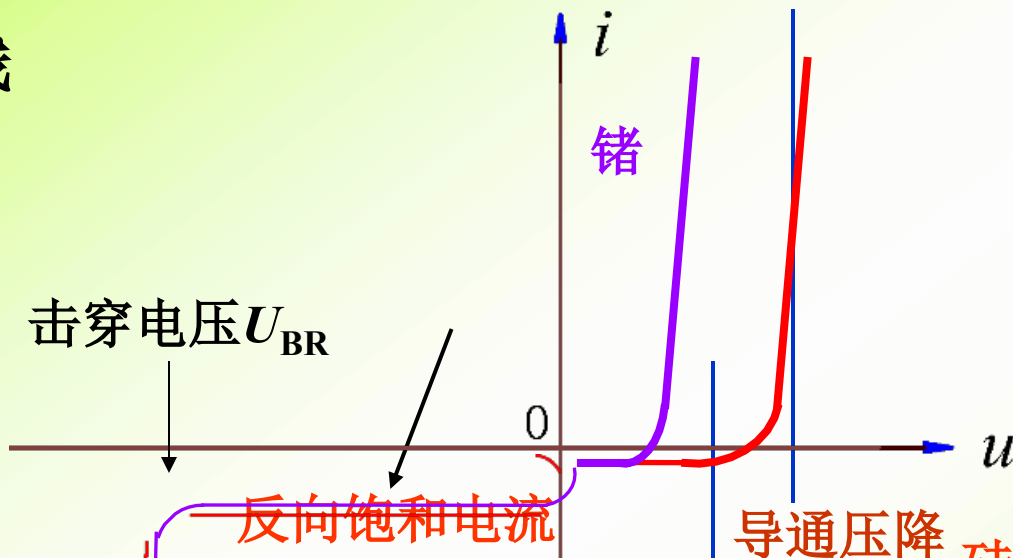
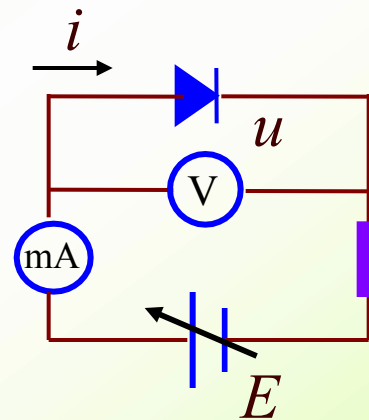
代表器件的材料，A为N型Ge，B为P型Ge，C为N型Si，D为P型Si。

