

# 第6章 二极管

二极管基础

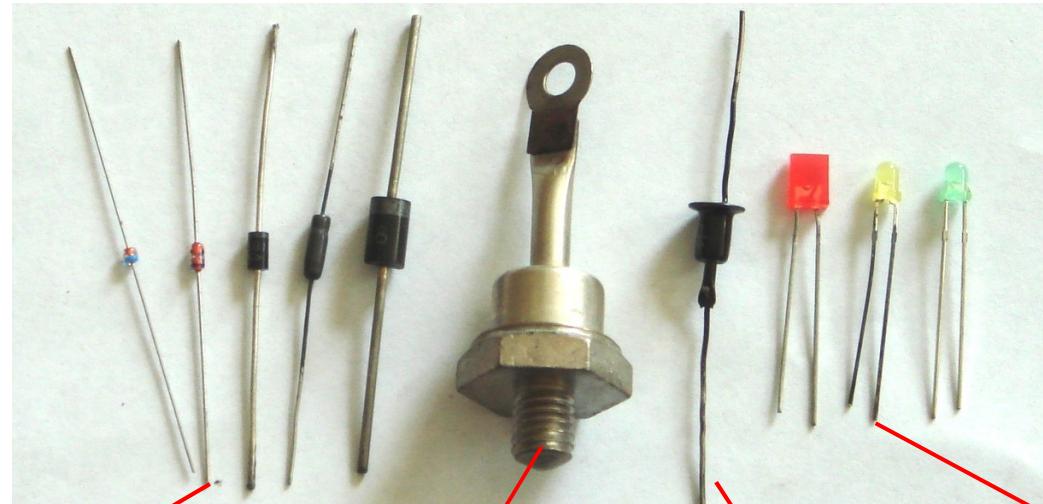
二极管应用电路

## 6.1 二极管基础

### 6.1.1 二极管的结构及其伏安特性

#### 一、二极管的结构

将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管。

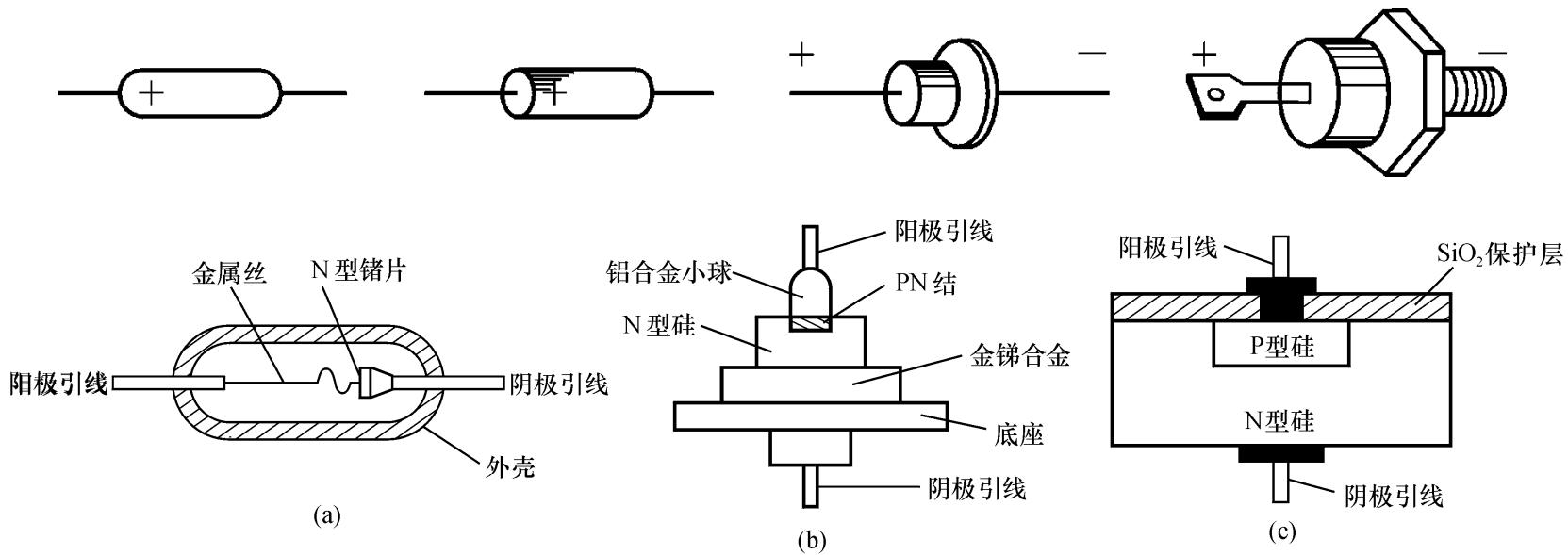


小功率  
二极管

大功率  
二极管

稳压  
二极管

发光  
二极管



**点接触型:** 结面积小，结电容小，允许通过的电流小，最高工作频率高。

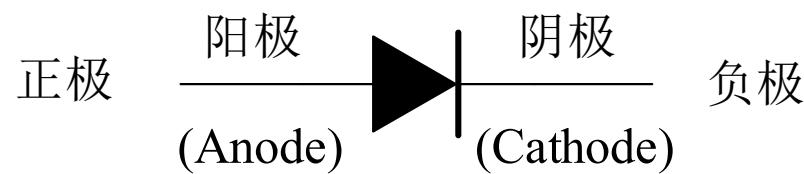
**面接触型:** 结面积大，结电容大，允许通过的电流大，最高工作频率低。

**平面型:** 结面积可小、可大，小的工作频率高，大的允许通过的电流大。

## 二极管电路符号



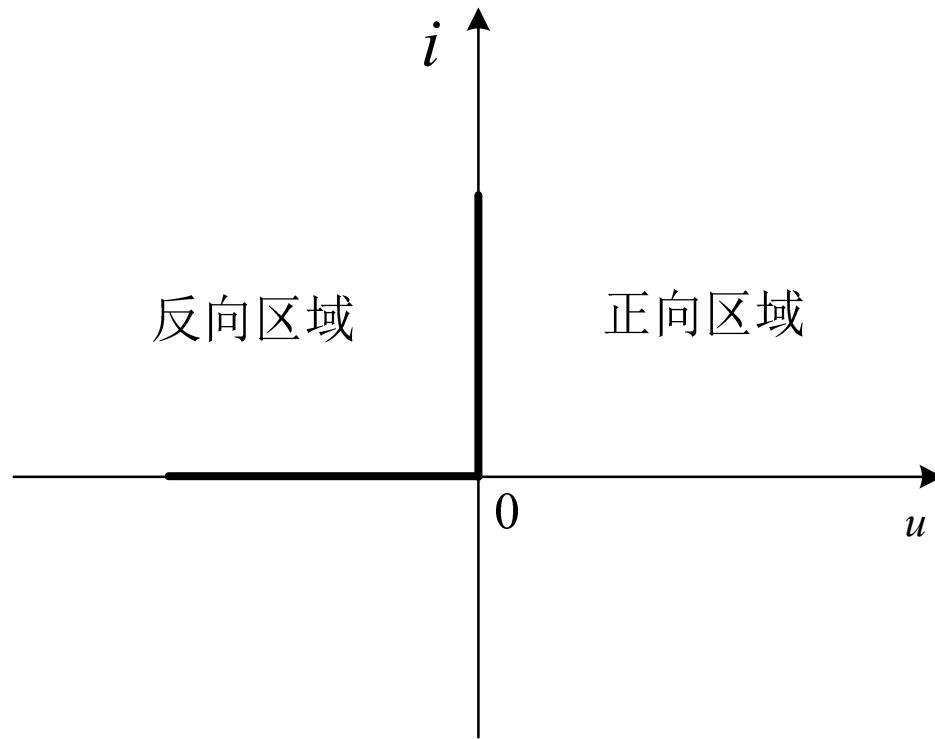
普通二极管 稳压二极管 变容二极管 发光二极管 光电二极管



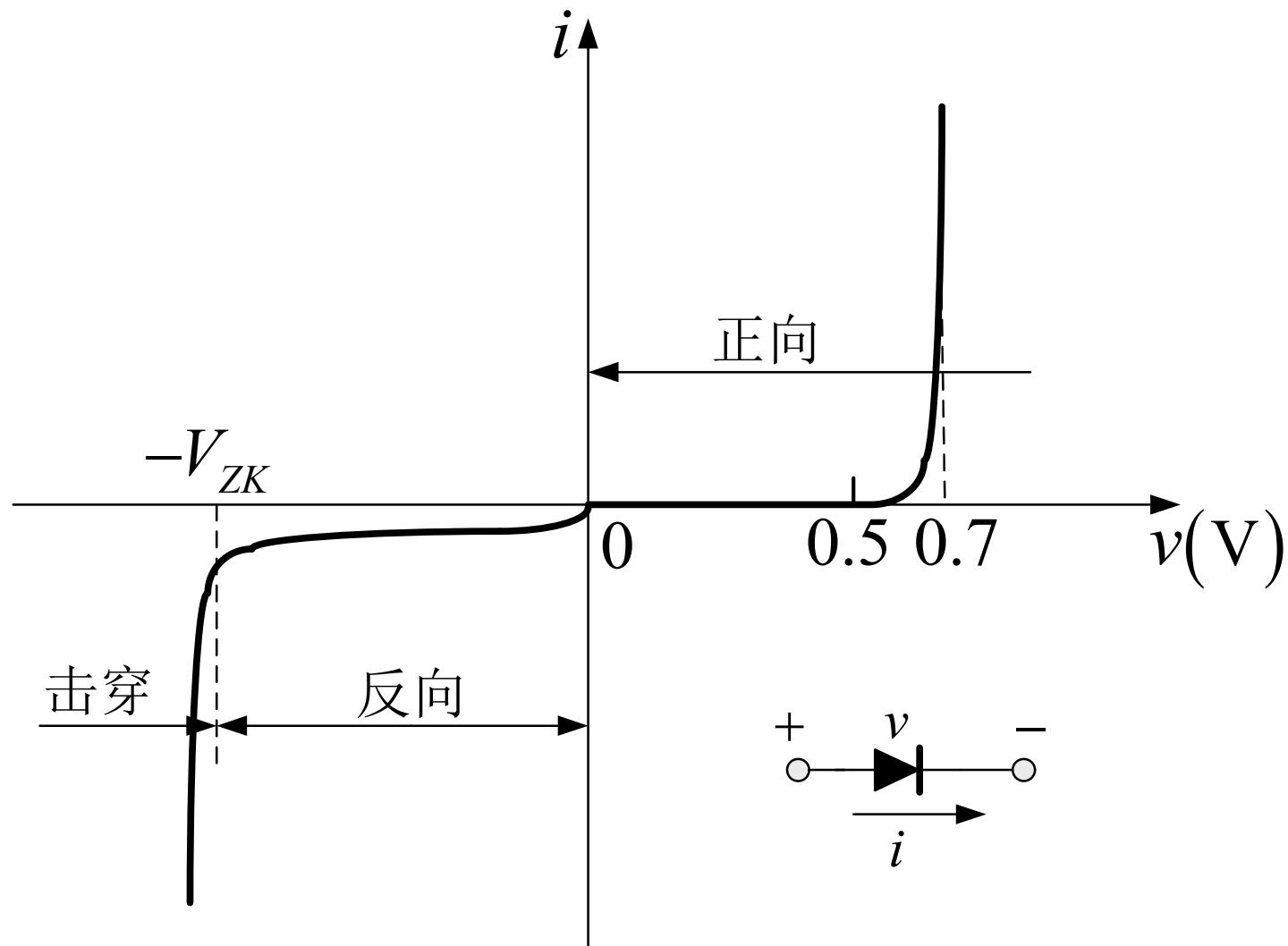
## 二、二极管伏安特性

### 理想二极管

理想二极管的性能就像一个单向的开关，正向导通无压降，反向截止无漏电。



## 实际二极管



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

$$V_T = kT/q$$

热电压:

