

# 第一章 半导体器件(1)

# 第一章 半导体器件

---

1.1 半导体基础知识

1.2 二极管

1.3 二极管的基本应用电路

1.4 稳压管

1.5 其他类型的二极管

1.6 三极管

1.7 场效应管

---

# 1.1 半导体的基础知识

---

**导体：**自然界中很容易导电的物质称为导体，金属一般都是导体。

**绝缘体：**有的物质几乎不导电，称为绝缘体，如橡皮、陶瓷、塑料和石英。

**半导体：**另有一类物质的导电特性处于导体和绝缘体之间，称为半导体，  
如**锗**、**硅**、砷化镓和一些硫化物、氧化物等。

# 1.1 半导体的基础知识

---

**半导体**的导电机理不同于其它物质，所以它具有不同于其它物质的特点。  
例如：

当受外界热和光的作用时，它的导电能力明显变化。

—— 光敏器件

往纯净的半导体中掺入某些杂质，会使它的导电能力和内部结构发生变化。

—— 二极管

---

## 1.1.1 本征半导体

纯净的晶体结构的半导体称为  
本征半导体

将硅或锗材料提纯便形成单晶体，它的原子结构为共价键结构。

当温度  $T = 0\text{ K}$  时，半导体不导电，如同绝缘体。

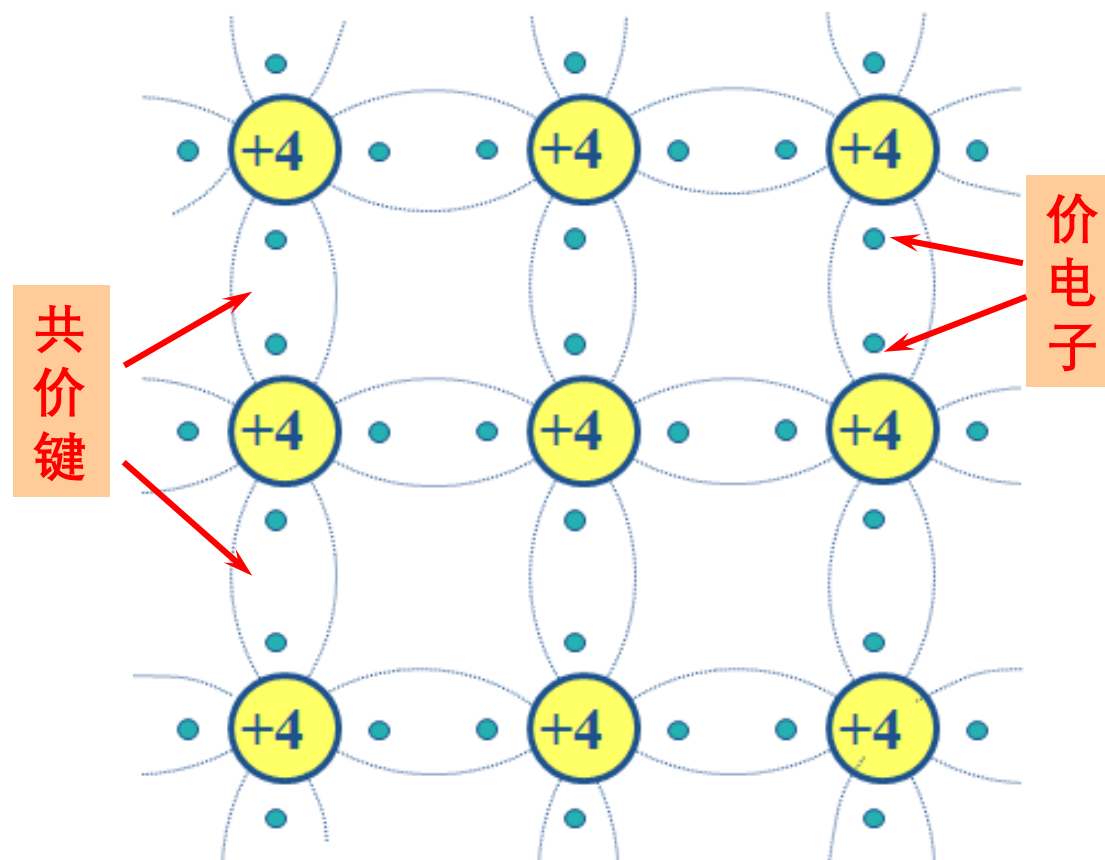


图1.1-1 共价键结构平面示意图

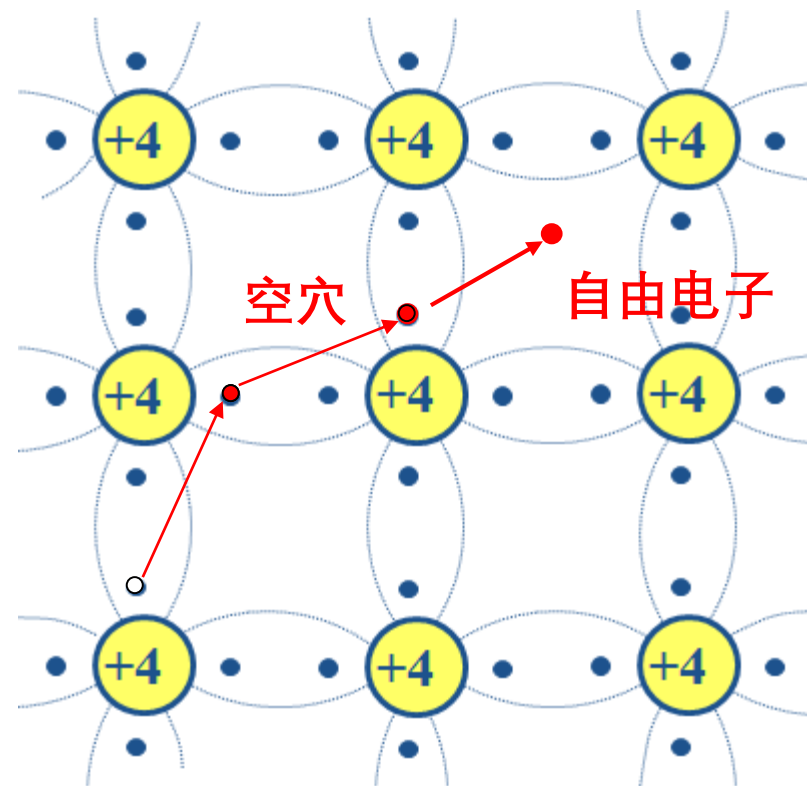
## 1.1.2 本征激发和两种载流子

若  $T \uparrow$ ，将有少数价电子克服共价键的束缚成为**自由电子**，在原来的共价键中留下一个空位——**空穴**。

**本征激发**: 本征半导体因热运动而产生电子-空穴对的现象。

**复合**: 自由电子在运动过程中与空穴相遇而填补空穴，使二者同时消失。

在一定温度下本征半导体中载流子的浓度是一定的，并且自由电子与空穴的浓度相等。



## 1.1.2 本征激发和两种载流子

---

1. 半导体中两种载流子  $\left\{ \begin{array}{l} \text{带负电的自由电子} \\ \text{带正电的空穴} \end{array} \right.$
2. 本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现，称为 电子 - 空穴对。
3. 本征半导体中自由电子和空穴的浓度用  $n_i$  和  $p_i$  表示，显然  $n_i = p_i$ 。
4. 由于物质的运动，自由电子和空穴不断的产生又不断的复合。在一定的温度下，产生与复合运动会达到平衡，载流子的浓度就一定了。
5. 载流子的浓度与温度密切相关，它随着温度的升高，基本按指数规律增加。

## 1.1.3 杂质半导体

---

杂质半导体有两种 { N 型半导体  
P 型半导体

### 一、N 型半导体(Negative)

在硅或锗的晶体中掺入少量的 **5 价**杂质元素，如磷、锑、砷等，即构成 **N 型半导体** (或称电子型半导体)。

常用的 5 价杂质元素有磷、锑、砷等。



## 1.1.3 杂质半导体

本征半导体掺入 5 价元素后，原来晶体中的某些硅原子将被杂质原子代替。杂质原子最外层有 5 个价电子，其中 4 个与硅构成共价键，多余一个电子只受自身原子核吸引，在室温下即可成为自由电子。

自由电子浓度远大于空穴的浓度，即  $n \gg p$ 。

自由电子称为多子，空穴称为少子。

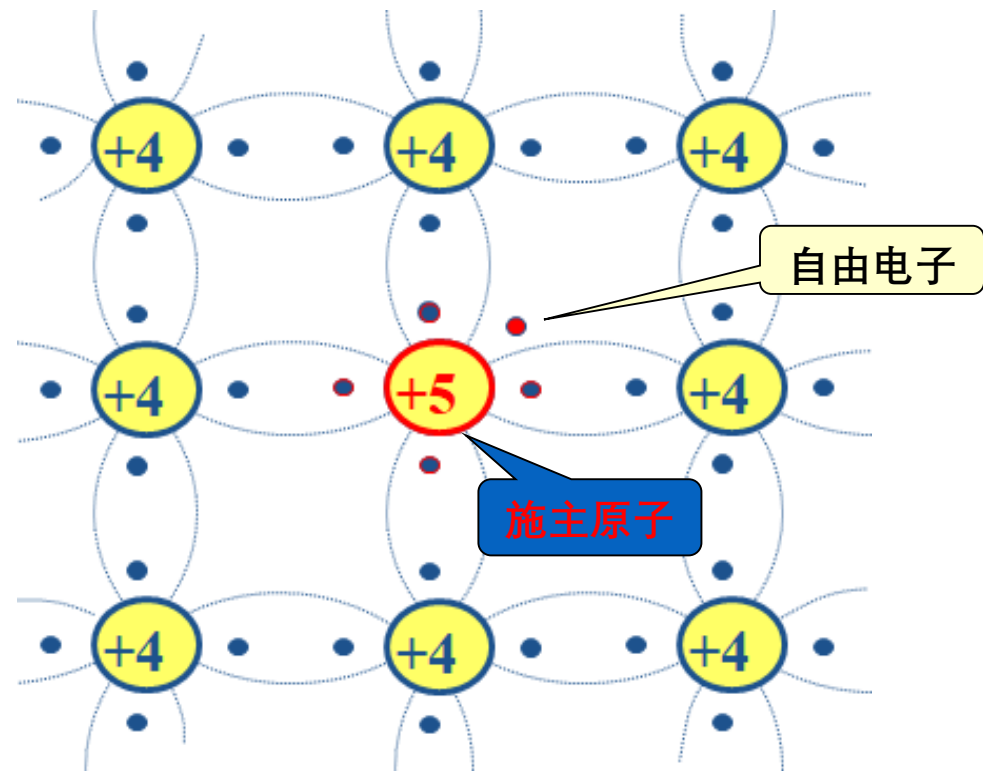


图 1.1-2 N 型半导体

## 1.1.3 杂质半导体

### 二、P 型半导体(Positive)

在硅或锗的晶体中掺入少量的 **3 价** 杂质元素，如硼、镓、铟等，即构成 **P 型半导体**。3 价杂质原子称为**受主原子**。

空穴浓度多于电子浓度，即  $p \gg n$ 。空穴为多数载流子，电子为少数载流子。

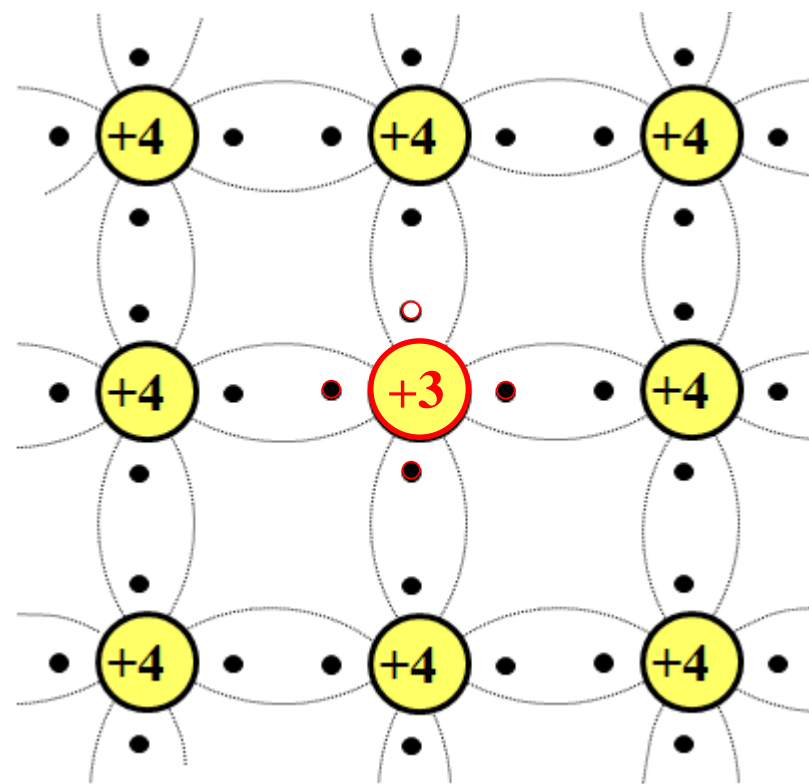
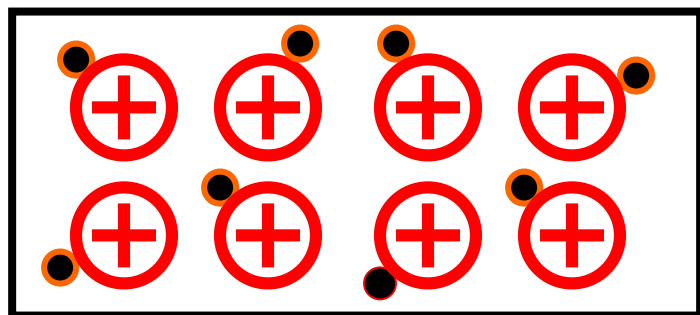