2代表二极管，3代表三极管。

# 一、半导体二极管的V—A特征曲线

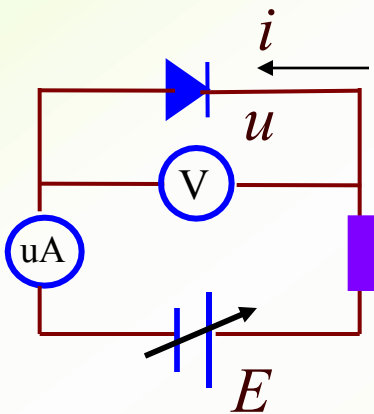
试验曲线

(1) 正向特征

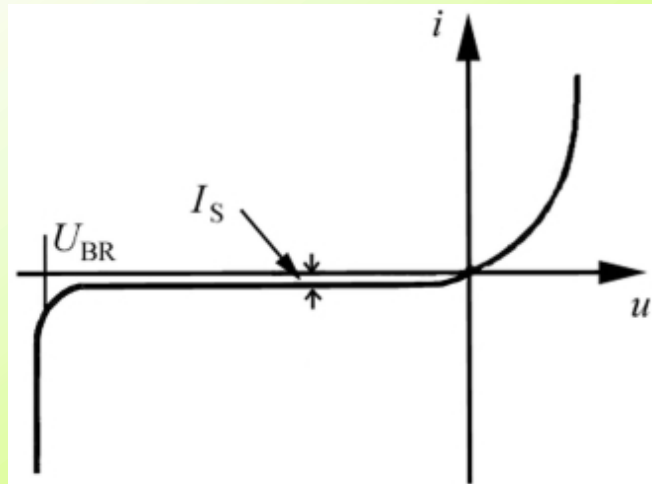


硅: 0.7 V 锗: 0.3V

(2) 反向特征



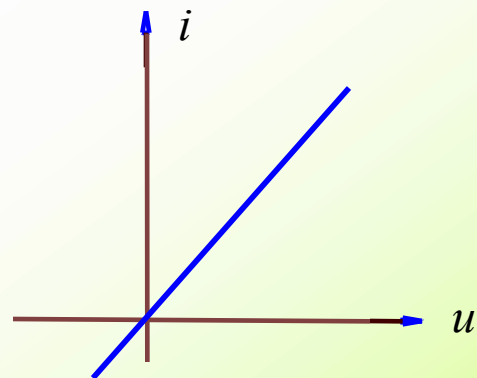
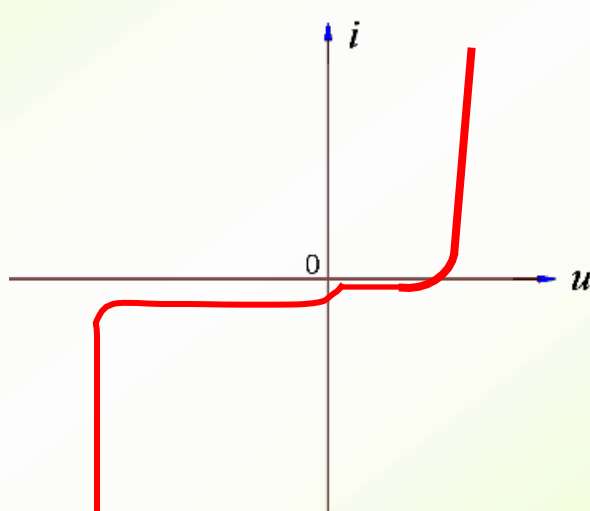
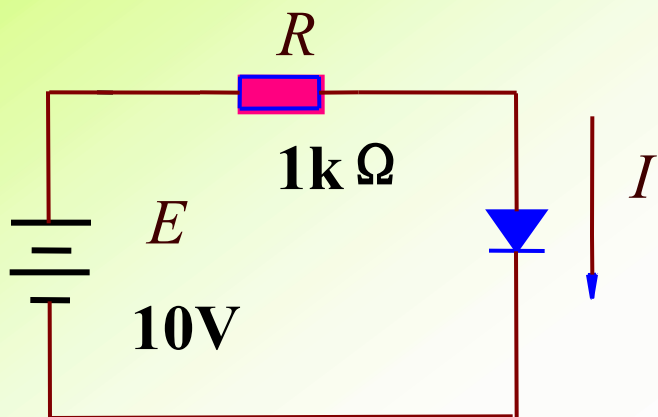
硅: 0.5 V  
锗: 0.1 V



## 二. 二极管的模型及近似分析计算

例:

