

5-2 晶体管



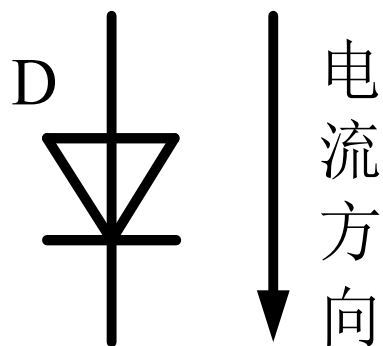
主要内容

1. 晶体管的基本结构
2. 晶体管的伏安特性
3. 晶体管的主要参数
4. 晶体管基本电路模型
5. 晶体管分类



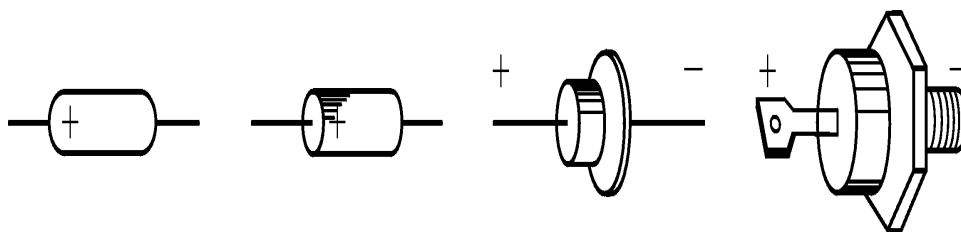
1.二极管的基本结构

- 二极管的基本结构就是一个PN结，二极管的所有特性都取决于PN结的特性，其电路符号和外形如下图所示。



(a)

二极管的电路符号



(b)

二极管的外形



1.二极管的基本结构

- 二极管根据结构，分为
 - 点接触型（图a）：结面积小，工作电流低，高频特性好
 - 面接触型（图b, c）：PN结接触面积大，工作电流大，适用于低频大电流工作