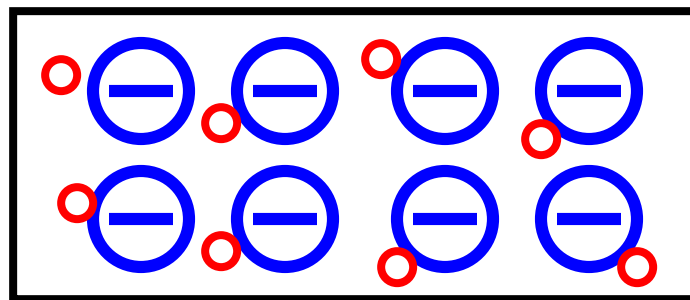
图1.1-3 P 型半导体

## 1.1.3 杂质半导体

1. 掺入杂质的浓度决定多数载流子浓度；温度决定少数载流子的浓度。
2. 杂质半导体**载流子的数目**要远远高于本征半导体，因而其导电能力大大改善。
3. 杂质半导体总体上保持电中性。



(a) N 型半导体



(b) P 型半导体

图1.1-4 杂质半导体的简化表示法

## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

在一块半导体单晶上一侧掺杂成为 P 型半导体，另一侧掺杂成为 N 型半导体，两个区域的交界处就形成了一个特殊的薄层，称为PN结。

### 一、PN 结的形成

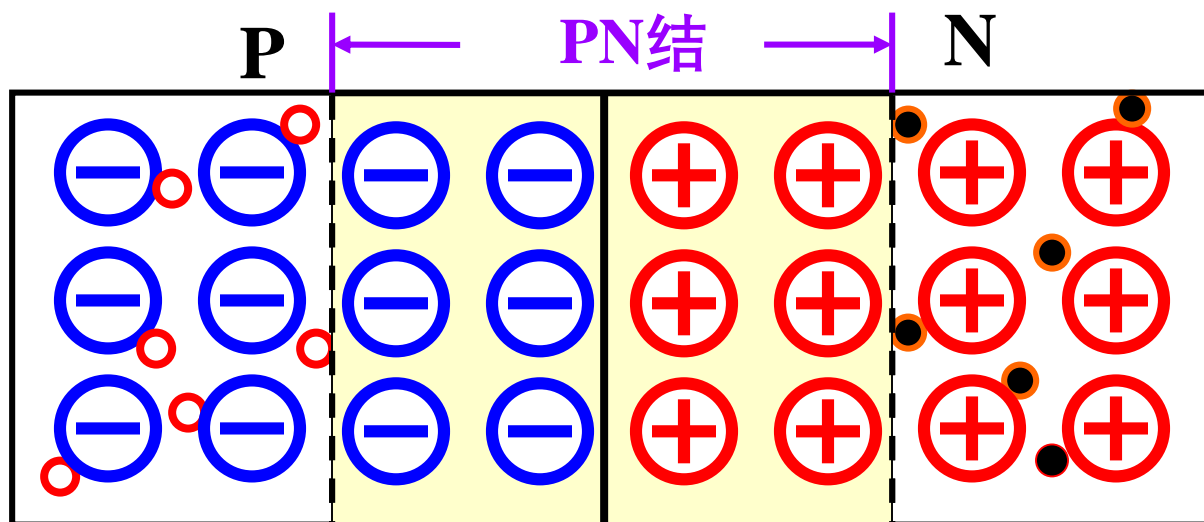


图1.1-5 PN 结的形成

## 1.1.4 PN结

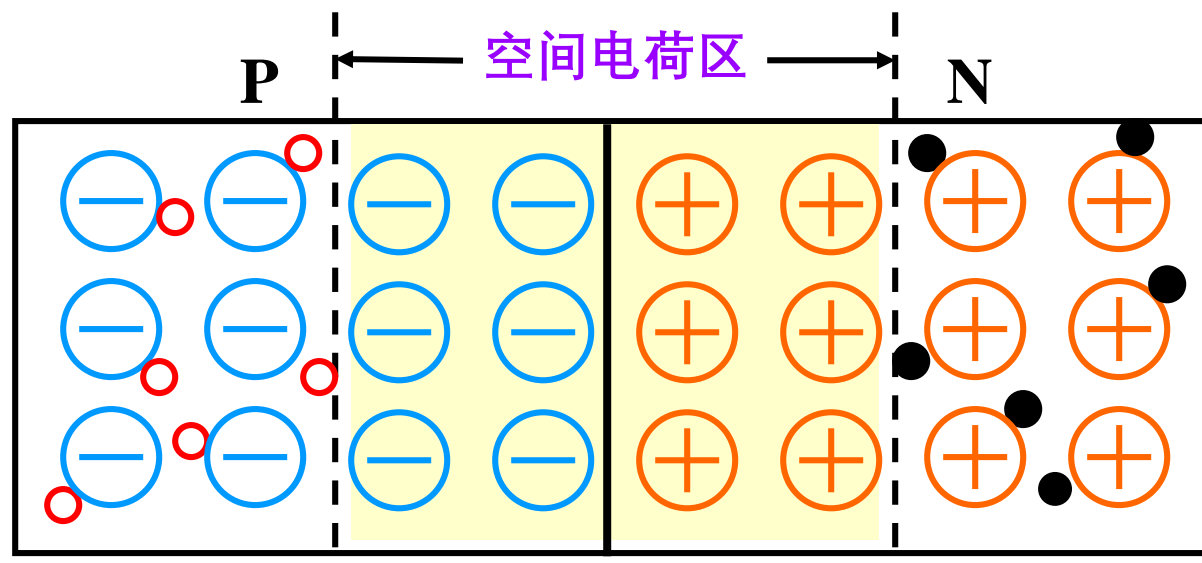
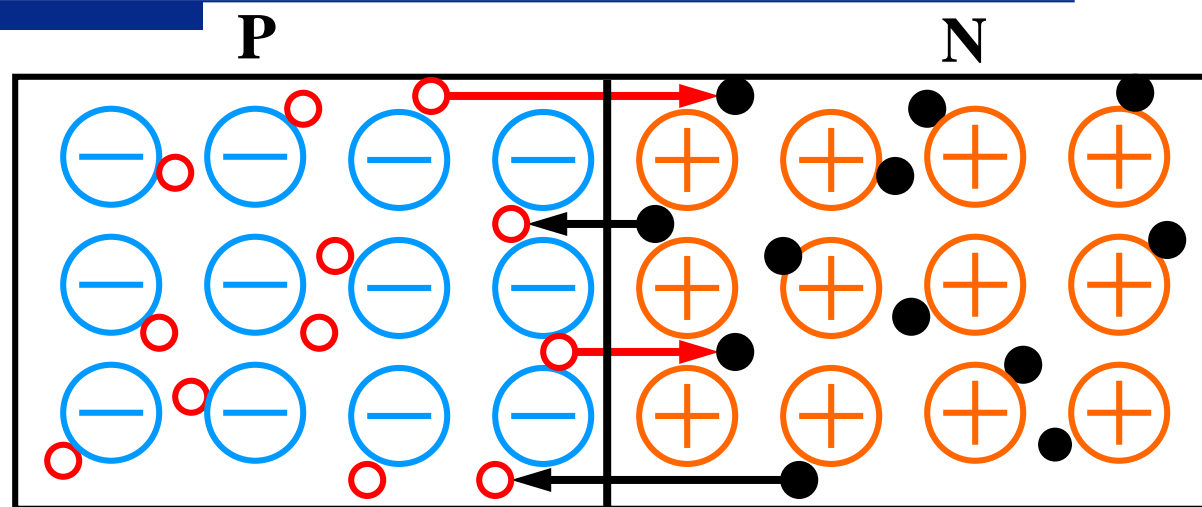
形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