室温下,  $V_T \approx 25 \text{ mV}$

集成二极管:  $n=1$

分立二极管:  $n=2$

击穿电压

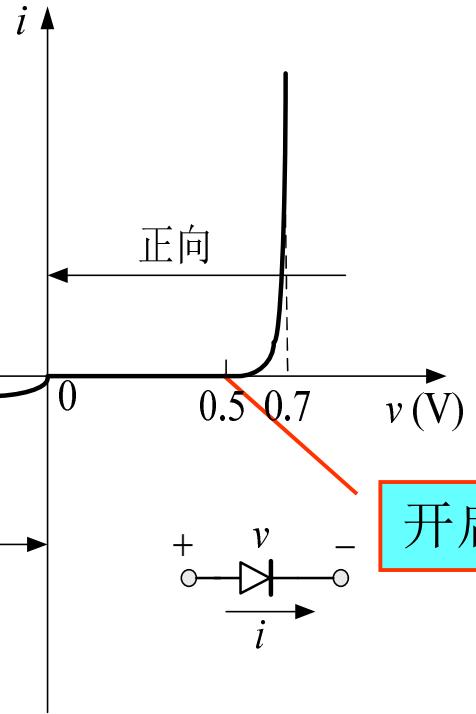
反向饱和电流

正向

击穿

反向

开启电压



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

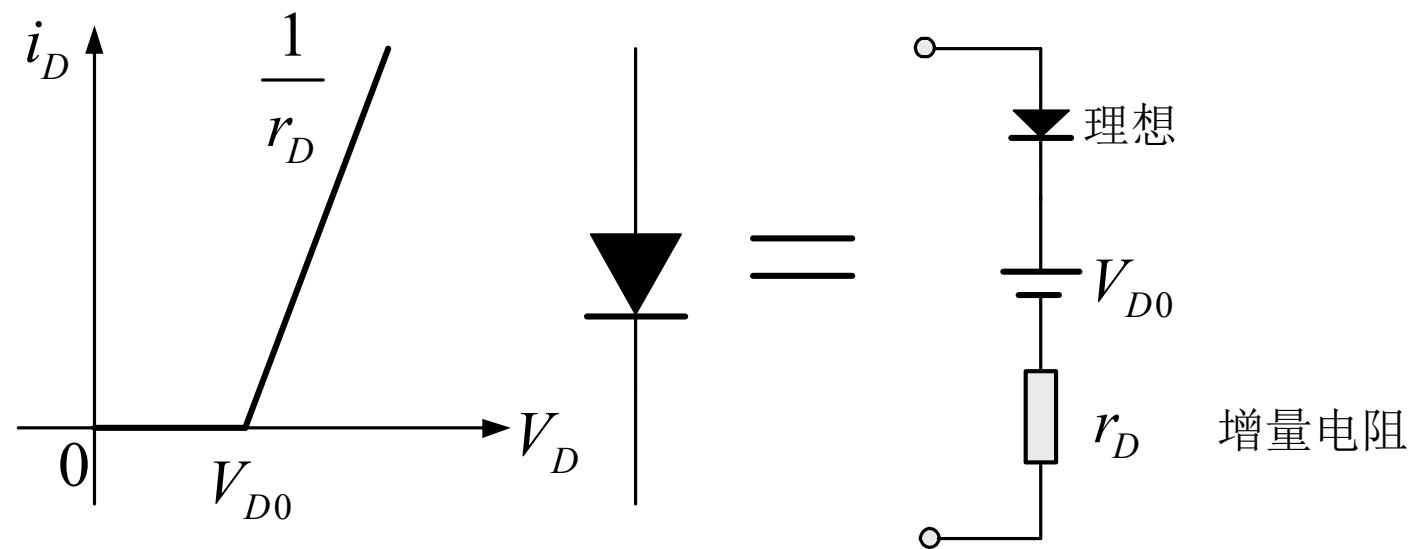
### 三、二极管的主要参数

- 最大整流电流  $I_F$ : 最大平均值
- 最大反向工作电压  $V_R$ : 最大瞬时值（反向击穿电压值的一半或三分之二）
- 反向饱和电流  $I_S$
- 最高工作频率  $f_M$ : 因PN结有电容效应

## 6.1.2 二极管等效电路模型

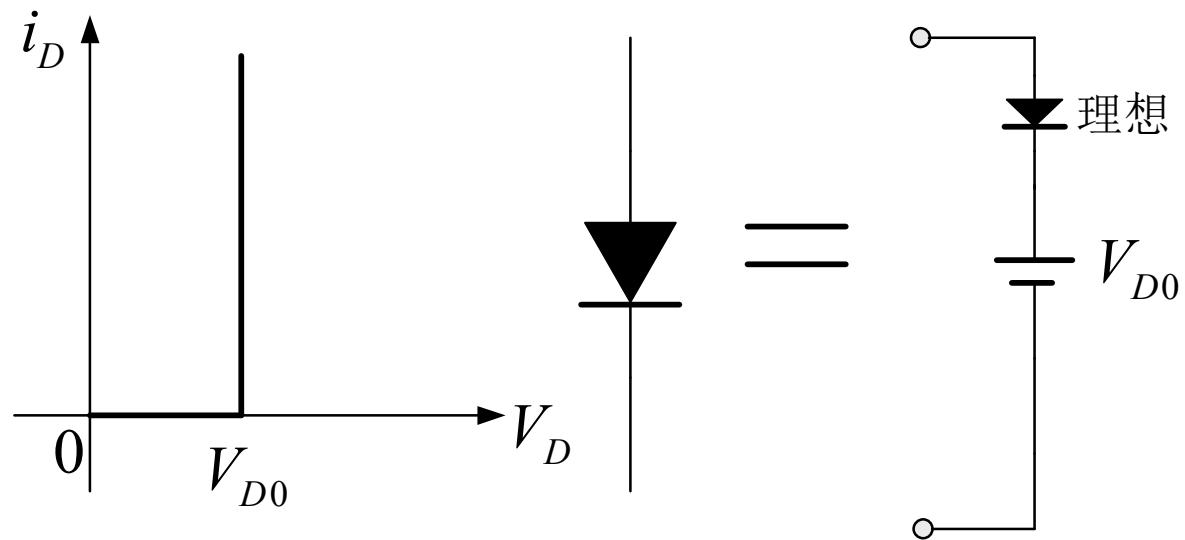
### 一、简化二极管模型

把一个普通的二极管等效为一个**理想二极管**、一个电压源和一个等效电阻的串联。



## 二、恒压降模型

把一个二极管等效成一个理想二极管和一个电压源的串联。

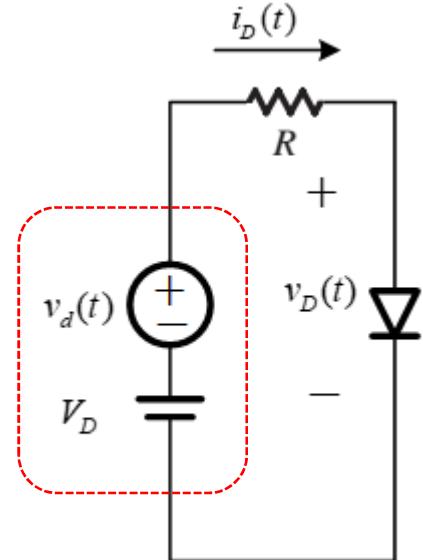


### 三、小信号模型

采用叠加原理分析二极管电路。

$$v_D = V_D + v_d(t)$$

$$i_D(t) = I_S e^{(V_D + v_d)/nV_T} = I_S \cdot e^{V_D/nV_T} \cdot e^{v_d/nV_T} = I_D \cdot e^{v_d/nV_T}$$

