

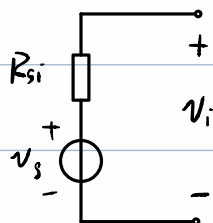
§1 绪论

1 信号

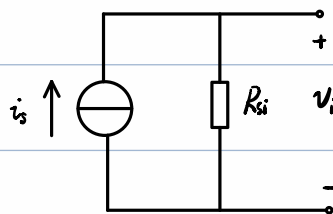
传感器：非电信号 \rightarrow 电信号 $\left\{ \begin{array}{l} \text{电压} \\ \text{电流} \end{array} \right.$

\downarrow
信号源

① 戴维宁等效电路



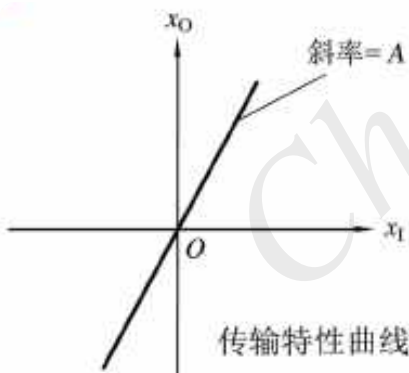
② 诺顿等效电路



模拟信号 \rightarrow 连续函数

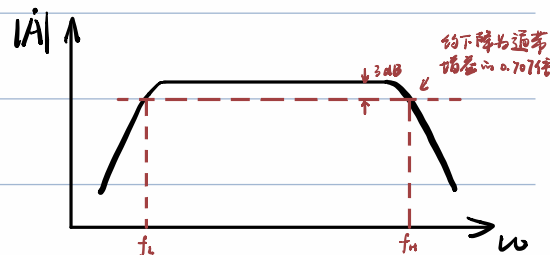
$\left\{ \begin{array}{l} \text{时域：平均值小，直流分量小} \\ \text{频域} \end{array} \right.$

2 信号的线性放大



$$x_o = A x_i$$

正弦信号不可能
出现线性失真



$\left\{ \begin{array}{l} \text{频率失真 / 线性失真} \\ \text{非线性失真} \end{array} \right.$
由线性元件引起

$\left\{ \begin{array}{l} \text{幅度失真} \\ \text{相位失真} \end{array} \right.$ 用幅频响应曲线描述
相频响应曲线

Δ 区别：频率失真不会产生输入信号没有的新的频率分量
非线性失真会出现新的高次谐波分量

只有在一定的幅值范围和频率范围内，
A才能基本保持常数。

3 放大电路模型

电压增益 $A_v = \frac{v_o}{v_i}$

$20 \lg |A_v| \text{ dB}$

电流增益 $A_i = \frac{i_o}{i_i}$

$20 \lg |A_i| \text{ dB}$

互阻增益 $A_r = \frac{v_o}{i_i} (\Omega)$

互导增益 $A_g = \frac{i_o}{v_i} (\text{S})$

功率增益 $A_p = \frac{P_o}{P_i}$

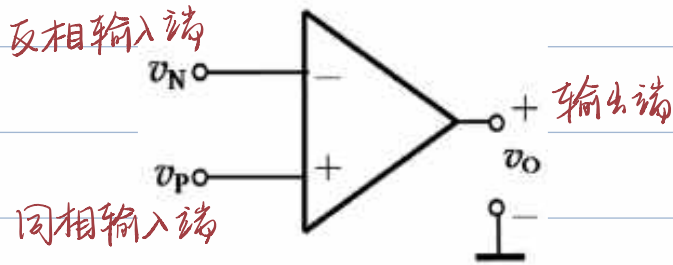
$10 \lg A_p \text{ dB}$

	电路模型	增益	对输入电阻要求	对输出电阻要求	适用场合
电压放大		$A_v = \frac{v_o}{v_i}$ $= A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$	R_i 越大越好	R_o 越小越好	电压信号源, 电压驱动型负载
电流放大		$A_i = \frac{i_o}{i_i}$ $= A_{io} \frac{R_o}{R_L + R_o}$	R_i 越小越好	R_o 越大越好	电流信号源, 电流驱动型负载
互阻放大		$A_r = \frac{v_o}{i_i}$ $= A_{ro} \frac{R_L}{R_L + R_o}$	R_i 越小越好	R_o 越小越好	电流信号源, 电压驱动型负载
互导放大		$A_g = \frac{i_o}{v_i}$ $= A_{gv} \frac{R_o}{R_L + R_o}$	R_i 越大越好	R_o 越大越好	电压信号源, 电流驱动型负载

