



## 第 5 章 频谱的线性搬移电路

---

- 5.1 非线性电路的分析方法
- 5.2 二极管电路
- 5.3 差分对电路
- 5.4 其它频谱线性搬移电路



## 5.2 二极管电路

---

二极管电路广泛用于通信设备中，特别是平衡电路和环形电路。

优点：电路简单，组合频率分量少，工作频带宽

缺点： 无增益

作用：振幅调制，解调，混频等



## 5.2 二极管电路

### 一、单二极管电路

#### ① 电路

二极管是非线性器件，在电路中会产生各种组合频率分量

用滤波器取出所需的频率分量

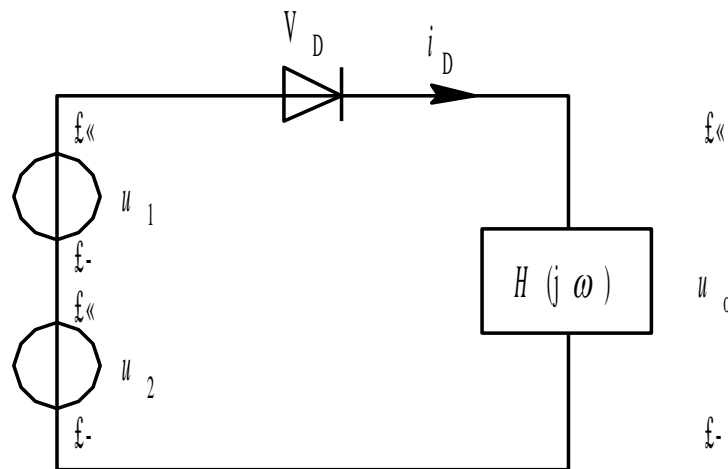
$u_1$ ——输入信号，要处理的信号

$u_2$ ——参考信号， $U_2 \gg U_1$

设二极管工作在大信号状态，即  $U_2 > 0.5$

忽略  $u_o$  对回路的反作用，则有：

$$u_D = u_1 + u_2$$



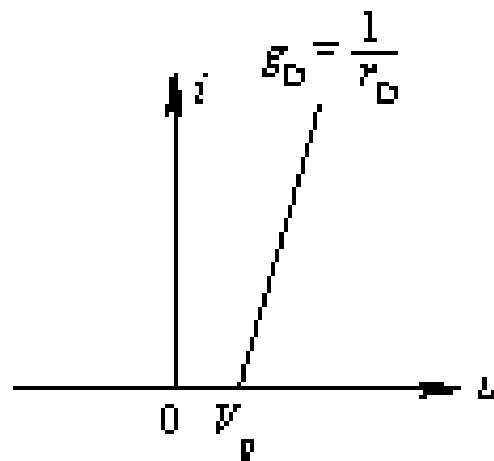


## 5.2 二极管电路

### 一、单二极管电路

#### ① 电路

由于二极管工作在大信号状态，主要工作在截止区和导通区，对二极管的伏安特性可作折线近似



$$i_D = \begin{cases} g_D u_D & u_D \geq V_p \\ 0 & u_D < V_p \end{cases}$$



## 5.2 二极管电路

### 一、单二极管电路

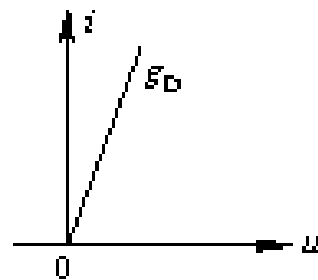
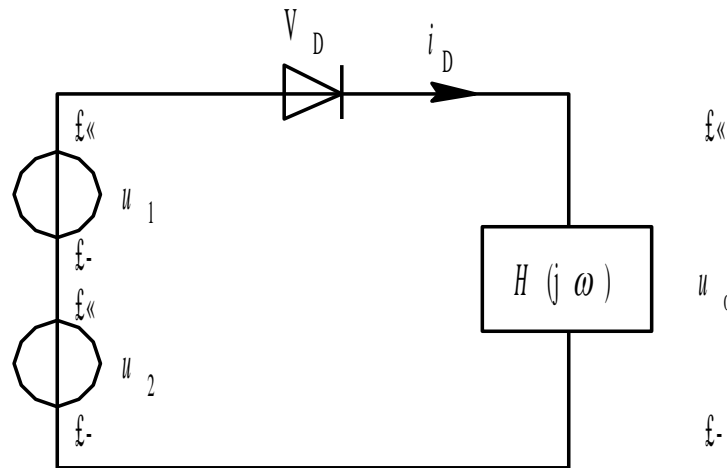
#### ② 分析

$$\left. \begin{array}{l} U_2 \gg U_1 \\ u_D = u_1 + u_2 \end{array} \right\} \text{故二极管主要由 } u_2 \text{ 控制}$$

$$i_D = \begin{cases} g_D u_D & u_2 \geq V_p \\ 0 & u_2 < V_p \end{cases}$$

一般  $V_p$  较小，可令  $V_p = 0$ ，也可在电路中加入一固定偏置电压  $E_0$ ，用以抵消  $V_p$ ，则

$$i_D = \begin{cases} g_D u_D & u_2 \geq 0 \\ 0 & u_2 < 0 \end{cases}$$





## 5.2 二极管电路

### 一、单二极管电路

#### ② 分析

$$i_D = \begin{cases} g_D u_D & u_2 \geq 0 \\ 0 & u_2 < 0 \end{cases}$$

设  $u_2 = U_2 \cos \omega_2 t$ , 则

$$i_D = \begin{cases} g_D u_D & 2n\pi - \frac{\pi}{2} \leq \omega_2 t < 2n\pi + \frac{\pi}{2} \\ 0 & 2n\pi + \frac{\pi}{2} \leq \omega_2 t < 2n\pi + \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

