

# 导言 我们为什么要学习模拟电子技术

在自然界以及人类活动中，存在着各种各样的信息。承载着这些信息的载体，就叫做**信号**。现实生活中，我们会遇到种类繁多的信号，比如声信号、光信号、温度信号等等，这些时间连续、幅值连续的信号叫做**模拟信号**，也就是数学当中的连续函数。在对这些信号进行处理时，为了方便研究，需要将它们转换成**电信号**。将各种非电信号转换为电信号的器件或装置叫做**传感器**，在电路中常将它描述为**信号源**。

然而，传感器输出的电信号通常是很微弱的，如细胞电生理实验中所检测到的电流仅有皮安（ $pA$ ， $10^{-12} A$ ）量级。对于这些过于微弱的信号，一般情况下既无法直接显示，也很难作进一步处理。因此，需要将这些信号输入到放大电路中进行放大处理。

如何利用各种元件设计出合理的**放大电路**，对信号源进行有效的、减少失真的处理，是这门课程的主要内容。可以说，“放大”一词，就是这门课的核心。

# 课时一：二极管及其基本电路

## 一、PN 结

### 1. 形成

通过一定的工艺，在同一块半导体的一边掺杂成 P 型，另一边掺杂成 N 型，当多子扩散与少子漂移达到动态平衡时，交界面上就会形成稳定的空间电荷区，又称势垒区或**耗尽层**，即为 **PN 结** 的形成。

### 2. 单向导电性

PN 结正向偏置时，耗尽层变窄，呈现低电阻，称为正向导通；

PN 结反向偏置时，耗尽层变宽，呈现高电阻，称为反向截止。

### 3. 电容效应

PN 结的电容效应包括扩散电容  $C_D$  和势垒电容  $C_B$ 。

### 4. 反向击穿特性

PN 结的反向击穿分为**雪崩击穿**和**齐纳击穿**两种现象。

## 二、半导体二极管

半导体二极管就是一个封装的 PN 结。

### 1. 二极管的伏安特性

#### 1) 伏安特性表达式

二极管是一个非线性器件，其伏安特性的数学表达式为

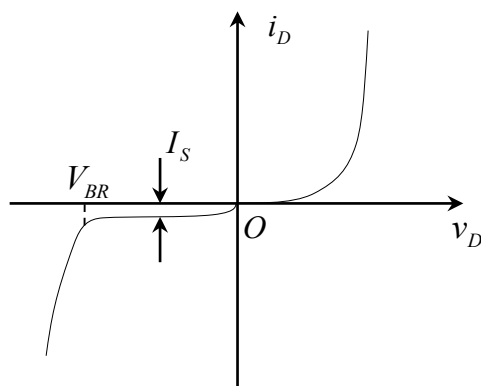
$$i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$$

在室温下 ( $T = 300K$  时),  $V_T = 26mV$ 。

[例 1.1]在室温下, 若二极管的反向饱和电流为  $1nA$ , 求它的正向电流为  $0.5mA$  时应加多大的电压。

## 2) 伏安特性曲线

二极管的伏安特性曲线如下图所示。



正向特性： $v_D$  小于**死区电压** (开启电压) 时,  $i_D \approx 0$  ; 正向部分的开始阶段, 电流增加的比较慢 ; 在电流  $i_D$  较大时, 电压  $v_D$  随电流变化很小, 称为**导通电压**。

(死区电压 : 硅管为  $0.5V$ , 锗管为  $0.1V$  ; 导通电压 : 硅管为  $0.7V$ , 锗管为  $0.2V$  )

反向特性 : 当反向电压  $|v_D| \gg V_T$ , 且小于  $|V_{BR}|$  时,  $i_D \approx -I_S$ , 反向饱和电流很小。当反向电压的绝对值达到  $|V_{BR}|$  后, 反向电流会突然增大, 二极管**反向击穿**。