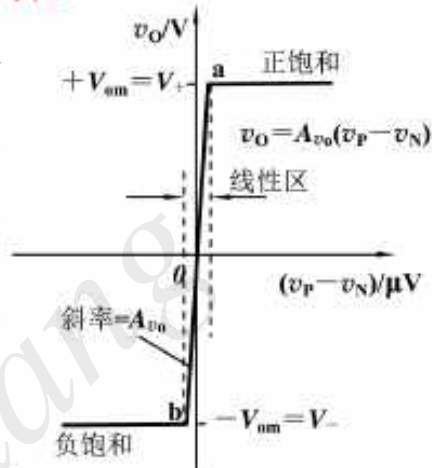
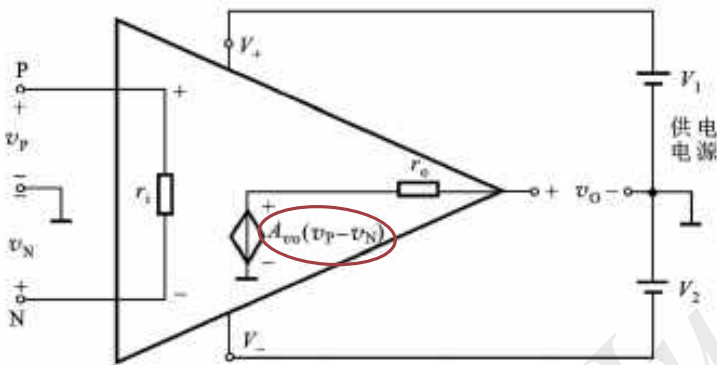
§2 运算放大器

1 运算放大器及其信号放大

(1) 运放的基本特性



同相/反相
指输入端与输出端的
相位关系



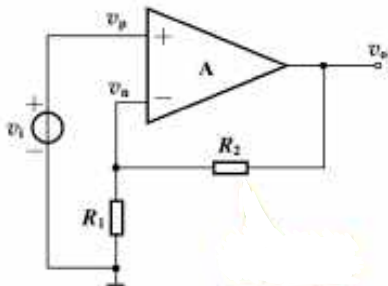
理想模型 $A_{vo} \rightarrow \infty$, $r_i \rightarrow \infty$, $r_o \rightarrow 0$, $BW \rightarrow \infty$

在线性区 $v_p \approx v_n$ 虚短

在线性区/饱和区 $r_i \rightarrow \infty \Rightarrow v_p \approx 0, i_n \approx 0$ 虚断

(2) 基本应用

同相放大电路

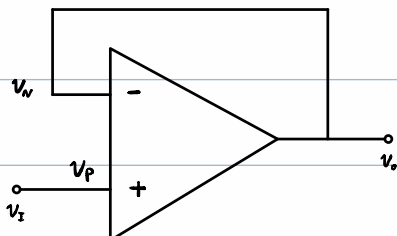


$$v_i = v_p = v_n = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_i \approx \infty \quad R_o \approx 0$$