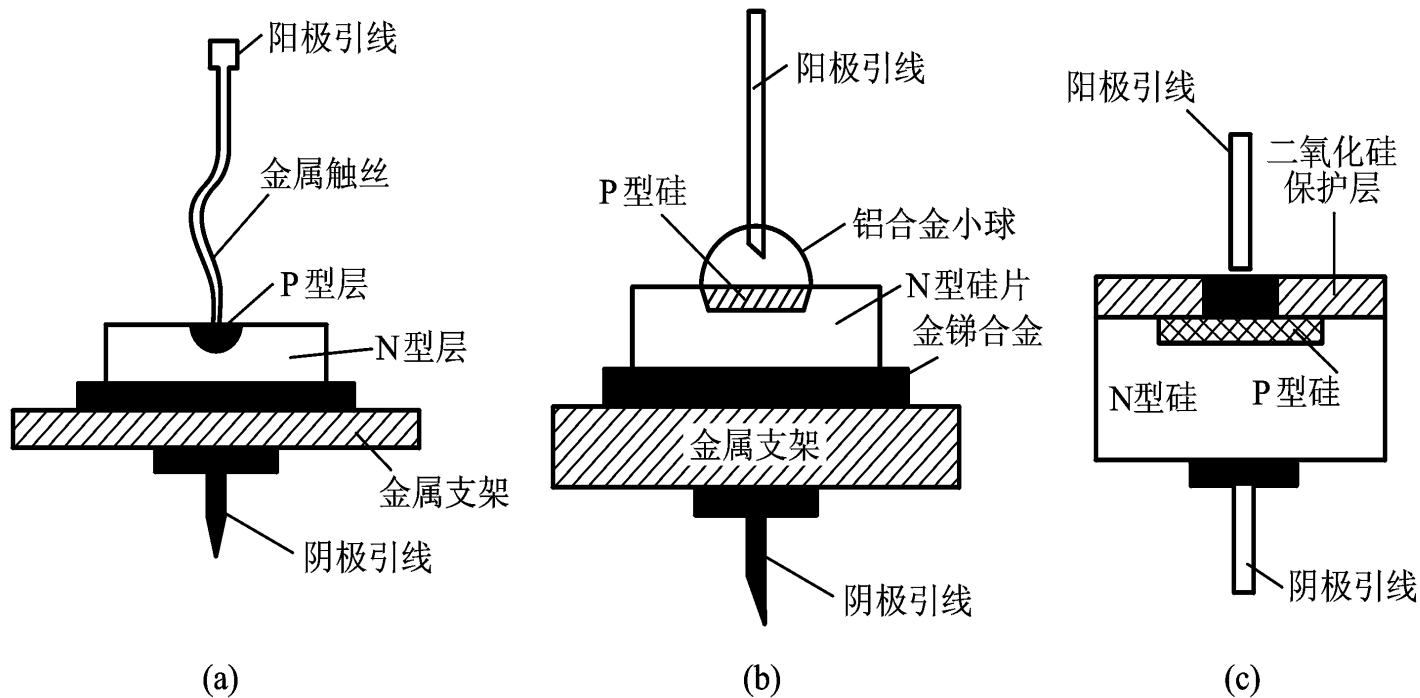


图5-2-2 二极管结构示意图

2.二极管的伏安特性



正向特性：二极管外加正向偏置电压时的伏安特性，如图所示

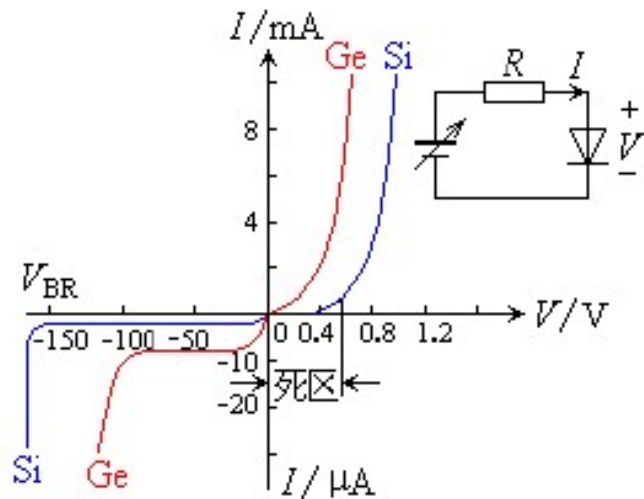
死区：正向特性的起始电流几乎为零

死区电压：硅管0.5V，锗管0.1V

正向导通电压：硅管0.6-0.7V，锗管0.2-0.3V

反向特性：外加反向偏置电压时的伏安特性，如图所示

反向饱和电流：外加反向偏置电压不超过一定范围时，通过二极管的是少数载流子漂移运动所形成的很小反向电流，几乎不受反向偏置电压的影响。受温度影响很大



硅/锗二极管伏安特性曲线

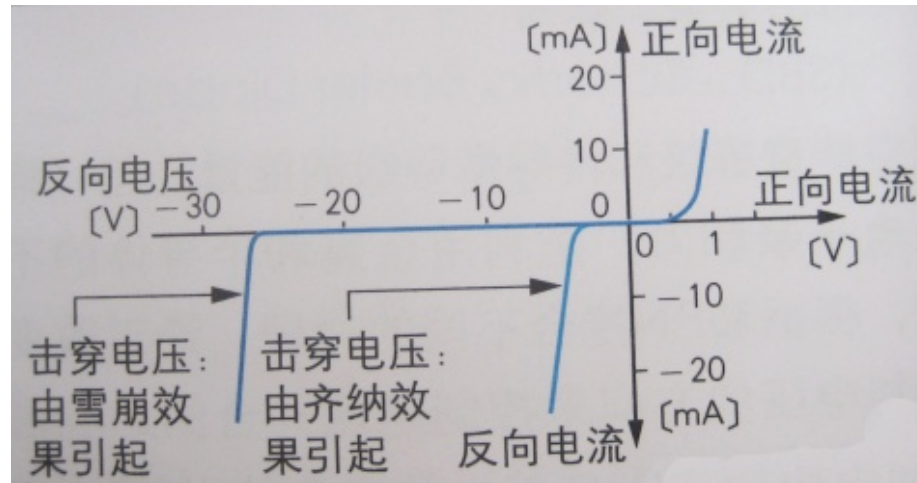
二极管的伏安特性方程为：

$$i_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1)$$

其中， I_S 为反向饱和电流

$U_T = 26mV$ 为温度电压当量

击穿特性



击穿特性: { 电击穿 { 雪崩击穿 (为主)
齐纳击穿 (稳压)
热击穿



3.二极管的主要参数

- **最大整流电流 I_{OM}** ：二极管长期工作时，允许通过的最大正向平均电流。PN结的面积越大，最大整流电流也越大。
- **最大反向偏置电压 U_{RM}** ：保证二极管不被击穿而允许的最高反向电压，约为击穿电压的一半。点接触二极管约为数十伏，面接触二极管可达数百伏。
- **最大反向电流 I_{RM}** ：二极管加上最大反向偏置电压时的反向电流。反向电流越大，说明二极管的单向导电性越差，且受温度影响也越大。硅管的反向电流很小，一般在几个微安以下。锗管的反向电流较大，一般在几十到几百个微安之间。
- **最高工作频率 f_M** ：二极管具有单向导电性的最高工作频率。由于PN结有电容效应，频率过高，单向性变差。点接触二极管PN结面积小，结电容小，适合工作在高频；面接触二极管适合工作在低频、大电流环境中。



4.二极管基本电路模型

- 二极管是无源器件，其作用相当于一个非线性电阻。
- 二极管的单向导电性决定了其具有整流（rectify）功能。利用这个特性可实现电源变换、信号检波、过电压保护和信号隔离的功能，电路如图5-2-4所示。