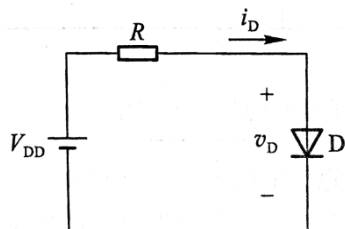
## 2. 温度特性

温度升高时, 二极管的正向曲线左移, 正向压降减小 ; 温度每升高  $1^\circ C$ , 正向电压降将降低  $2mV \sim 2.5mV$  。

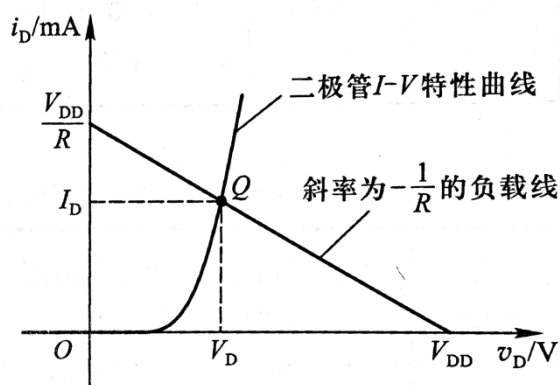
二极管的反向饱和电流  $I_S$  也随温度的改变而改变, 温度每升高  $10^\circ C$ , 反向饱和电流将增加一倍。

### 三、二极管基本电路的分析方法

在二极管两端接入正向电源和电阻，就构成了最基本的二极管电路。

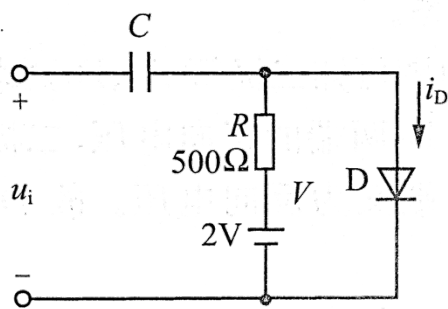


#### 1. 图解分析法

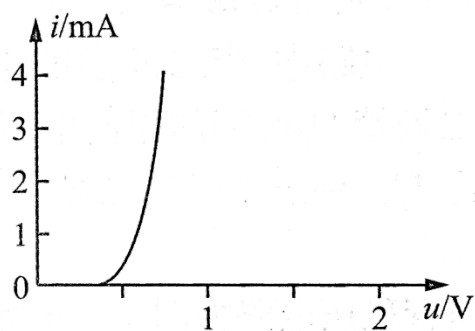


图解分析的前提是已知二极管的  $I$ - $V$  特性曲线，因此在复杂的电路中，图解法并不实用，但对理解电路的工作原理和工作点的概念有很大帮助。

**[例 1.2]** 电路如图 1，二极管的伏安特性如图 2，常温下  $V_T \approx 26mV$ ，问：二极管在  $u_i$  为零时的电流和电压各为多少？

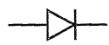
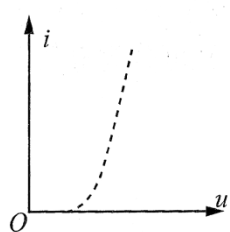


(a)

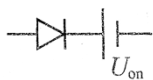
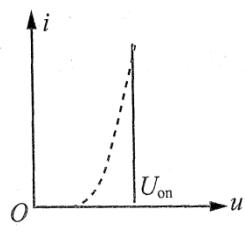


(b)

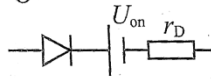
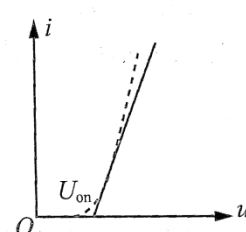
## 2. 模型分析法



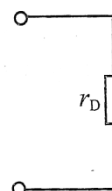
(a)



(b)



(c)

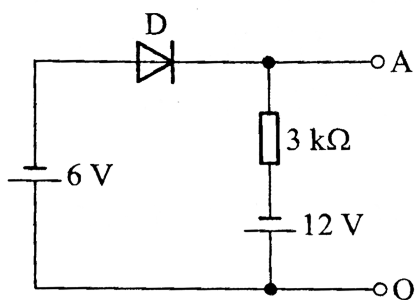


(d)