EXP 电压跟随器

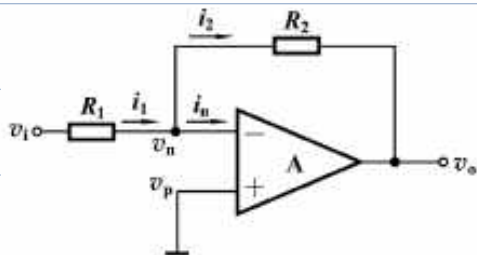


$$v_o = v_n \approx v_p = v_i$$

$$A_{vo} = \frac{v_o}{v_i} \approx 1$$

作用: 隔离, 缓冲

反相放大电路



$$v_N = v_P = 0$$

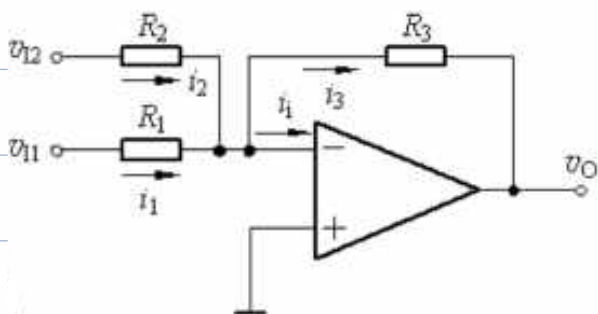
$$\frac{v_i - v_N}{R_1} = \frac{v_N - v_o}{R_2}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

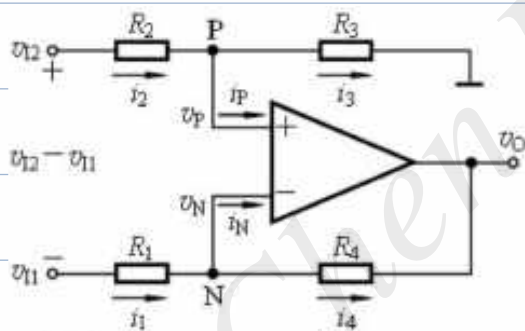
$$R_i = R_1 \quad R_o \approx 0$$

2 运算放大器其他应用

(1) 加法电路



(2) 减法电路



$$v_P = \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i2}$$

$$v_N = \frac{R_4}{R_1 + R_4} v_{i1} + \frac{R_1}{R_1 + R_4} v_o$$

$$v_P \approx v_N$$

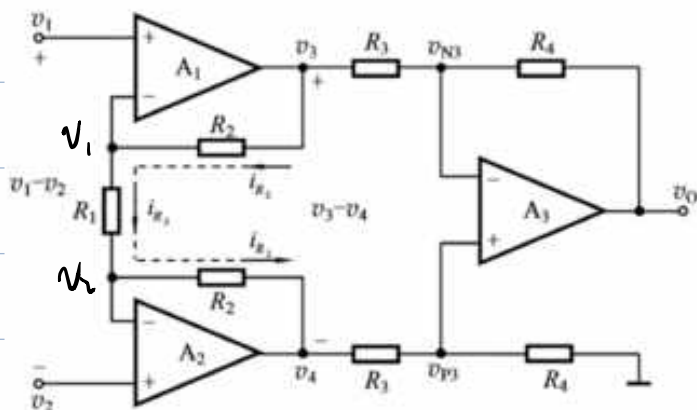
$$\Rightarrow v_o = \frac{R_1 + R_4}{R_1} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_{i2} - \frac{R_4}{R_1} v_{i1}$$

$$\text{若 } \frac{R_2}{R_2} = \frac{R_4}{R_1}, \quad v_o = \frac{R_4}{R_1} (v_{i2} - v_{i1})$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_{i2} - v_{i1}} = \frac{R_4}{R_1}$$

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{id}} = R_1 + R_2$$

(3) 仪用放大电路

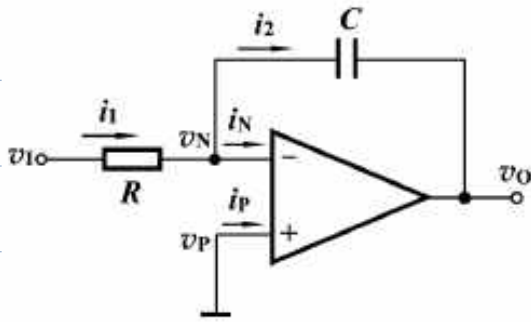


$$v_3 - v_4 = \frac{v_1 - v_2}{R_1} (R_1 + 2R_2)$$

$$v_o = -\frac{R_4}{R_3} (v_3 - v_4)$$

$$= -\frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) (v_1 - v_2)$$

4) 积分电路



$$\begin{cases} v_P = v_N = 0 \\ i_N = i_P = 0 \end{cases}$$

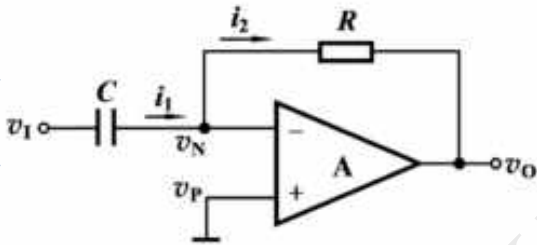
$$i_2 = i_1 = \frac{v_I}{R}$$

设电容初始电压为 0

$$v_N - v_O = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{C} \int \frac{v_I}{R} dt = \frac{1}{RC} \int v_I dt$$