D—非线性器件    RLC—线性器件

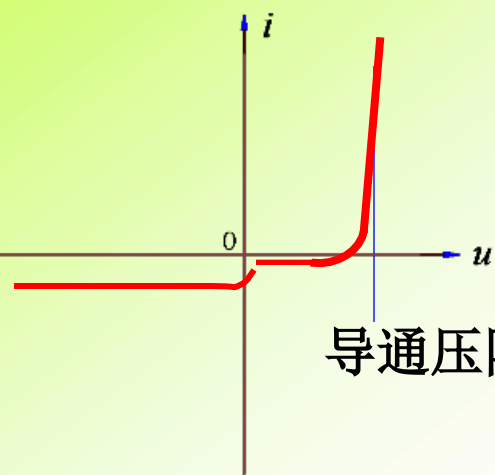


$$i = I_S (e^{u/U_T} - 1)$$

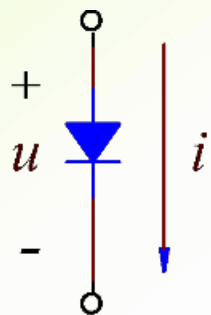
$$u = Ri$$

# 二极管的模型

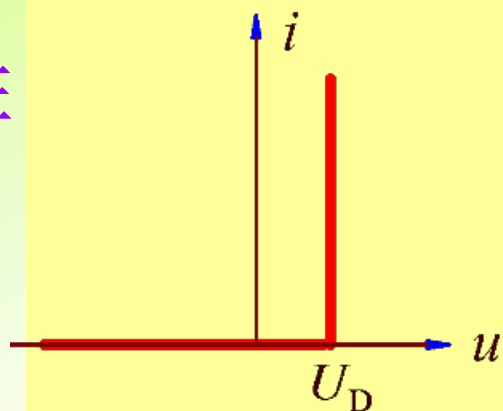
## 二极管的V—A特征



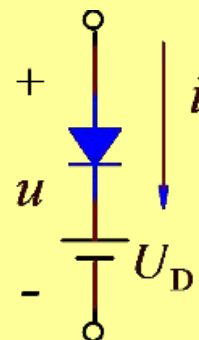
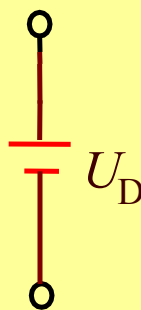
导通压降