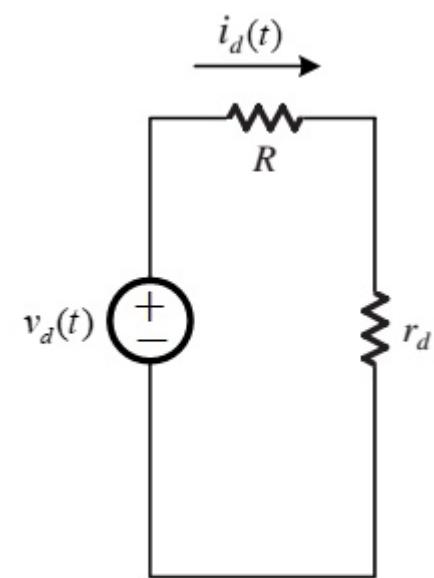
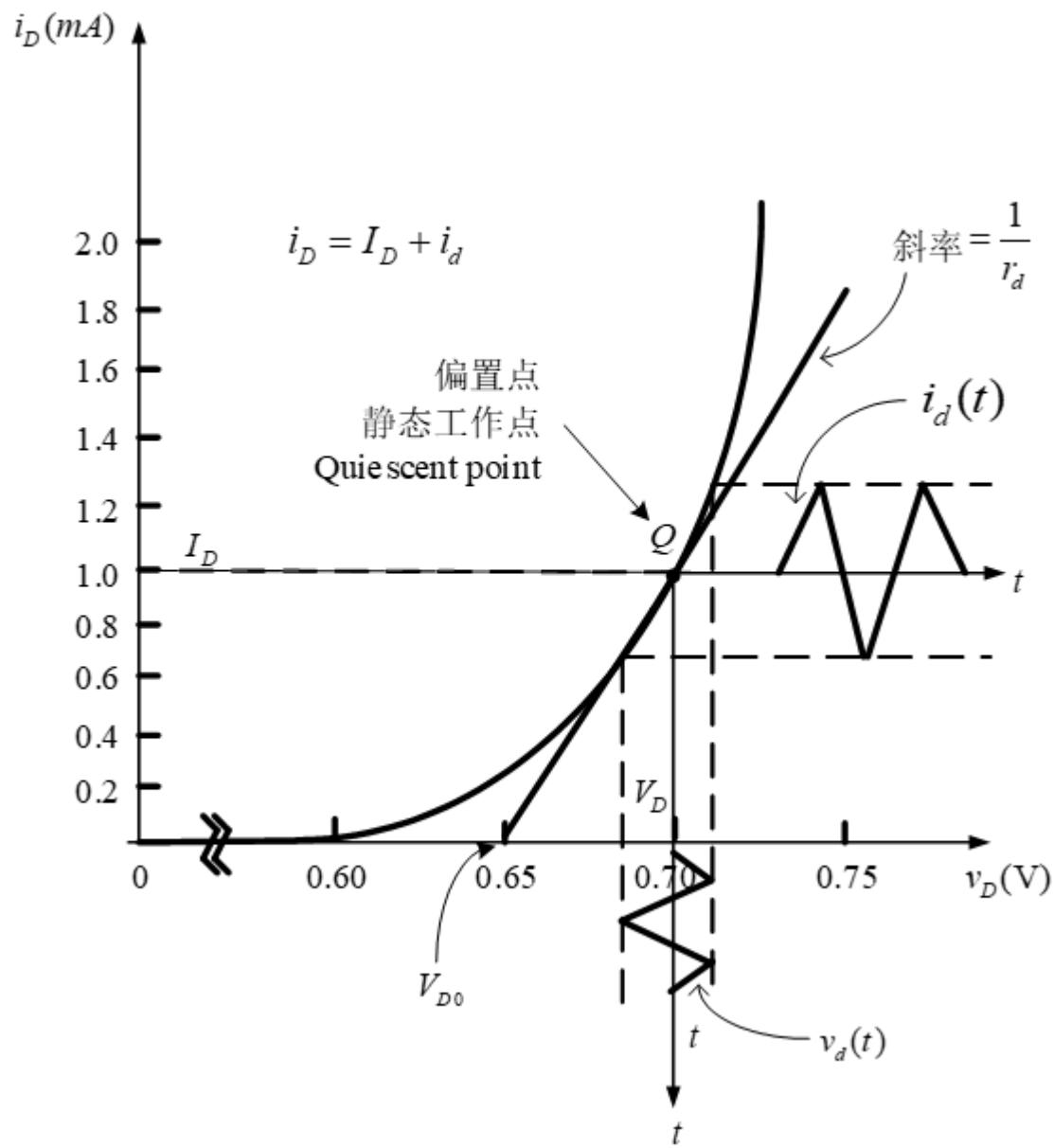


若  $\frac{v_d}{nV_T} \ll 1$

$$i_D(t) \approx I_D \left( 1 + \frac{v_d}{nV_T} \right) = I_D + \frac{I_D}{nV_T} \cdot v_d = I_D + i_d$$