$$v_O = -\frac{1}{RC} \int v_I dt$$

5) 微分电路



$$i_1 = i_2$$

$$i_1 = C \frac{d(v_I - v_N)}{dt} = C \frac{dv_I}{dt}$$

$$i_2 = \frac{v_N - v_O}{R} = -\frac{v_O}{R}$$

$$v_O = -RC \frac{dv_I}{dt}$$



§3 二极管及其基本电路

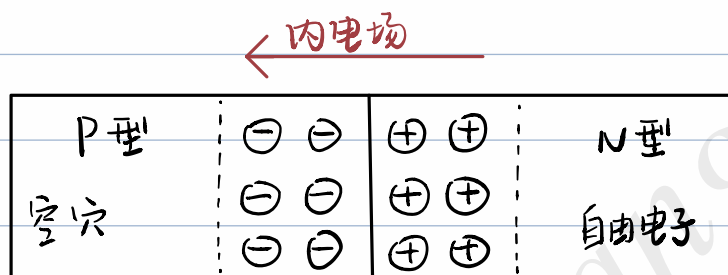
1. 半导体基本知识

空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要标志

本征半导体: +4 自由电子 & 空穴成对出现 (温度会影响)
 杂质半导体: 掺入 $\left\{ \begin{array}{l} +3 \text{ 多出一个空穴} \\ +5 \text{ 多出一个电子} \end{array} \right.$ P型半导体 (positive)
 N型半导体 (negative)