## 串联电压源模型

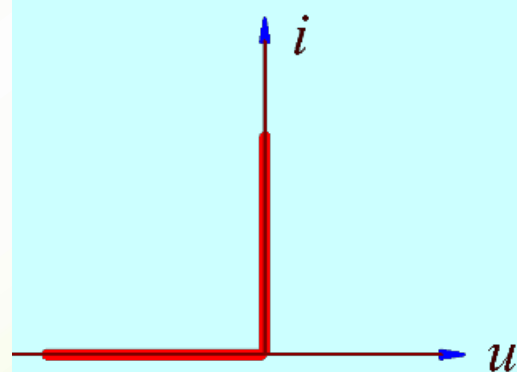


$u \geq U_D$     $u < U_D$



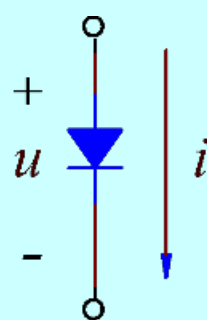
$U_D$  二极管的导通压降。硅管 0.7V；锗管 0.3V。

## 理想二极管模型



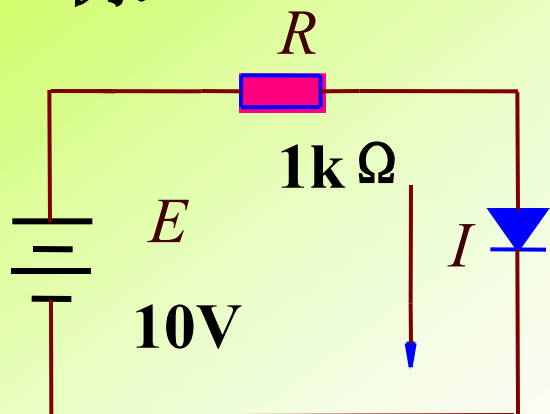
正偏

反偏

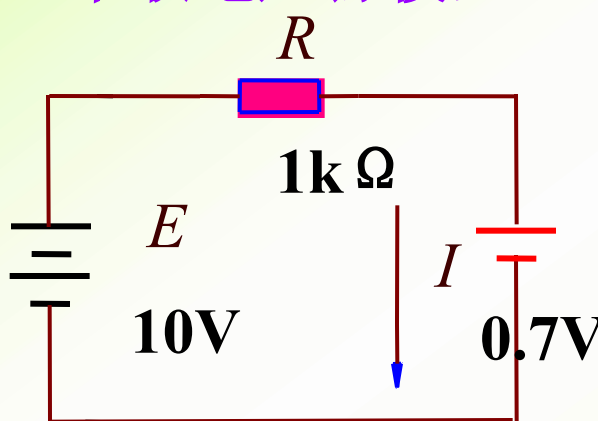


# 二极管的近似分析计算

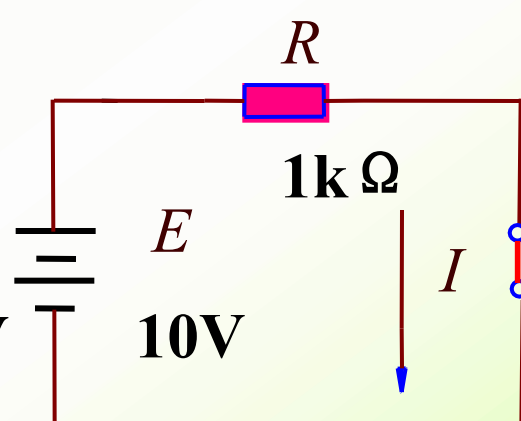
例:



串联电压源模型



理想二极管模型



测量值 9.32mA

$$I = \frac{(10 - 0.7)\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 9.3\text{mA}$$

$$I = \frac{10\text{V}}{1\text{k}\Omega} = 10\text{mA}$$

相对误差

$$\delta = \frac{9.32 - 9.3}{9.32} \times 100\% \approx 0.2\%$$

相对误差

$$\delta = \frac{10 - 9.32}{9.32} \times 100\% \approx 7\%$$

**例：**二极管构成的限幅电路如图所示， $R=1\text{k}\Omega$ ， $U_{\text{REF}}=2\text{V}$ ，输入信号为 $u_i$ 。

(1)若 $u_i$ 为4V的直流信号，分别采用理想二极管模型、理想二极管串联电压源模型计算电流 $I$ 和输出电压 $u_o$ 。

**解：**（1）采用理想模型分析。

$$I = \frac{u_i - U_{\text{REF}}}{R} = \frac{4\text{V} - 2\text{V}}{1\text{k}} = 2\text{mA}$$