$$u_D = u_1 + u_2$$

或:  $i_D = g(t)u_D = g_D K(\omega_2 t)u_D$

在前面的假设条件下, 二极管电路可等效一线性时变电路, 其时变电导  $g(t)$  为

$$g(t) = g_D K(\omega_2 t)$$

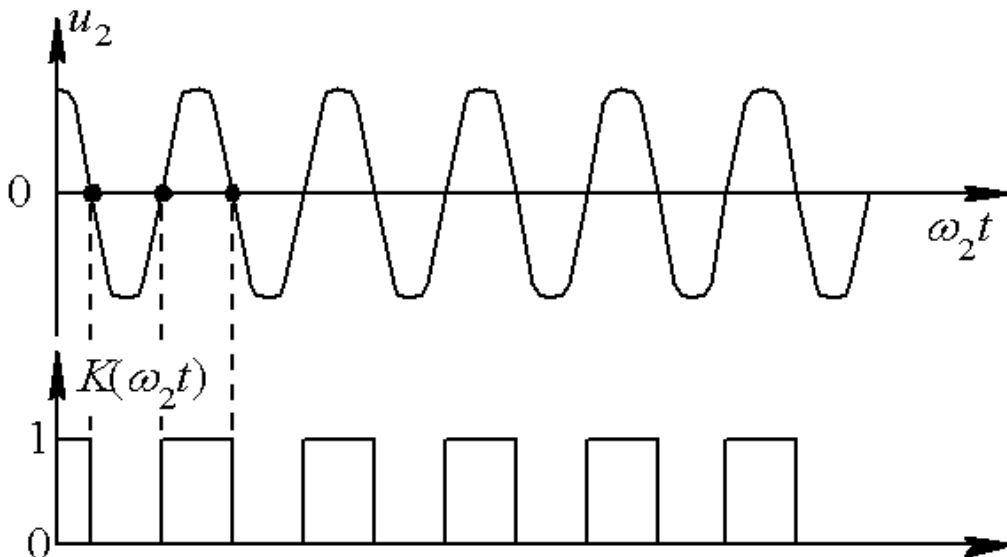


## 5.2 二极管电路

### 一、单二极管电路

$$i_D = g(t)u_D = g_D K(\omega_2 t) u_D$$

$K(\omega_2 t)$  为开关函数, 它在  $u_2$  的正半周时等于 1, 在负半周时为零, 即



$$K(\omega_2 t) = \begin{cases} 1 & 2n\pi - \frac{\pi}{2} \leq \omega_2 t < 2n\pi + \frac{\pi}{2} \\ 0 & 2n\pi + \frac{\pi}{2} \leq \omega_2 t < 2n\pi + \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$



## 5.2 二级管电路

### 一、单二级管电路

$$K(\omega_2 t) = \begin{cases} 1 & 2n\pi - \frac{\pi}{2} \leq \omega_2 t < 2n\pi + \frac{\pi}{2} \\ 0 & 2n\pi + \frac{\pi}{2} \leq \omega_2 t < 2n\pi + \frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

付立叶级数展开，有：

$$K(\omega_2 t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_2 t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_2 t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_2 t - \cdots \\ + (-1)^{n+1} \frac{2}{(2n-1)\pi} \cos(2n-1)\omega_2 t + \cdots$$





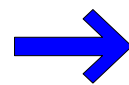
## 5.2 二级管电路

### 一、单二级管电路

$$i_D = g(t)u_D = g_D K(\omega_2 t) u_D$$

$$K(\omega_2 t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_2 t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_2 t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_2 t - \dots$$

$$+ (-1)^{n+1} \frac{2}{(2n-1)\pi} \cos(2n-1)\omega_2 t + \dots$$



$$i_D = g_D \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_2 t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_2 t + \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_2 t - \dots \right] (u_1 + u_2)$$

若  $u_1 = U_1 \cos \omega_1 t$ , 为单一频率信号, 则  $i_D$  中包含的频率分量有:

$$\square \omega_1, \omega_2$$

$$\square (2n+1)\omega_2 \square \omega_1$$

$$\square 2n\omega_2$$

分析条件: (1) 大信号;

(2)  $U_2 \gg U_1$ ;

(3) 忽略  $u_o$  的反作

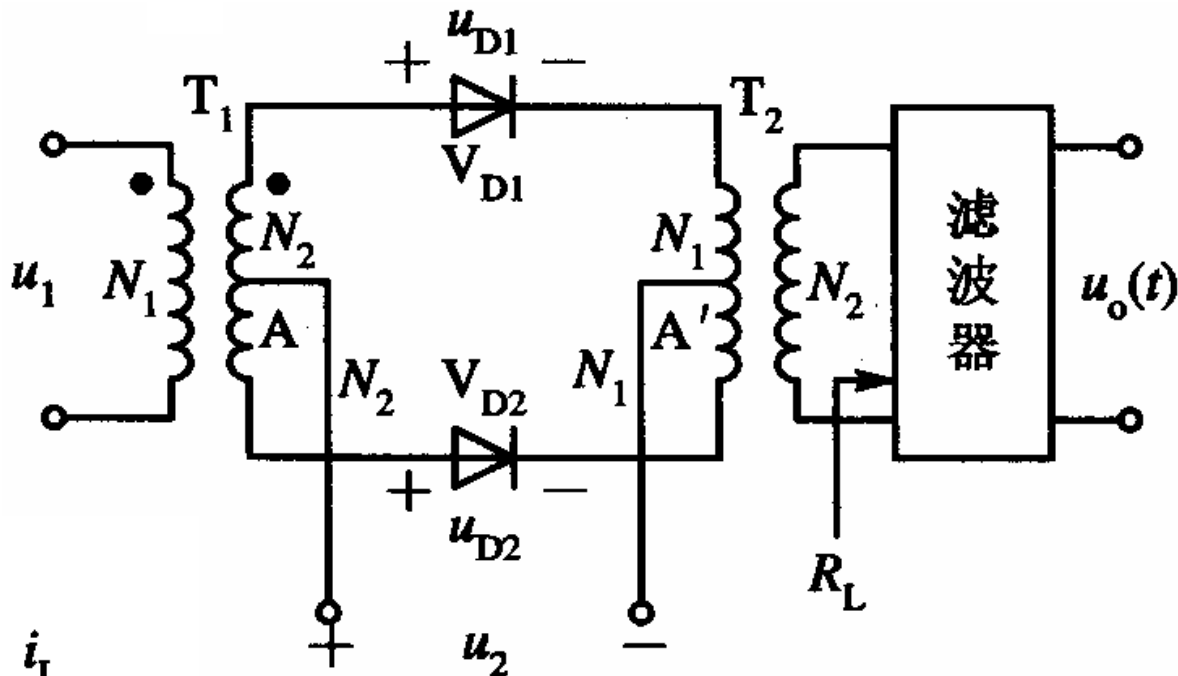
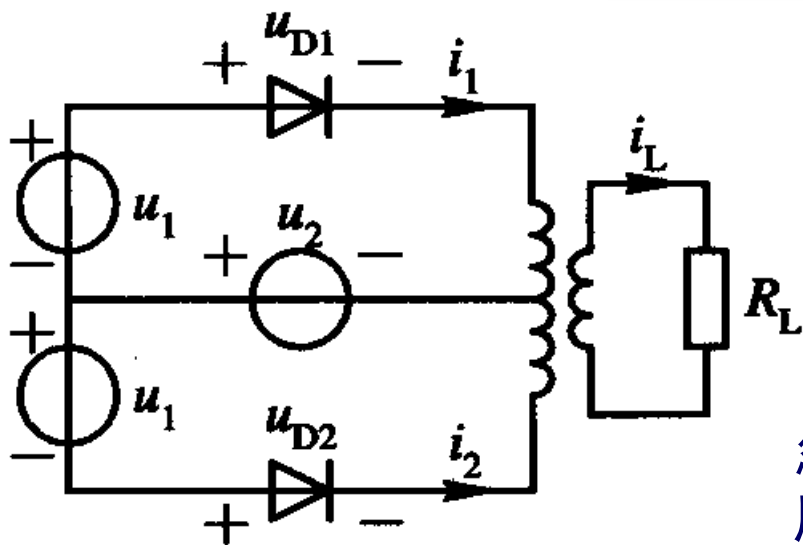