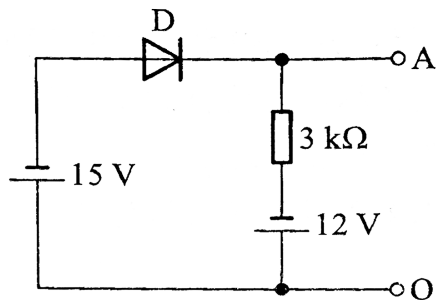
- a. 理想模型：正向导通时，二极管正向压降为零，相当于一根导线；反向截止时，二极管电流为零，相当于开路。

**[例 1-3]**判断下列图中的二极管是导通的还是截止的，并求出 AO 两端电压  $V_{AO}$ ，

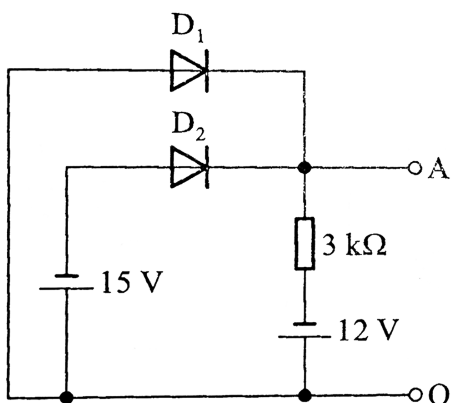
设二极管是理想的。



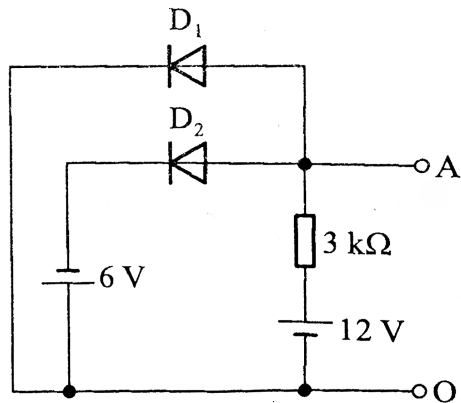
(a)



(b)

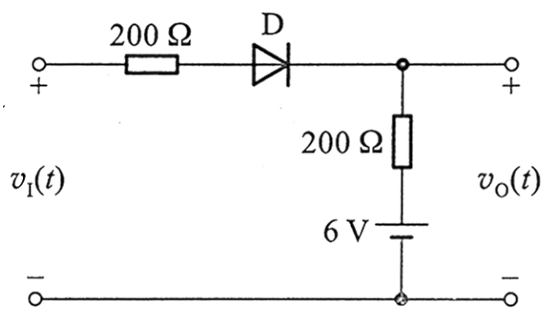


(c)

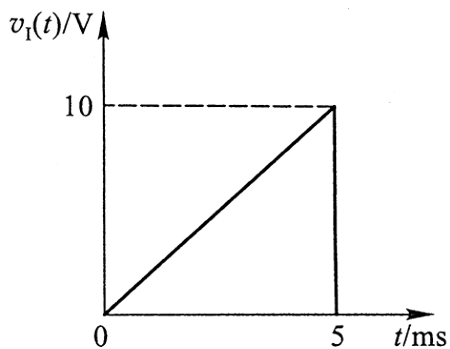


(d)

[例 1-4] 二极管电路如图 a，设输入电压  $u_i$  的波形如图 b，在  $0 < t < 5\text{ms}$  的时间间隔内，试绘出  $v_o(t)$  的波形，设二极管是理想的。



(a)



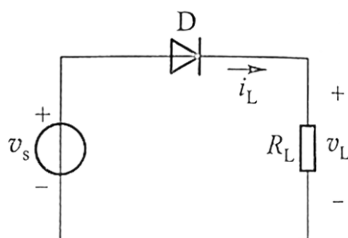
(b)

b. 恒压降模型：正向导通时，二极管正向压降为常数（硅管  $0.7\text{V}$ ，锗管  $0.2\text{V}$ ）；

反向截止时，二极管电流为零，相当于开路。

[例 1-5] 使用恒压降模型，重复例 1-4。

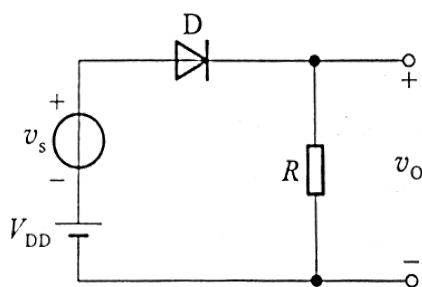
**[例 1-6]**电路如图，电源  $v_s = 2 \sin \omega t V$ ，试分别使用理想模型和恒压降模型（其中二极管为硅管）分析，绘出负载  $R_L$  两端的电压波形，并标出幅值。



