



# 第二章 **PN**结二极管 及其应用

郭圆月

2022年9月7日





# 本章主要内容

---

§ 2.1 半导体基础知识

§ 2.2 PN结

§ 2.3 PN结二极管

§ 2.3 二极管应用电路





# § 2.1 半导体基础知识

---

一、本征半导体

二、掺杂半导体

三、PN结的形成及其单向导电性

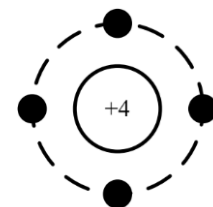
四、PN结的电容效应





# 一、本征半导体

## 1、什么是半导体？什么是本征半导体？



价电子

- 导电性介于导体与绝缘体之间的物质称为**半导体**。
- **导体**——铁、铝、铜等金属元素等**低价**元素，其最外层价电子在外电场作用下很容易产生定向移动，形成电流。
- **绝缘体**——惰性气体、橡胶等，原子的最外层电子受原子核的束缚力很强，只有在外电场强到一定程度时才可能导电。
- **半导体**——硅（Si）、锗（Ge），均为**四价**元素，它们原子的最外层电子受原子核的束缚力介于导体与绝缘体之间。
- **本征半导体**是由单一元素原子构成、纯净的晶体结构的半导体。

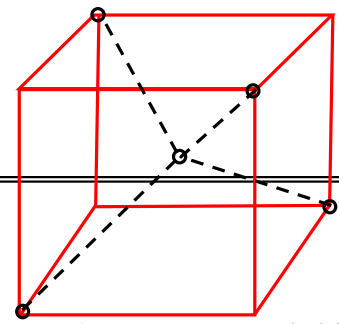
无杂质

稳定的结构

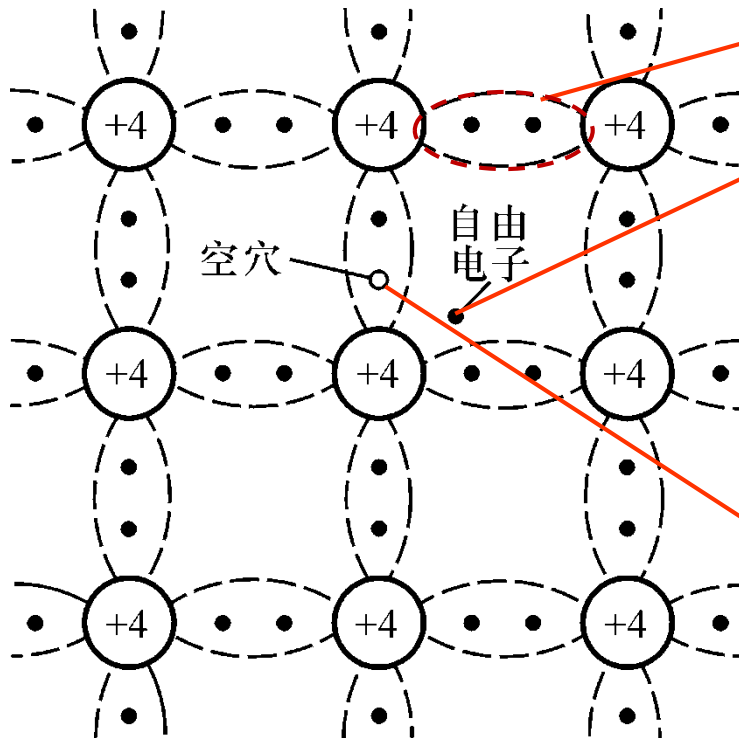




# 一、本征半导体的结构



Si和Ge的共价键结构  
(四面体结构)



共价键

由于热运动，具有足够能量的价电子挣脱共价键的束缚而成为自由电子

自由电子的产生使共价键中留有一个空位置，称为空穴

本征激发

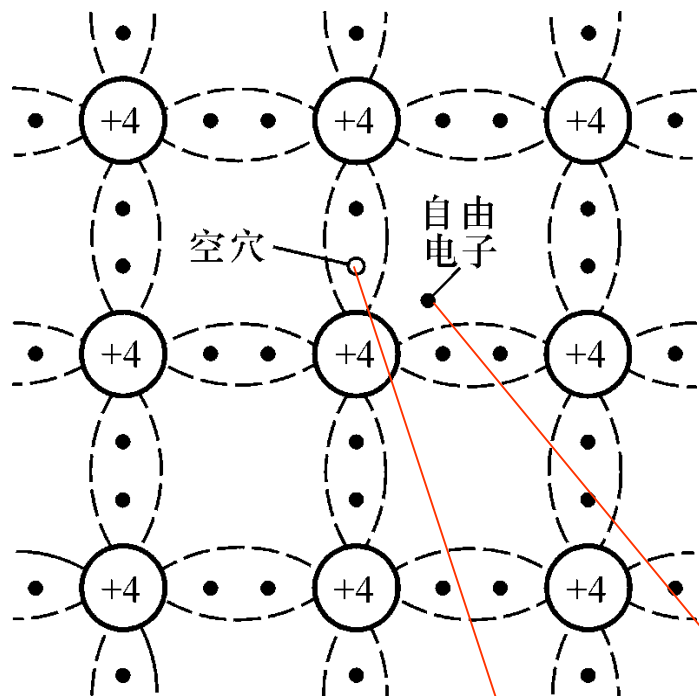
动态平衡

自由电子与空穴相碰同时消失，称为复合。





# 一、本征半导体中的两种载流子



## ■ 本征半导体新的导电方式：

- 运载电荷的粒子称为**载流子**。
- 外加电场时，带负电的**自由电子**和**新型带正电的空穴**均参与导电，且运动方向相反。
- 载流子浓度决定半导体导电能力；
- 室温下，载流子数目很少，故**导电性很弱**；热力学温度0K时**不导电**。

两种载流子

思考：为什么要将半导体变成导电性很差的本征半导体？

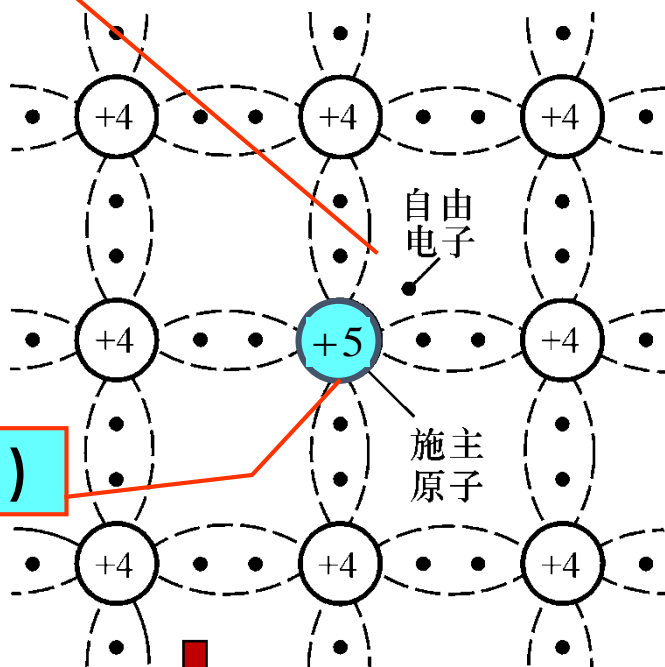




## 二、掺杂半导体

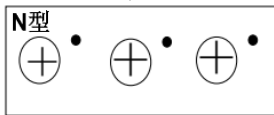
1. **N型**（电子型）半导体：在四价本征半导体中掺入微量**5价**元素。

多数载流子



磷 (P)

符号



■ 掺杂半导体**导电方式**:

- **多子**:自由电子, 由掺入元素产生;
- **少子**:空穴, 由本征激发产生的;
- 导电能力: 主要靠**单一多子电子**导电。掺入杂质越多, 电子浓度越高, 导电性越强, 实现导电性可控。

思考: 空穴比未加杂质时数目多了? 少了?  
温度敏感性?为什么?

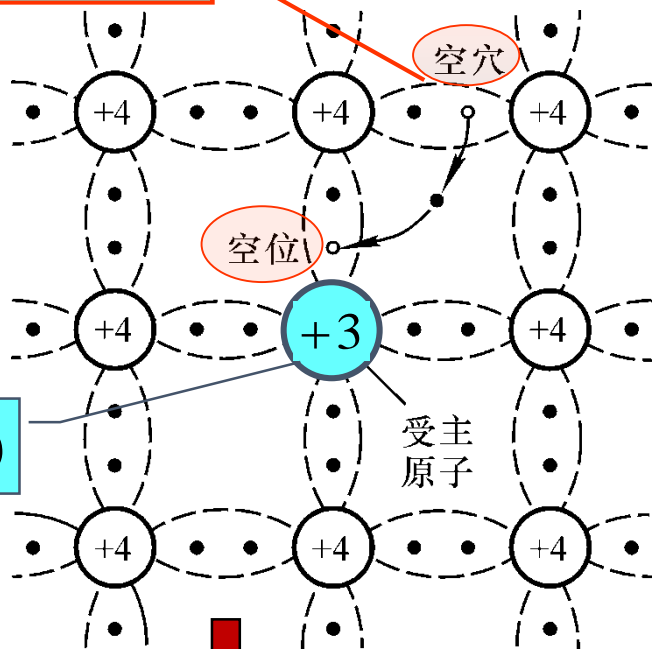




## 2. P型半导体

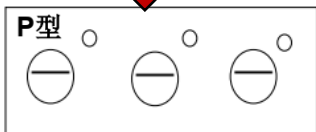
■ P型（空穴型）半导体：在本征半导体中掺入微量的3价元素。

多数载流子



硼(B)