## 5.2 二极管电路

### 二、二极管平衡电路

#### ① 电路

它是由两个性能一致的二极管及中心抽头变压器  $T_1$ 、 $T_2$  接成平衡电路的。



$$N_1 = N_2 ;$$

工作条件与单二极管相同  
( $U_2 \gg U_1$ , 大信号)

忽略输出电压的反作用

$$\begin{aligned} u_{D1} &= u_2 + u_1 \\ u_{D2} &= u_2 - u_1 \end{aligned}$$



## 5.2 二极管电路

### 二、二极管平衡电路

#### ② 工作原理

$$i_1 = g_1(t)u_{D1} = g_D K(\omega_2 t)(u_2 + u_1)$$

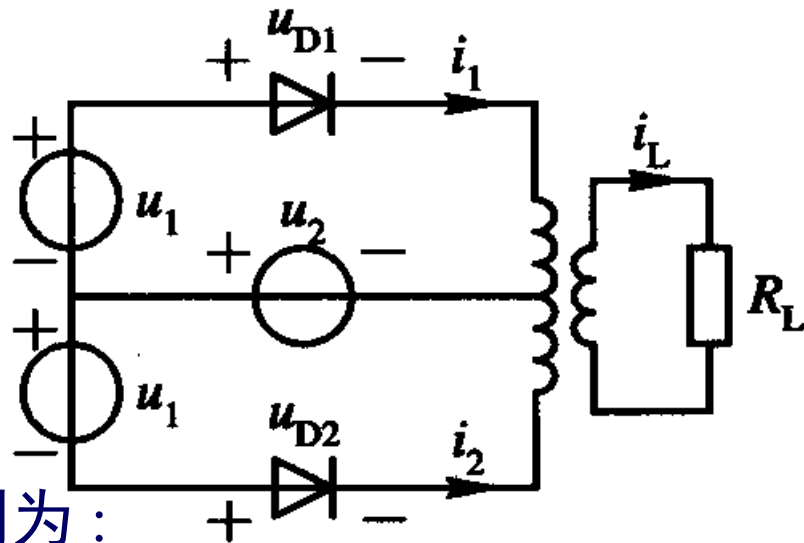
$$i_2 = g_1(t)u_{D2} = g_D K(\omega_2 t)(u_2 - u_1)$$

$i_1$ 、 $i_2$  在  $T_2$  次级产生的电流分别为：

$$i_{L1} = \frac{N_1}{N_2} i_1 = i_1$$

$$i_{L2} = \frac{N_1}{N_2} i_2 = i_2$$

$$i_L = i_{L1} - i_{L2} = i_1 - i_2 \quad \rightarrow \quad i_L = 2g_D K(\omega_2 t)u_1$$





## 5.2 二极管电路

### 二、二极管平衡电路

#### ② 工作原理

$$i_L = 2g_D K(\omega_2 t) u_1$$

$K(\omega_2 t)$  中的频率分量有:  $(2n+1)\omega_2$

令  $u_1 = U_1 \cos \omega_1 t$ , 则

$$\begin{aligned} i_L = & g_D U_1 \cos \omega_1 t + \frac{2}{\pi} g_D U_1 \cos(\omega_2 + \omega_1)t + \frac{2}{\pi} g_D U_1 \cos(\omega_2 - \omega_1)t \\ & - \frac{2}{3\pi} g_D U_1 \cos(3\omega_2 + \omega_1)t - \frac{2}{3\pi} g_D U_1 \cos(3\omega_2 - \omega_1)t + \cdots \end{aligned}$$

$i_L$  中的频率分量有:

- $\square \omega_1$
- $\square (2n+1)\omega_2 \square \omega_1$



## 5.2 二极管电路

### 二、二极管平衡电路

#### ② 工作原理

平衡电路	$\square \omega_1$	单二极管电路	$\square \omega_1, \omega_2$
	$\square (2n+1)\omega_2$		$\square (2n+1)\omega_2$
	$\square \omega_1$		$\square \omega_1$
			$\square 2n\omega_2$