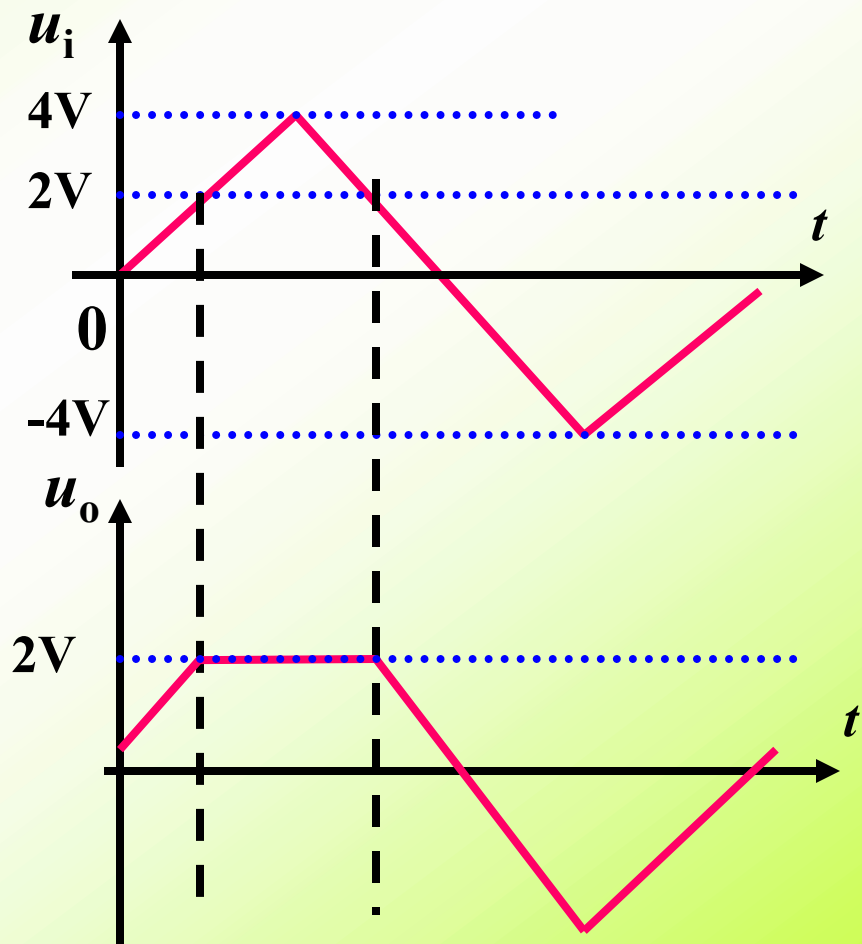
$$u_o = U_{\text{REF}} = 2\text{V}$$

采用理想二极管串联电压源模型分析。

$$I = \frac{u_i - U_{\text{REF}} - U_{\text{D}}}{R} = \frac{4\text{V} - 2\text{V} - 0.7\text{V}}{1\text{k}} = 1.3\text{mA}$$

$$u_o = U_{\text{REF}} + U_{\text{D}} = 2\text{V} + 0.7\text{V} = 2.7\text{V}$$

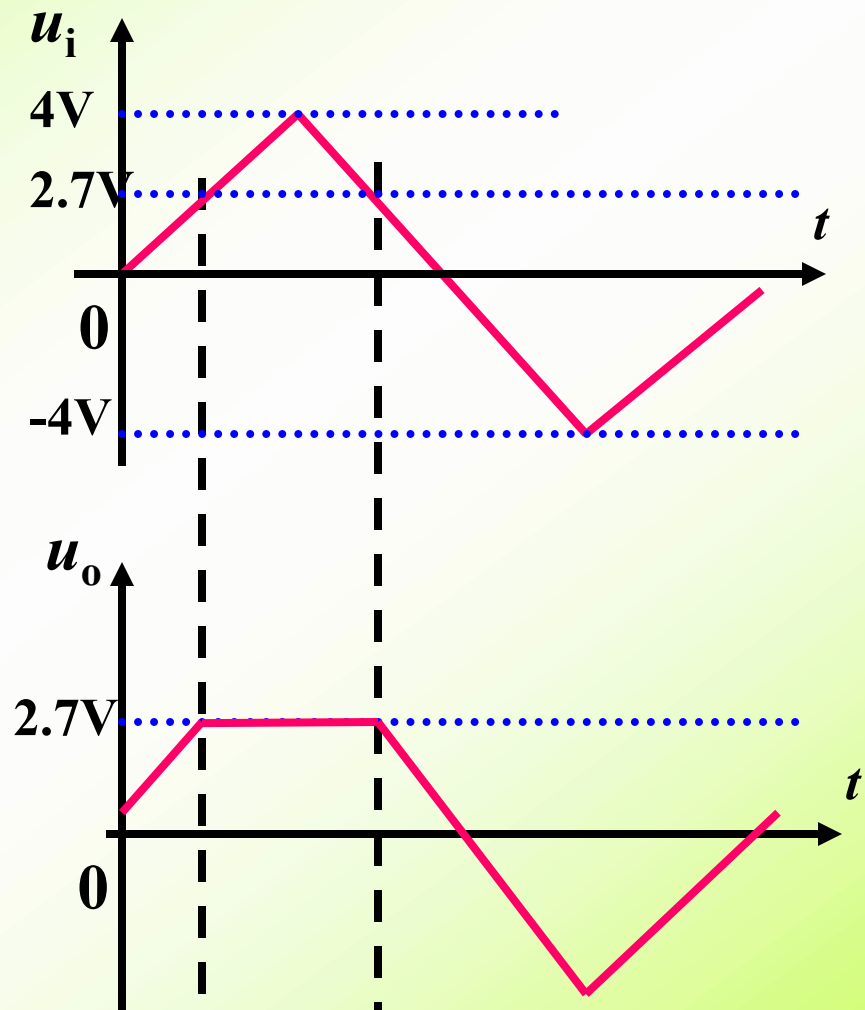
(2) 假如 $u_i$ 为幅度 $\pm 4V$ 的交流三角波，波形如图(b)所示，分别采用理想二极管模型和理想二极管串联电压源模型分析电路并画出相应的输出电压波形。