$$i_d = \frac{I_D}{nV_T} v_d = \frac{v_d}{r_d}$$

$$r_d = \frac{v_d}{i_d} = \frac{nV_T}{I_D}$$
 增量电阻



小信号等效电路

## 6.1.3 齐纳二极管及其应用

### 一、工作原理

当击穿电压小于 5 V 时，通常是齐纳效应；

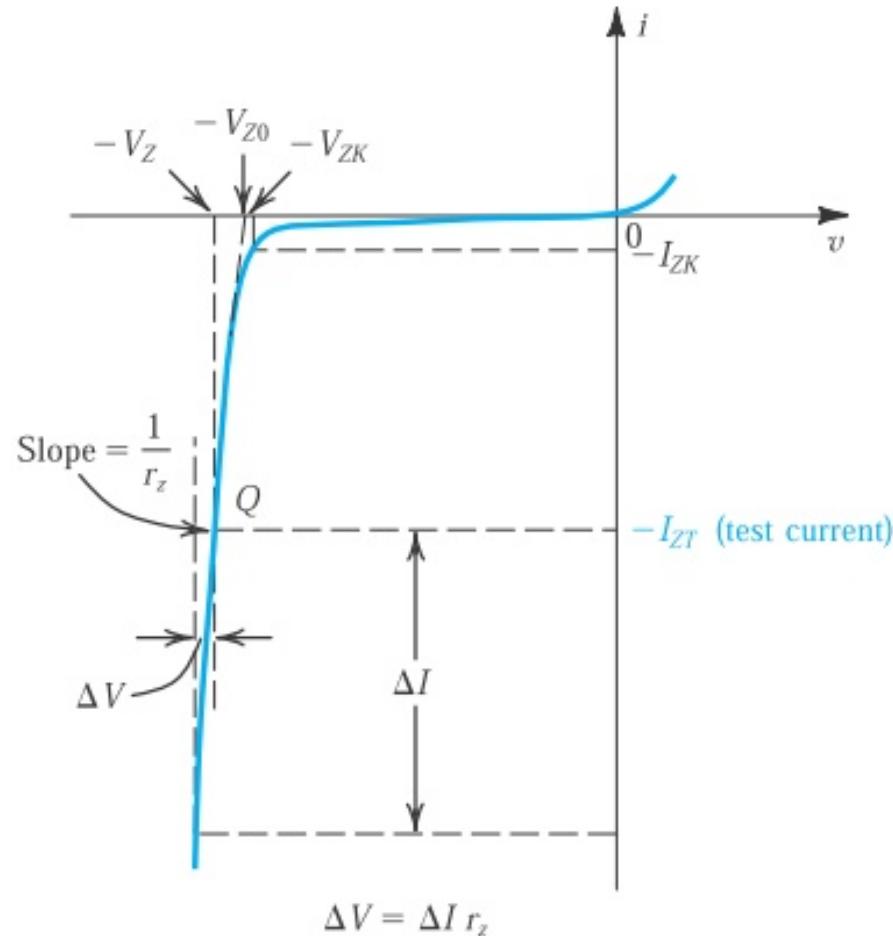
当击穿电压大于 7 V 时，通常是雪崩效应。

当击穿电压在 5~7 V 时，则两种情况兼而有之。



电路符号

## 二、伏安特性



### 三、齐纳二极管的主要参数

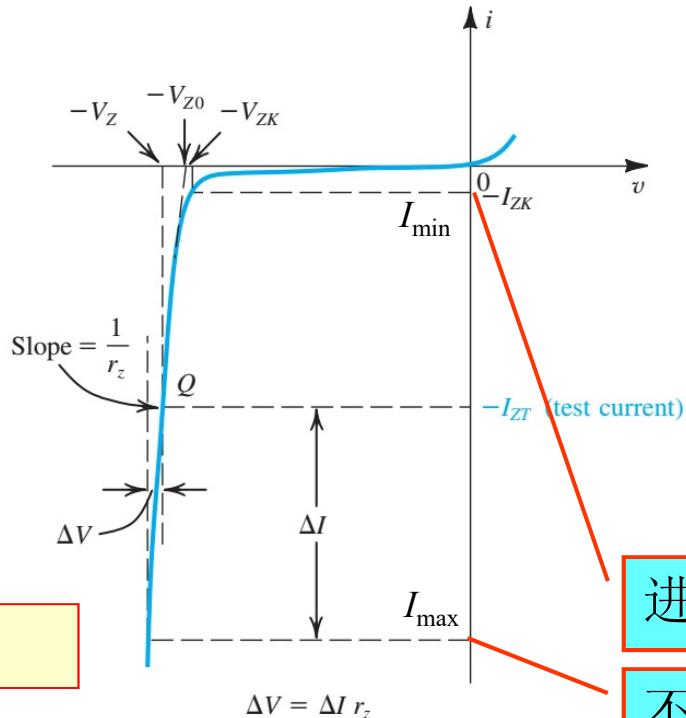
稳定电压  $V_Z$

最大稳定电流  $I_{\max}$

最小稳定电流  $I_{\min}$

动态电阻  $r_z = \Delta V / \Delta I$

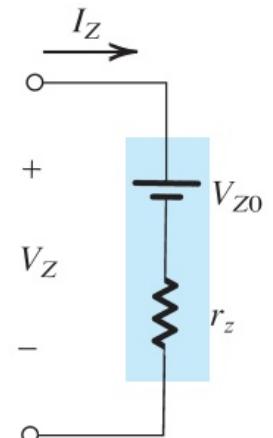
最大功耗  $P_{ZM} = I_{\max} V_Z$



齐纳二极管等效模型

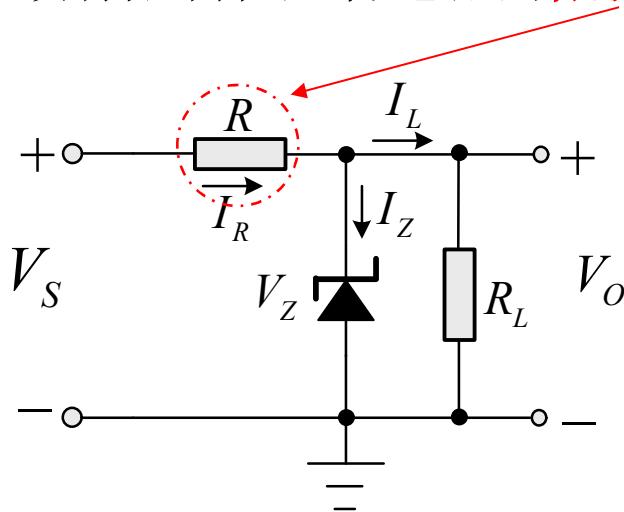
进入稳压区的最小电流

不至于损坏的最大电流



## 四、齐纳二极管的应用电路

若通过稳压管的电流太小则不能稳压，太大则会因功耗过大而损坏，因而稳压管电路中必须有限制稳压管电流的**限流电阻**！



$$I_{\min} < I_z < I_{\max}$$

$$I_{\min} < I_R - I_L < I_{\max}$$

$$I_{\min} < \frac{V_s - V_z}{R} - \frac{V_z}{R_L} < I_{\max}$$

电源稳定性  $\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s}$

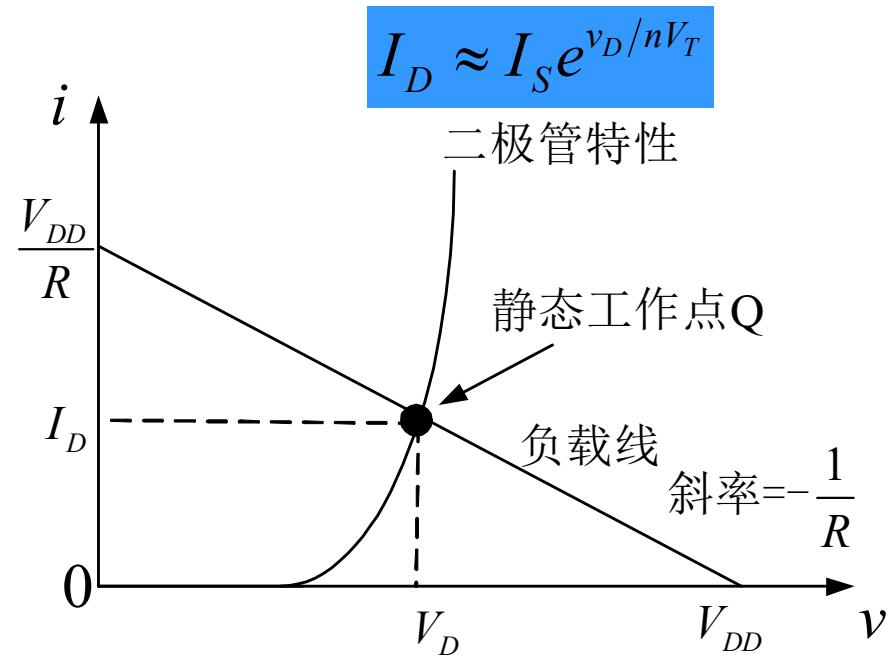
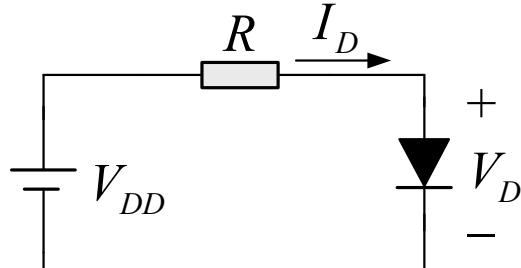
负载稳定性  $\frac{\Delta V_o}{\Delta I_L}$