结论：二极管平衡电路相对单二极管电路来说，基波分量和偶次谐波分量被抵消掉

原因： 电路对称

注：当考虑  $R_L$  的反应电阻对二极管电流的影响时，要用包括反映电阻的总电导来代替  $g_D$

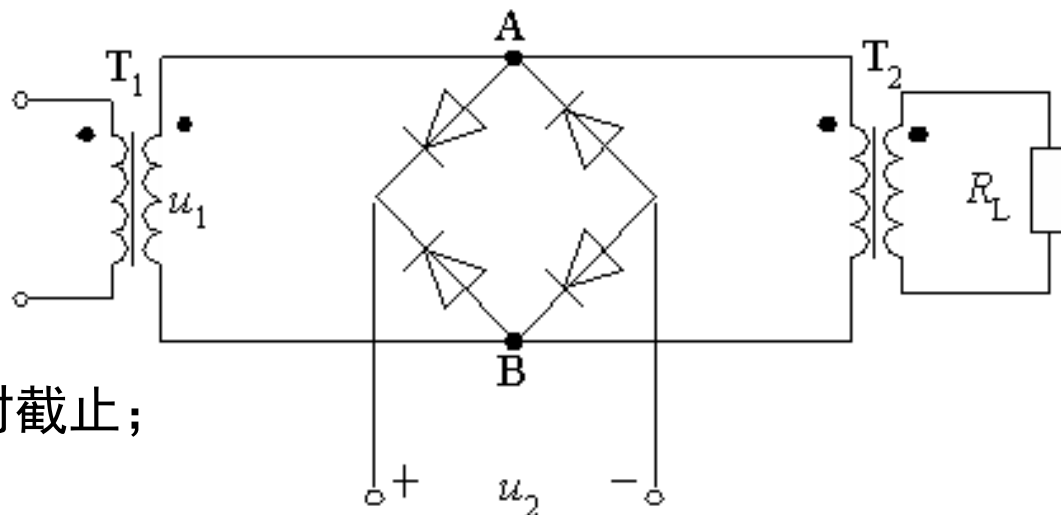
如果  $T_2$  次级所接负载为宽带电阻，则初级两端的反映电阻为  $4R_L$ 。对  $i_1$ 、 $i_2$  各支路的电阻为  $2R_L$ 。此时用总电导