产生多数载流子; 提高自由电子和空穴的复合几率

2. PN结



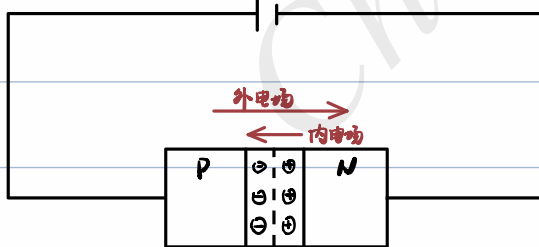
电阻 \Rightarrow PN结

多子扩散 + 少子漂移

3. PN结特性

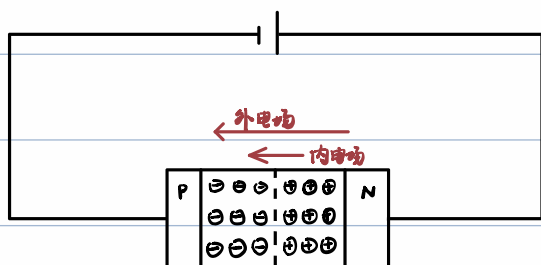
(1) 单向导电性

正向偏置



PN结变窄 \Rightarrow 电阻 \downarrow

反向偏置 PN结截止



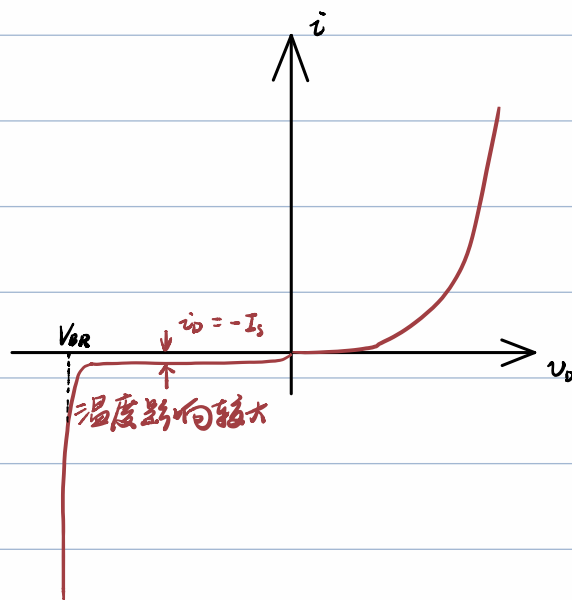
阻止多子扩散, 促进少子漂移

$$i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$$

I_S 反向饱和电流 $V_T = \frac{kT}{q}$

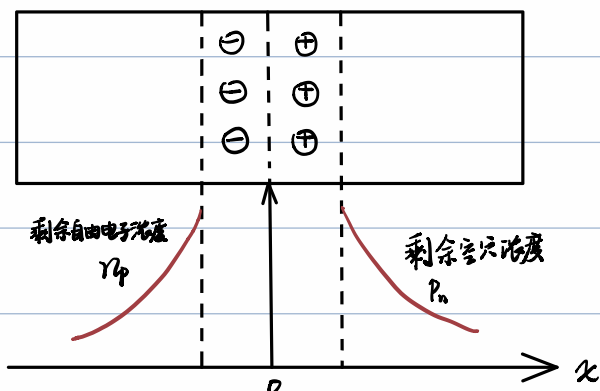
$v_D \gg V_T$ 时, $i_D \approx I_S e^{\frac{v_D}{V_T}}$

$v_D < 0$ 且 $|v_D| \gg V_T$ 时, $i_D \approx -I_S$

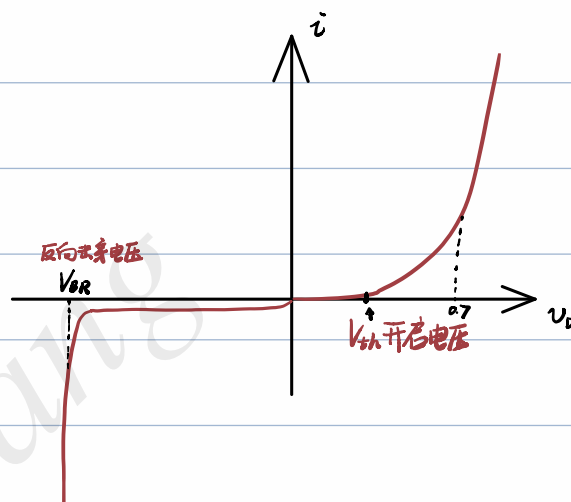
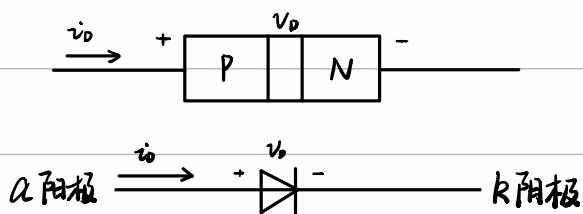


(2) 反向击穿 $\left\{ \begin{array}{l} \text{电击穿 (可逆)} \\ \text{热击穿 (不可逆)} \end{array} \right.$

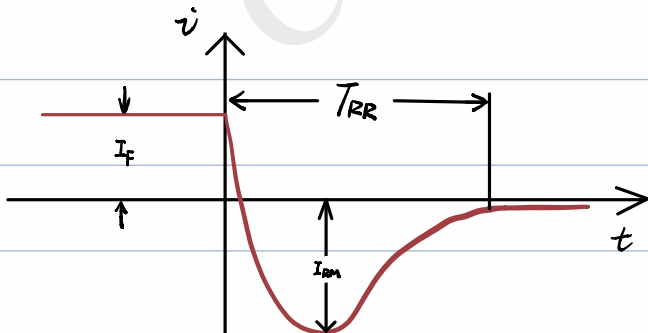
(3) 电容效应 (扩散电容)