- c. 折线模型：用一电池电压和一个电阻  $r_D$  串联的电路模型。 $r_D$  可用折线的斜率求出。
- d. 小信号模型：如果电路中除了直流电源外，还有微变信号（交流小信号）时，则对后者而言，二极管可用交流等效电阻  $r_d$  表示，其值与静态工作点有关，即  $r_d \approx V_T / I_{DQ}$ ，其中  $V_T = 26mV$ （常温下）。

**[例 1-7]**电路如图，D 为硅管， $V_{DD} = 2V$ ， $R = 1k\Omega$ ， $v_s = 50 \sin(2\pi \times 50t)mV$ 。

- 1) 静态时，求二极管中的静态电流和  $v_o$  的静态电压；
- 2) 动态时，求二极管中的交流电流振幅和  $v_o$  的交流电压振幅；
- 3) 求输出电压  $v_o$  的总量。



#### 四、稳压二极管——齐纳击穿

稳压管, 又称齐纳二极管, 是一种特殊的二极管, 其伏安特性与二极管类似, 但它的反向击穿特性很陡。因此, 稳压管通常工作于反向击穿状态来稳定直流电压。

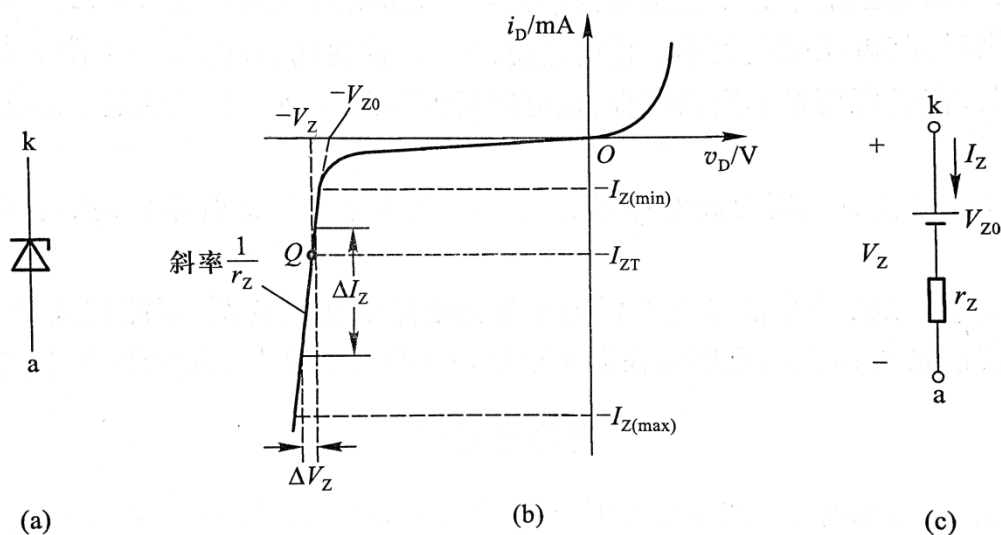


图 3.5.1 稳压管的代表符号与  $I$ - $V$  特性  
(a) 代表符号 (b)  $I$ - $V$  特性 (c) 反向击穿时的模型

图中的  $V_Z$  表示反向击穿电压, 即稳压管的稳定电压。稳压管的正常工作状态是反向击穿状态。

**[例 1-8]** 电路如图, 所有稳压管均为硅管, 且稳定电压  $V_Z = 8V$ , 设  $v_i = 15 \sin \omega t V$ , 试绘出  $v_{o1}$  和  $v_{o2}$  的波形。