### PN 结中载流子的运动

#### 1. 扩散运动

电子和空穴浓度差形成多数载流子的扩散运动。

扩散运动形成空间电荷区



## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

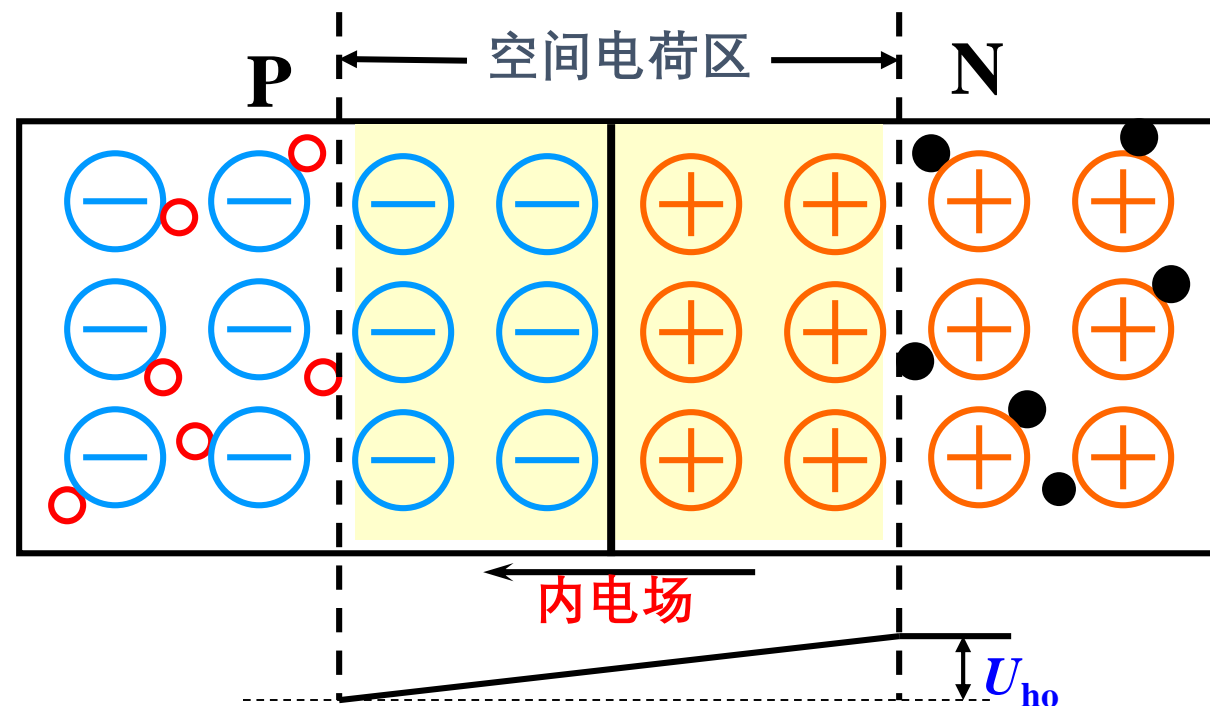
空间电荷区产生内电场

内电场阻止多子的扩散，但对少子的运动起到促进作用。

### 2. 漂移运动

少子在内电场作用下的运动——  
**漂移**

在空间电荷区外的同侧,少子的运动与多子运动方向相反



## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

### 3. 扩散与漂移的动态平衡

扩散运动使空间电荷区增大，扩散电流逐渐减小；随着内电场的增强，漂移运动逐渐增加；

当扩散电流与漂移电流相等时，PN 结总的电流等于零，空间电荷区的宽度达到稳定。

即扩散运动与漂移运动达到动态平衡。

## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

### 二、PN 结的单向导电性

#### 1. PN结 外加正向电压 (正偏)

正偏时，外电场削弱内电场，PN结变薄，势垒电压降低，利于多子扩散，不利于少子漂移，由多子扩散形成较大的正向电流。PN结呈现低阻，处于正向导通状态。

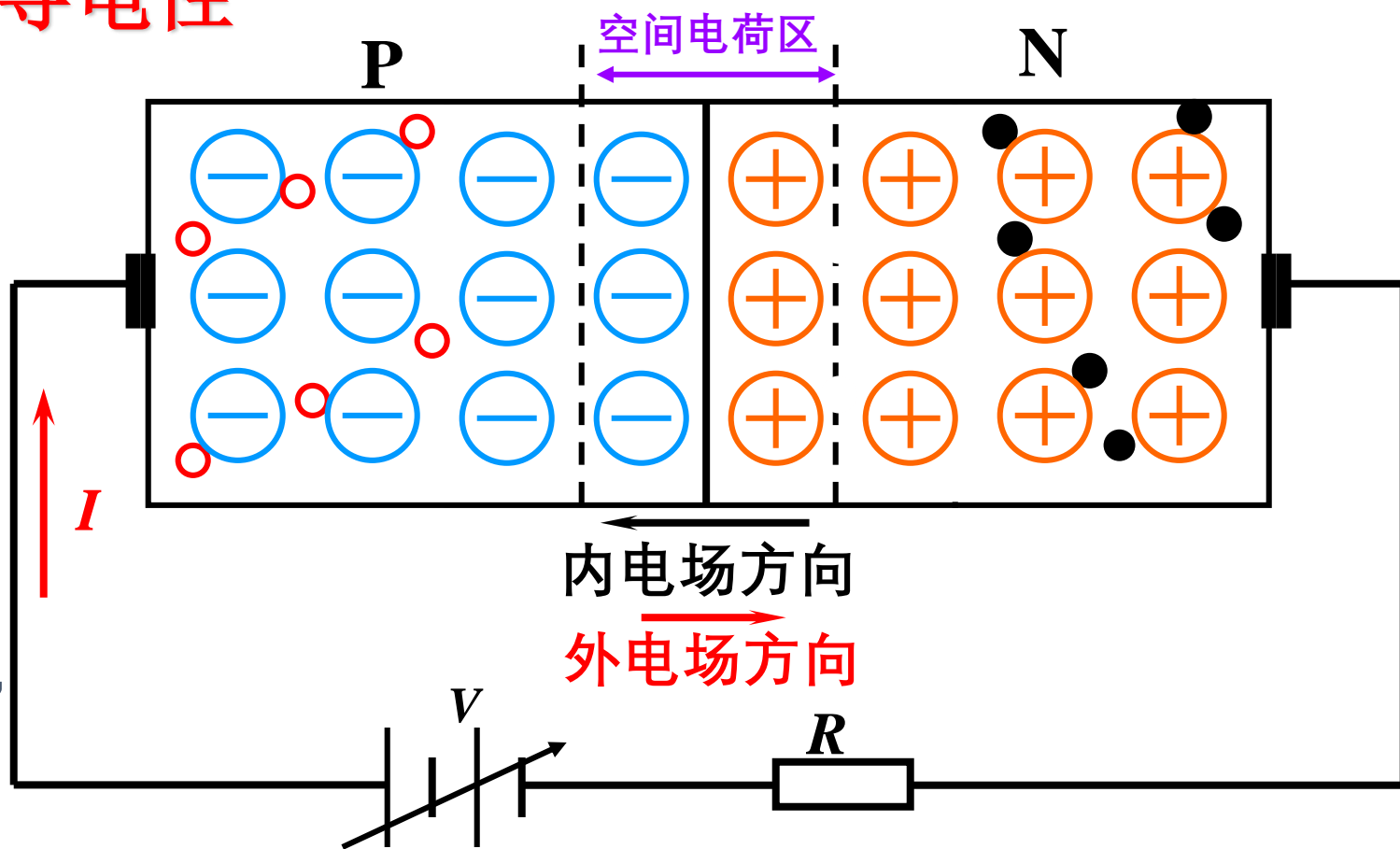


图 1.1-6 PN结正偏



## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

### 2. PN 结外加反向电压（反偏） 截止

反向电流又称反向饱和电流。对温度十分敏感，随着温度升高， $I_S$  将急剧增大。

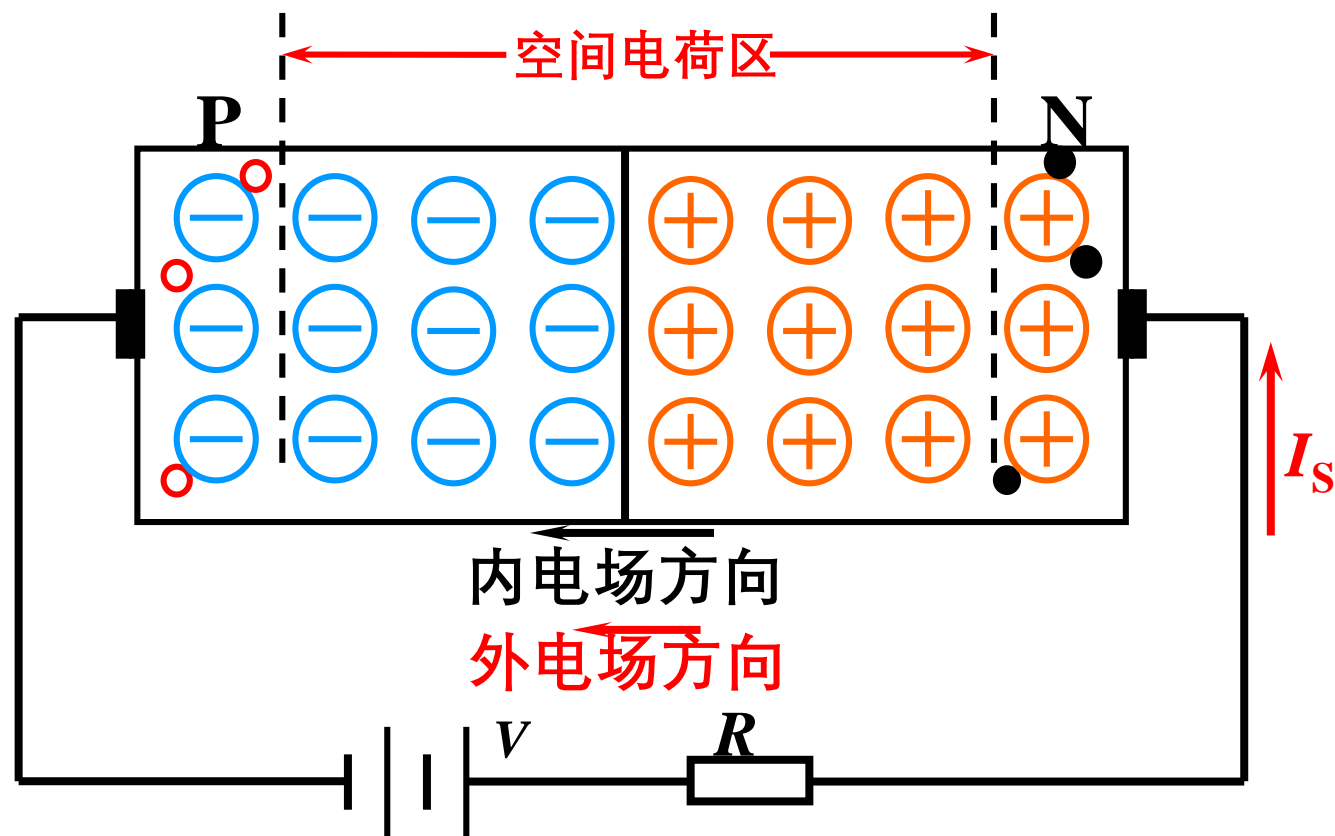


图 1.1-7 PN结反偏

## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

综上所述：

当 PN 结正向偏置时，回路中将产生一个较大的正向电流，PN 结处于 **导通状态**；

当 PN结反向偏置时，回路中反向电流非常小，几乎等于零，PN 结处于**截止状态**。

可见，PN 结具有**单向导电性**。

## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 **电流方程** 伏安特性 电容效应

### 三、PN 结的电流方程

PN结所加端电压 $u$ 与流过的电流 $i$ 的关系为

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

令 $U_T = kT/q$ ,

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

$I_S$ : 反向饱和电流

$q$ : 电子电量

$k$ : 玻尔兹曼常数

$T$ : 热力学温度

$U_T$ 称为温度的电压当量,

在常温 (300 K) 下,  $U_T \approx 26 \text{ mV}$

## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

### 四、PN结的伏安特性

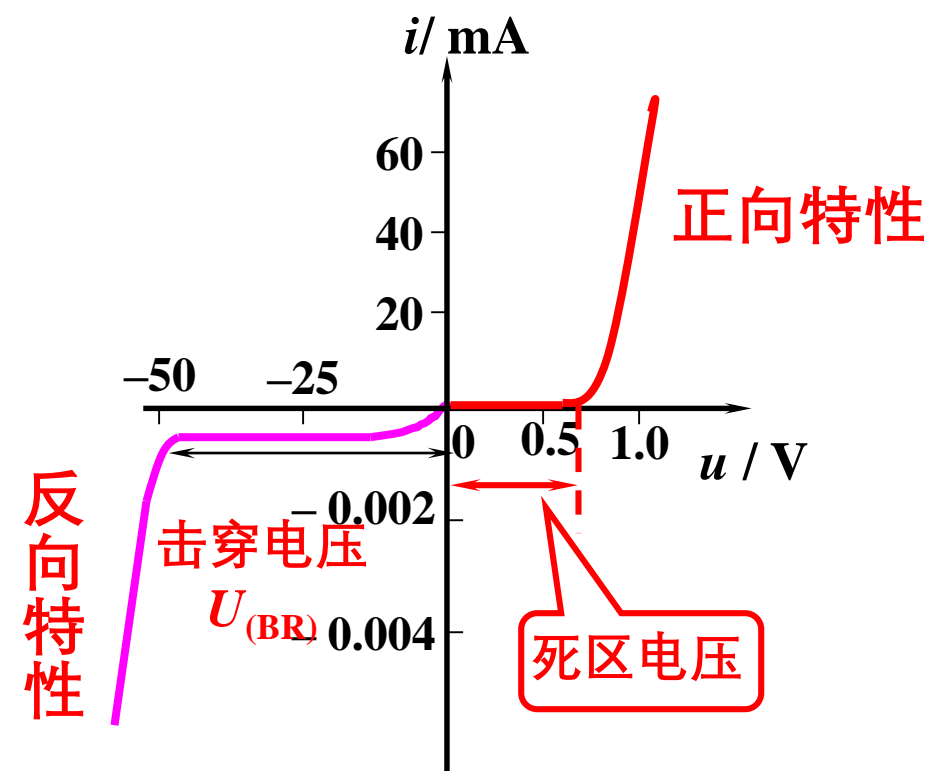


图 1.1-8 PN结的伏安特性

## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

### 五、PN结的电容效应

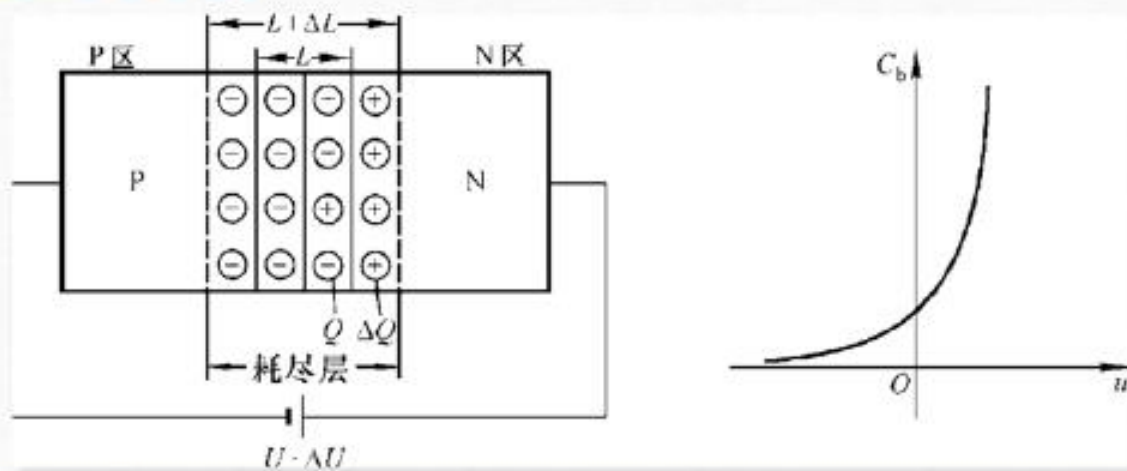
当PN上的电压发生变化时，PN 结中储存的电荷量将随之发生变化，使PN结具有电容效应。