稳压系数  $S = \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta V_s / V_s}$

## 6.2 二极管应用电路

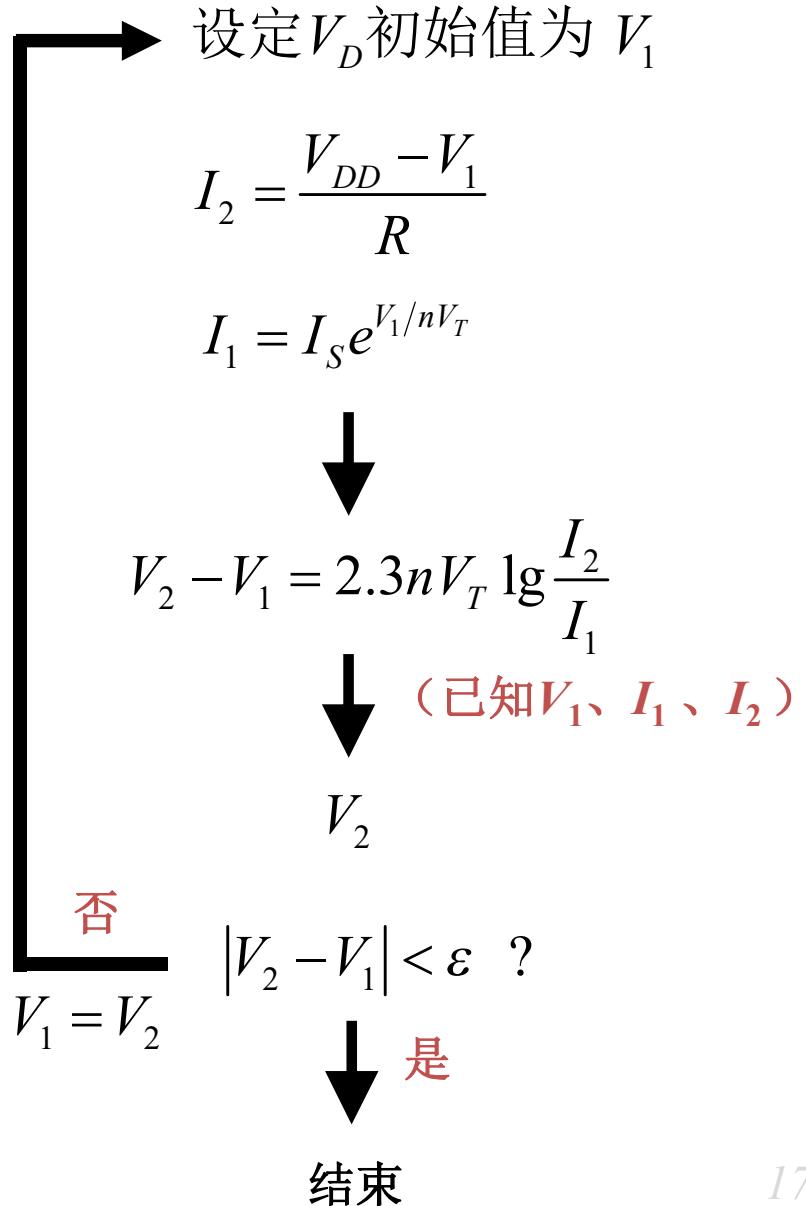
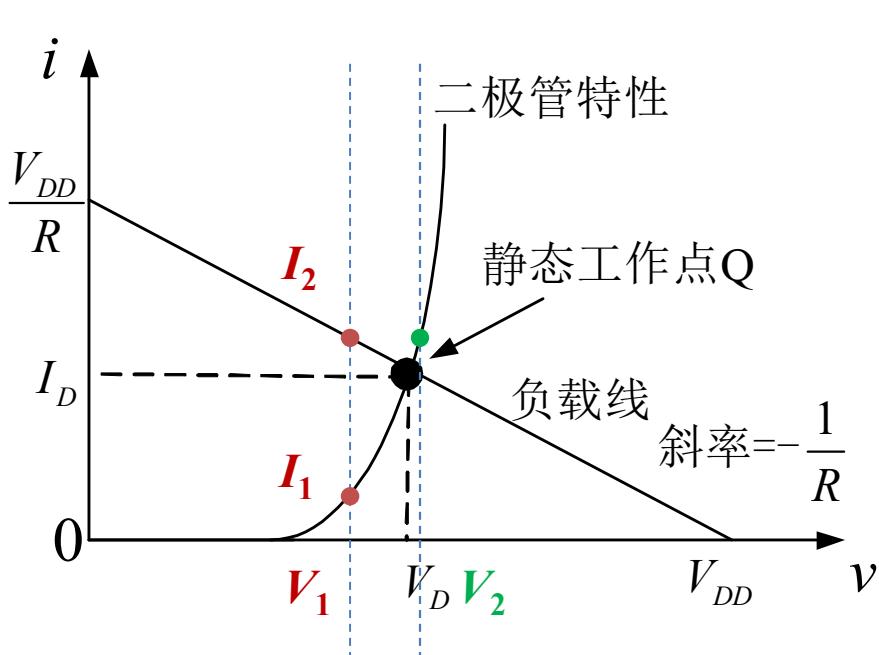
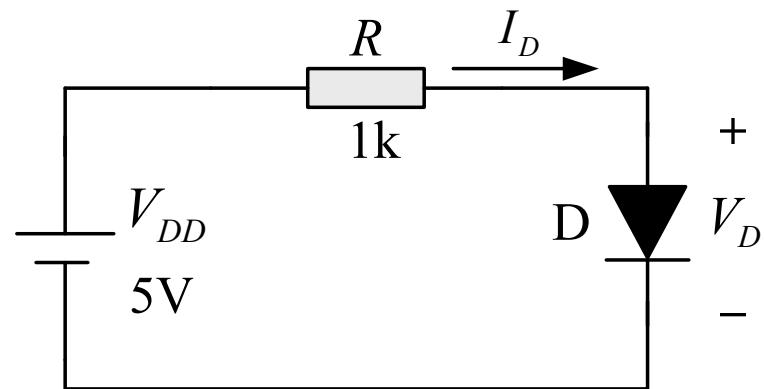
### ➤ 二极管电路分析方法

#### 1、图解分析法

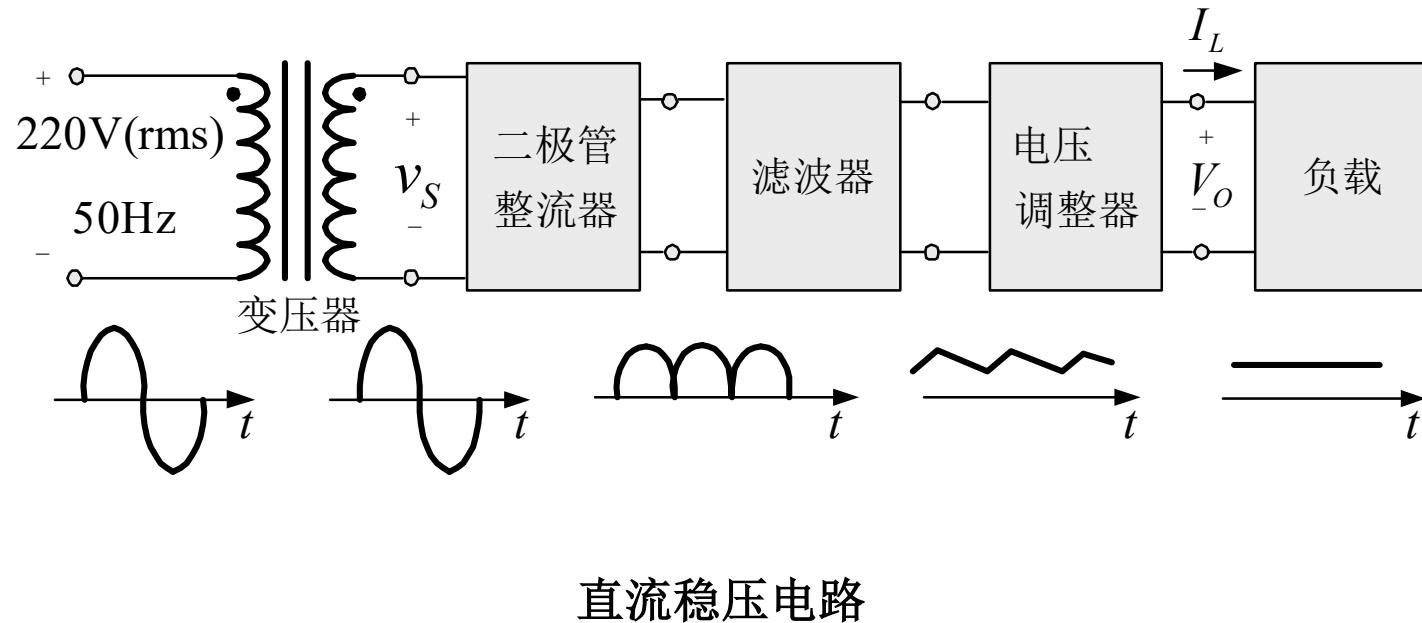


$$V_{DD} = I_D R + V_D$$

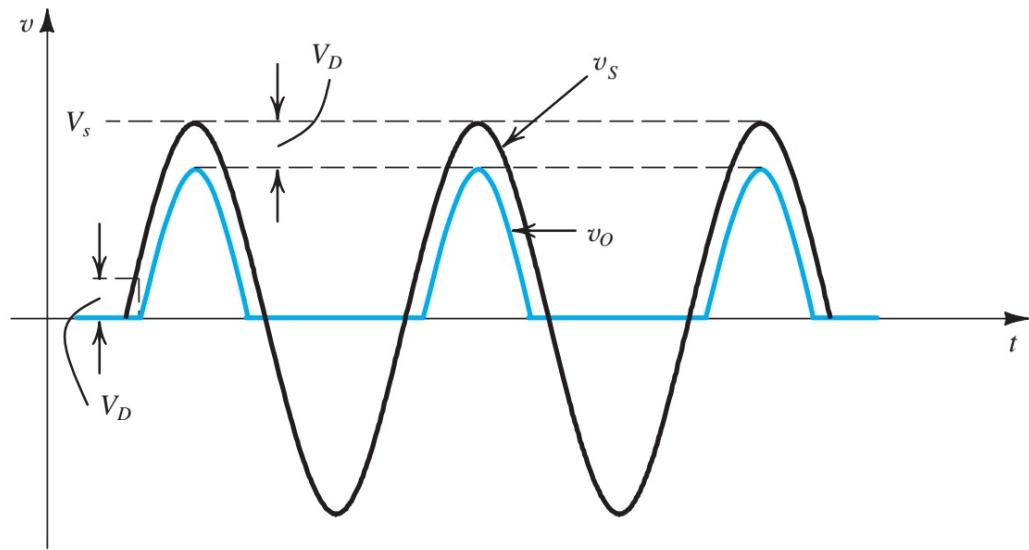
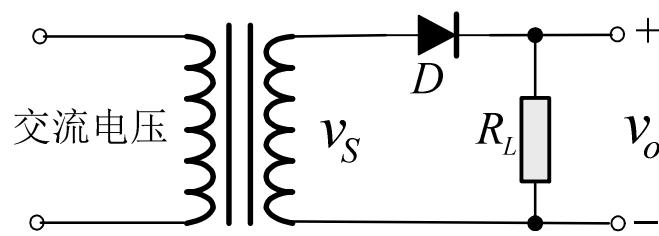
## 2、重复分析法（迭代法）