符号



■ 掺杂半导体导电方式：

- 多子：空穴，由掺入元素产生；
- 少子：电子，由本征激发产生；
- 导电能力：主要靠单一多子空穴导电。掺入杂质越多，空穴浓度越高，导电性越强。

思考：温度变化时，载流子的数目变化吗？  
少子与多子变化的数目相同吗？少子与多子浓度的变化相同吗？





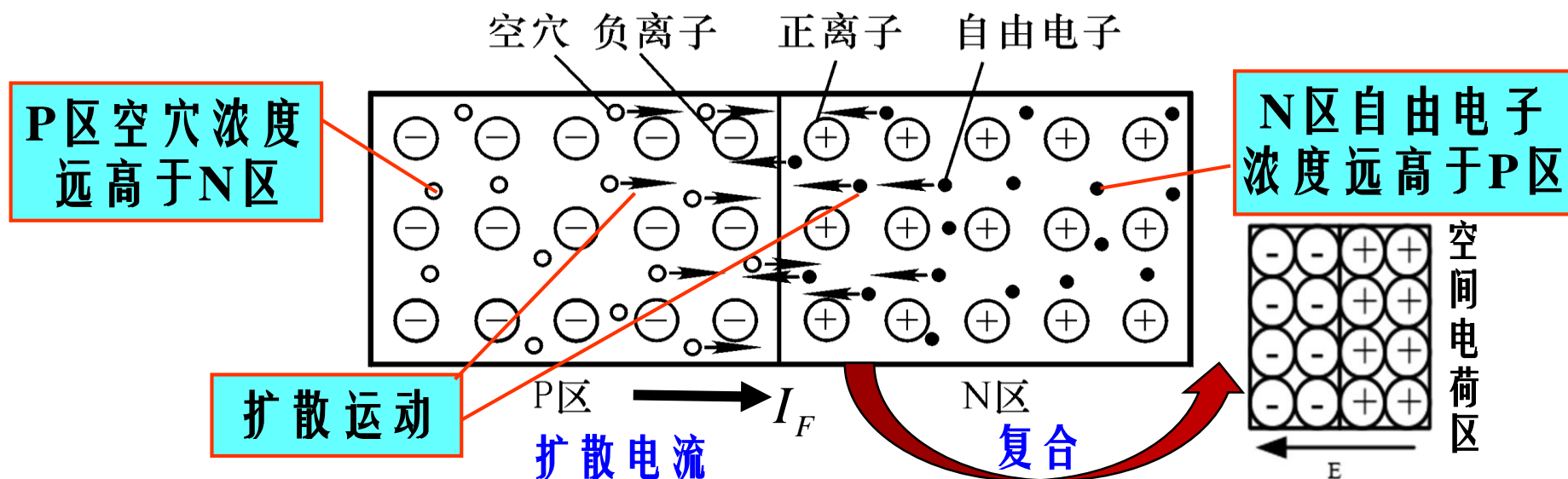


# 三、PN结的形成及其单向导电性

## ■ PN结形成：

### (1) 多子扩散与扩散电流：

- 浓度梯度引起多子做扩散运动，形成扩散电流  $I_F$ ；
- 在交界面形成空间电荷区和内建电场，减缓了扩散运动；



■ 电子、空穴多子向对方扩散运动 → 空间电荷区

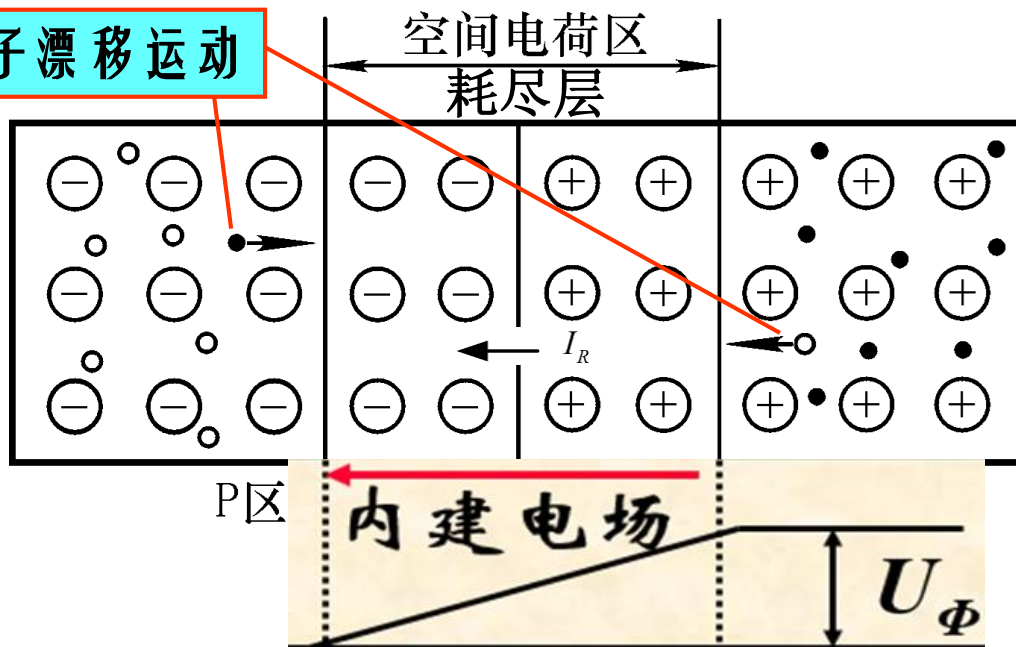




# 1、PN 结的形成

## (2) 少子漂移与漂移电流

少子漂移运动



➤ 内电场：

➤ 漂移电流  $I_R$ ：在内电场作用下少子做漂移运动；

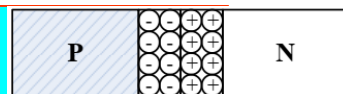
➤ 补充了多子，使空间电荷区变薄，减小了内电场。

(3) 动态平衡  $I_F = I_R$

扩散和漂移 → 动态平衡 → PN结

宏观稳态

电路符号

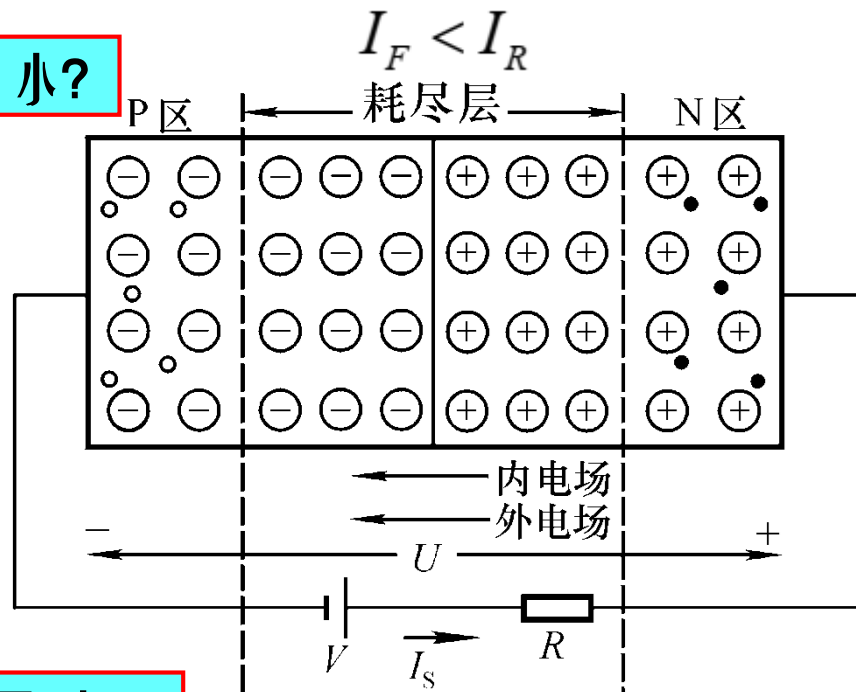
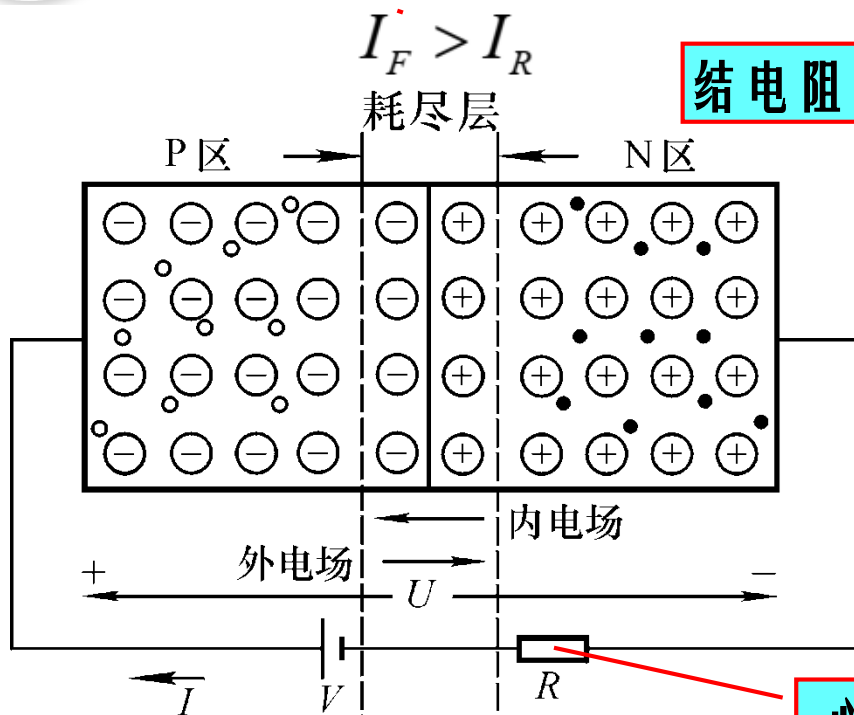


PN结是电中性，宏观整体上没有电流流过；





## 2、PN 结的单向导电性



PN结加正向偏置电压导通：

内电场被削弱，耗尽层变窄，  
多子扩散运动加剧，形成较大的  
扩散电流 $I_D$ ，PN结处于导通状态。

PN结加反向偏置电压截止：

内电场被增强，耗尽层变宽，阻止扩  
散运动，利于少子漂移运动，形成很  
小的漂移电流 $I_S$ ，近似认为其截止。

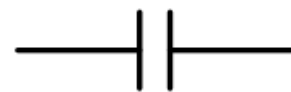




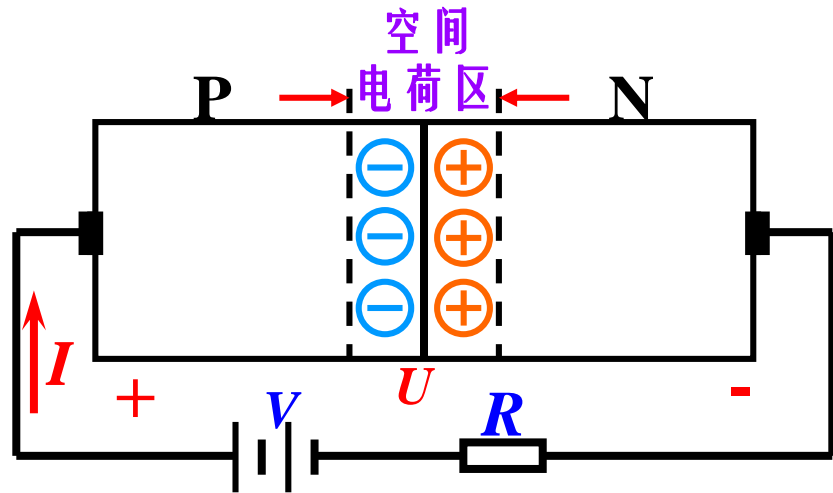
### 3、PN 结的电容效应

当PN上的电压发生变化时，PN 结中储存的电荷量将随之发生变化，使PN结具有电容效应。

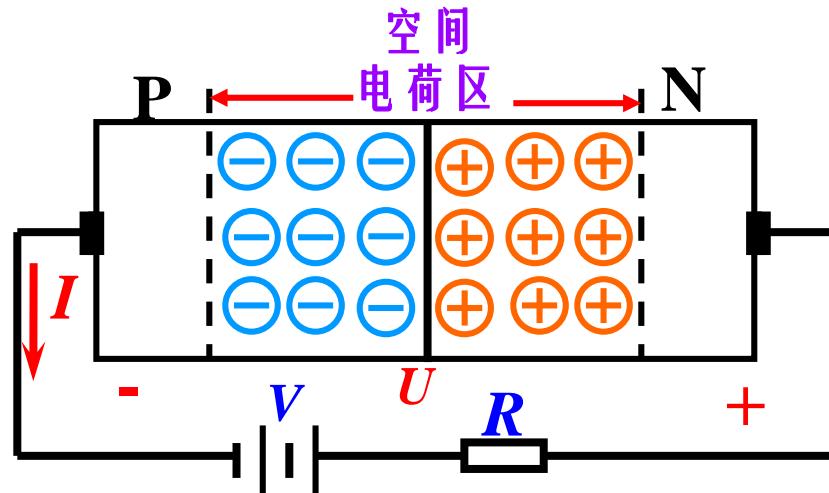
势垒电容  
扩散电容



1. 势垒电容  $C_b$ : 由 PN 结的空间电荷区厚度变化形成，有电荷的积累和释放的过程。



(a) PN 结加正向电压



(b) PN 结加反向负电压





### 3、PN 结的势垒电容

■ 势垒电容的大小可用下式表示：

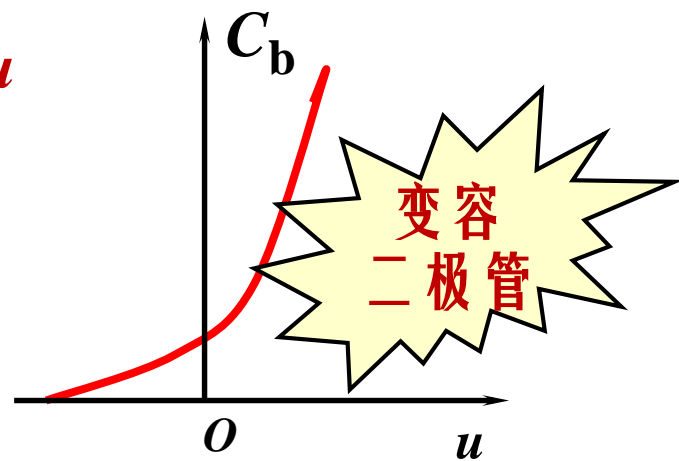
$$C_b = \frac{dQ}{dU} = \varepsilon \frac{S}{l}$$