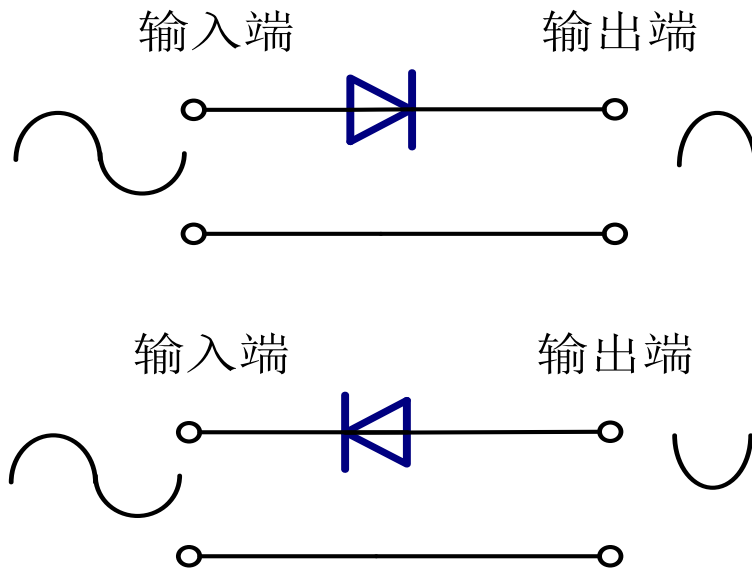


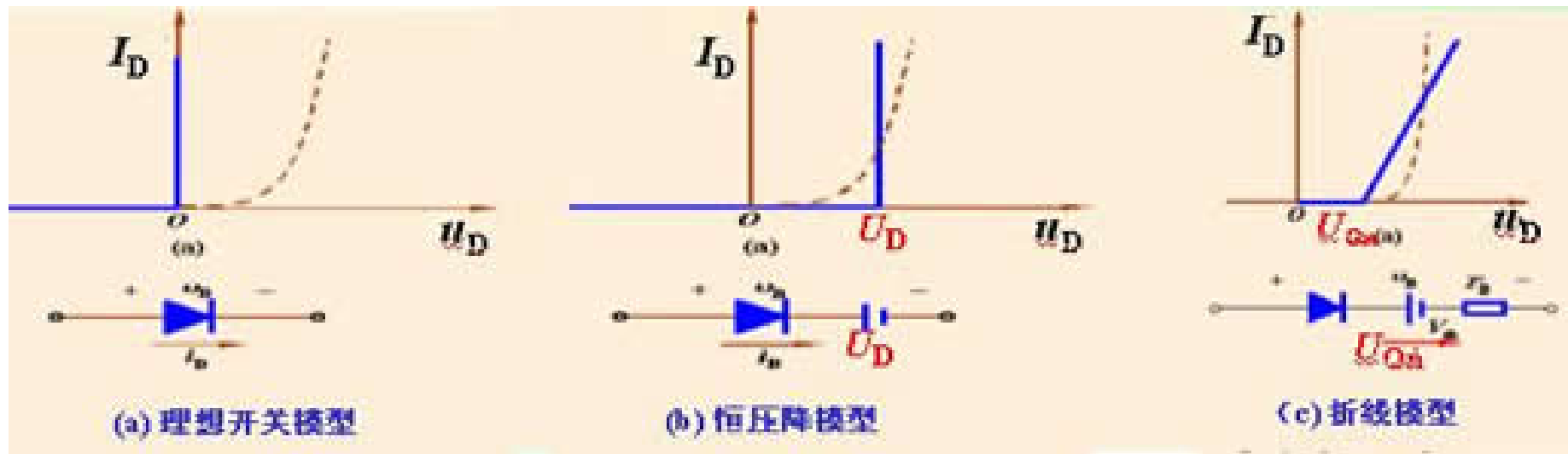
图5-2-4 二极管的整流作用

- 二极管理想化模型：正向导通电压为零。
- 恒压降模型：将正向导通电压考虑在内的二极管电路模型。硅管0.6-0.7V；锗管0.2-0.3V



二极管的直流模型

- 1) 理想开关模型
- 2) 恒压降模型
- 3) 折线模型



例题5-2



用Multisim仿真图5-2-5电路，观察输入输出信号之间的关系和变化，说明变化原因。仿真中设

$$C_1 = 470\mu F, C_2 = 1\mu F, R_1 = 1k\Omega$$

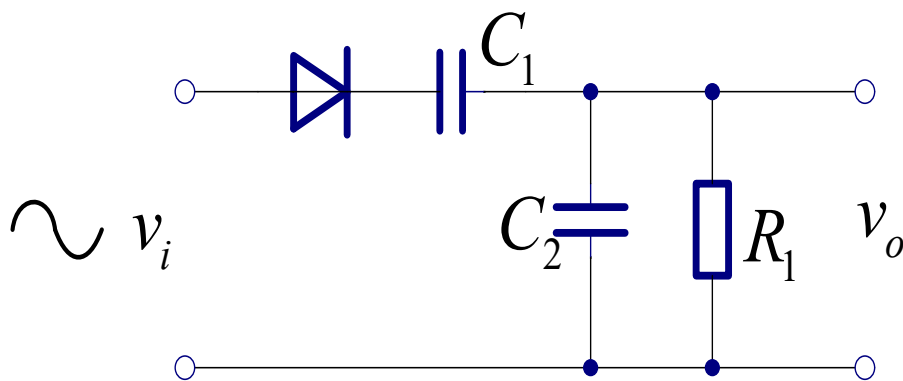
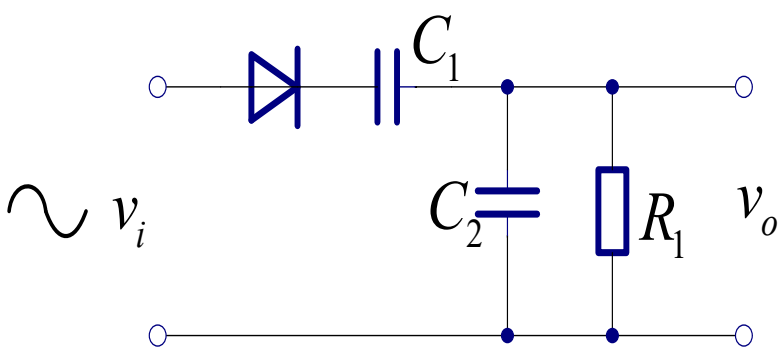