## 6.2.1 整流电路 (Rectifiers)



# 一、半波整流器 (Half - wave rectifier)



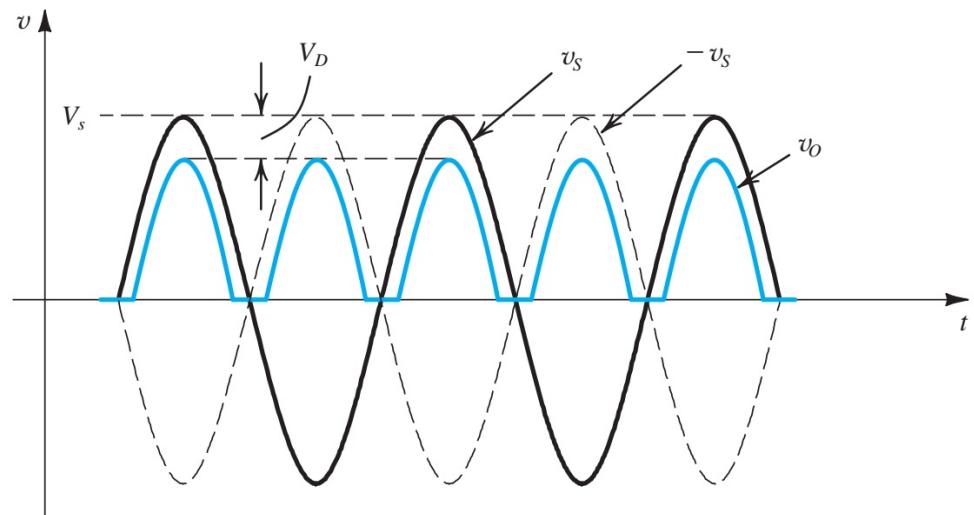
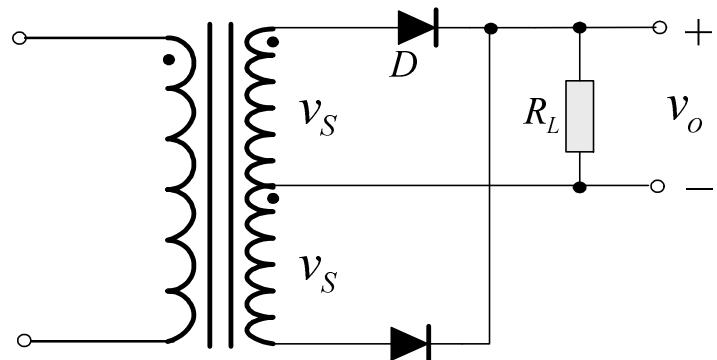
反峰电压 (Peak Inverse Voltage)  $PIV = V_s$

$v_s$  的峰值电压

输出直流电压  
(忽略 $V_D$ )

$$V_o = \frac{\int_0^{\pi} \sqrt{2}V_{orms} \sin \phi d\phi}{2\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{orms} \approx 0.45V_{orms}$$

## 二、全波整流器 (Full - wave rectifier)

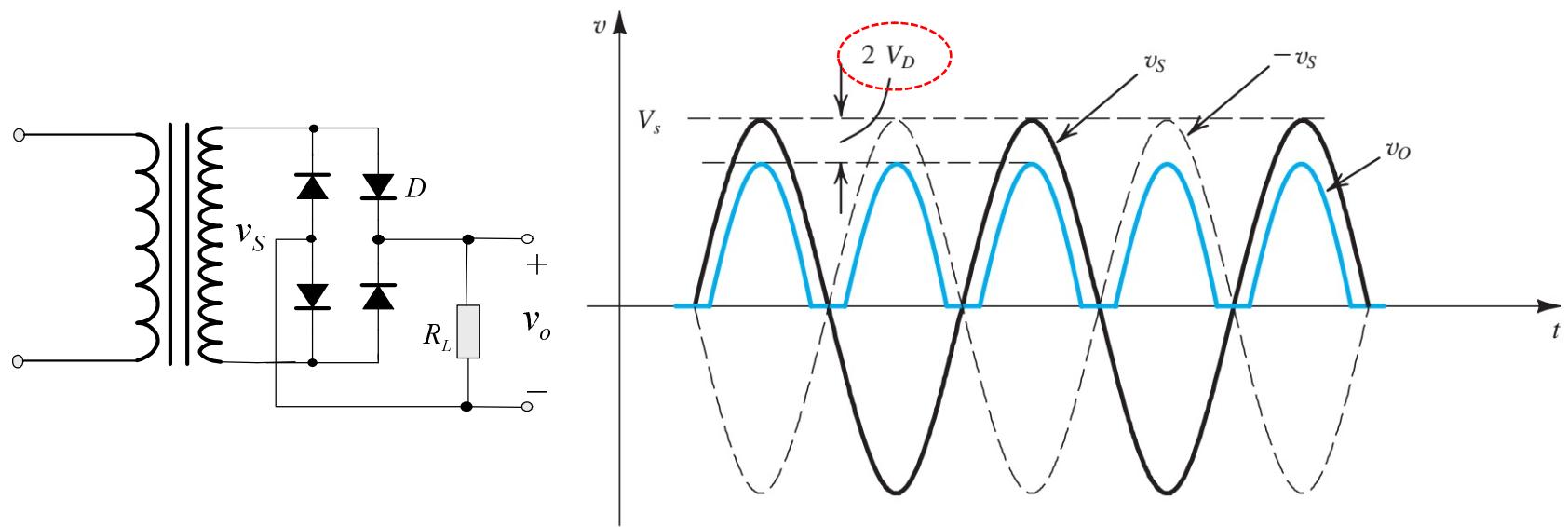


$$PIV = 2V_s - V_D \approx 2V_s$$

输出直流电压  
(忽略  $V_D$ )

$$V_o = \frac{\int_0^\pi \sqrt{2}V_{orms} \sin \phi d\phi}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{orms} \approx 0.9V_{orms}$$

### 三、桥式整流器 (Bridge rectifier)

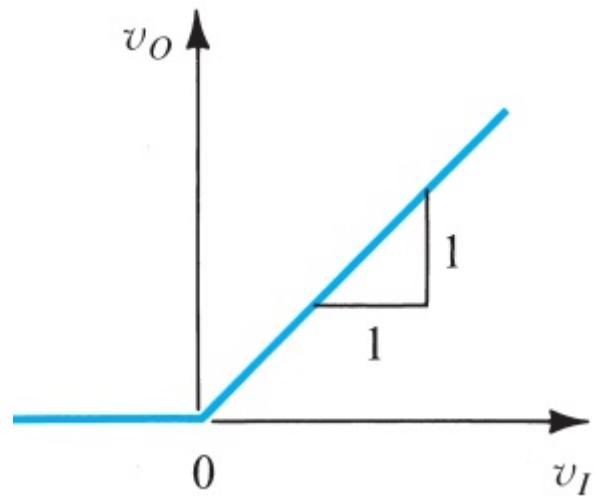
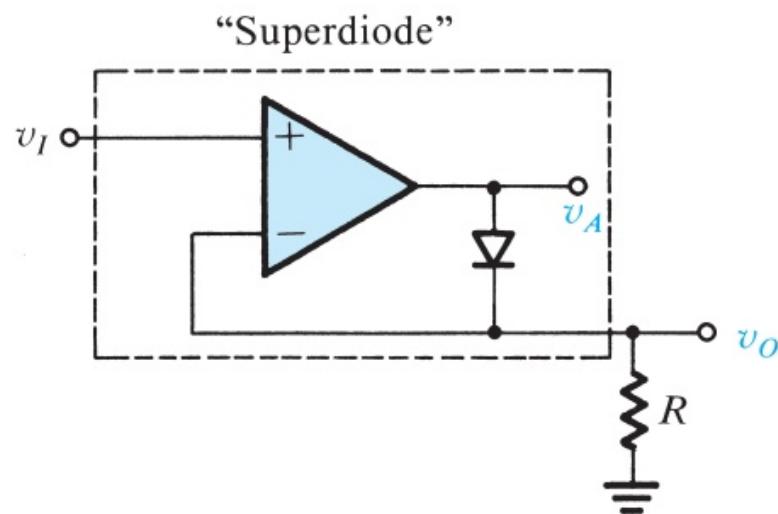


$$PIV = V_s - V_D \approx V_s$$

输出直流电压  
(忽略\$V\_D\$)

$$V_o = \frac{\int_0^\pi \sqrt{2}V_{o rms} \sin \phi d\phi}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{o rms} \approx 0.9 V_{o rms}$$