$\varepsilon$ ：半导体材料的介电比系数；

$S$ ：结面积；

$l$ ：耗尽层宽度。

由于 PN 结 宽度  $l$  随外加反向电压  $u$  而变化，因此势垒电容  $C_b$  不是一个常数。  
其  $C_b = f(U)$  曲线如图示。



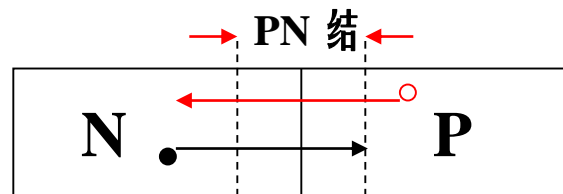


### 3. 扩散电容 $C_d$

■ **P、N区多子扩散浓度梯度随外加电压变化**——多子在扩散中积累而引起的。

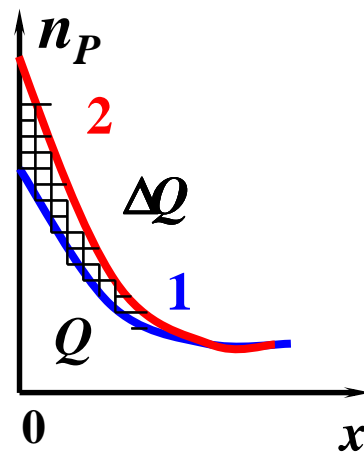
➤ 正偏，P区电子浓度  $n_p$  (N区空穴浓度  $p_n$ )

分布曲线如图示；



➤ 当电压加大， $n_p$  ( $p_n$ ) 会升高，反之浓度会降低；

➤ 正向电压变化，变化载流子积累电荷量发生变化，相当于电容器充、放电过程——扩散电容效应。



➤ 当加反向电压时，扩散运动被削弱，扩散电容的作用可忽略。

$x = 0$  处为 P 与 N 耗尽层的交界处





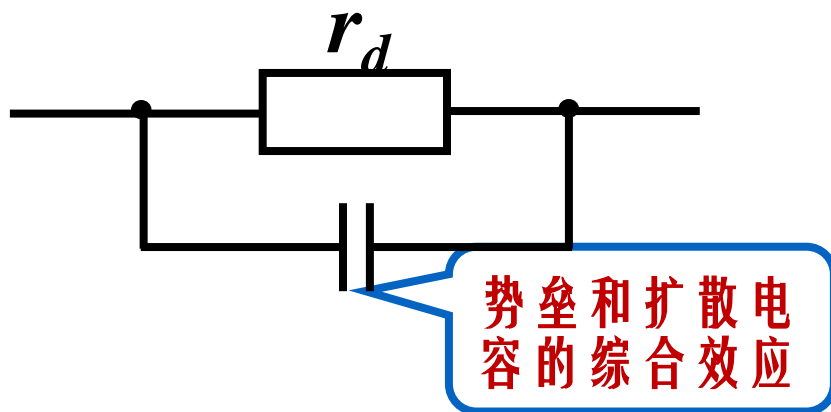
# 综述

■ PN 结总的结电容  $C_j$ :

$$C_j = C_b + C_d$$

- 反偏，主要决定于势垒电容，即  $C_j \approx C_b$ ;
- 正偏，主要决定于扩散电容，即  $C_j \approx C_d$ ;
- $C_b$  和  $C_d$  很小，常几pF ~ 几十pF，结面积大达几百pF。
- 结电容不是常量！在信号频率较高时，须考虑结电容的作用。

PN结高频小信号时的等效电路：



为什么半导体器件  
有最高工作频率？





# § 2 半导体二极管

---

- 一、二极管的组成
- 二、二极管的伏安特性及电流方程
- 三、二极管的等效电路
- 四、二极管的主要参数
- 五、稳压二极管

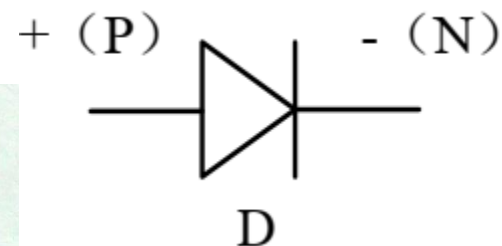
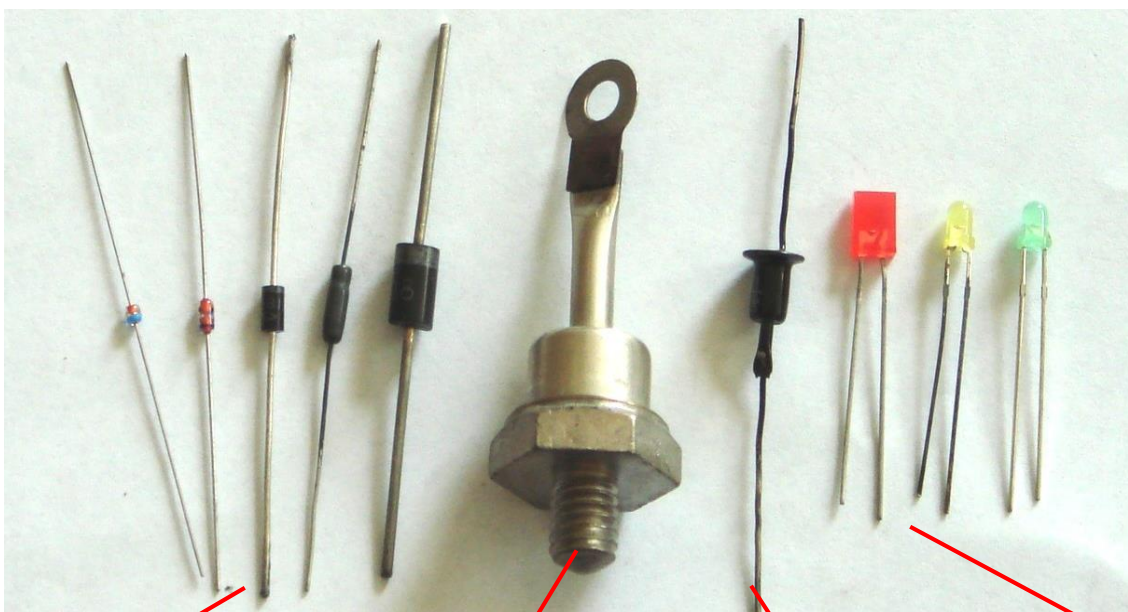






# 一、二极管的组成

将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管。



PN结正负极，  
怎么判定？

小功率  
二极管

大功率  
二极管

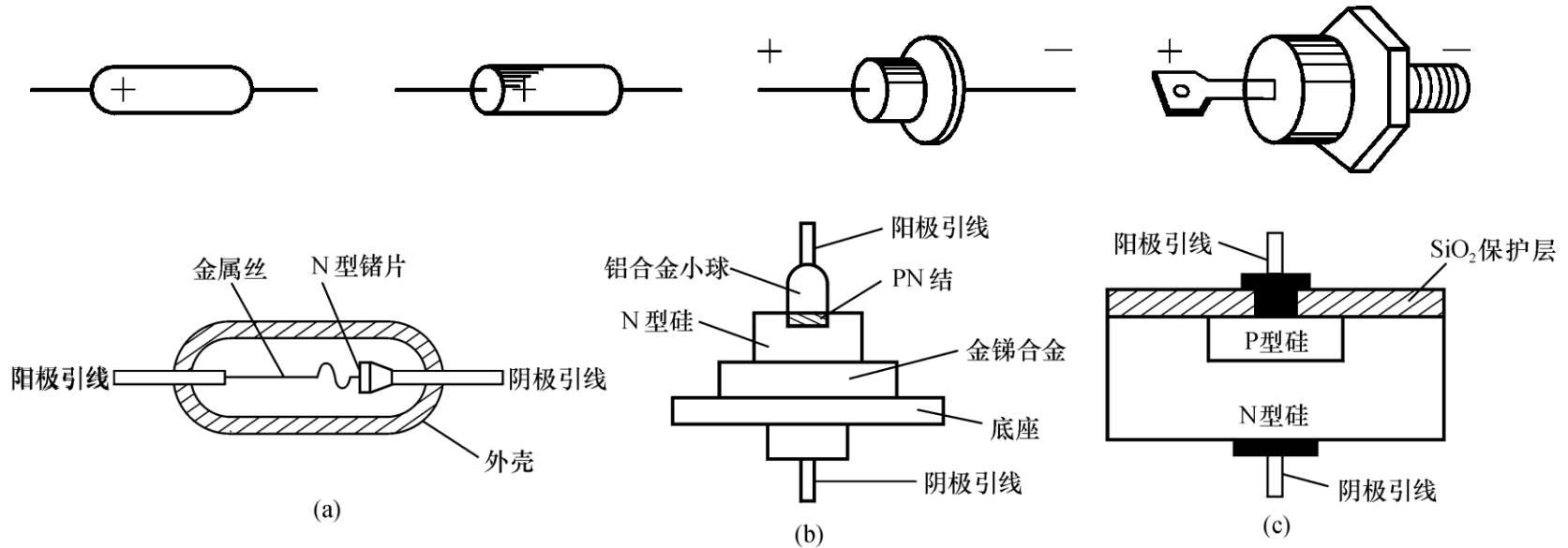
稳压  
二极管

发光  
二极管





# 一、二极管的组成



**点接触型：**结面积小，结电容小，故结允许的电流小，最高工作频率高。

**面接触型：**结面积大，结电容大，故结允许的**电流大**，最高工作频率低。

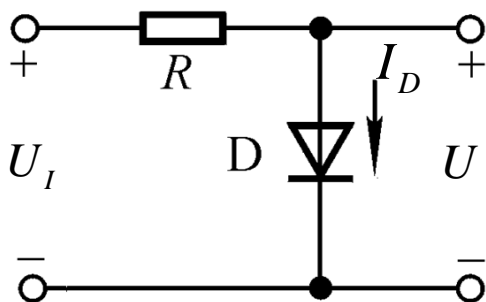
**平面型：**结面积可小、可大，小的工作频率高，大的结允许的电流大。





## 二、二极管的伏安特性及电流方程

### 1. 二极管的非线性伏安特性：电流与其端电压的关系



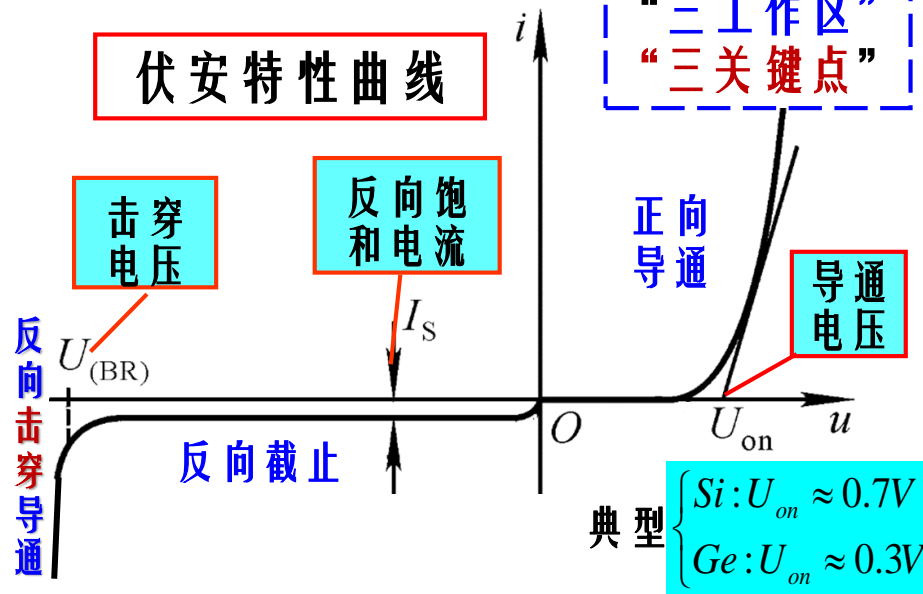
$$I_D = f(U)$$

1. 正向偏置导通状态：电流随电压呈指数律非线性增长， $U_D$ 动态范围小，电流 $I_D$ 变化范围大，导通区；

2. 反向偏置饱和截止状态：反向电流 $I_s$ 很小，很快达到饱和，截止区；

3. 反向击穿导通状态：反向电压大于击穿电压 $U_{(BR)}$ ，反向电流急剧增加，击穿区；

伏安特性曲线



非线性元件

“三工作区”  
“三关键点”