$$g_D = \frac{1}{r_D + 2R_L}$$



## 5.2 二极管电路

### 三、二极管桥式电路



$u_2 > 0$  时，四个二极管同时截止；

$$u_{AB} = u_1$$

$u_2 < 0$  时，四个二极管同时导通；

$$u_{AB} = 0$$

$$u_{AB} = K(\omega_2 t) u_1$$

与平衡电路结论一致

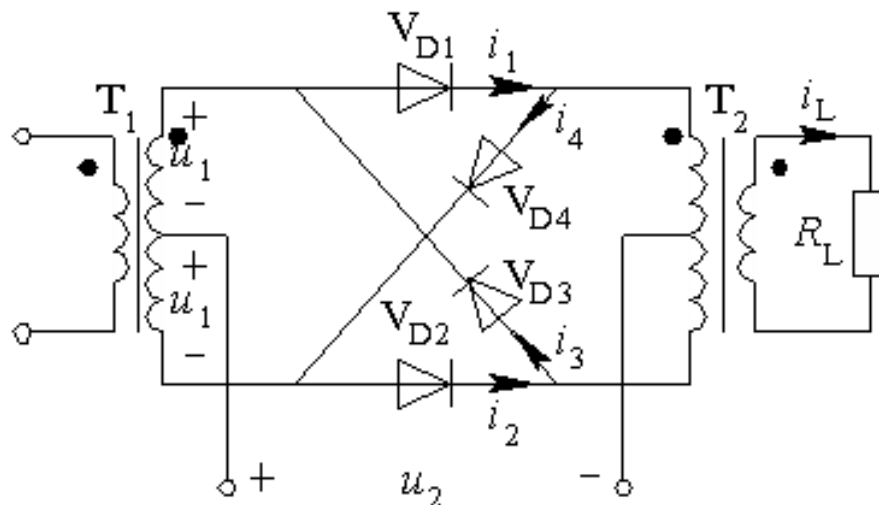


## 5.2 二极管电路

### 四、二极管环形电路

#### ① 基本电路

与二极管平衡电路相比，多接了两只二极管  $V_{D3}$ ， $V_{D4}$ ，四只二极管方向一致，组成一个环路，故称为二极管环形电路。



当  $u_2 \geq 0$  时，

$V_{D1}$ ， $V_{D2}$  导通；

$V_{D3}$ ， $V_{D4}$  截止；

当  $u_2 < 0$  时，

$V_{D1}$ ， $V_{D2}$  截止；

$V_{D3}$ ， $V_{D4}$  导通；

$$\square u_{D1} = u_1 + u_2$$

$$\square u_{D2} = u_2 - u_1$$

$$\square u_{D3} = -u_1 - u_2$$

$$\square u_{D4} = -u_2 + u_1$$



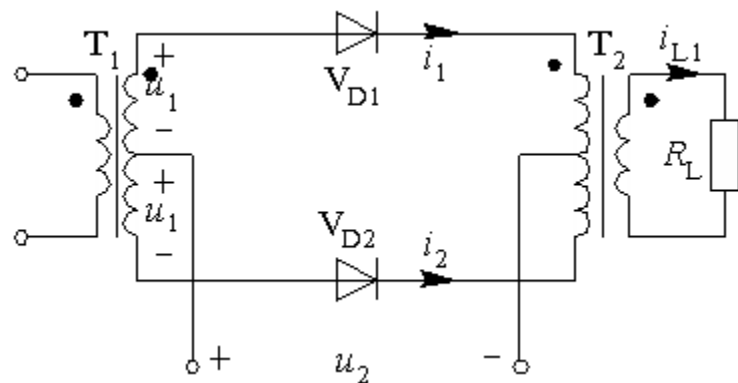
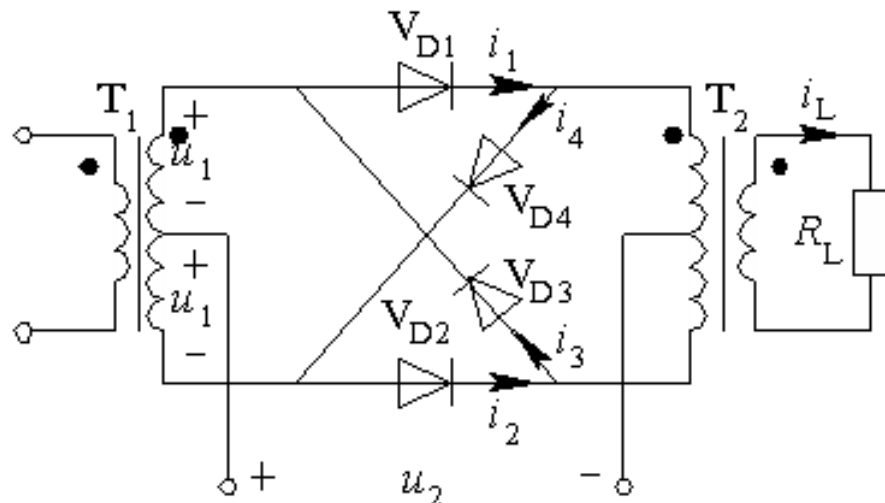
## 5.2 二极管电路

### 四、二极管环形电路

#### ② 工作原理

当  $u_2 \geq 0$  时

$$i_{L1} = i_1 - i_2 = 2g_D K(\omega_2 t) u_1$$





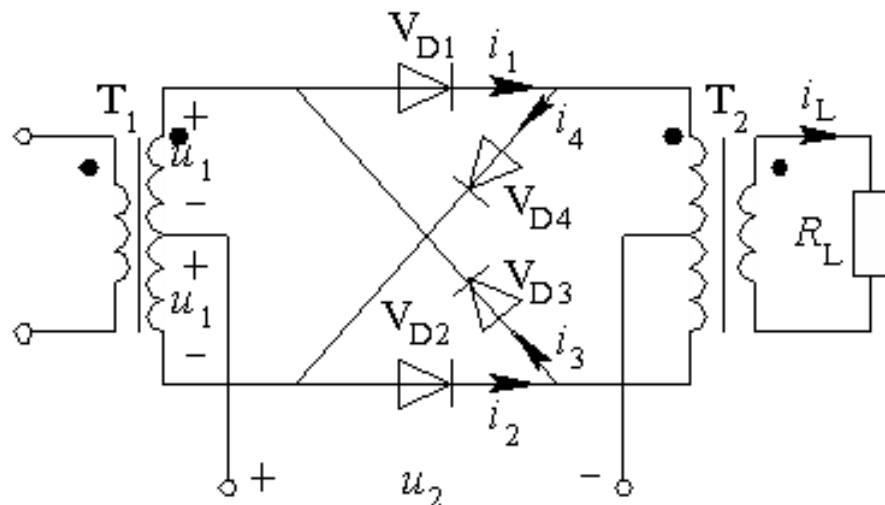


## 5.2 二极管电路

### 四、二极管环形电路

#### ② 工作原理

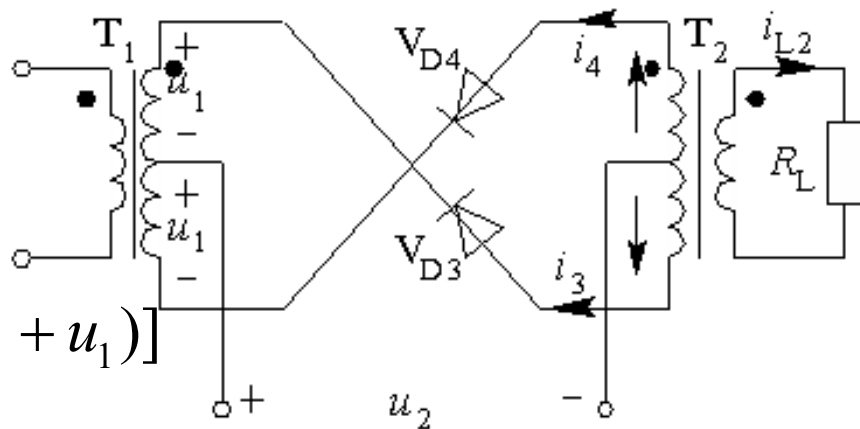
当  $u_2 < 0$  时



$$i_{L2} = i_3 - i_4 = g_D K(\omega_2 t - \pi) u_{D3} - g_D K(\omega_2 t - \pi) u_{D4}$$

$$= g_D K(\omega_2 t - \pi) [(-u_1 - u_2) - (-u_2 + u_1)]$$

$$= -2g_D K(\omega_2 t - \pi) u_1$$

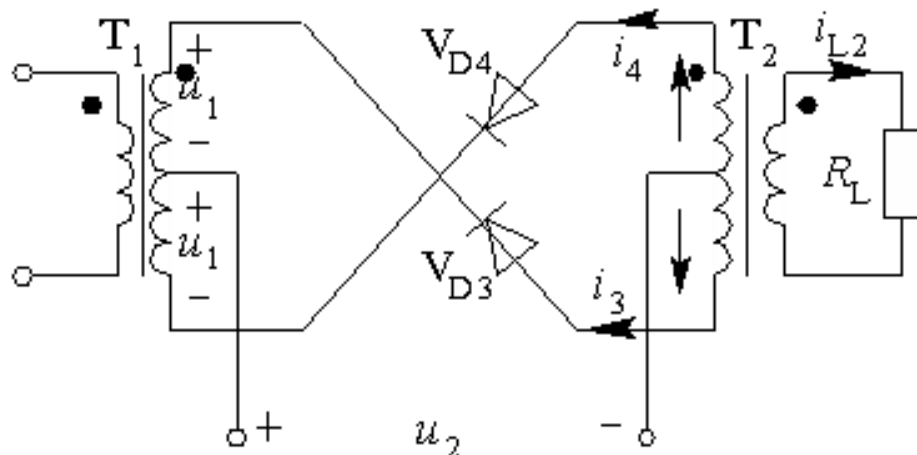
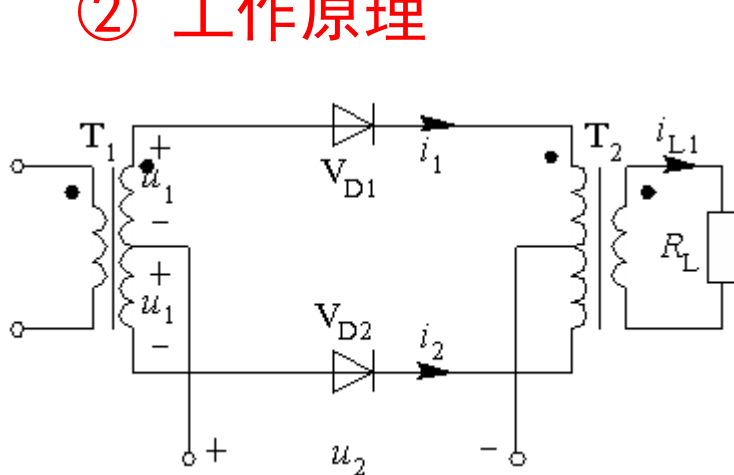