图5-2-5 一个二极管电路

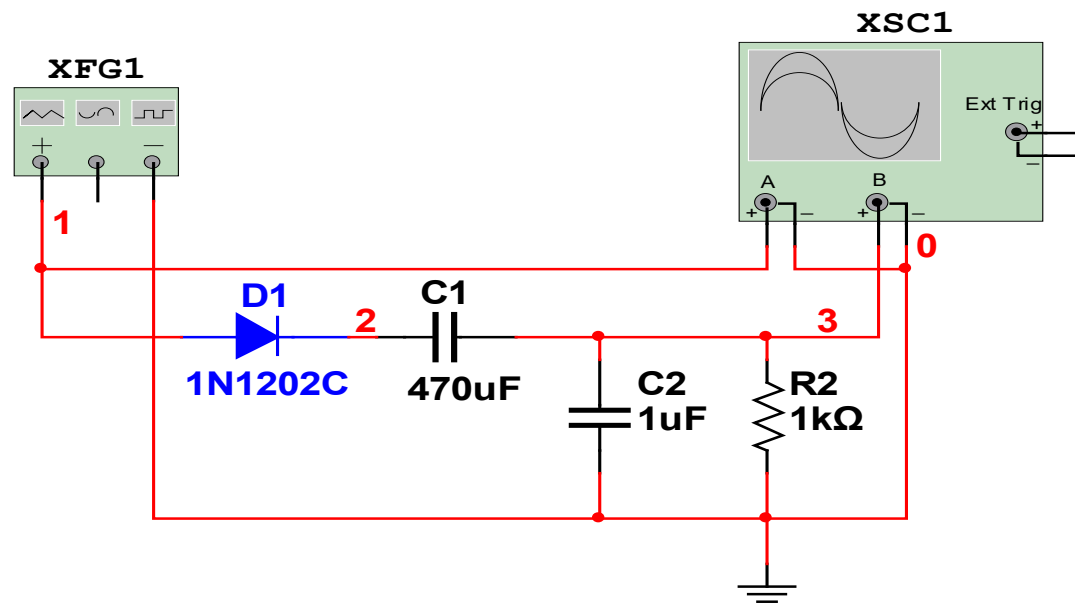
解：



在Multisim中按照图5-2-5连接电路，如图5-2-6（a）所示，其中二极管选用1N1202C。输入正弦交流信号采用信号发生器输出的正弦交流信号，其频率为20 Hz，振幅为3 V。用示波器观察输入和输出信号。