电容效应包括两部分 { 势垒电容  
扩散电容

## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

### 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 $C_b$ 。 $C_b$ 主要表现在加反向电压时。

## 1.1.4 PN结

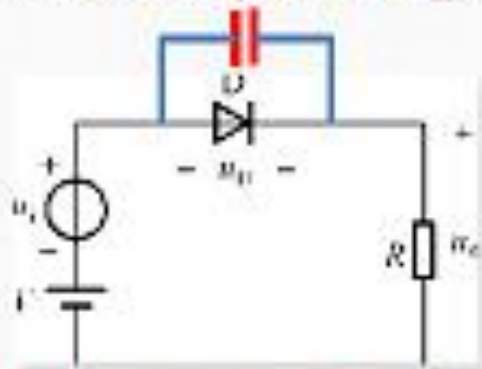
形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

### 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：

$$C_j = C_b + C_d$$



若PN结外加电压频率高到一定程度，则失去单向导电性！

结电容不是常量！

## 1.1.4 PN结

形成 单向导电性 电流方程 伏安特性 电容效应

综上所述：

PN 结总的结电容  $C_j$  包括势垒电容  $C_b$  和扩散电容  $C_d$  两部分。

一般来说，当二极管正向偏置时，扩散电容起主要作用，即可以认为  $C_j \approx C_d$ ；

反向偏置时，势垒电容起主要作用，可以认为  $C_j \approx C_b$ 。

$C_b$  和  $C_d$  值都很小，通常为几个皮法 ~ 几十皮法，有些结面积大的二极管可达几百皮法。

在信号频率较高时，须考虑结电容的作用。



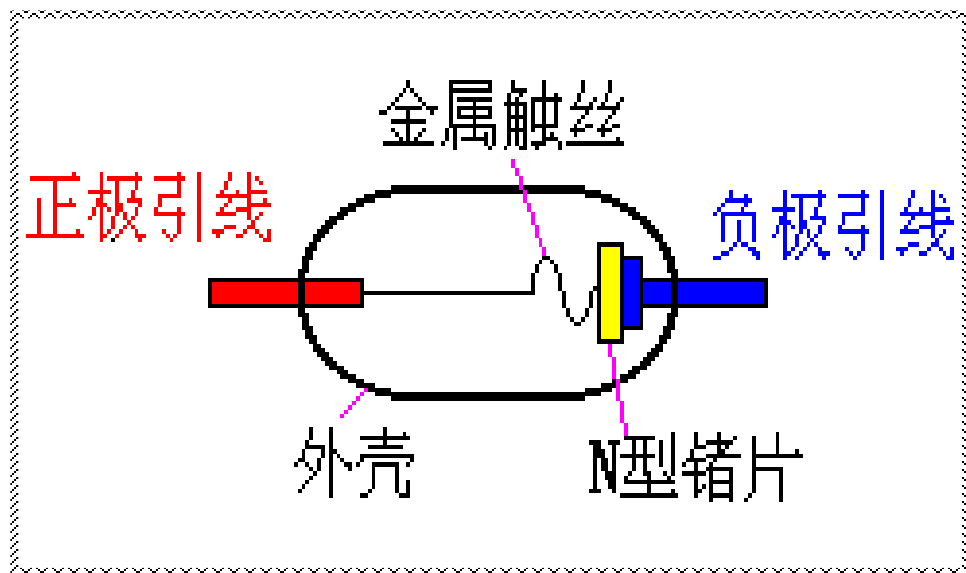
## 1.2 二极管

在PN结上加上引线 and 封装，就成为一个二极管。



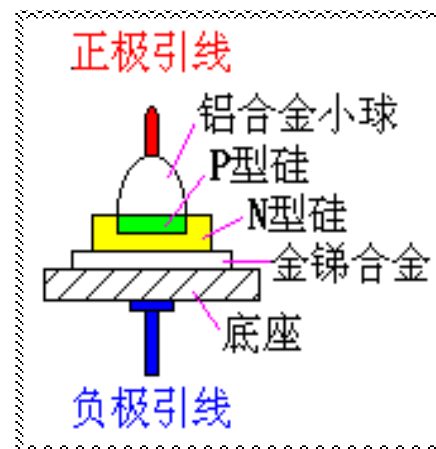
图1. 2-1二极管的几种外形

## 1.2.1 二极管的几种常见结构



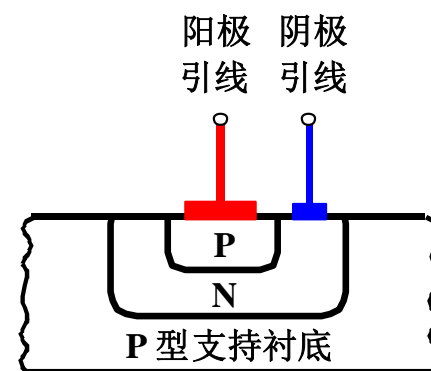
(a) 点接触型

PN结面积小，结电容小，用于检波和变频等高频电路。



(b) 面接触型

PN结面积大，用于工频大电流整流电路。



(c) 平面型

往往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。

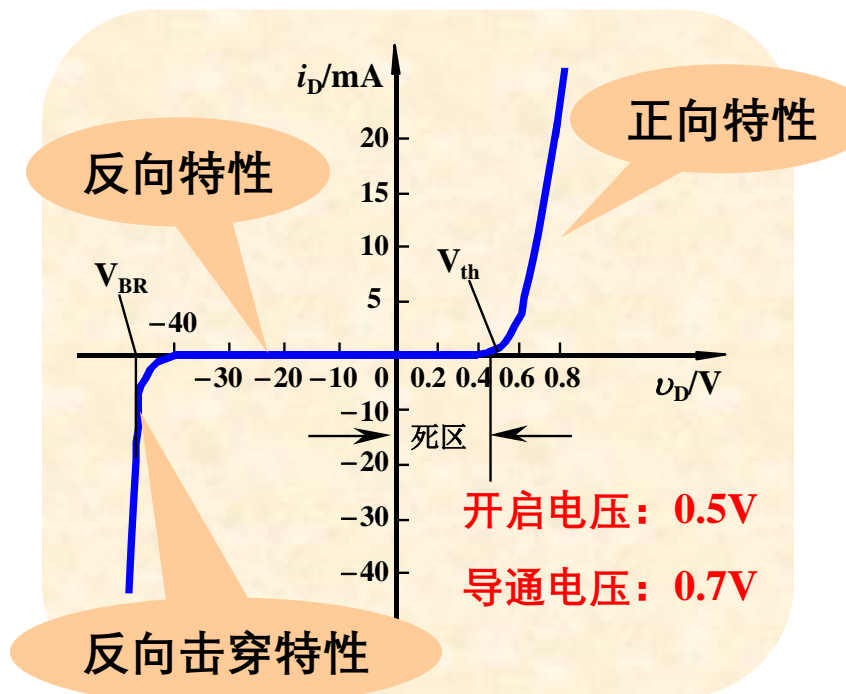
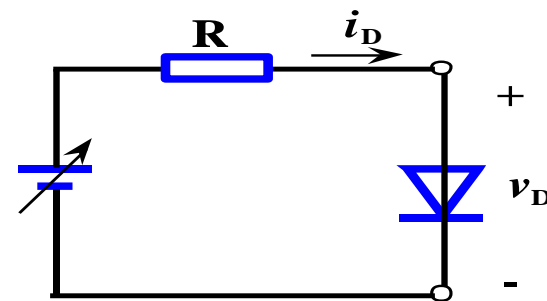
图1.2-2 二极管的常见结构

## 1.2.2 二极管的伏安特性

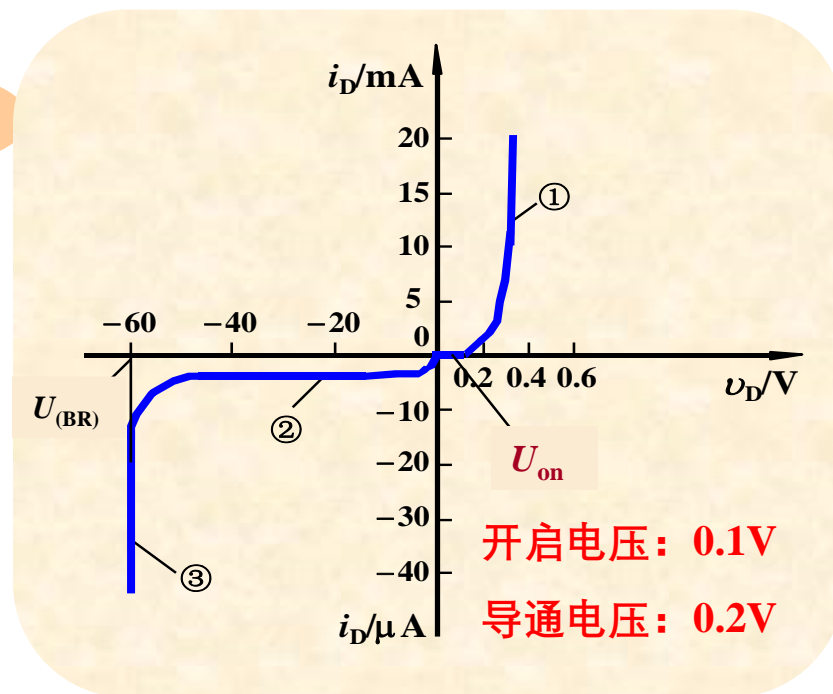
### 一、伏安特性

二极管的伏安特性曲线可用下式表示

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



硅二极管2CP10的伏安特性

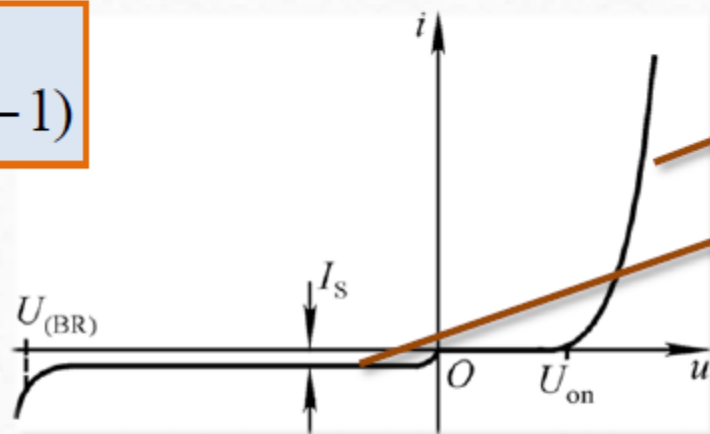


锗二极管2AP15的伏安特性

## 1.2.2 二极管的伏安特性

### ■ 单向导电性

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



正向特性为指数曲线

几乎是反向特性  
为横轴的平行线

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

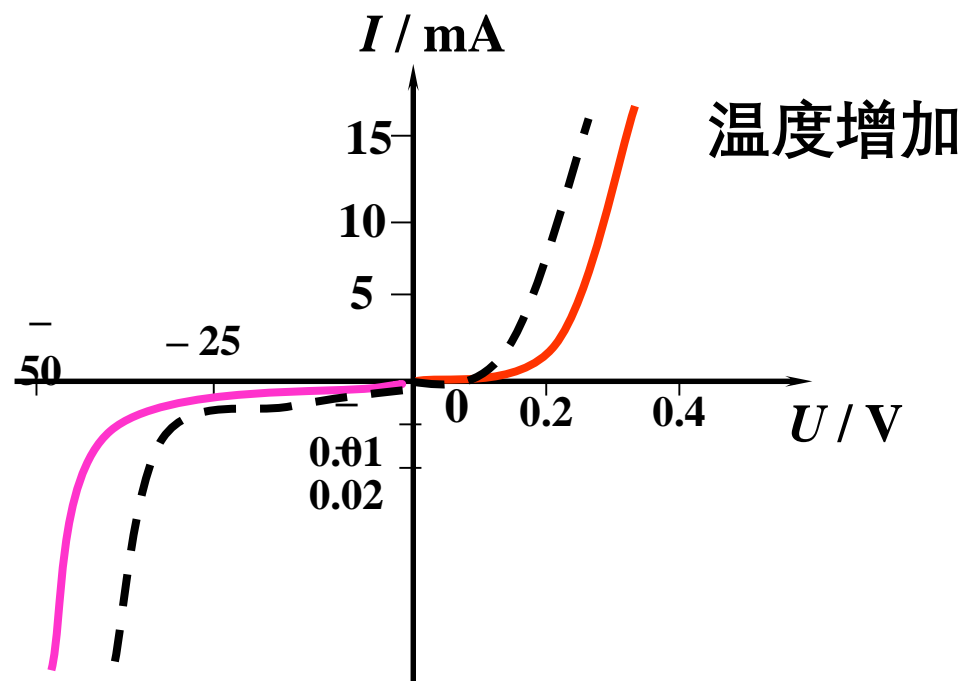
若反向电压  $|u| \gg U_T$ , 则  $i \approx -I_S$