## 5.2 二极管电路

### 四、二极管环形电路

#### ② 工作原理



$$i_{L1} = i_1 - i_2 = 2g_D K(\omega_2 t) u_1 \quad i_{L2} = -2g_D K(\omega_2 t - \pi) u_1$$

$$\begin{aligned} i_L &= i_{L1} + i_{L2} = 2g_D u_1 [K(\omega_2 t) - K(\omega_2 t - \pi)] \\ &= 2g_D u_1 K'(\omega_2 t) \end{aligned}$$



## 5.2 二极管电路

### 四、二极管环形电路

#### ② 工作原理

$$\begin{aligned}
 i_L &= i_{L1} + i_{L2} = 2g_D u_1 [K(\omega_2 t) - K(\omega_2 t - \pi)] \\
 &= 2g_D u_1 K'(\omega_2 t)
 \end{aligned}$$

$$K'(\omega_2 t) = K(\omega_2 t) - K(\omega_2 t - \pi) = \begin{cases} 1 & u_2 \geq 0 \\ -1 & u_2 < 0 \end{cases}$$

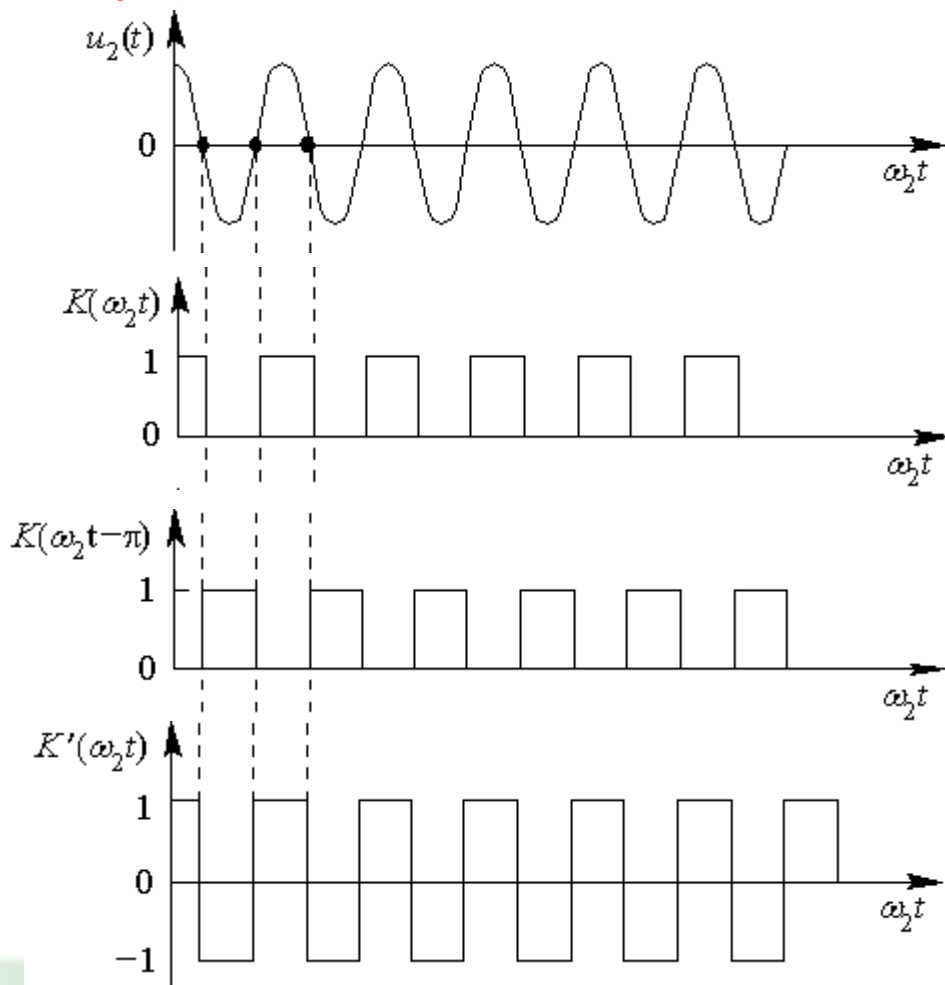
$$K(\omega_2 t) + K(\omega_2 t - \pi) = 1$$