二极管电路

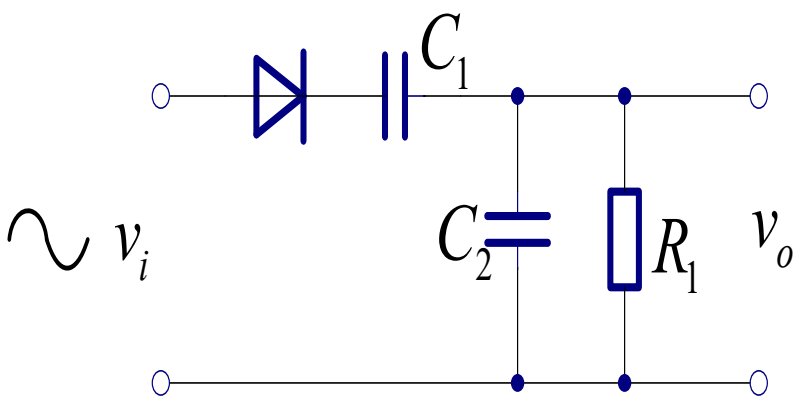


Multisim中的仿真实验电路

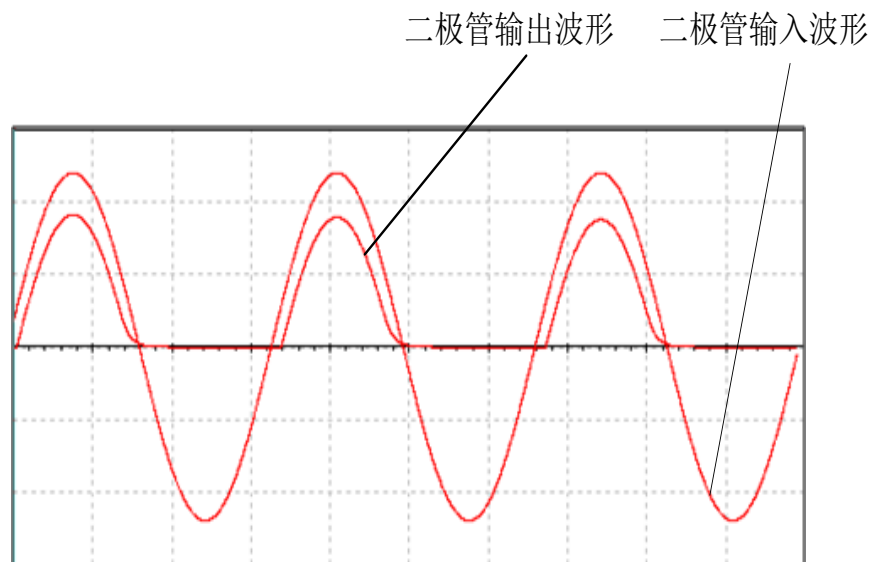
解续



从示波器观察到的信号可以看出，输入信号是完整的正弦波，输出信号则是幅度比输入信号低、频率相同的半波（没有正弦波的负半周）。这说明了二极管的单向导电特性。



二极管电路

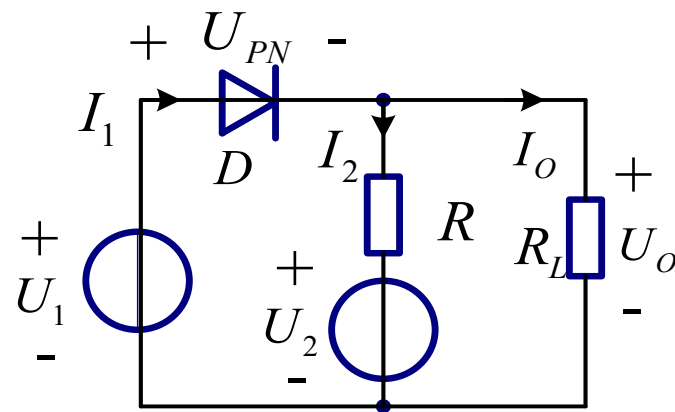


Multisim仿真实验结果

例5-3



试求如图硅二极管电路中电流 I_1 、 I_2 、 I_o 和输出电压 U_o 值。电路中 $R=1k\Omega$ 、 $R_L=3k\Omega$ 、 $U_1=15V$ 、 $U_2=12V$ 。



解： 假设二极管断开，则有 R_L 端电压 U_N ：

$$U_N = \frac{R_L}{R_L + R} \times U_2 = \frac{3}{3+1} \times 12V = 9V$$

由此可知二极管的端电压 $U_{PN} > 0.7V$ ，二极管导通，可以等效为 $0.7V$ 的恒压源

解续

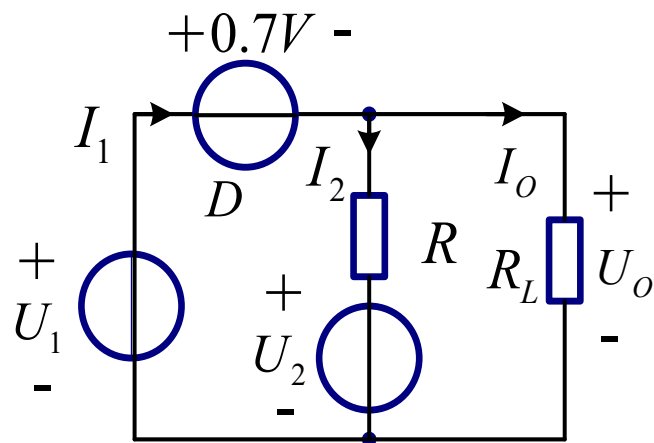


$$U_O = U_1 - U_{PN} = 15 - 0.7 = 14.3V$$

$$I_O = \frac{U_O}{R_L} = \frac{14.3}{3} = 4.8mA$$

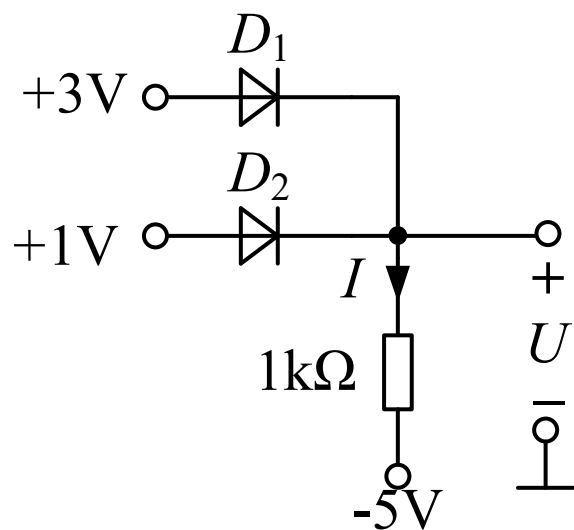
$$I_2 = \frac{U_O - U_2}{R} = \frac{14.3 - 12}{1} = 2.3mA$$