击穿电压

反向饱和电流

正向导通

导通电压

典型  $\begin{cases} \text{Si}: U_{on} \approx 0.7\text{V} \\ \text{Ge}: U_{on} \approx 0.3\text{V} \end{cases}$

电流方程数学模型

$$I_D = I_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad \text{其中 } U_T = \frac{kT}{q}$$

(常温下  $U_T \big|_{T=300\text{K}} \approx 26\text{mV}$ )

温度的电压当量





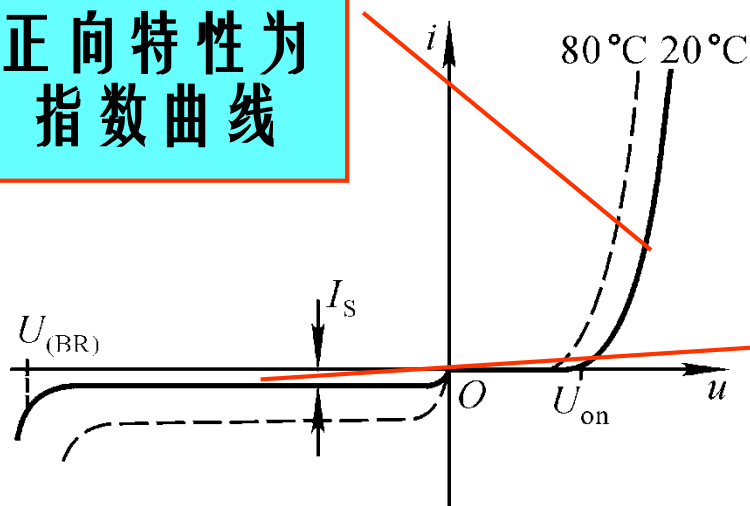
## 2、二极管的伏安特性及电流方程

从二极管的伏安特性可以反映出：

$$I_D = I_S (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$$

### 1) 正、反导电性

正向特性为  
指数曲线



若正向电压  $U \gg U_T$ , 则  $I_D \approx I_S e^{\frac{U}{U_T}}$

若反向电压  $|U| \gg U_T$ , 则  $I_D \approx -I_S$

反向特性为横轴的平行线

2) 温敏特性:  $T (^\circ\text{C}) \uparrow \rightarrow$  在电流不变情况下管压降  $u \downarrow$

$\rightarrow$  反向饱和电流  $I_S \uparrow$ ,  $U_{(BR)} \downarrow$

增大1倍/ $10^\circ\text{C}$

$T (^\circ\text{C}) \uparrow \rightarrow$  正向特性左移, 反向特性下移





### 3. 二极管的反向击穿特性

■ PN结反向击穿：反向偏压增至一定值，反向电流会急剧增大；

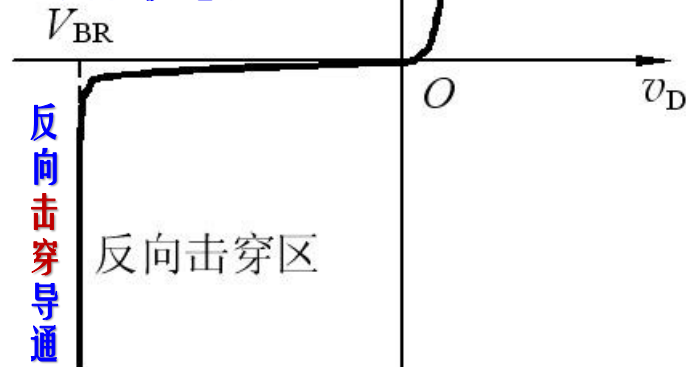
➤ 热击穿——不可逆

➤ 电击穿——可逆：

**雪崩击穿---碰撞电离**：反向电压足够高时，宽空间电荷区的合成电场较强，**倍增效应**！

**齐纳击穿---电场击穿**：当反向电压足够高，窄空间电荷区中的电场强度达到  $10^5 \text{V/cm}$  以上；**场致激发**！

反向击穿电压



利用此特性制作稳压二极管

➤ 低掺杂PN结，雪崩击穿主要的，击穿电压  $> 6\text{V}$ ；

➤ 重掺杂PN结中，齐纳击穿主要的，击穿电压  $< 6\text{V}$ 。





## 4、二极管的直流电阻 $R_D$

1. 直流等效电阻：二极管两端直流电压与直流电流的比值；

➤ 直流偏置-- 静态工作Q点。

➤ 直流电阻：

$$R_D = \frac{U_Q}{I_Q}$$

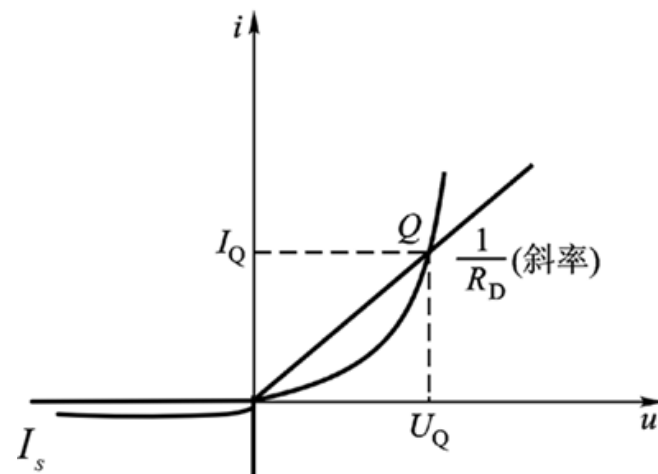
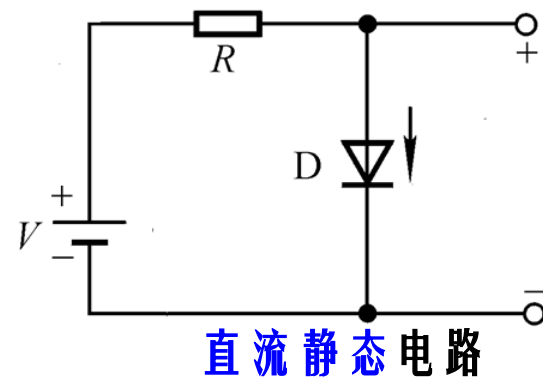


图 二极管直流电阻

➤ Q点越高，工作电流愈大，直流电阻越小。

➤ 反向偏置：直流电阻很大， $I_S=0$ ， $R_D=\infty$ ；

整体  
非线性



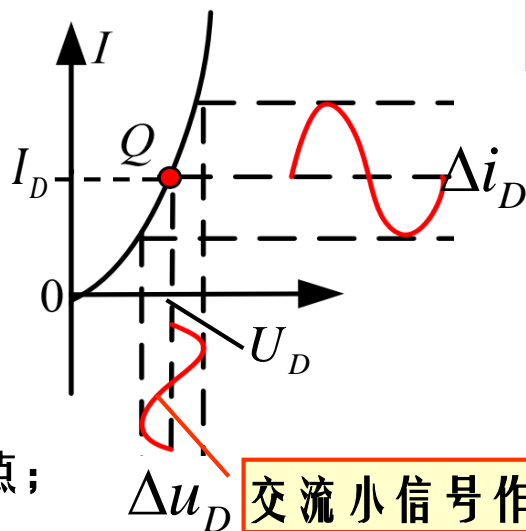
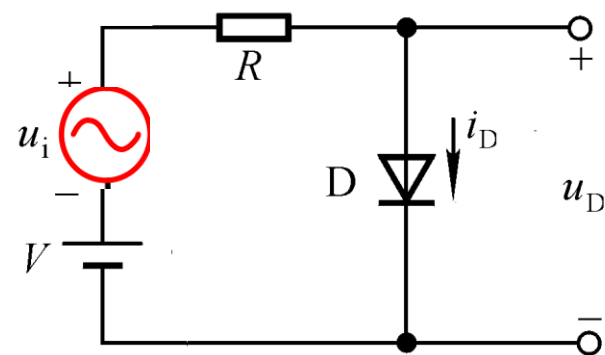


# 4、

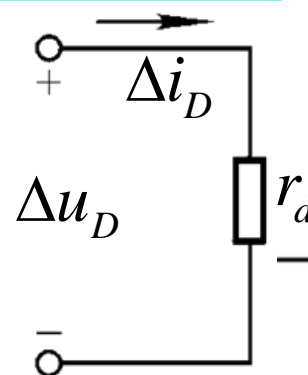
# 二极管的小信号交流电阻 $r_d$

1. 动态交流电阻  $r_d$ : 静态Q点附近, 电压微变与电流微变之比。

交流直流混合电路



二极管微变交流等效电路



$i$  呈线性特性

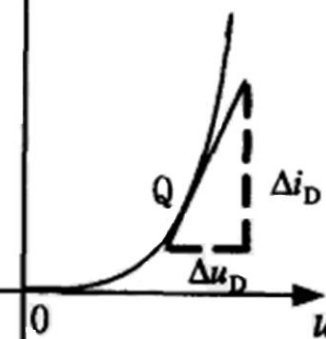


图 二极管交流电阻

$$r_d = \left. \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \right|_Q = \frac{1}{k}$$

- ✓ 直流电路设置合适静态工作点;
- ✓ 交流信号叠加在直流信号上;

- 与Q点有关, Q点切线斜率倒数, 正向很小, 反向很大, Q越高,  $r_d$  越小。
- 该模型用于二极管处于正向偏置条件下, 且  $U_D \gg U_T$ 。  $r_d$  的估算?