## 5.2 二极管电路

### 四、二极管环形电路

#### ② 工作原理





## 5.2 二极管电路

### 四、二极管环形电路

#### ② 工作原理

$$K(\omega_2 t) = K(\omega_2 t) - K(\omega_2 t - \pi) = \begin{cases} 1 & u_2 \geq 0 \\ -1 & u_2 < 0 \end{cases}$$

$$K(\omega_2 t - \pi) = 1 - K(\omega_2 t)$$

$$K(\omega_2 t) + K(\omega_2 t - \pi) = 1$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \cos \omega_2 t + \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_2 t - \frac{2}{5\pi} \cos 5\omega_2 t + \blacklozenge \\ &\quad + (-1)^n \frac{2}{(2n+1)\pi} \cos(2n+1)\omega_2 t + \blacklozenge \blacklozenge \blacklozenge \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K(\omega_2 t) &= \frac{4}{\pi} \cos \omega_2 t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_2 t + \frac{4}{5\pi} \cos 5\omega_2 t + \blacklozenge \blacklozenge \blacklozenge \\ &\quad + (-1)^{n+1} \frac{4}{(2n+1)\pi} \cos(2n+1)\omega_2 t + \blacklozenge \blacklozenge \blacklozenge \end{aligned}$$



## 5.2 二级管电路

### 四、二级管环形电路

#### ② 工作原理

$$u_1 = U_1 \cos(\omega_1 t)$$

$$\begin{aligned}
 i_L &= 2g_D u_1 K'(\omega_2 t) \\
 &= 2g_D u_1 \left[ \frac{4}{\pi} \cos \omega_2 t - \frac{4}{3\pi} \cos 3\omega_2 t + \frac{4}{5\pi} \cos 5\omega_2 t + \right. \\
 &\quad \left. + (-1)^{n+1} \frac{4}{(2n+1)\pi} \cos(2n+1)\omega_2 t + \dots \right] \\
 &= \frac{4}{\pi} g_D U_1 \cos(\omega_2 + \omega_1)t + \frac{4}{\pi} g_D U_1 \cos(\omega_2 - \omega_1)t \\
 &\quad - \frac{4}{3\pi} g_D U_1 \cos(3\omega_2 + \omega_1)t - \frac{4}{3\pi} g_D U_1 \cos(3\omega_2 - \omega_1)t \\
 &\quad + \frac{4}{5\pi} g_D U_1 \cos(5\omega_2 + \omega_1)t - \frac{4}{5\pi} g_D U_1 \cos(5\omega_2 - \omega_1)t + \dots
 \end{aligned}$$



## 5.2 二极管电路

### 四、二极管环形电路

#### ② 工作原理

$$\begin{aligned}
 i_L = & \frac{4}{\pi} g_D U_1 \cos(\omega_2 + \omega_1)t + \frac{4}{\pi} g_D U_1 \cos(\omega_2 - \omega_1)t \\
 & - \frac{4}{3\pi} g_D U_1 \cos(3\omega_2 + \omega_1)t - \frac{4}{3\pi} g_D U_1 \cos(3\omega_2 - \omega_1)t \\
 & + \frac{4}{5\pi} g_D U_1 \cos(5\omega_2 + \omega_1)t - \frac{4}{5\pi} g_D U_1 \cos(5\omega_2 - \omega_1)t + \dots
 \end{aligned}$$

$i_L$  中的频分量为:  $(2n+1)\omega_2 \square \omega_1$

平衡电路  $\square \omega_1$   
 $\square (2n+1)\omega_2 \square \omega_1$

当  $\omega_2$  很大时,  $3\omega_2 \square \omega_1$  以上的  
 频率分量很容易被滤除, 因此环形  
 电路更接近于理想乘法器

环形电路在平衡电路的基础上  
 , 又消除了输入信号  $u_1$  的频率  
 分量, 而且输出的频率分量  
 $(2n+1)\omega_2 \square \omega_1$   
 的幅度是平衡电路的两倍

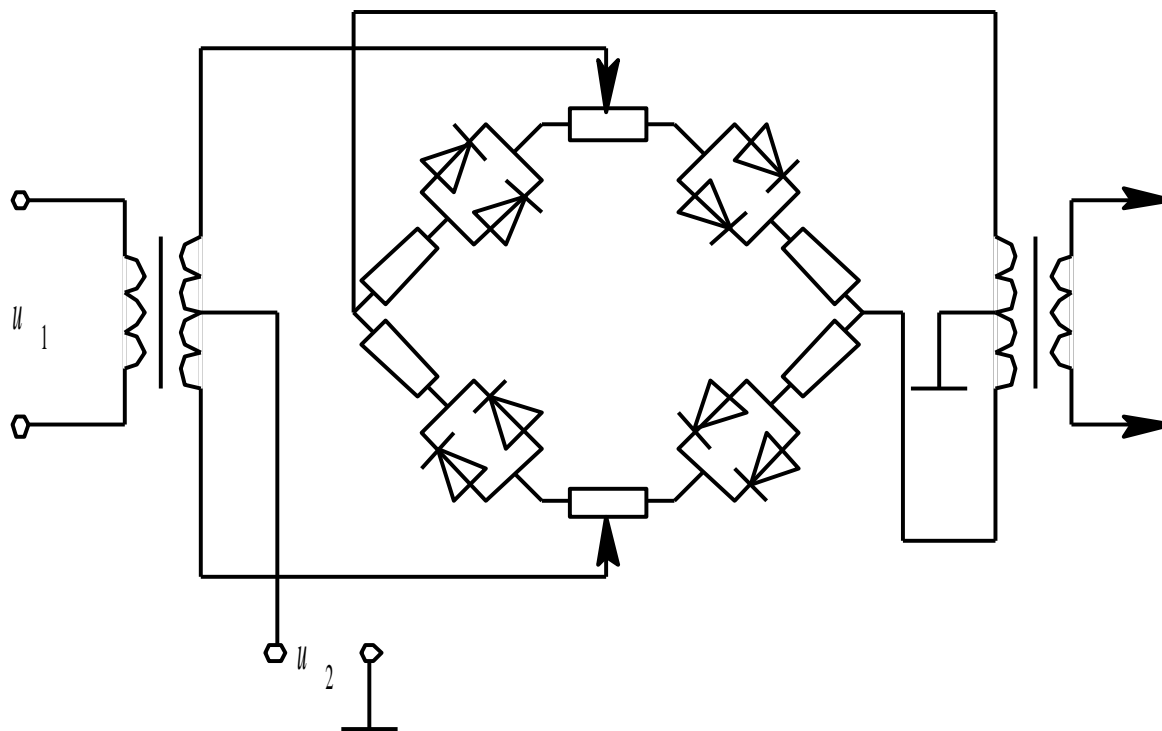
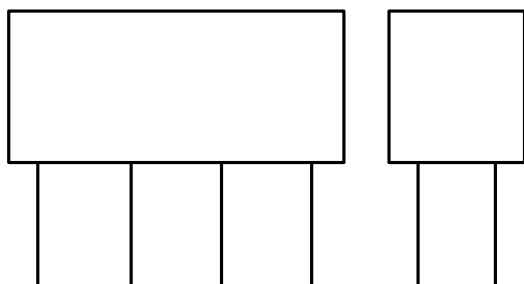
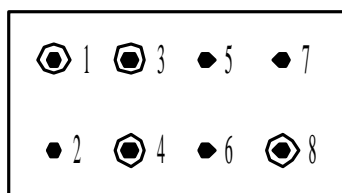
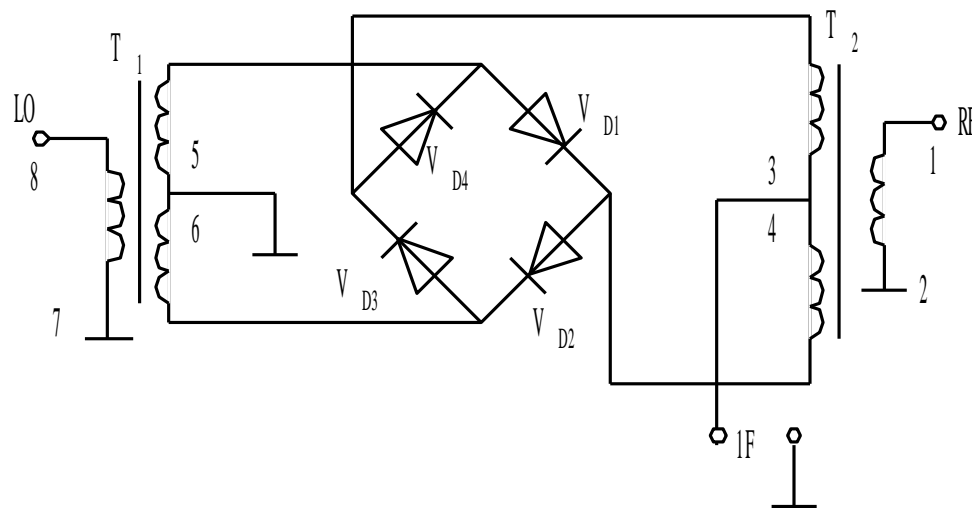