解：①采用理想二极管模型分析。波形如图所示。



②采用理想二极管串联电压源模型分析，波形如图所示。



### 三. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流  $I_F$ ——

二极管长久连续工作时，允许经过二极管的最大整流电流的平均值。

(2) 反向击穿电压  $U_{BR}$ ——

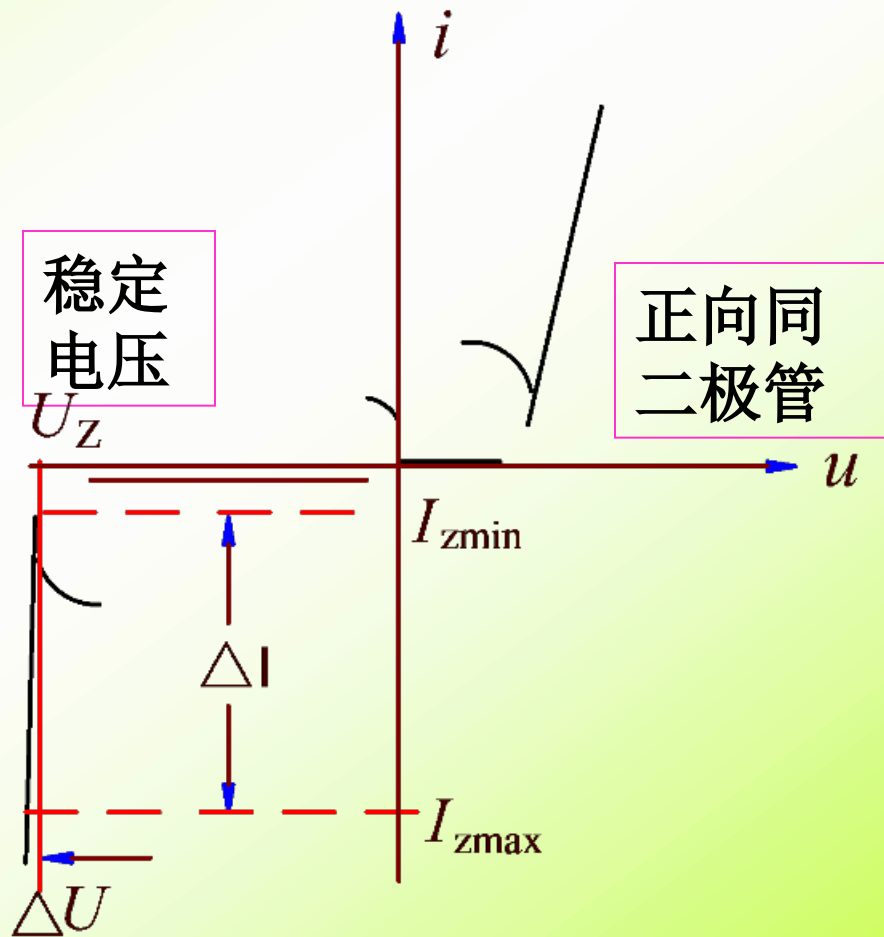
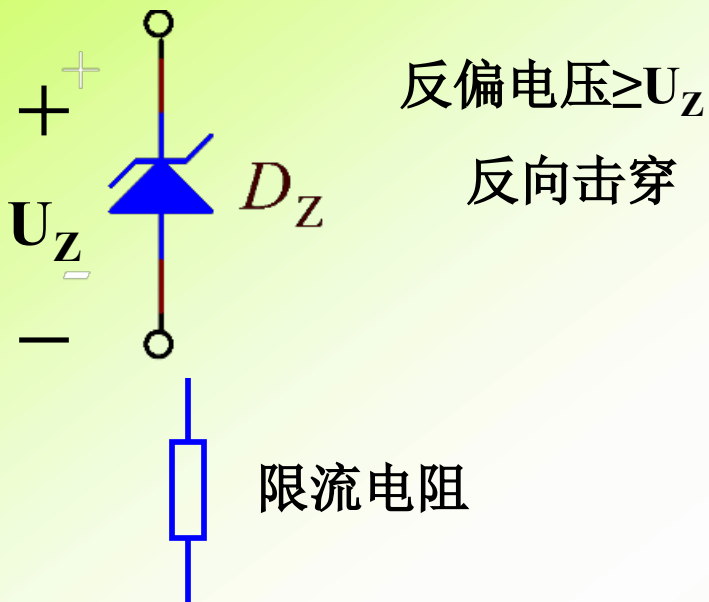
二极管反向电流急剧增长时相应的反向电压值称为反向击穿电压  $U_{BR}$ 。