## 4、二极管的交流电阻 $r_d$ 估算

由  $r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D}$  根据  $I_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1)$

得  $Q$  点处的微变电导

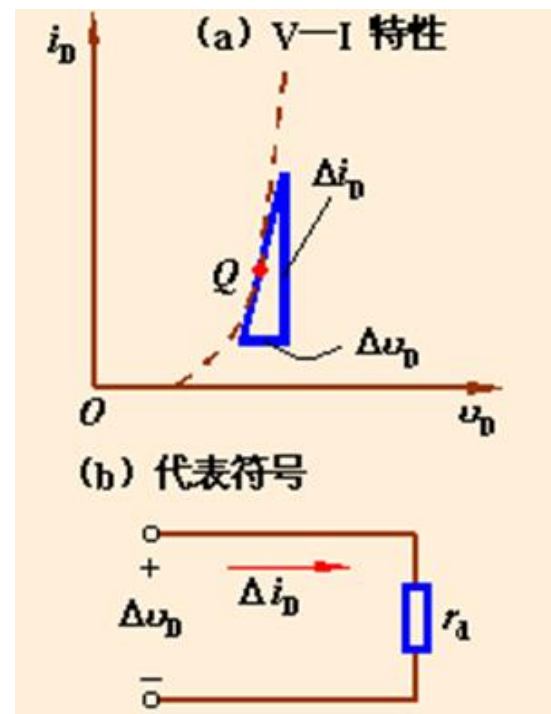
$$g_d = \left. \frac{di_D}{du_D} \right|_Q = \frac{I_S}{U_T} e^{u_D/U_T} \Big|_Q \approx \frac{I_D}{U_T}$$

则  $r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{U_T}{I_D}$

→ 常温下 ( $T=300\text{K}$ )

$$r_d = \frac{U_T}{I_{DQ}} = \frac{26(\text{mV})}{I_{DQ}(\text{mA})}$$

交流量取决于直流量。

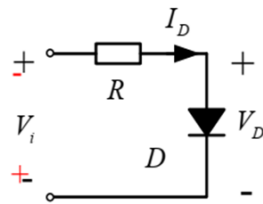






# 5、二极管直流大信号模型—折线化模型

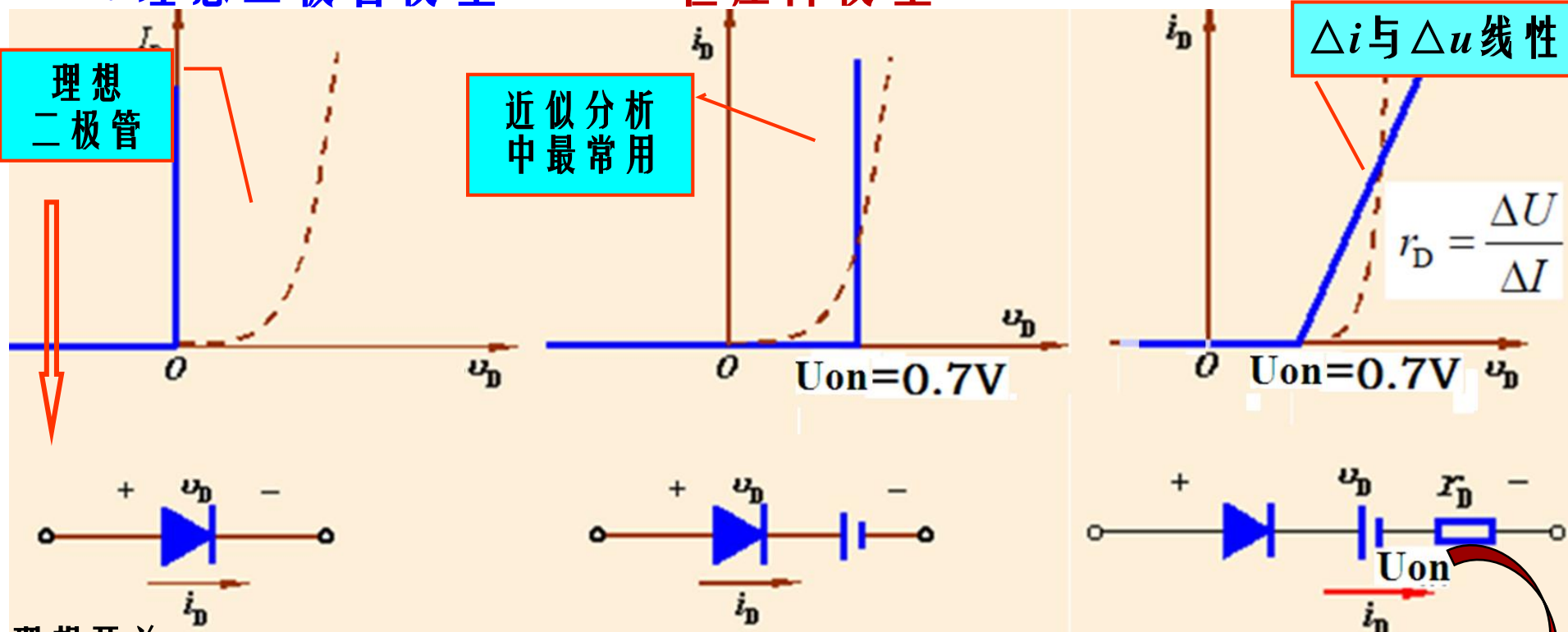
■ 由伏安特性曲线---线性化+折线化得到等效电路



## 1. 理想二极管模型

## 2. 恒压降模型

## 3. 折线模型



理想开关  
导通时  $U_D = 0$   $R_D = 0$   
截止时  $I_S = 0$   $R_D = \infty$

导通时  $U_D = U_{on}$   
截止时  $I_S = 0$

导通时  $U_D = U_{on} + r_D I_D$   
截止时  $I_S = 0$

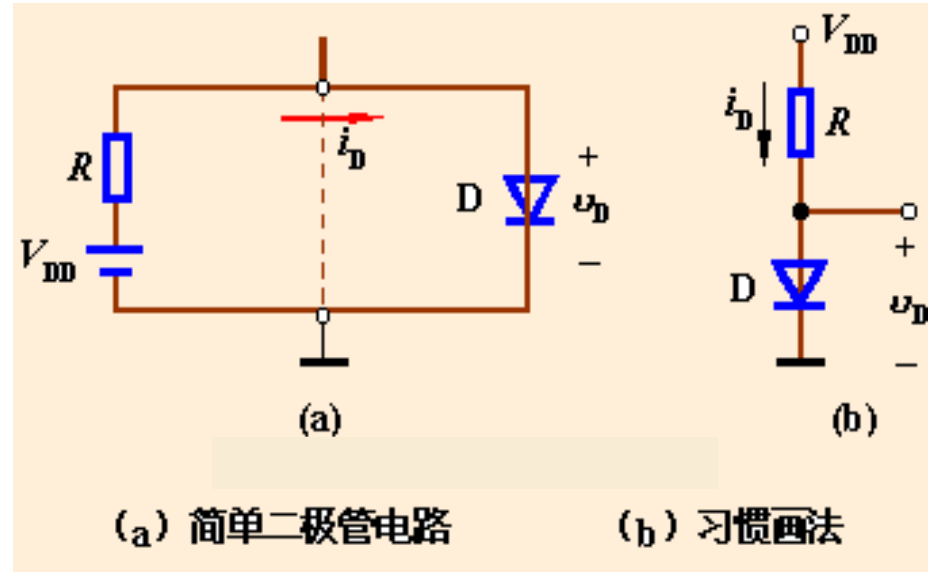
等效电阻意义?



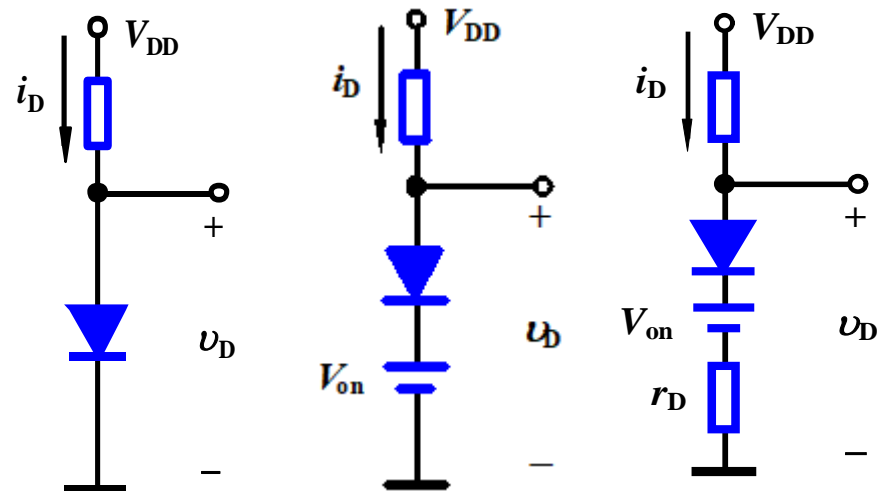


# 举例：二极管的静态工作情况分析

- (1)  $V_{DD}=10V$  时,  $R=10K\Omega$ ,  
(2)  $V_{DD}=1V$  时,  $R=10K\Omega$ ,  
求二极管  $V_D$ 、 $I_D$ =?



三种线性化模型电路





# 举例：二极管的静态工作情况分析

解：（1） $V_{DD}=10V$  时

**理想模型**

$$V_D = 0V \quad I_D = V_{DD}/R = 1mA$$

**恒压模型**

$$V_D = V_{on} = 0.7V$$

$$I_D = (V_{DD} - V_{on})/R = 0.93mA$$

**折线模型** 设  $r_D = 0.2k\Omega$

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_{on}}{R + r_D} = 0.911mA$$

$$V_D = V_{on} + I_D r_D = 0.88V$$

如何选择不同的等效模型？

10V? 5V? 1V?

（2） $V_{DD}=1V$  时

**理想模型**

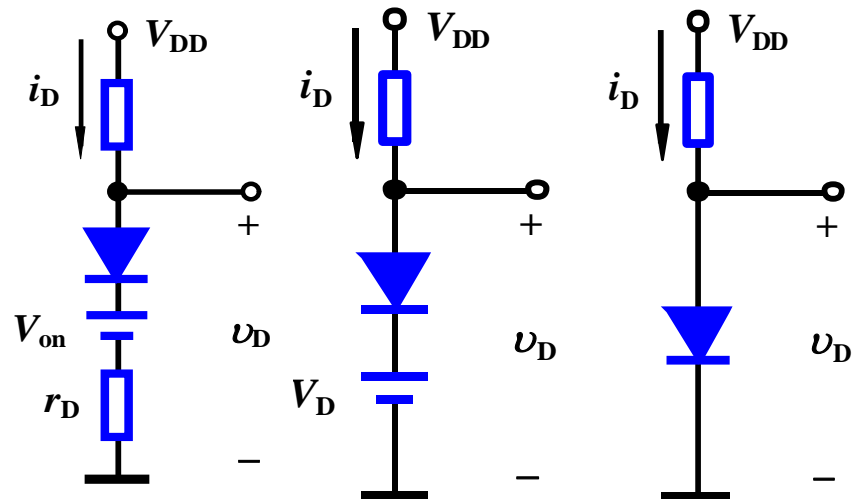
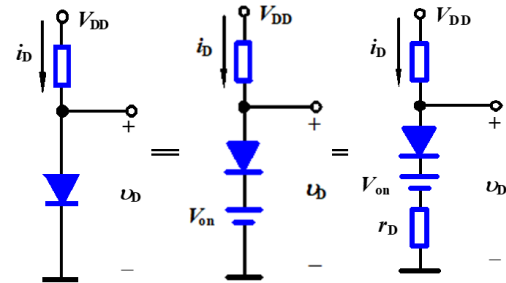
$$V_D = 0V \quad I_D = V_{DD}/R = 0.1mA$$