4. 二极管 单向导电性

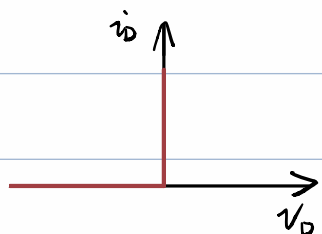


- 最大整流电流: 长时间工作允许通过的最大正向平均电流
- 反向击穿电压
- 反向电流: 工作在反向截止状态时的电流
- 极间电容 \propto PN结面积

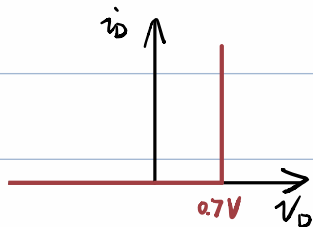


- I_F 正向电流
- T_{RR} 反向恢复时间
- I_{RM} 最大反向恢复电流

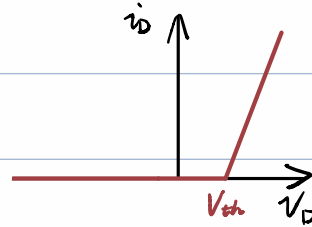
(1) 理想模型



(2) 恒压降模型



(3) 折线模型



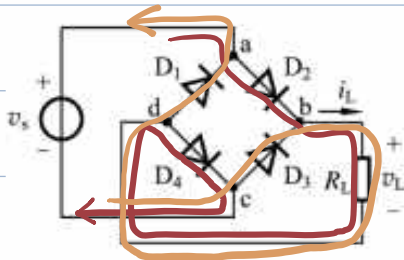
(4) 小信号模型 (小范围线性近似)

$$g_m = \frac{di_o}{dv_o} = \frac{d}{dv_o} [I_s (e^{\frac{v_o}{V_T}} - 1)] = \frac{I_s}{V_T} e^{\frac{v_o}{V_T}} \Big|_Q \approx \frac{i_o}{V_T} \Big|_Q = \frac{I_o}{V_T}$$

$$r_d = \frac{1}{g_m} \quad \text{动态电阻 / 交流电阻}$$

5. 二极管基本电路

- (1) 整流电路
- 半波整流
 - 桥式整流

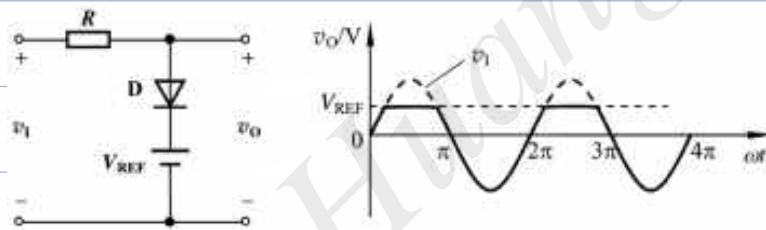


正半周 $v_a > v_b > v_d > v_c$ D_2, D_4 正偏; D_1, D_3 反偏

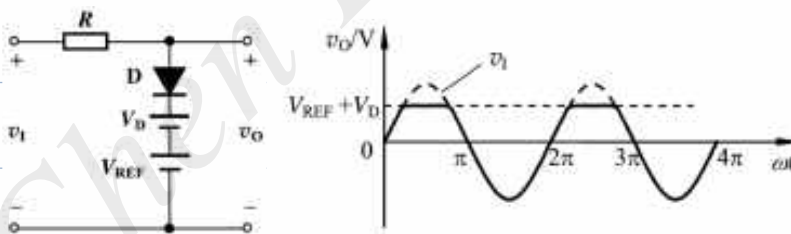
负半周 $v_c > v_b > v_d > v_a$ D_1, D_3 正偏; D_2, D_4 反偏

(2) 限幅电路

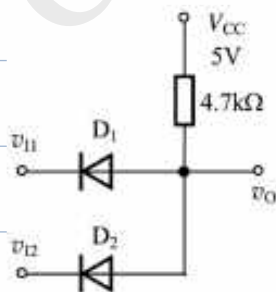
理想模型



恒压降模型



(3) 开关电路



v_{I1}/V	v_{I2}/V	二极管工作状态		v_O/V
		D_1	D_2	
0	0	导通	导通	0
0	5	导通	截止	0
5	0	截止	导通	0
5	5	截止	截止	5

(4) 小信号应用

- 直流电源单独作用时 (静态)
- 交流电源单独作用时 (动态)