(3) 反向电流  $I_R$ ——

在室温下，在要求的反向电压下的反向电流值。硅二极管的反向电流一般在纳安(nA)级；锗二极管在微安( $\mu$ A)级。

# 四、稳压二极管

稳压二极管是应用在反向击穿区的特殊二极管



当稳压二极管工作在反向击穿状态下,工作电流  $I_Z$  在  $I_{zmax}$  和  $I_{zmin}$  之间变化时,其两端电压近似为常数

## 稳压二极管的主要参数

(1) 稳定电压  $U_Z$  ——

在要求的稳压管反向工作电压

(2) 动态电阻  $r_Z$  ——

$$r_Z = \Delta U / \Delta I$$

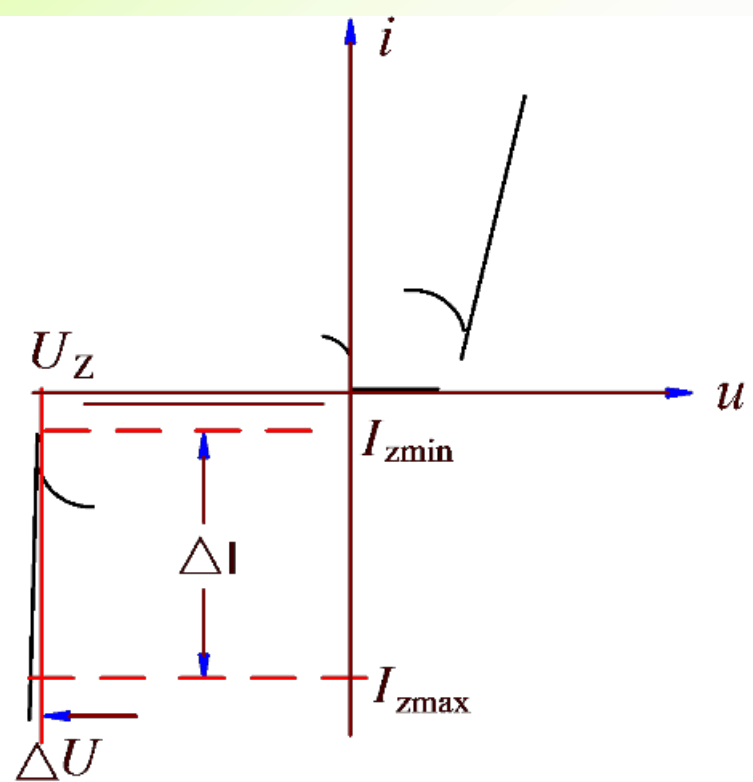
$r_Z$  愈小，反应稳压管的击穿

(3) 最小稳定工作电流  $I_{Zmin}$  ——

确保稳压管击穿所相应的电流，若  $I_Z < I_{Zmin}$  则不能稳压。

(4) 最大稳定工作电流  $I_{Zmax}$  ——

超出  $I_{Zmax}$  稳压管会因功耗过大而烧坏。



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/048000063067006130>