图 5—11 实际的环形电路





(a)



(b)

图 5—12 双平衡混频器组件的外壳和电原理图



例 2 在图 5—12 的双平衡混频器组件的本振口加输入信号  $u_1$ , 在中频口加控制信号  $u_2$ , 输出信号从射频口输出, 如图 5—13 所示。忽略输出电压的反作用, 可得加到四个二极管上的电压分别为

$$u_{D1}=u_1-u_2 \quad u_{D2}=u_1+u_2$$

$$u_{D3}=-u_1-u_2 \quad u_{D4}=-u_1+u_2$$

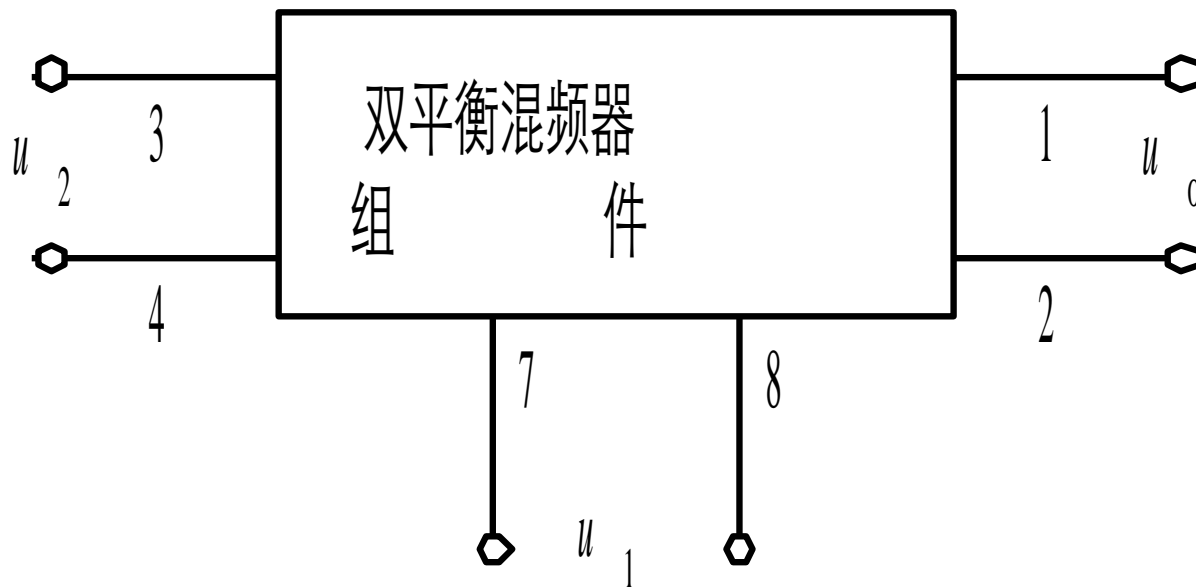


图 5—13 双平衡混频器组件的应用



这些电流为

$$i_1 = g_D K (\omega_2 t - \pi) u_{D1}$$

$$i_2 = g_D K (\omega_2 t) u_{D2}$$

$$i_3 = g_D K (\omega_2 t - \pi) u_{D3}$$

$$i_4 = g_D K (\omega_2 t) u_{D4}$$

这四个电流与输出电流  $i$  之间的关系为

$$i = -i_1 + i_2 + i_3 - i_4 = (i_2 - i_4) - (i_1 - i_3)$$

$$= 2g_D K (\omega_2 t) u_1 - 2g_D K (\omega_2 t - \pi) u_1$$

$$= 2g_D K'(\omega_2 t) u_1$$