## 1.2.2 二极管的伏安特性

### 二、温度对二极管伏安特性的影响

在环境温度升高时，二极管的正向特性将左移，反向特性将下移。

二极管的特性对温度很敏感。



## 1.2.3 二极管的主要参数

---

(1) 最大整流电流 $I_F$ ：最大平均值，限制二极管的结温升

(2) 反向工作峰值电压 $U_R$ ：最大瞬时值

(3) 反向峰值电流 $I_R$ ：即 $I_S$

(4) 最高工作频率 $f_M$

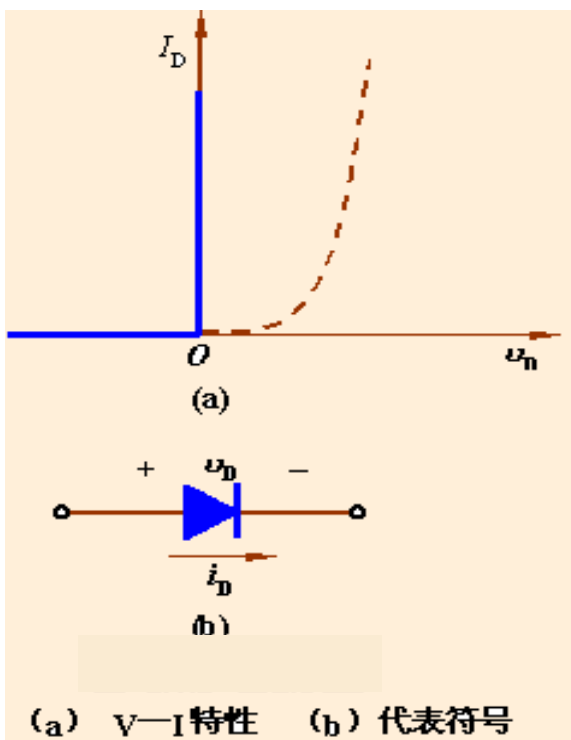
在实际应用中，应根据管子所用的场合，按其所承受的最高反向电压、最大正向平均电流、工作频率、环境温度等条件，选择满足要求的二极管。

二极管在电子电路中主要起**整流、限幅、开关**的作用。

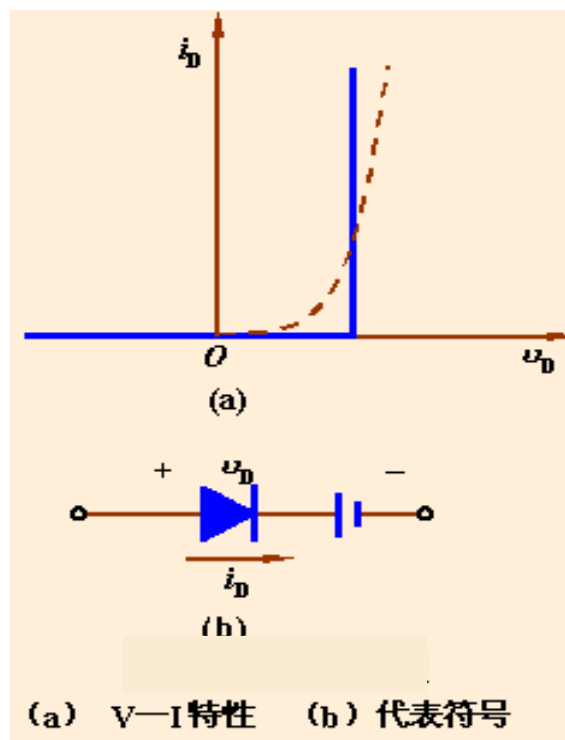
## 1.2.5 二极管的等效电路

### 一、由伏安特性折线化得到的等效电路

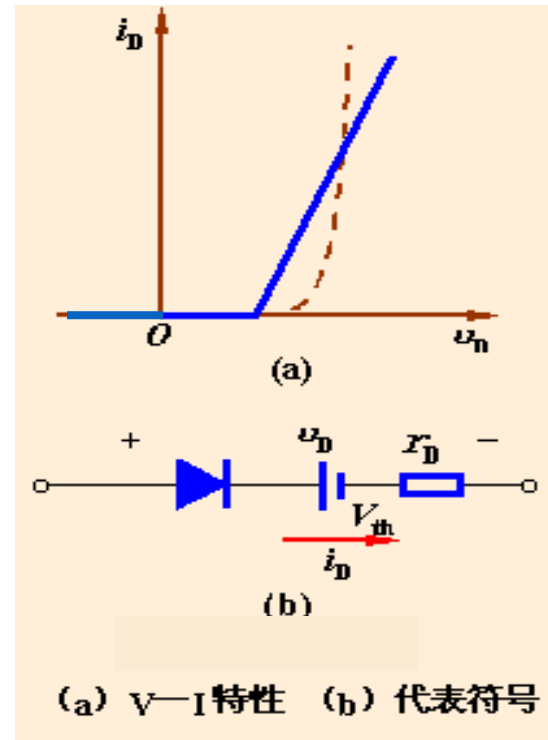
#### 1. 理想模型



#### 2. 恒压降模型



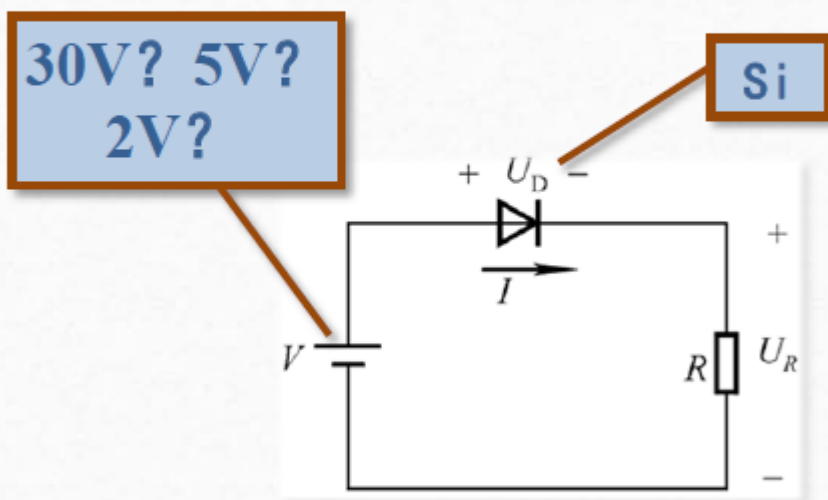
#### 3. 折线模型



## 1.2.5 二极管的等效电路



讨论:电源电压值不同时如何求解回路电流?



$$V = 30\text{V时 } I \approx \frac{V}{R}$$

$$V = 5\text{V时 } I = \frac{V - U_D}{R}$$

$V = 2\text{V}$ 时要实测伏安特性  
采用第三种模型求  $I$

应根据不同情况选择不同的等效电路，采用不同求解方法！



## 1.2.5 二极管的等效电路

### 二、二极管的微变等效电路

二极管工作在正向特性的某一小范围内时，其正向特性可以等效成一个微变电阻。

$$\text{即 } r_d = \frac{\Delta v_D}{\Delta i_D} \quad \text{根据 } i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$$

得Q点处的微变电导

$$g_d = \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q = \frac{I_S}{V_T} e^{v_D/V_T} \Big|_Q = \frac{I_D}{V_T}$$

$$\text{则 } r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{V_T}{I_D}$$

常温下 ( $T=300\text{K}$ )

$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D(\text{mA})}$$

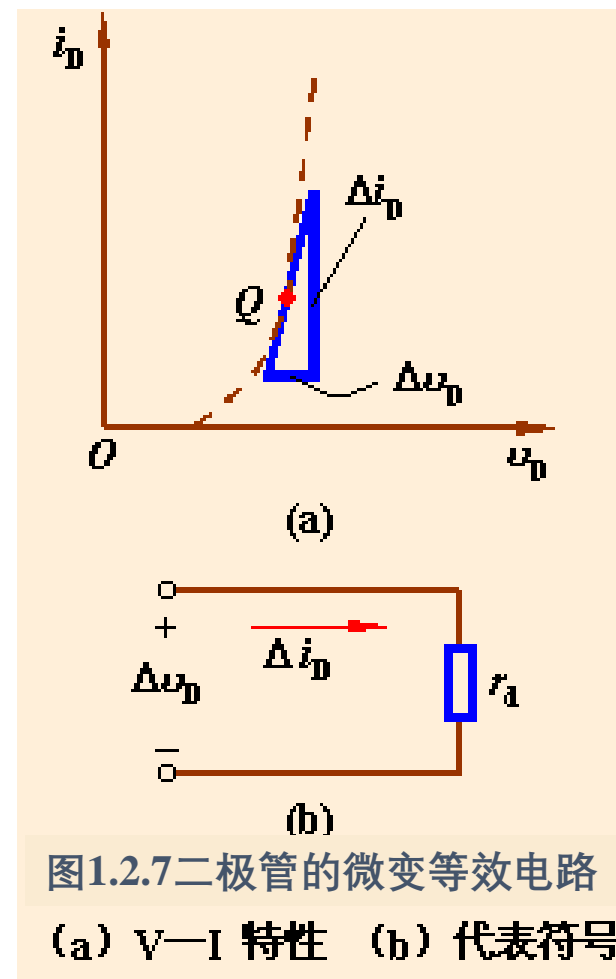


图1.2.7二极管的微变等效电路  
(a) V—I 特性 (b) 代表符号

## 1.2.5 二极管的等效电路

应用举例: 计算二极管电流和两端的电压

$$V_{DD}=10\text{V 时} \quad (R=10\text{k}\Omega)$$

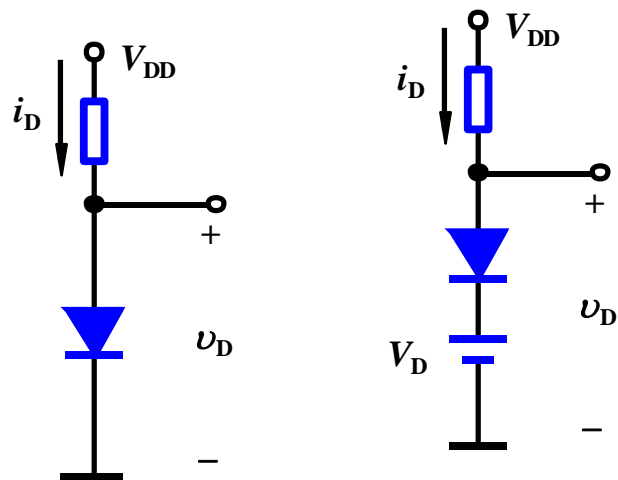
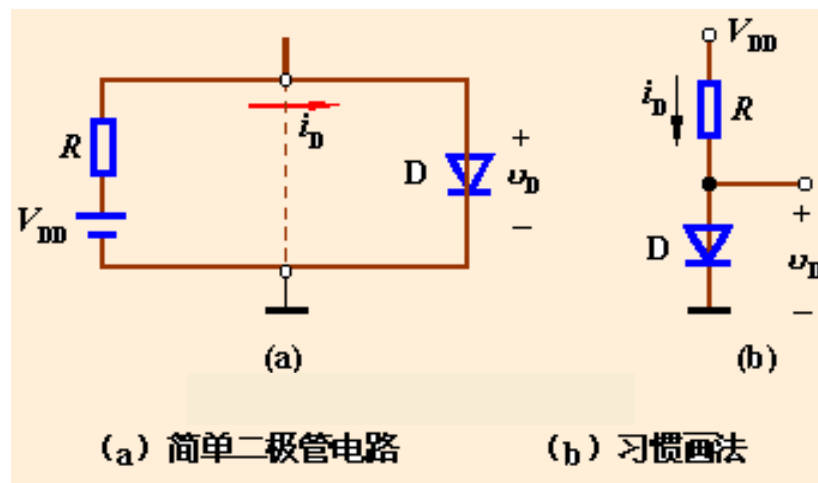
理想模型

$$V_D = 0\text{V} \quad I_D = V_{DD} / R = 1\text{mA}$$

恒压模型

$$V_D = 0.7\text{V} \quad (\text{硅二极管典型值})$$

$$I_D = (V_{DD} - V_D) / R = 0.93\text{mA}$$



## 1.2.5 二极管的等效电路

应用举例: 计算二极管电流和两端的电压

$V_{DD}=10\text{V}$  时      ( $R=10\text{k}\Omega$ )