$$I_1 = I_O + I_2 = 4.8 + 2.3 = 7.1mA$$



等效电路

计算 U 和 I



如图 5 所示电路，设两个二极管的正向压降均为 0.6V ，分析二极管 $D1$ 和 $D2$ 工作在导通还是截止状态，并计算电压 U_o 。

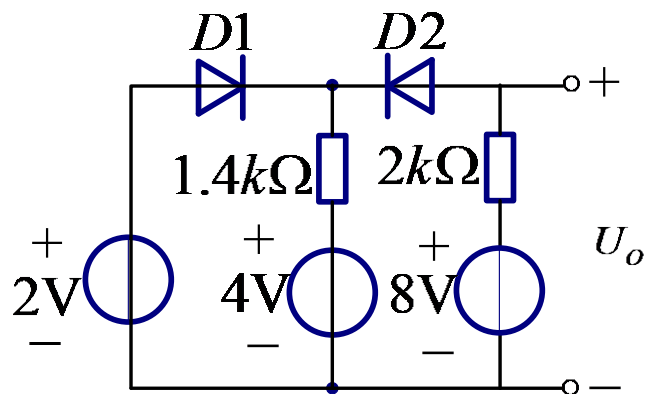


图 5

假设二极管 $D1$ 和 $D2$ 断开，判断得到：

$D1$ 截至；（2 分）

$D2$ 导通；（2 分）

$$U_o = 8 - 2 \times \frac{8 - 4 - 0.6}{2 + 1.4} = 6\text{V} \quad (2 \text{ 分})$$

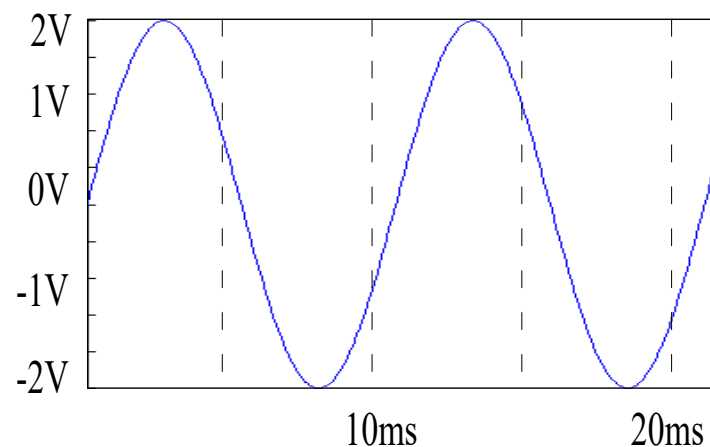
例5-4



某电路的交流信号为正弦波，峰峰值为4V，偏置电压为0V，频率为100Hz。电路的电源电源（二极管可能遇到的最大反向电压）为16V，电路要求经过二极管的信号幅度损失不大于0.7V。试画出此正弦波的波形图，并确定选择二极管时主要参数的选择范围。

解：根据题意要求，选择二极管时应当参考以下参数：

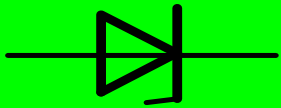
- ① 最大反向击穿电压大于16V
- ② 工作频率高于100Hz
- ③ PN结压降小于0.7V
- ④ 正弦波形右图所示。





5.二极管的分类

- ① 通用二极管 (General purpose diode)
- ② 高频二极管 (High frequency diode)
- ③ 稳压二极管 (齐纳二极管 Zener diode)



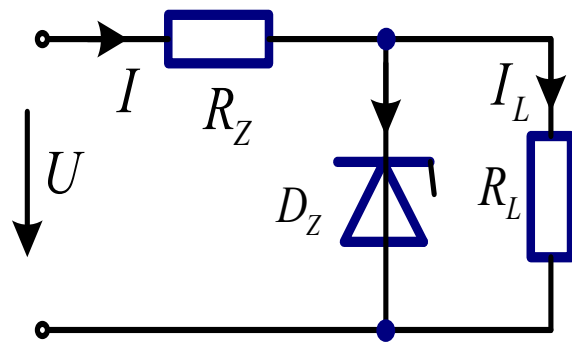
稳压二极管的电路符号

- 稳压二极管工作在击穿区。由于齐纳击穿效应，在维持一定的电流条件下，二极管的反向偏置电压会稳定在一个固定数值上，当反向偏置电压撤销后，能恢复原来状态。
- 主要用于电压限制和调整，也可以作为电路的过电压保护器件