**恒压模型**

$$V_D = V_{on} = 0.7V$$

$$I_D = (V_{DD} - V_{on})/R = 0.03mA$$

**折线模型** 设  $r_D = 0.2k\Omega$

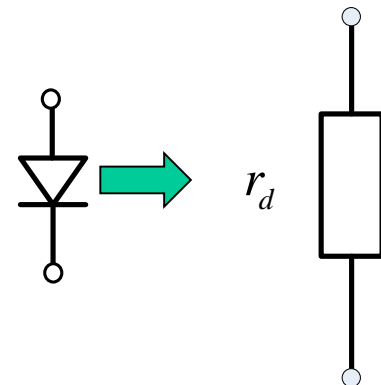




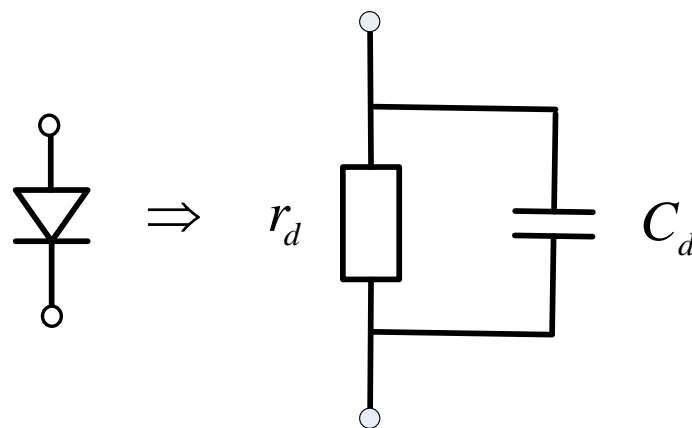
## 6. 晶体二极管交流小信号模型

### ■ 低频小信号模型

- 合适的直流偏置；
- 输入交流信号应满足交流小信号激励条件，交流分析时，二极管才能看作为线性器件；



### ■ 高频小信号模型

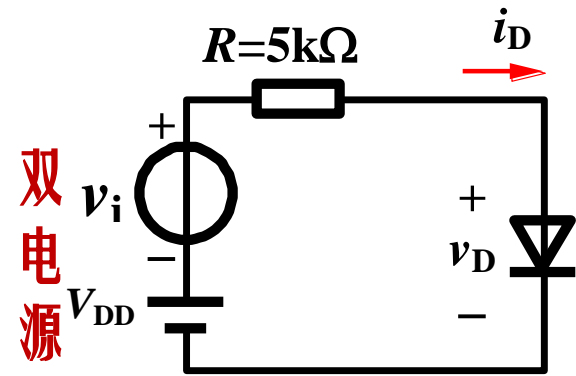




# 6. 举例：交直流混合电路分析方法

## 1. 小信号工作情况分析

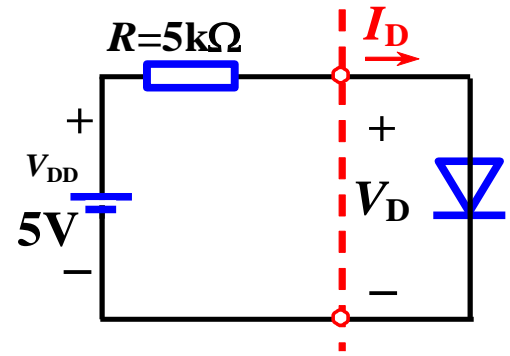
$$V_{DD} = 5V, v_i = 0.1 \sin \omega t \text{ V}$$



叠加原理

静态分析

$$v_i = 0$$



$$V_D \approx 0.7V$$

$$I_D = (5 - 0.7) / 5k = 0.86mA$$

求  $\Delta v_D$ 、 $\Delta i_D$ ?

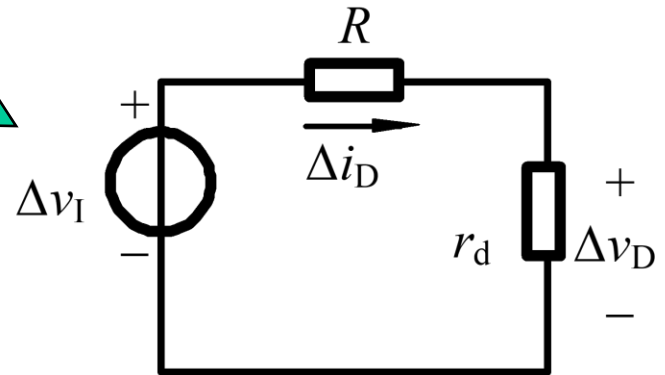
$$r_d = \frac{V_T}{I_D} = \frac{26(mV)}{0.86(mA)} = \frac{26(mV)}{0.86(mA)} \approx 30\Omega$$

$$\Delta v_D = \frac{r_d}{R + r_d} \times v_i = \frac{0.03k\Omega}{5k\Omega + 0.03k\Omega} \times 0.1 \sin \omega t$$

$$\approx 0.6 \sin \omega t (mV)$$

动态分析

$$V_{DD} = 0$$



$$\Delta i_D = \frac{\Delta v_D}{r_d} = 0.02 \sin \omega t (mA)$$



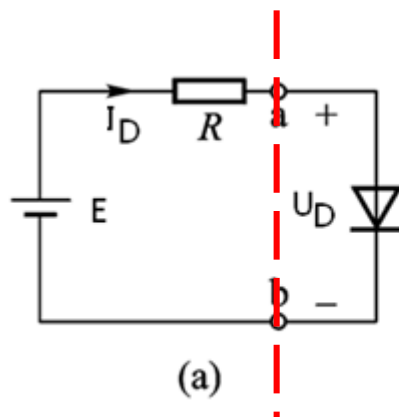


# 7. 二极管实际电路分析方法

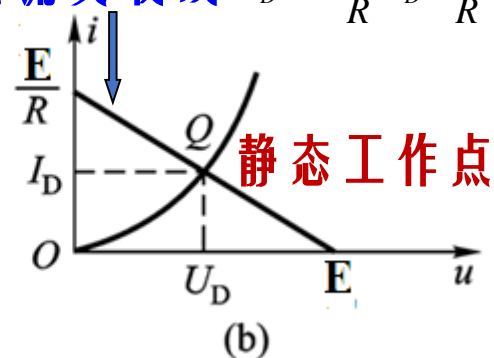
■ 电路分为：

线性部分

非线性部分



直流负载线  $I_D = -\frac{1}{R}U_D + \frac{1}{R}E$



■ 列方程组：

$$\begin{cases} U_D = E - I_D R \\ I_D = I_S (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \end{cases}$$

迭代法，繁杂

(1) 解方程法：两个方程，两个未知数，可解。

(2) 图解分析方法：直流负载线，其交点  $(I_Q, V_Q)$  静态工作点。

➡ 简单，估算，但管子特性不同，要已知  $V-I$  特性曲线。

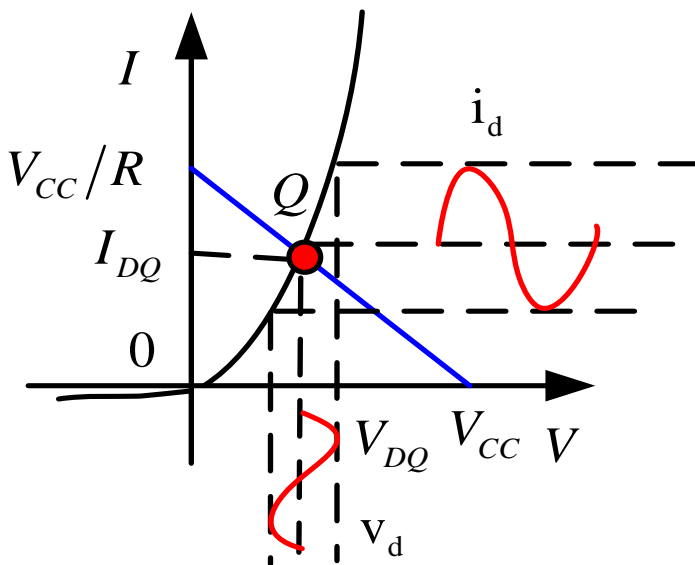




# 8. 二极管实际电路图解分析方法

## ■ 图解法优点

- 电路求解过程直观，可以清楚看出电路的工作点
- 数值解的精度基本满足工程近似估算要求；
- 可以进行交流直流混合电路分析。



- **直流电路** 为二极管设置合适的静态工作点；
- **交流信号** 叠加在直流信号上，流经二极管输出；





# 典型例题

■ 例：已知理想二极管电路如图所示，试求I。

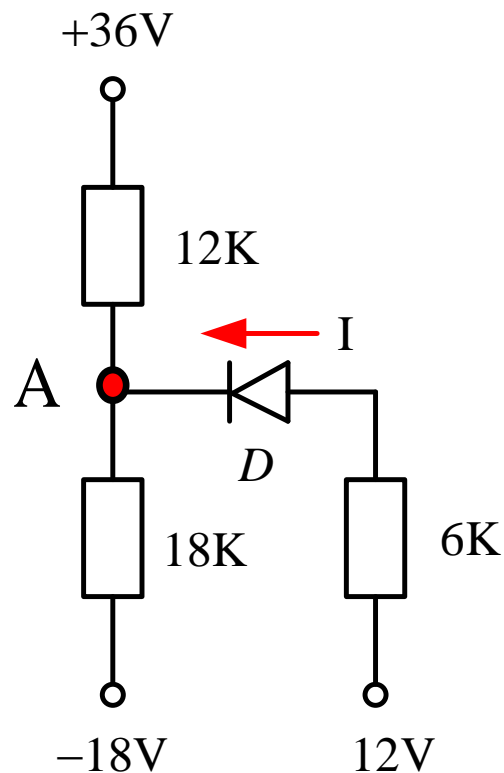
$$\text{解：假定 } D \text{ 截止} \Rightarrow V_A = \frac{-18 \times 12 + 36 \times 18}{12 + 18} = 14.4\text{V} > 12\text{V} \Rightarrow D \text{ 截止}$$

$$\Rightarrow I = 0$$

若12V改成15V，则D导通，此时有

$$\frac{36 - V_A}{12} + \frac{15 - V_A}{6} = \frac{V_A + 18}{18} \Rightarrow V_A = 14.7\text{V}$$