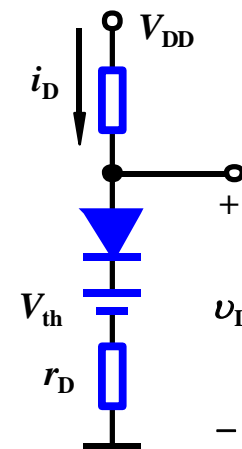
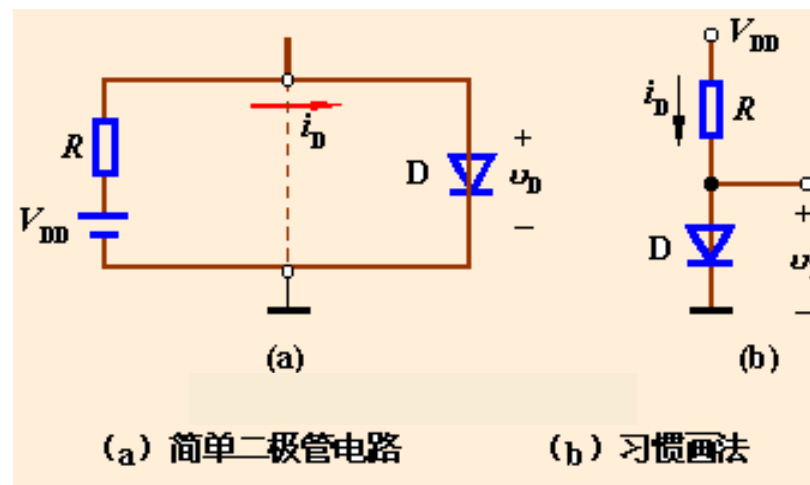
折线模型

$V_{th} = 0.5\text{ V}$  (硅二极管典型值)

设  $r_D = 0.2\text{ k}\Omega$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{th}}{R + r_D} = 0.931\text{mA}$$

$$V_D = V_{th} + I_D r_D = 0.69\text{ V}$$



## 1.2.5 二极管的等效电路

应用举例: 计算二极管电流和两端的电压

$V_{DD}=10\text{V}$  时      ( $R=10\text{k}\Omega$ )

理想模型

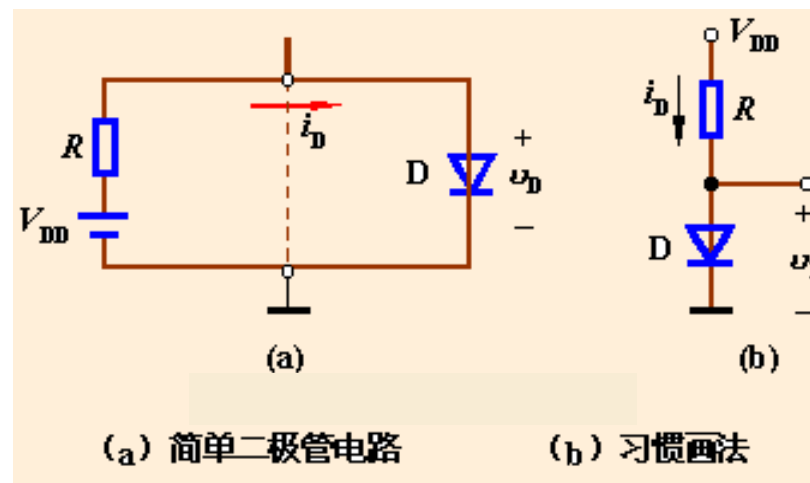
$$V_D = 0\text{V} \quad I_D = V_{DD} / R = 1\text{mA}$$

恒压模型

$$V_D = 0.7\text{V} \text{ (硅二极管典型值)} \quad I_D = (V_{DD} - V_D) / R = 0.93\text{mA}$$

折线模型

$$V_D = V_{th} + I_D r_D = 0.69\text{V} \quad I_D = \frac{V_{DD} - V_{th}}{R + r_D} = 0.931\text{mA}$$



## 1.3 二极管的基本应用电路

---

1.3.1 二极管整流电路

1.3.2 桥式整流电路

1.3.3 倍压整流电路

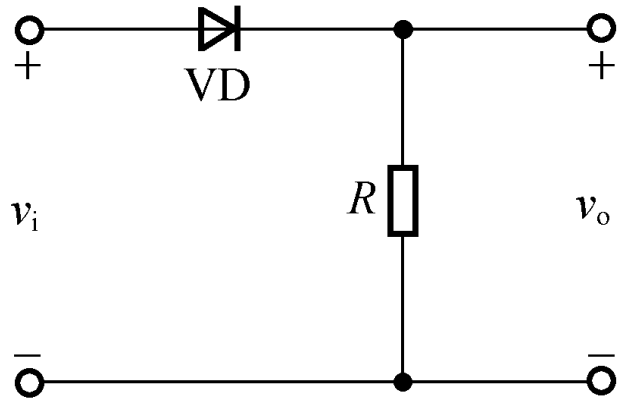
1.3.4 限幅电路

1.3.5 与门电路

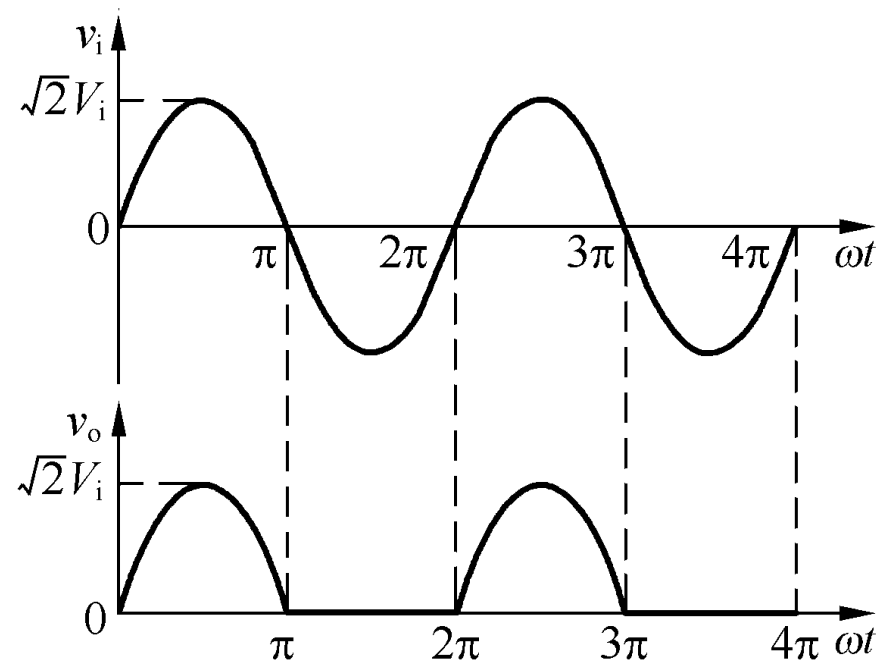
---

## 1.3.1 二极管整流电路

利用二极管的单向导电性可以将交流信号变换成单向脉动的信号，这个过程称为整流。



(a)



(b)

图1.3-1二极管整流电路及波形图

## 1.3.2 桥式整流电路

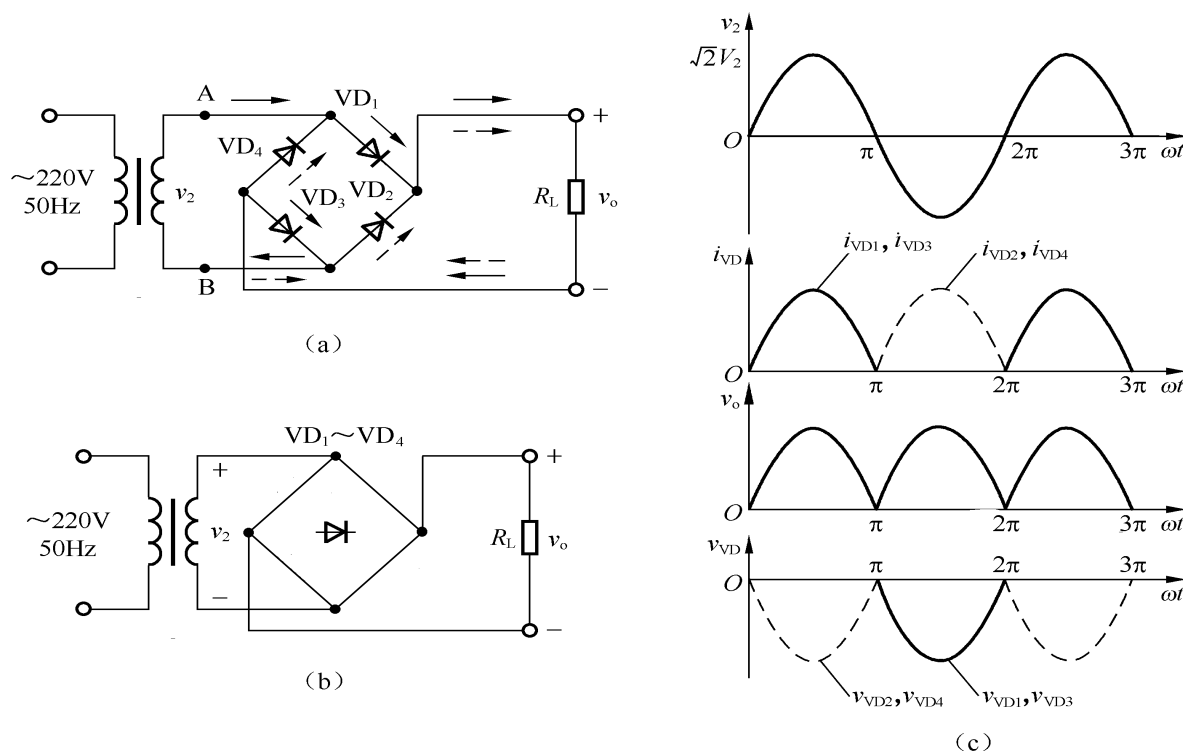


图1.3-2桥式整流电路及波形

设输入信号  $v_i = \sqrt{2}V_i \sin \omega t$ ，根据高等数学求平均值的方法，可得桥式整流电路输出电压的平均值为：

$$V_{o(AV)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}V_i \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_i \approx 0.9V_i$$

$$I_{o(AV)} = \frac{V_{o(AV)}}{R} = \frac{0.9V_i}{R}$$

根据输出电压脉动系数  $S$  的定义：整流输出电压的基波峰值电压  $V_{OM}$  与输出电压的平均值  $V_{o(AV)}$  的比可得

$$S = \frac{V_{OM}}{V_{o(AV)}} = \frac{\frac{2}{3} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_i}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_i} = \frac{2}{3} \approx 0.67$$

## 1.3.2 桥式整流电路

---

基波峰值电压  $V_{OM}$  实际上 就是傅里叶级数基波信号的系数, 因为桥式整流输出基波信号的频率是输入信号的 2 倍, 即周期为  $\pi$ , 且该函数为偶函数, 根据傅里叶级数系数的计算公式可得

$$V_{OM} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{2} V_i \cos \omega t \cos(2\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{3} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_i$$