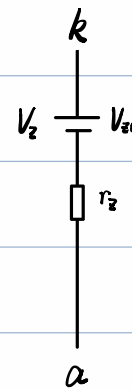
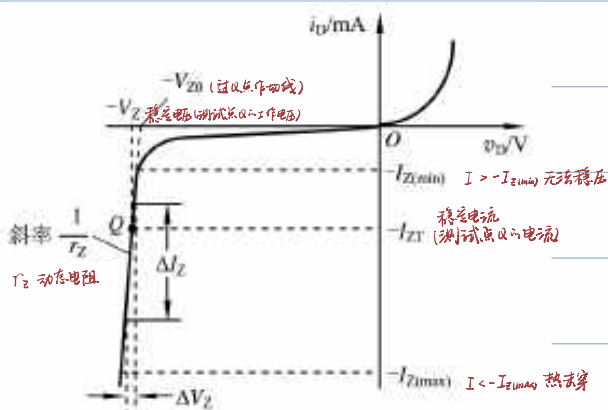
(5) 图解分析法 (前提: 已知二极管特性曲线)

6. 特殊二极管

1) 齐纳二极管

稳压二极管
↑

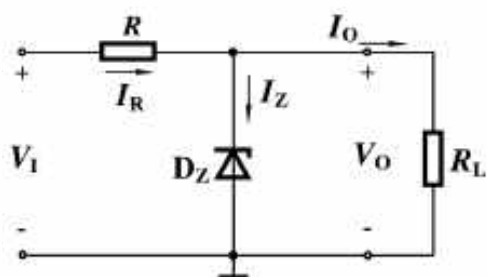
可以在反向击穿下工作，电流反向迅速增加，电压变化很小。



↔ 反向击穿

$$r_Z = 0 \Rightarrow V_Z = V_{Z0}$$

正常工作时处于反向击穿，电压 & 电流参考方向与普通二极管相反
使用时



① 电压 $V_I > V_Z$ ，使齐纳二极管反向击穿

② 串入限流电阻 R ，将电流 I_Z 限制在 $[I_{Z(min)}, I_{Z(max)}]$

③ 负载电阻并联在二极管两端

● 输入电压 $[V_{I(min)}, V_{I(max)}]$

● 输出电压 V_O ($V_{I(min)} > V_O$)

● 输出最大电流 $I_{O(max)}$

齐纳二极管的选择条件：

— 电压 $V_O = V_Z$

— 电流 $I_{Z(max)} > I_{Z(min)} + I_{O(max)}$

— 最大耗散功率 $P_{ZM} > V_Z (I_{Z(min)} + I_{O(max)})$

— 限流电阻 $R = \frac{V_I - V_Z}{I_Z + I_O}$

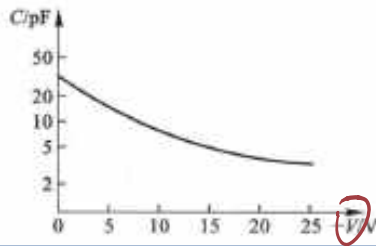
$$\textcircled{1} V_I = V_{I(min)} \quad I_O = I_{O(max)} \quad I_Z = I_{Z(min)} \quad \Rightarrow R_{max}$$

$$\textcircled{2} V_I = V_{I(max)} \quad I_O = 0 \quad I_Z = I_{Z(max)} \quad \Rightarrow R_{min}$$

$$\frac{V_{I(max)} - V_Z}{I_{Z(max)} + I_{O(min)}} < R < \frac{V_{I(min)} - V_Z}{I_{Z(min)} + I_{O(max)}}$$

$$P_R > \frac{(V_{I(max)} - V_Z)^2}{R}$$

(2) 变容二极管 (突出电容与电压的关系)



反偏电压

(3) 肖特基二极管

- ① 电容效应小, 工作速度快, 适用于高频/开关状态应用
- ② 正向导通时的压降电压和正向压降小

(4) 光电二极管 (光 → 电)

反偏电压

少数浓度与光照强度有关

(5) 发光二极管 (电 → 光)

正偏电压

发光二极管必须施加正向偏置电压才能发光; 光电二极管在不同的光照强度下, 会有不同的反向饱和电流, 所以应该加反向偏置电压; 变容二极管正常工作时, 也应该施加反向偏置电压。