## 四、精密半波整流器 --- Superdiode



输出特性曲线

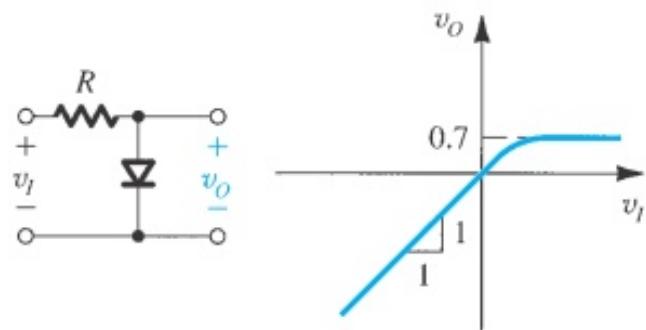
$$v_O = v_I \quad (v_I \geq 0)$$

$$v_O = 0 \quad (v_I < 0)$$

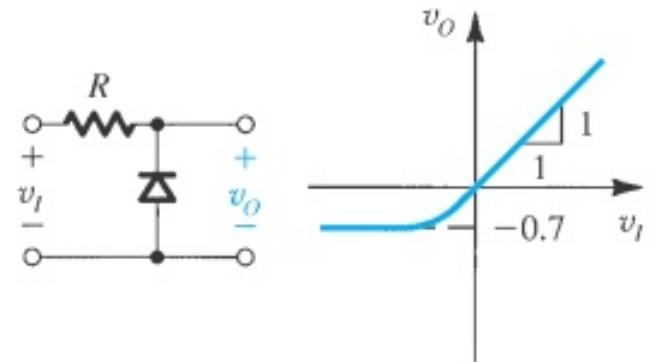
## 6.2.2 限幅和钳位电路

### 一、限幅电路（Limiter Circuit）

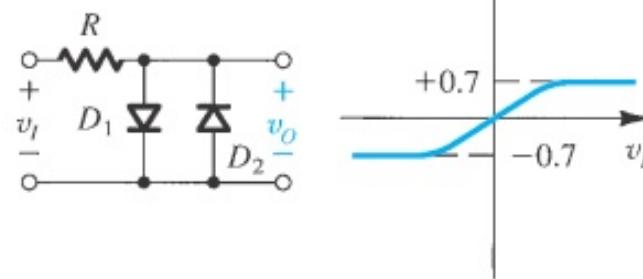
正向限幅电路



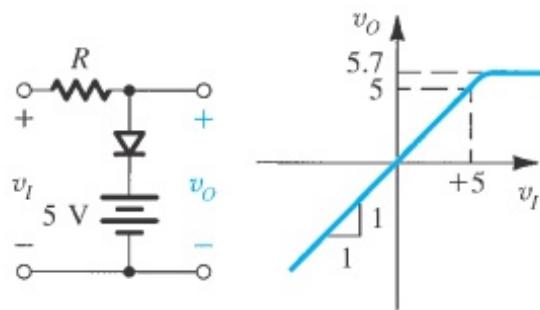
反向限幅电路



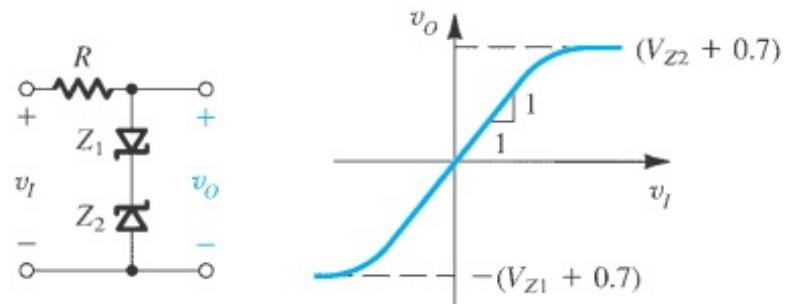
双向限幅电路



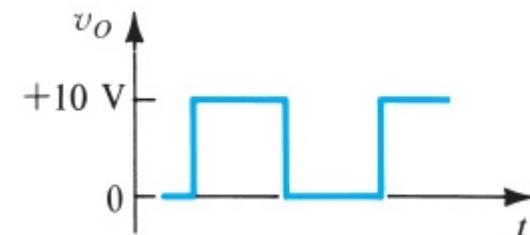
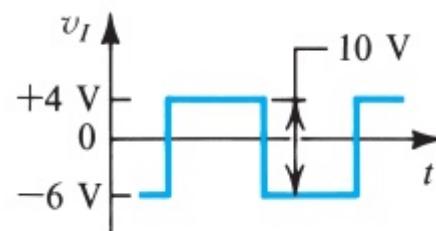
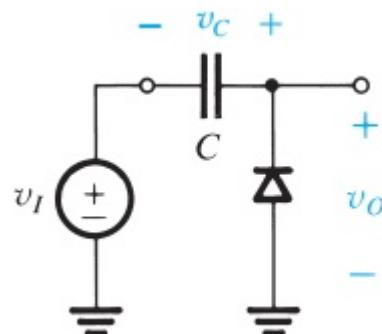
正向限幅电路



双向限幅电路

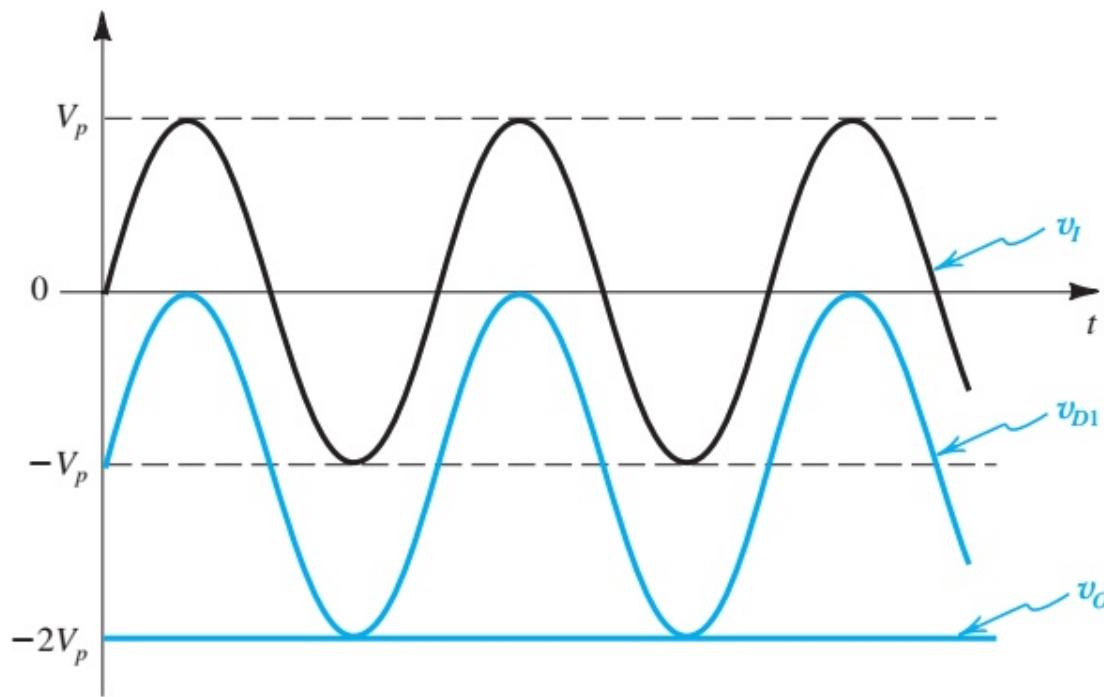
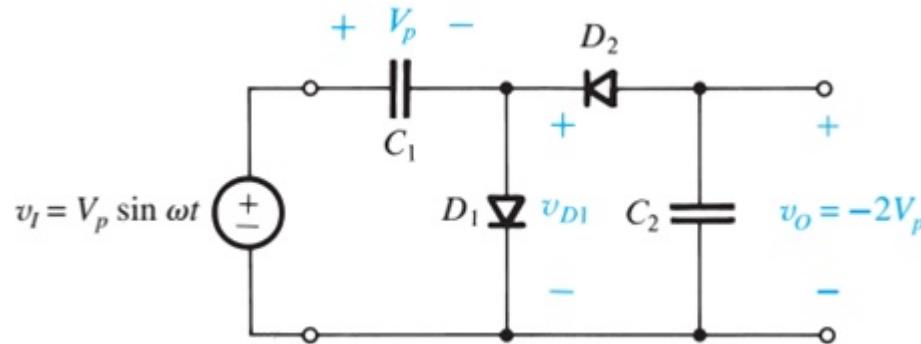


## 二、箝位电路或直流恢复器（Clamped capacitor or DC restorer）



$$v_O = v_I + v_C$$

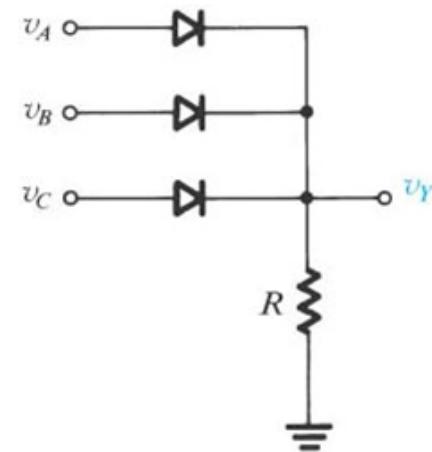
### 6.2.3 电压倍增器（Voltage doubler）



## 6.2.4 逻辑门

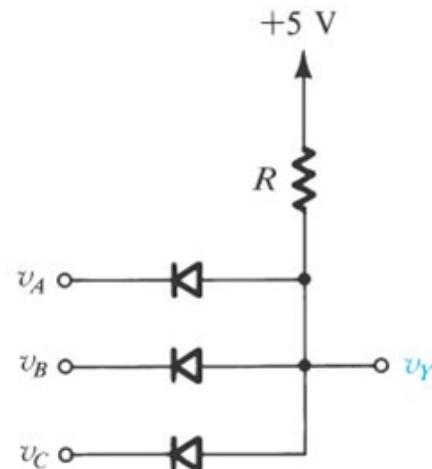
### 一、或门

- 高电平表示1，低电平表示0
- 若 $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_C$ 中任意一个输入高电平
  - 对应二极管导通
  - $v_Y$ 输出高电平
- 若所有输入均为低电平
  - 所有二极管截止
  - $v_Y$ 输出低电平