$$\Rightarrow I = 0.05\text{mA}$$

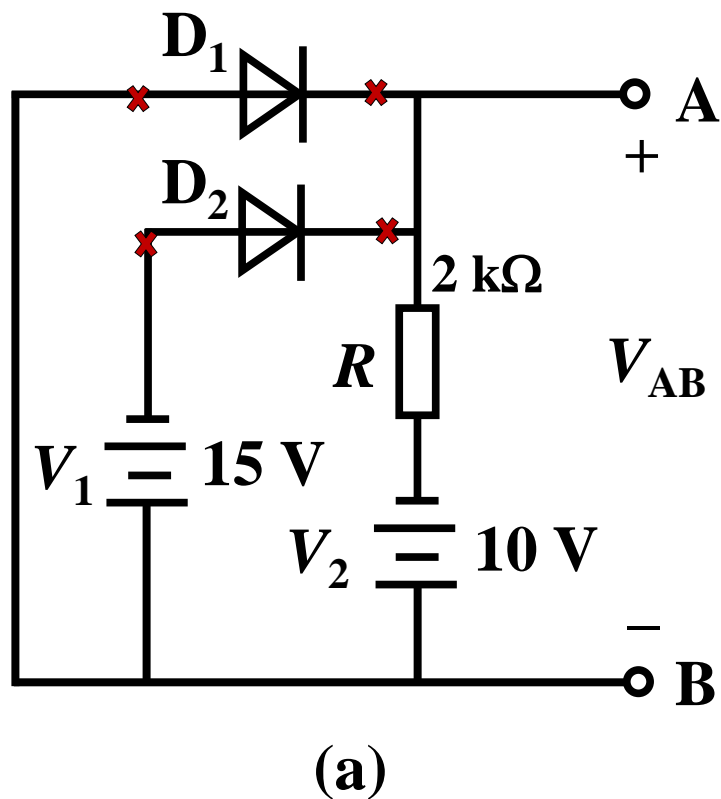






## 典型题解

■ 设图示电路中的二极管性能均为理想。试判断各电路中的二极管是导通还是截止，并求出A、B两点之间的电压 $U_{AB}$ 值。



解：设参考零电位点为B点，二极管断开，经判断知：

$D_1$ 两端的开路电压为：10 V

$D_2$ 两端的开路电压为：-5 V

$D_1$  导通

$V_{AB} = 0 \text{ V}$

$D_2$ 反偏电压为15V

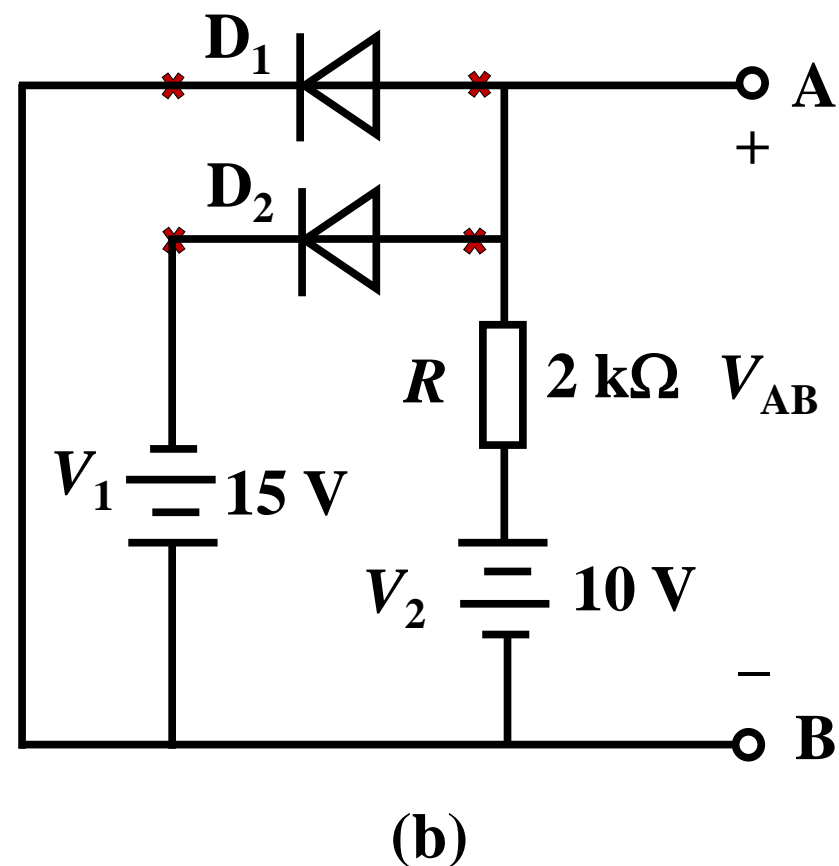
$D_2$  截止





## 典型题解

■ 设图示电路中的二极管性能均为理想。试判断各电路中的二极管是导通还是截止，并求出A、B两点之间的电压 $U_{AB}$ 值。



解：设参考零电位点为B点，二极管都断开，经判断知：

$D_1$ 两端的开路电压为：**10 V**

$D_2$ 两端的开路电压为：**25 V**

$D_2$ 优先导通， $D_2$ 导通后

$$V_{AB} = -15 \text{ V}$$

即  $D_1$  上的反偏电压为15 V

$D_1$  截止

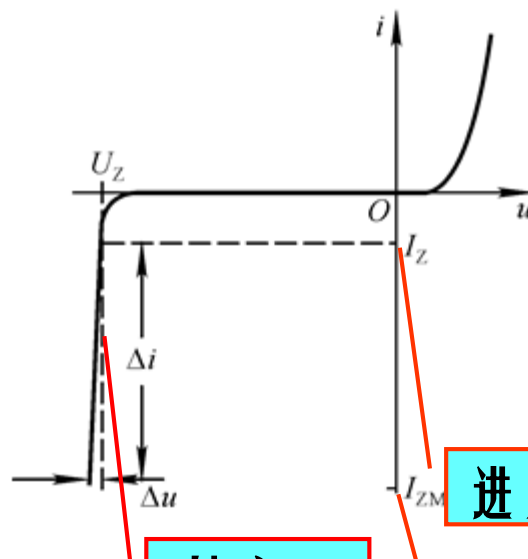




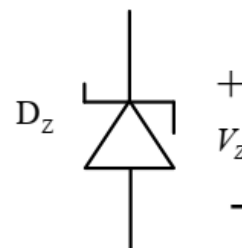
# 三、二极管应用电路—稳压电路

## 1. 反向击穿特性实现稳压：

- 面接触型；
- 高掺杂，低击穿电压；
- 反向击穿特性很陡峭；



齐纳管



进入稳压区的最小电流

斜率？

不至于损坏的最大电流

## 2. 主要参数

稳定电压  $U_Z$ 、稳定电流  $I_Z$

动态电阻  $r_z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$

最大功耗  $P_{ZM} = I_{ZM} U_Z$

温度系数  $\alpha = \Delta U_Z / \Delta T$





# 1、并联式稳压电路

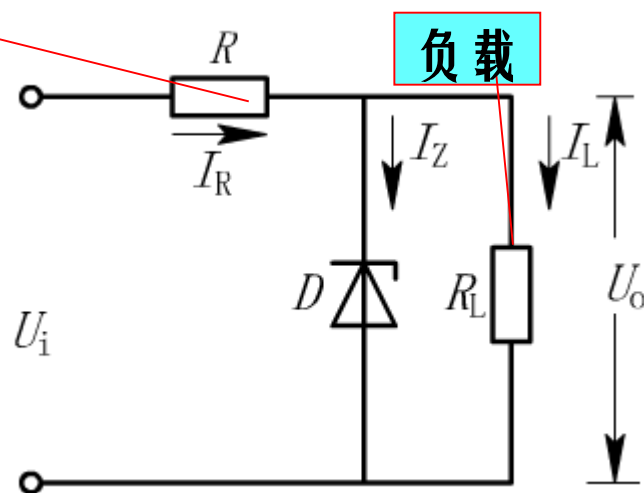
## 1. 电路构成：

$$\begin{aligned}U_O &= U_Z = U_i - U_R \\ &= U_i - I_R \cdot R\end{aligned}$$

$$I_R = I_L + I_Z$$

限流电阻

负载



## 2. 工作原理：

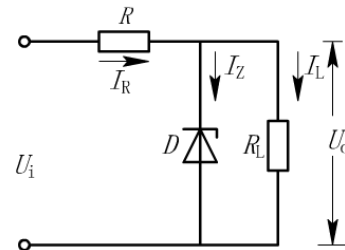
**A：电源电压波动：**  $U_i \uparrow \rightarrow U_O \uparrow \rightarrow U_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow$

**B：负载变化：**  $R_L \downarrow \rightarrow I_L \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow U_R \downarrow \rightarrow U_O \uparrow$





# 1、限流电阻和稳压管的选择



## 1. 管子 $D_z$ 的选取:

➤  $U_z = U_o$ , 如稳压值不够, 可多个稳压管串联, 禁止并联;

➤ 一般  $I_{ZMax} \geq 2I_{LMax}$ ;  $U_i = (2 \sim 3) U_o$

2. 限流电阻R的大小: 取决于输入电压 $V_{i \min}$ 、 $V_{i \max}$ 、负载电流 $I_{L \max}$ 、 $I_{L \min}$ 和稳压管电流 $I_{z \max}$ 、 $I_{z \min}$ 三者关系!

$$\begin{cases} \frac{V_{i \min} - V_z}{R} - I_{L \max} \geq I_{z \min} \\ \frac{V_{i \max} - V_z}{R} - I_{L \min} \leq I_{z \max} \end{cases} \Rightarrow \frac{V_{i \min} - V_z}{I_{z \min} + I_{L \max}} \geq R \geq \frac{V_{i \max} - V_z}{I_{z \max} + I_{L \min}}$$



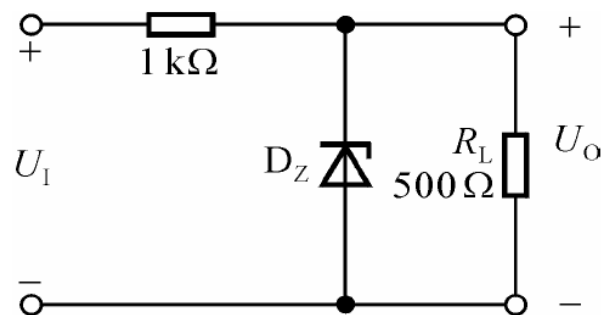


# 典型例题

1. 已知图所示电路中稳压管的稳定电压  $U_Z = 6\text{V}$ ,  $I_{Z\min} = 5\text{mA}$ ,  $I_{Z\max} = 25\text{mA}$ 。

(1) 分别计算  $U_I$  为  $10\text{V}$ 、 $15\text{V}$ 、 $35\text{V}$  三种情况下输出电压  $U_O$  的值；

(2) 若  $U_I = 35\text{V}$  时负载开路，则会怎样？为什么？



解：(1) 假设稳压管工作在稳压状态，则稳压管中的电流为

$$I_{D_Z} = I_R - I_{R_L} = \frac{U_I - U_Z}{R} - \frac{U_Z}{R_L}$$

当  $U_I = 10\text{V}$  时,  $I_{D_Z} = -8\text{mA}$ , 故假设不成立, 稳压管截止,  $U_O = \frac{R_L}{R_L + R} U_I \approx 3.33\text{V}$ ;

当  $U_I = 15\text{V}$  时,  $I_{D_Z} = -3\text{mA}$ , 故假设不成立, 稳压管截止,  $U_O = \frac{R_L}{R_L + R} U_I \approx 5\text{V}$ ;

当  $U_I = 35\text{V}$  时,  $I_{D_Z} = 17\text{mA}$ , 故假设成立,  $U_O = U_Z = 6\text{V}$ 。

(2) 若负载开路, 则  $I_{D_Z} = \frac{U_I - U_Z}{R} = 29\text{mA} > I_{Z\max} = 25\text{mA}$ , 稳压管会因功耗过大而损坏





# 典型例题

1. 已知稳压管 $D_z$ 稳定电压 $U_Z = 6V$ 及稳压工作的电流范围 $15mA-30mA$ ，限流电阻 $R=400\Omega$ ，负载 $R_L=1k\Omega$ ，当输入 $V_i=15(1\pm 20\%)V$ 时，稳压电路输出能否稳定在 $6V$ ？

解  $V_o=6V$  时的负载电流  $I_L = \frac{6}{1 \times 10^3} = 6mA$ 。

流过  $D_z$  的电流  $I_z = I - I_L = \frac{V_i - V_o}{R} - 6mA$

当  $V_i = 15 \times (1 + 20\%) = 18V$  时，

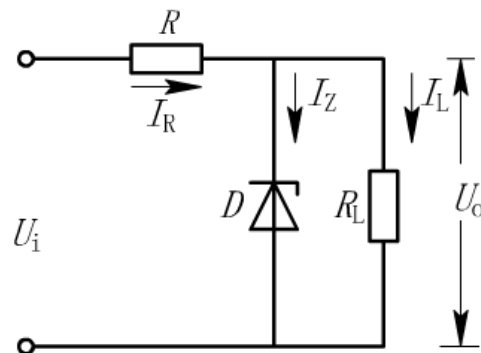
$I_z = \frac{18 - 6}{0.4 \times 10^3 \Omega} - 6 \times 10^{-3} = 24mA < I_{zmax} = 30mA$ ，故  $V_o$  能稳定在  $6V$ 。

当  $V_i = 15 \times (1 - 20\%) = 12V$  时

$I_z = \frac{12 - 6}{0.4 \times 10^3} - 6 \times 10^{-3} = 9mA < I_{zmin} = 15mA$ ，此时  $V_o$  不能稳定在  $6V$ 。

能使  $V_o$  稳定在  $6V$  的最小输入电压  $V_{imin}$  须满足

$$V_{imin} > (I_{zmin} + I_L)R + V_o = (15 + 6) \times 10^{-3} \times 400 + 6 = 14.4V$$





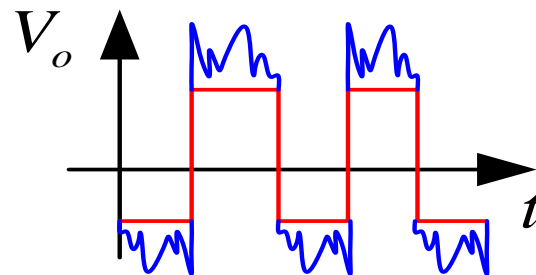
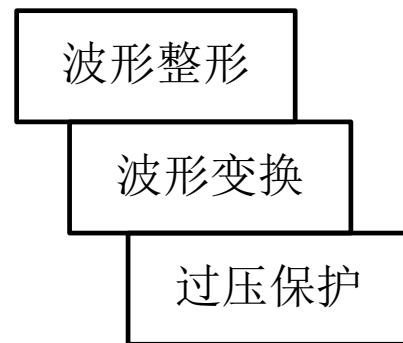
## 2、二极管限幅电路