### 1.3.3 倍压整流电路

利用电容器存储电能的作用，由多个二极管和电容器可以获得几倍于输入电压的输出电压，这种电路称为倍压整流电路，如图1.3-3所示。

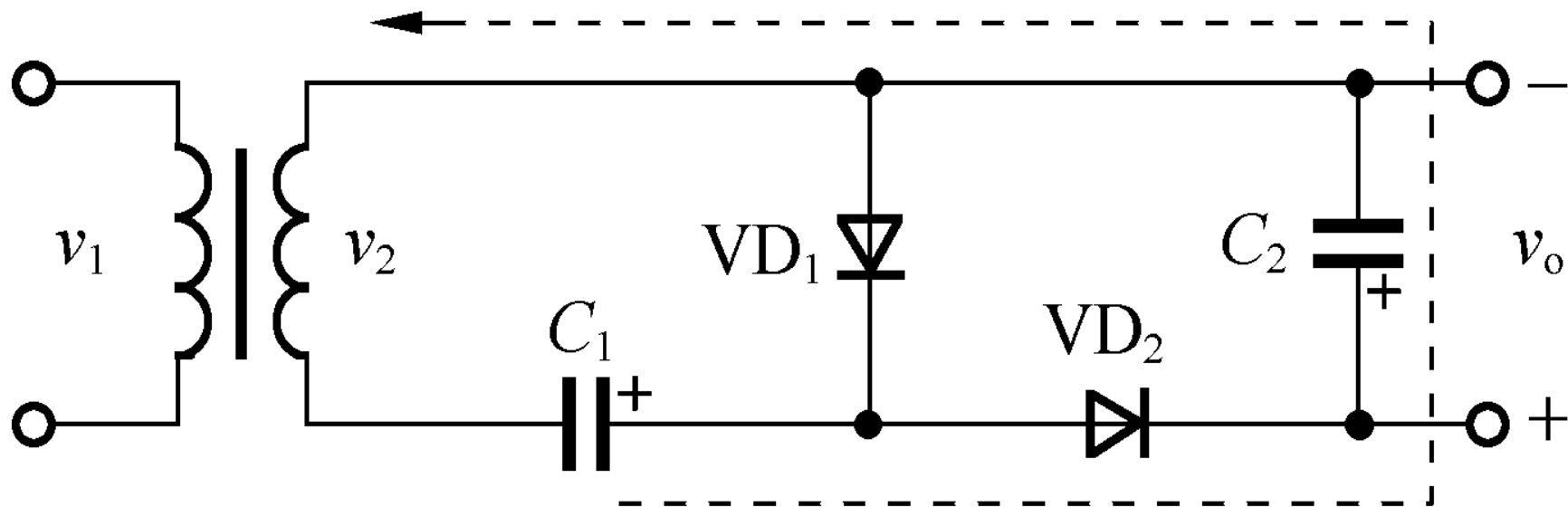


图1.3-3倍压整流电路

## 1.3.3 倍压整流电路

同理还可组成三倍压、四倍压的整流电路。

在图1.3-4所示的电路中，若输出信号是 $C_1$ 和 $C_3$ 两端电压的和，则输出电压为输入电压的三倍压，组成三倍压整流电路；若输出信号是 $C_2$ 和 $C_4$ 两端电压的和，则输出电压为输入电压的四倍压，组成四倍压整流电路。

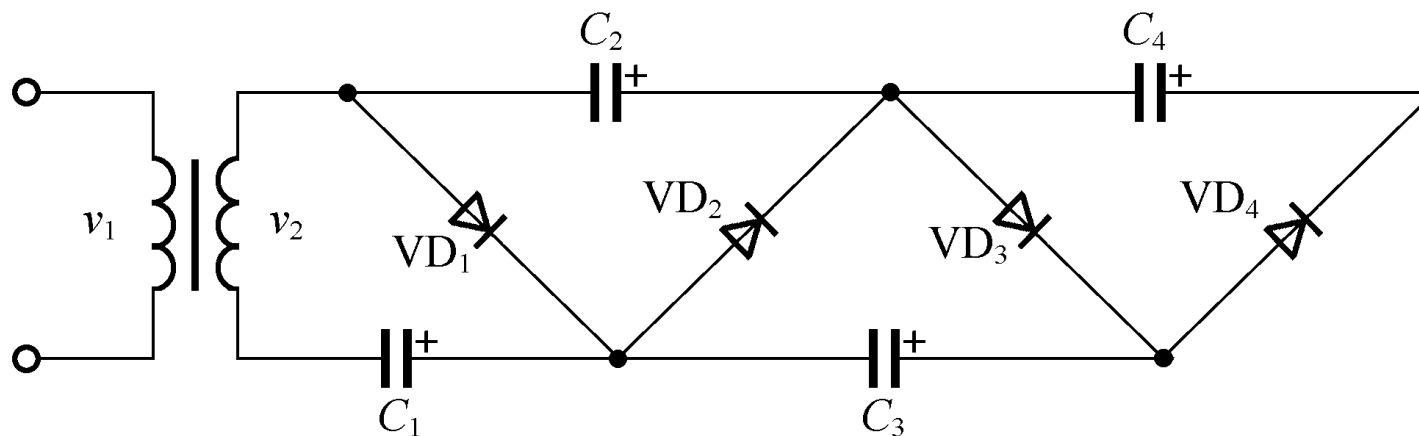


图1.3-4三倍压、四倍压整流电路

## 1.3.4 限幅电路

在电子电路中，为了保护电路不会因电压过高而损坏，需要对输入电压进行限制，利用二极管限幅电路就可实现该目的。

二极管限幅电路及波形如图1.3-5所示。

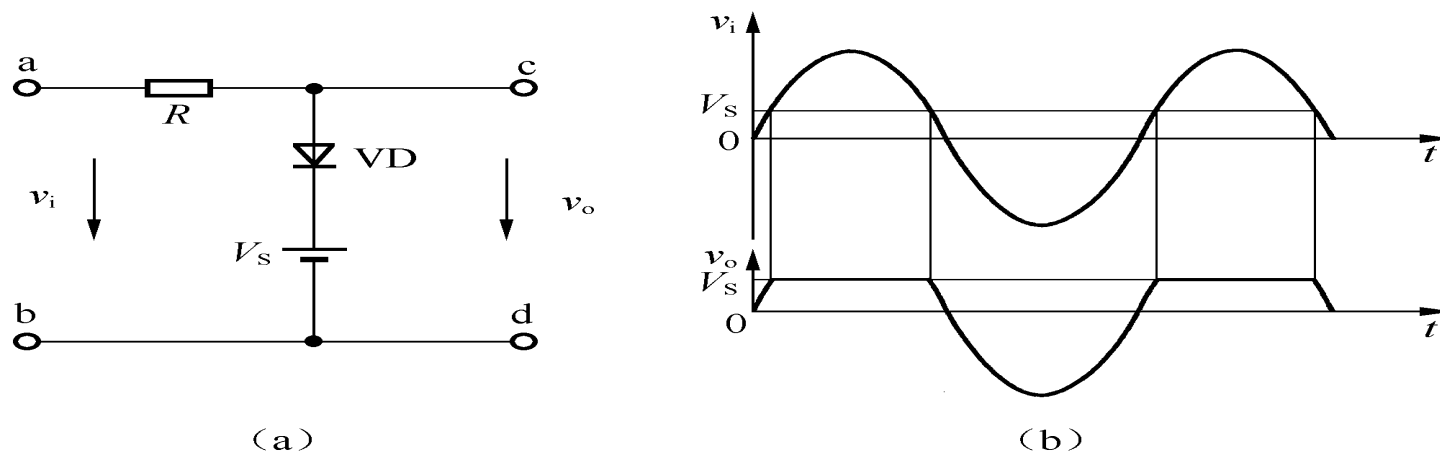


图1.3-5限幅电路及波形

## 1.3.5 与门电路

利用二极管通、断的开关特性，可以组成实现与逻辑函数关系的电路，该电路称为与门电路。二极管与门电路如图1.3-6所示。

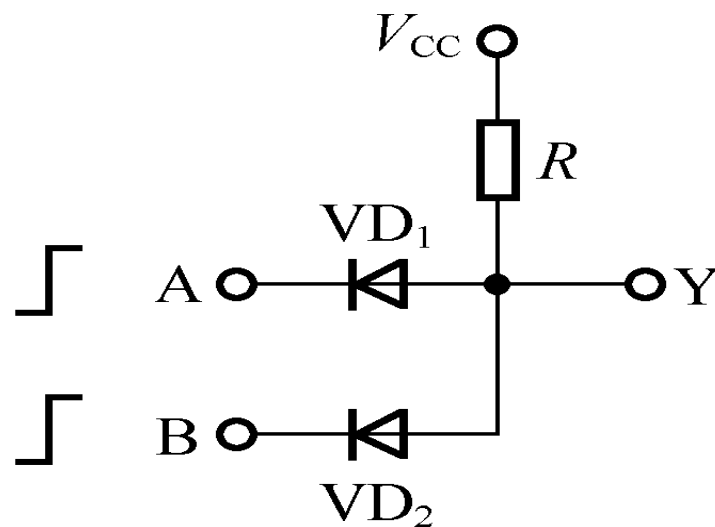
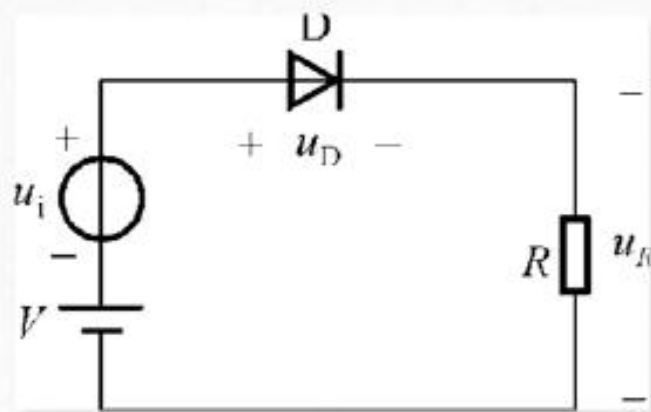
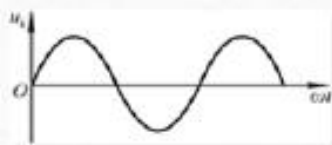
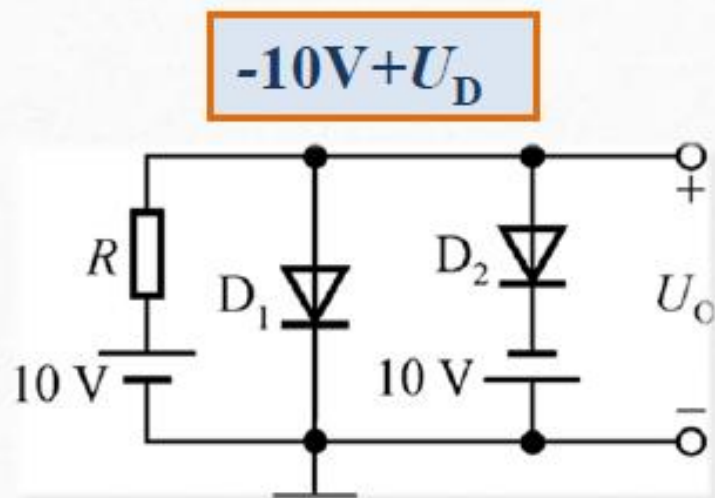


图1.3-6与门电路

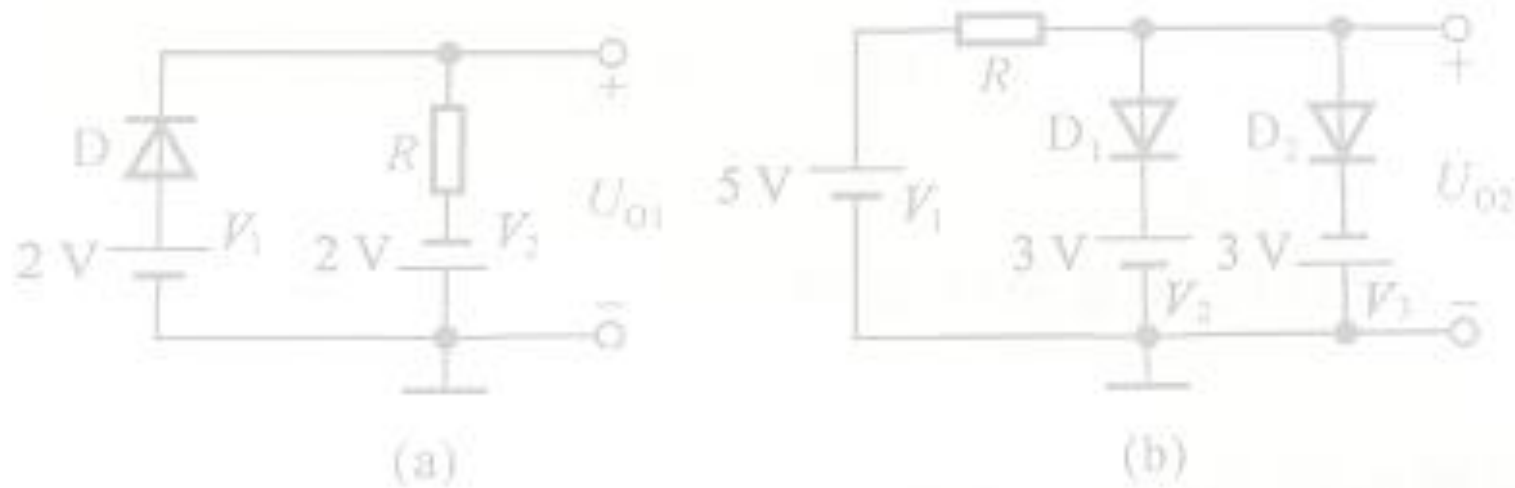


## 讨论:对于二极管应用电路应解决两个问题

- 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?