## 二、与门

- 高电平表示1，低电平表示0
- 若  $v_A$ 、 $v_B$ 、 $v_C$  中任意一个输入低电平
  - 对应二极管导通
  - $v_Y$  输出低电平
- 若所有输入均为高电平
  - 所有二极管截止
  - $v_Y$  输出高电平



# 补充： P17页

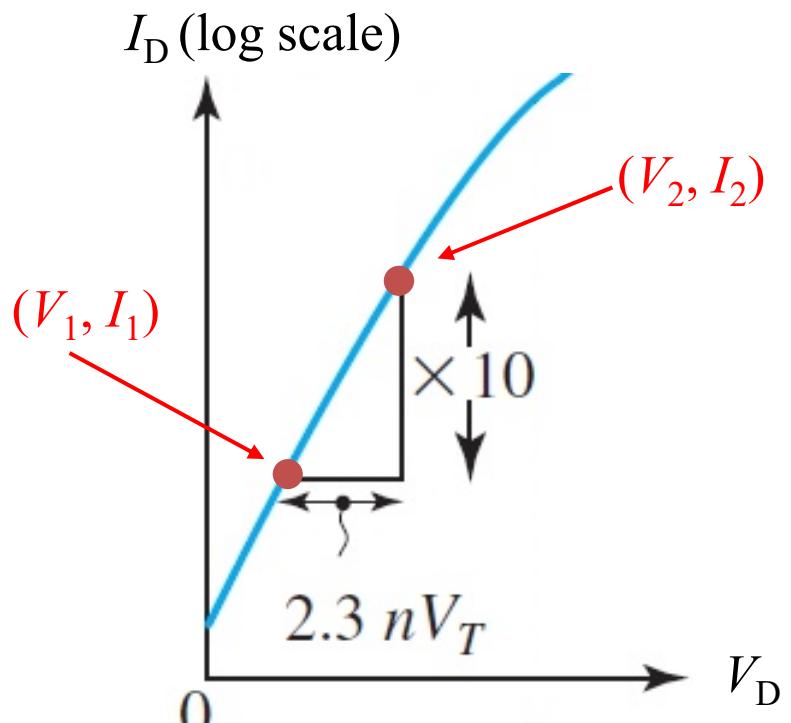
- ◆ 斜率的倒数=2.3nV<sub>T</sub>

$$I_D = I_S e^{V_D/nV_T}$$

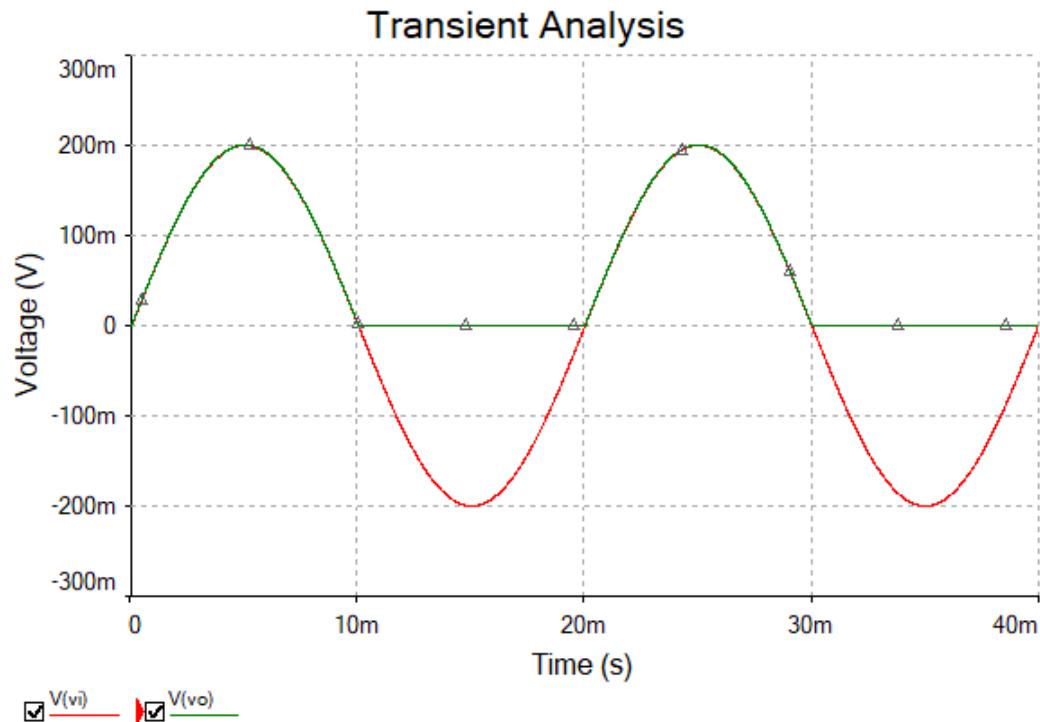
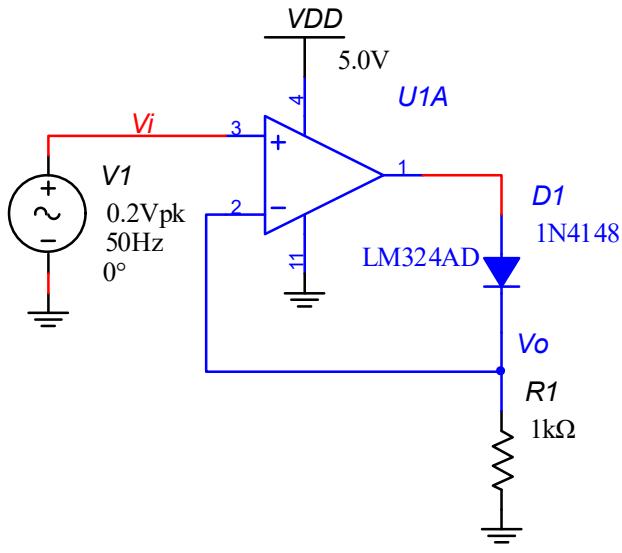
$$\lg(I_D) = \lg(I_S) + \frac{V_D}{nV_T} \lg(e)$$

$$= \lg(I_S) + \frac{V_D}{2.3nV_T}$$

- ◆  $V_2 - V_1 = 2.3nV_T \lg \frac{I_2}{I_1}$

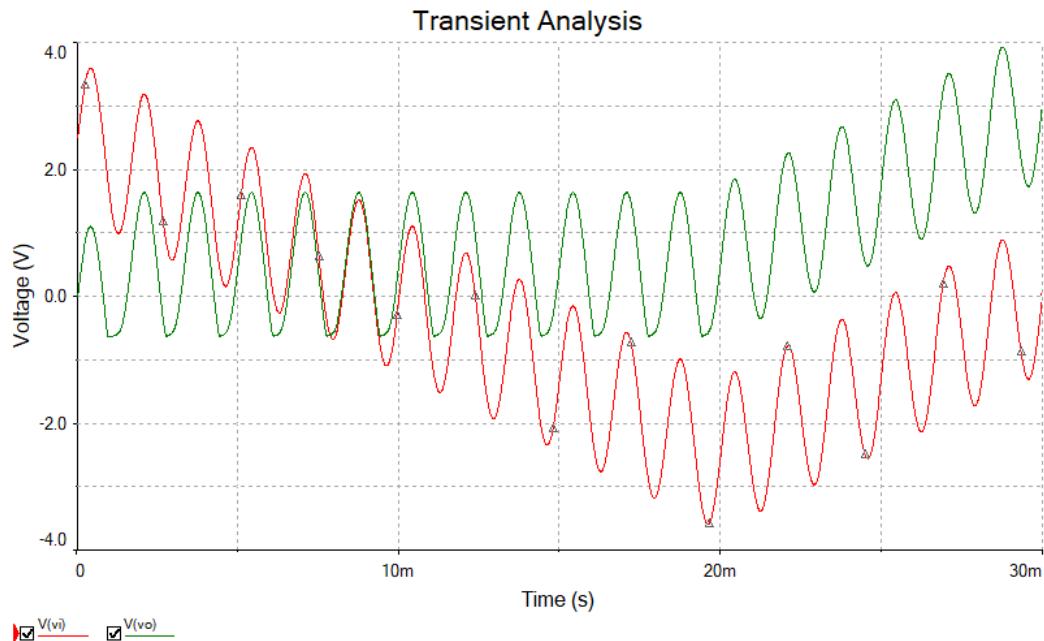
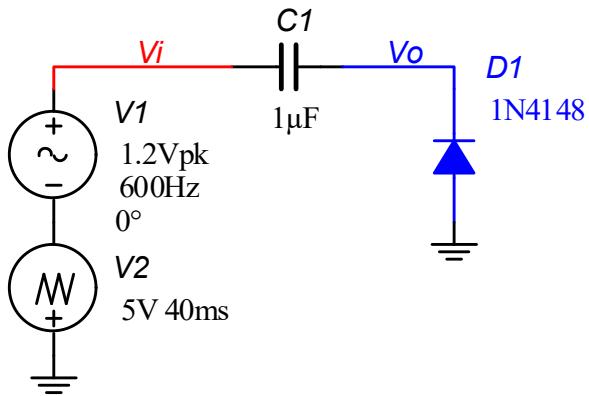


# 补充：P22页superdiode仿真



# 补充：P24页DC restorer仿真

- ◆  $v_C$  电压=最大负峰值



# 补充：P25页Voltage doubler仿真