例5-5



图示稳压电路，电源电压 $U=12V$ ，稳压管的稳定电压为 $U_Z=6V$ ，最大稳定电流 $I_{Zmax}=18mA$ ， $R_Z=1k\Omega$ ， $R_L=5k\Omega$ 。试求 I_L ， I_Z 的值，并分析电压稳定过程。



解：先判断稳压管的工作情况，断开稳压管 D_Z ，则支路 R_L 上的电压为
$$U_{RL} = \frac{U}{R_Z + R_L} \times R_L = \frac{12}{5+1} \times 5 = 10V$$

因为 $U_{RL} > U_Z$ ，说明稳压管被击穿，因此电阻 R_L 两端的电压被限制在 $6V$ 。则

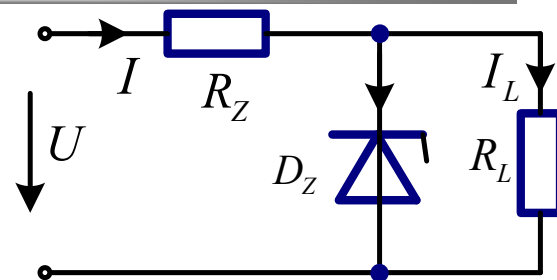
$$I_L = \frac{U_Z}{R_L} = \frac{6}{5} = 1.2mA$$

$$I = \frac{U - U_Z}{R_Z} = \frac{12 - 6}{1} = 6mA$$



于是

$$I_Z = I - I_L = 6 - 1.2 = 4.8 \text{mA}$$



由于 $I_Z < I_{Z\max}$, 稳压管处在正常工作状态。

稳压管稳压过程如下:

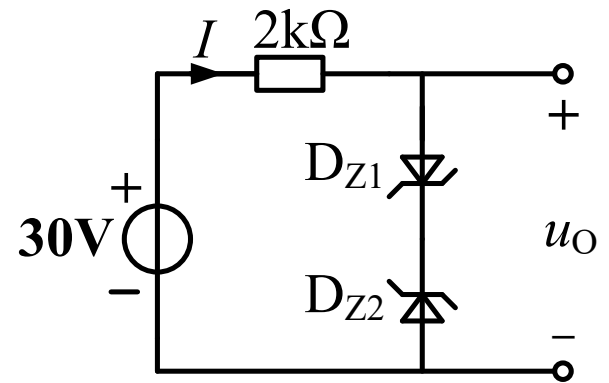
$$U \uparrow \rightarrow U_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow U_{RZ} \uparrow \rightarrow U_Z \downarrow$$

当电源电压下降时, 上述过程相反。

上述分析表明, 稳压管的稳压作用是通过限流电阻 R_Z 的电流调节作用实现的。



电路如图 9 所示，稳压管 D_{Z1} 与 D_{Z2} 的稳压值分别 6V 和 9V，稳定电流是 5mA，正向压降为 0.7V，求电压 u_O 及电流 I





5. 二极管的分类

④ 功率二极管 (Power diode)

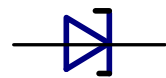
- 允许通过大电流，对电源系统实现整流。由于需要通过大电流，所以功率二极管的结面积比较大，因此不适合于高频条件下使用。

⑤ 肖特基二极管 (Schottky diode)

- 利用金属与半导体接触所形成的势垒来对电流进行控制。特点：具有较低的正向压降（0.3 V至0.6 V）；多数载流子参与导电，有更快的反应速度。

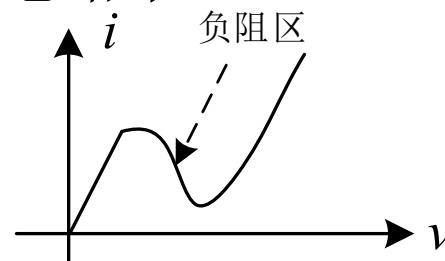
⑥ 隧道二极管 (Tunnel diode)

- 隧道二极管比齐纳二极管具有更大的电压降，可以实现快速击穿。从 $V-A$ 特性可以看出，隧道二极管具有一段负电阻区，可用在高频电路中。



电路符号

隧道二极管的电路符号



$V-A$ 特性



二极管等效

- 一阶等效到三阶等效
- 二极管故障
 - 正反向电阻都很大或很小
- 正向直流电阻随着电流增大而减小
 - 反向直流电阻接近击穿电压时减小
- 手册