两电路如下图所示，二极管导通时 $U_D=0.7V$ ，分别求解各电路的输出电压。



## 1.4 稳压管

稳压管与二极管的外形相似，稳压管的特性曲线如图1.4-1(a)所示，常用的图符如图1.4-1(b)所示，稳压管工作于反向击穿状态，击穿电压从几伏到几十伏，反向电流也比一般的二极管大。**能在反向击穿状态下正常工作而不损坏**，是稳压管工作的特点。稳压管在电路中用VDZ来表示。

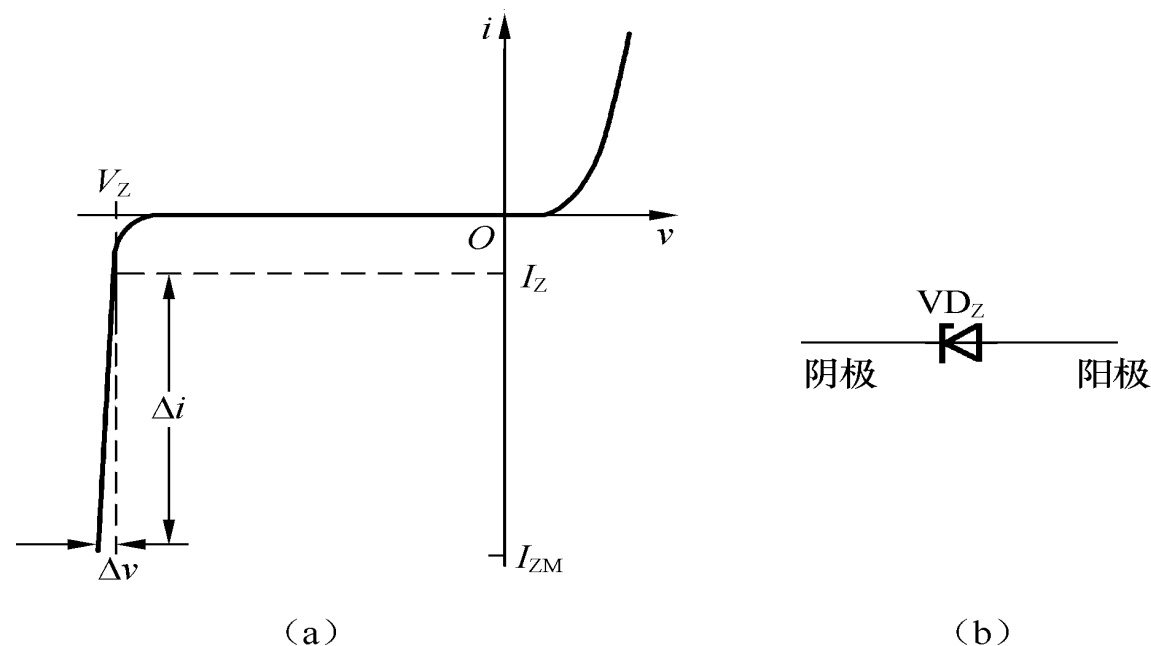


图1.4-1稳压管的特性曲线和符号

## 1.4 稳压管

---

稳压管的主要参数包括：

1. 稳定电压 $V_Z$

正常工作时二极管两端的电压，也是并联负载两端电压

2. 稳定电流 $I_Z$ （ $I_{Zmin}$ ）

3. 额定功耗 $P_{ZM}$

4. 动态电阻 $r_d$

5. 温度系数 $\alpha$ ：温度每变化 $1^\circ\text{C}$ 时，稳压管稳压值的变化量

---



## 1.4 稳压管

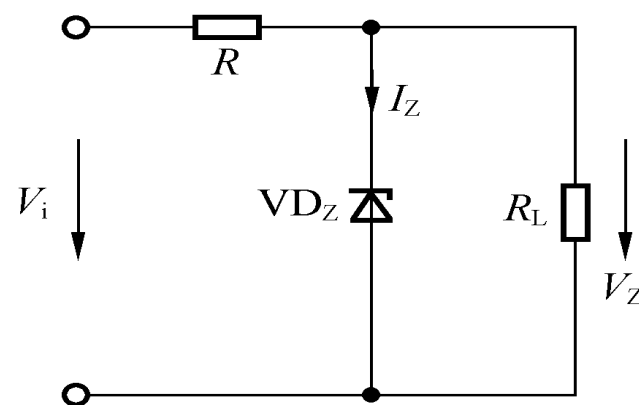
如图所示电路,  $V_i = 10\text{V}$  , 波动的幅度为  $\pm 10\%$  ,  $V_Z = 6\text{V}$  ,  $I_{Z\min} = 5\text{mA}$  ,  $I_{ZM} = 30\text{mA}$  ,  $R_L$  的变化范围是  $600\Omega \sim \infty$  , 求限流电阻  $R$  的取值范围。

**分析:** 由于稳压管的反向电流在小于  $I_{Z\min}$  时不稳压, 大于  $I_{Z\max}$  时会因超过额定功率而损坏, 所以在稳压管电路中必须串联一个电阻来限制电流。

计算限流电阻  $R$  时应考虑:

当输入电压最小, 负载电流最大, 稳压管的工作电流应比  $I_{Z\min}$  大

当输入电压最大, 负载电流最小, 稳压管的工作电流应比  $I_{Z\max}$  小

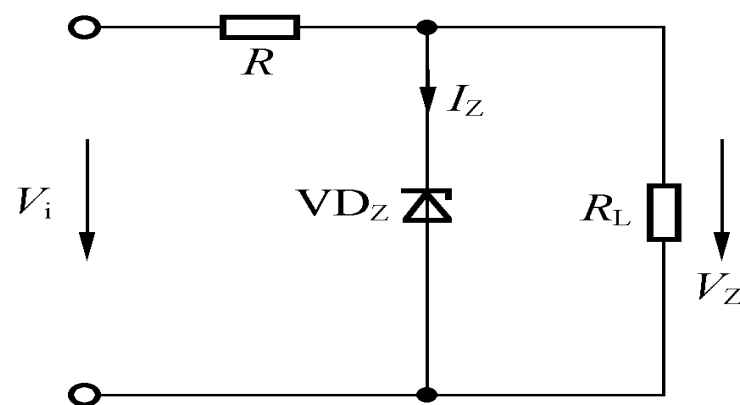


## 1.4 稳压管

如图所示电路,  $V_i = 10\text{V}$ , 波动的幅度为  $\pm 10\%$ ,  $V_Z = 6\text{V}$ ,  $I_{Z\min} = 5\text{mA}$ ,  $I_{ZM} = 30\text{mA}$ ,  $R_L$  的变化范围是  $600\Omega \sim \infty$ , 求限流电阻  $R$  的取值范围。

**解** 因为输入电压变化的幅度是  $\pm 10\%$ , 所以输入电压的最大值为  $11\text{V}$ , 最小值为  $9\text{V}$ , 该电路带负载两个极限的情况是, 输入电压最小时, 带最大的负载  $600\Omega$ , 负载电流最大  $I_{L\max}$  为  $10\text{mA}$ , 此时稳压管应工作在最小击穿电流  $I_{Z\min}$  的状态下, 限流电阻的值为

$$R_1 = \frac{V_{i\min} - V_Z}{I_{Z\min} + I_{L\max}} = \frac{(9 - 6)\text{V}}{(5 + 10)\text{mA}} = 200\Omega$$



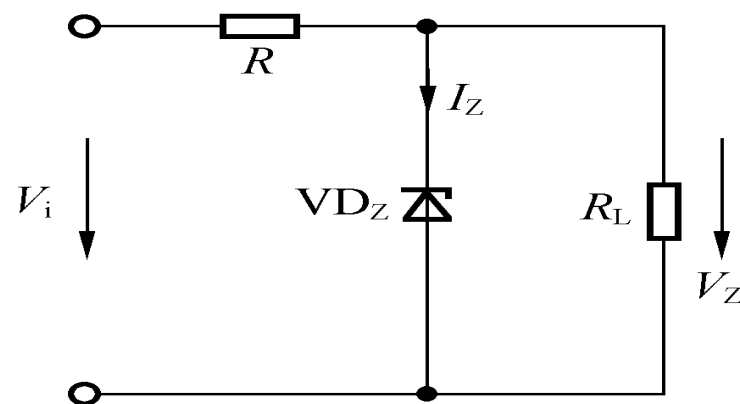
## 1.4 稳压管

如图所示电路,  $V_i = 10V$  ,波动的幅度为  $\pm 10\%$  ,  $V_Z = 6V$  ,  $I_{Zmin} = 5mA$  ,  $I_{ZM} = 30mA$  ,  $R_L$  的变化范围是  $600\Omega \sim \infty$  , 求限流电阻  $R$  的取值范围。

输入电压最大时, 带最小的负载  $R = \infty$  , 此时稳压管应工作在最大击穿  $I_{ZM}$  的状态下, 限流电阻的值为

$$R_2 = \frac{V_{i\max} - V_Z}{I_{ZM}} = \frac{(11 - 6)V}{30mA} = 167\Omega$$

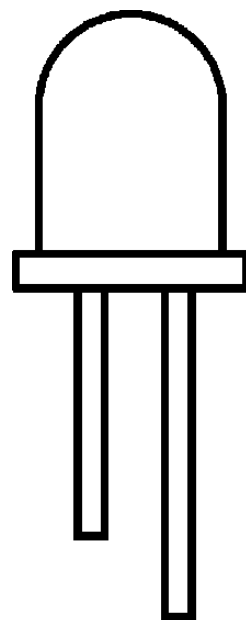
根据  $R_1 \geq R \geq R_2$  的关系, 取  $R = 180\Omega$ 。



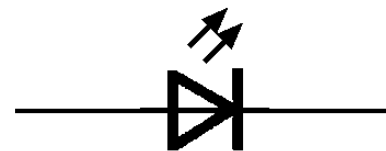
## 1.5 其他类型的二极管

### 一、发光二极管

发光二极管包括可见光、不可见光、激光等不同的类型，这些二极管除了具有PN结的单向导电性外，还可以将电能转换成光能输出。



(a)



(b)

图1.5-1发光二极管和符号

# 1.5 其他类型的二极管

## 二、光电二极管

光电二极管是一种远红外线接收管，它可将所接收到的光能转换成电能。PN结型光电二极管充分利用PN结的光敏特性，将接收到光能的变化转换成电流的变化。

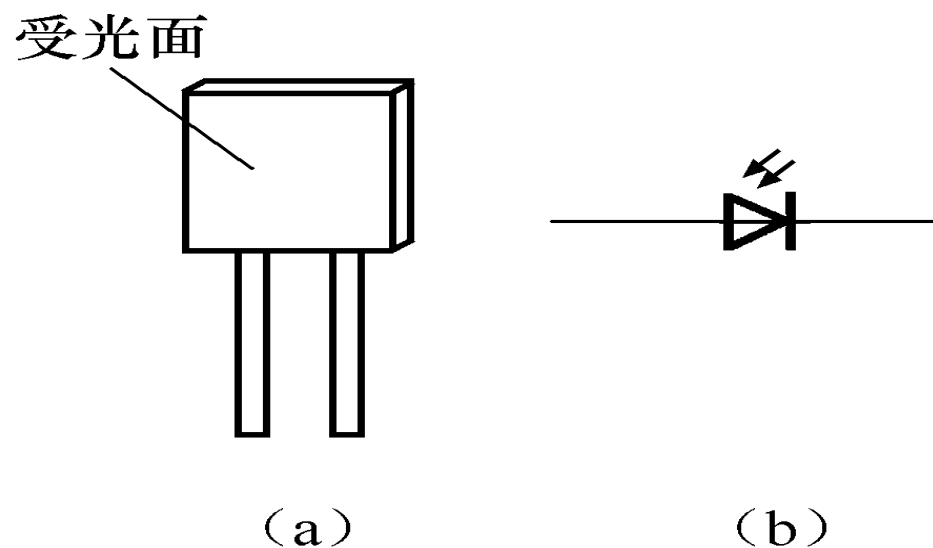


图1.5-2光电二极管