### ■ 基本功能

- 限幅电路又称为削波电路，用以限制输出信号的上部和（或）下部的电压幅度；

### ■ 常用限幅电路

- 上限幅电路
- 下限幅电路
- 双向限幅电路





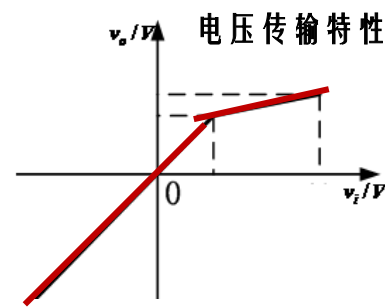
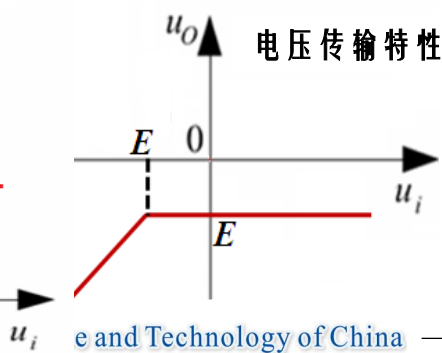
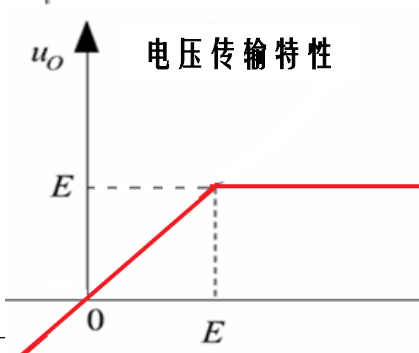
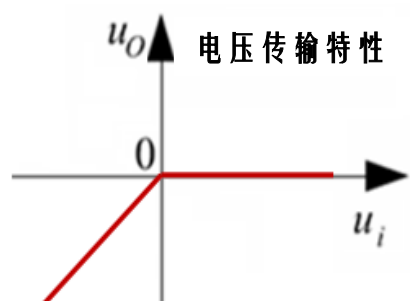
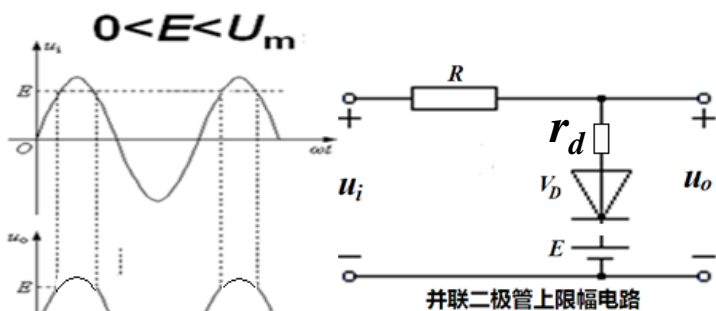
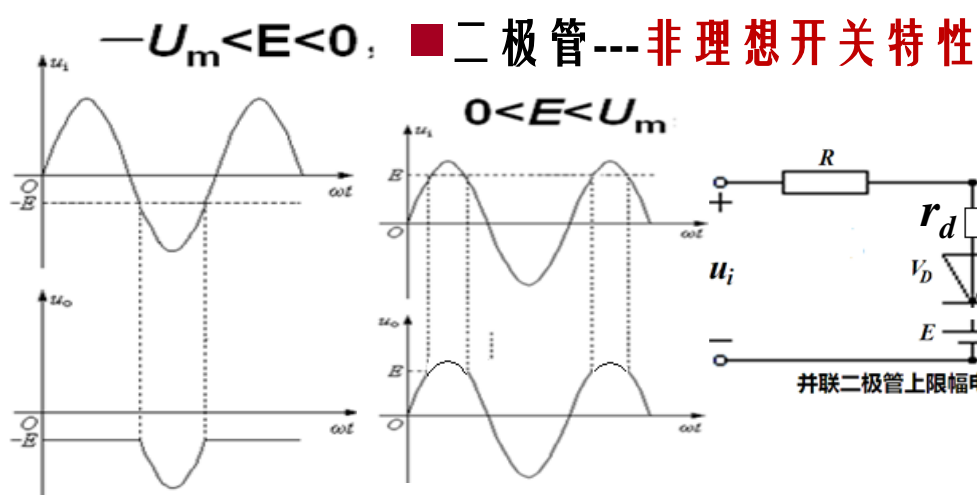
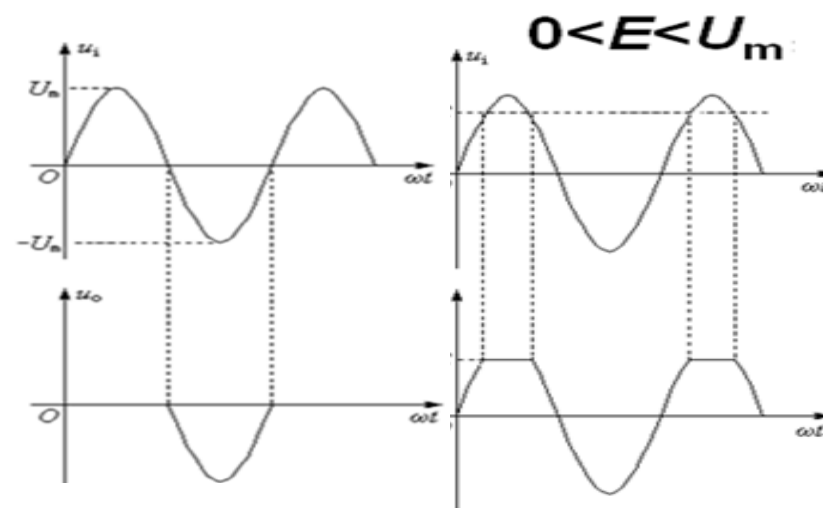
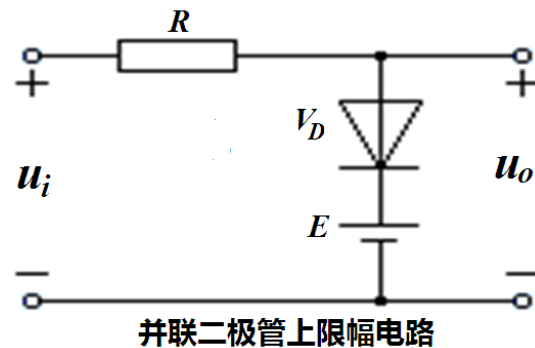
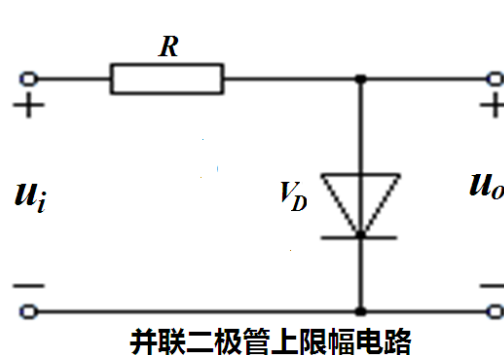


## 2、二极管上限幅电路

### ■ 二极管--理想开关特性

➤  $U_i > 0$ ,  $D$  导通,  $V_d = 0$ ,  $u_o = 0$ ;

➤  $U_i < 0$ ,  $D$  截止,  $I_d = 0$ ,  $u_o = u_i$ ;



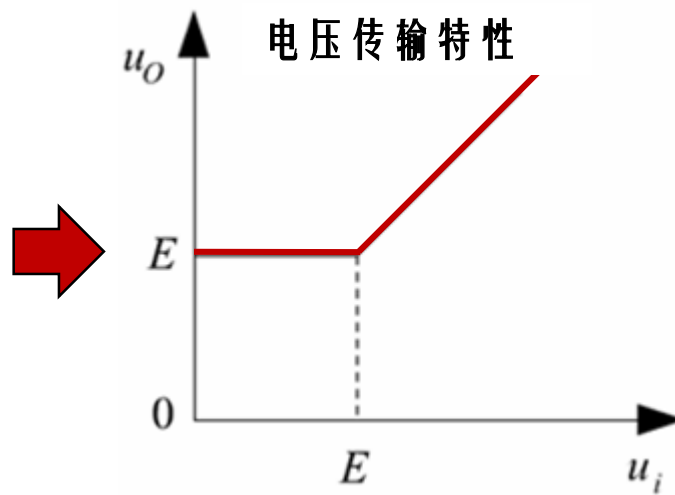
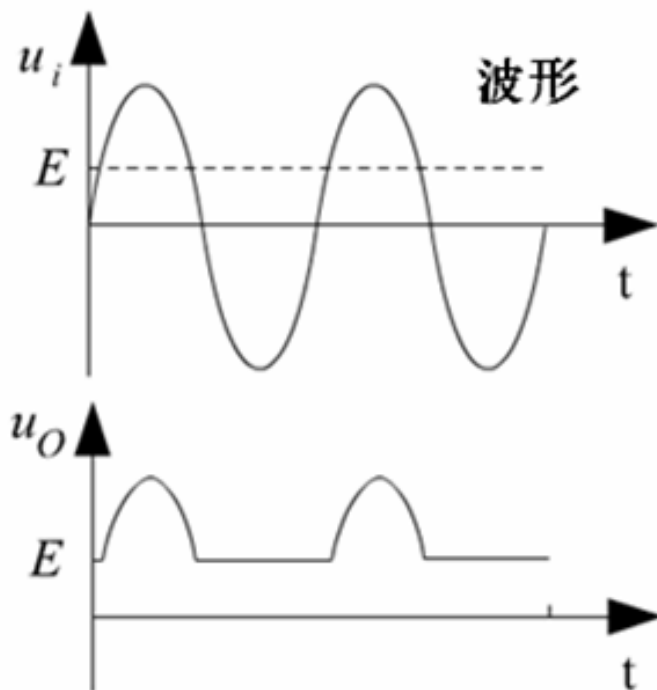
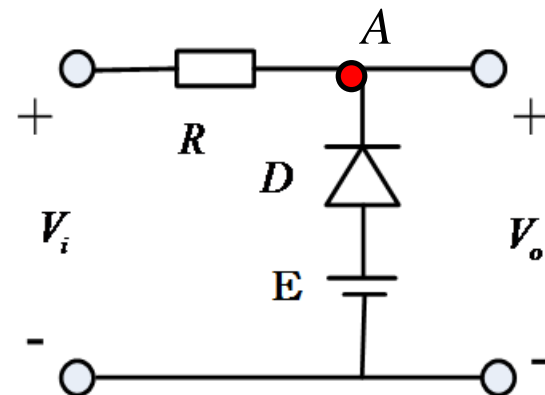


## 2、二极管下限幅电路

### ■ 二极管--理想开关特性；

➤  $U_i > E$ ,  $D$  截止,  $I_d = 0$ ,  $U_o = U_i$ ;

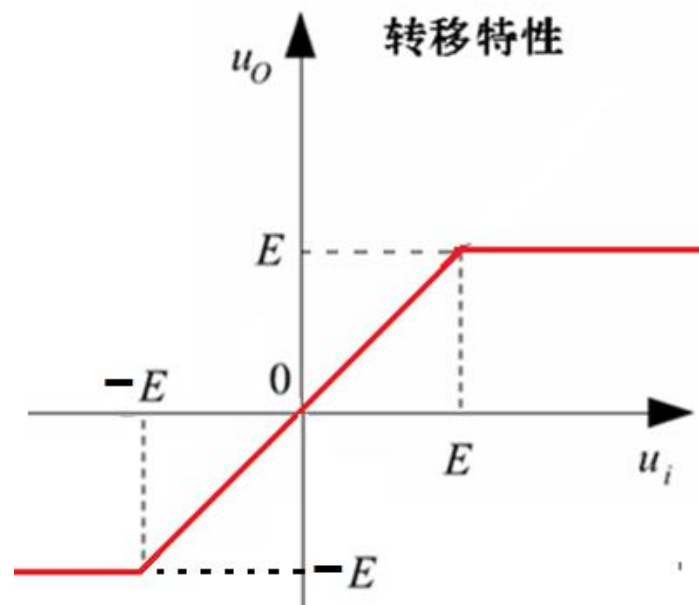
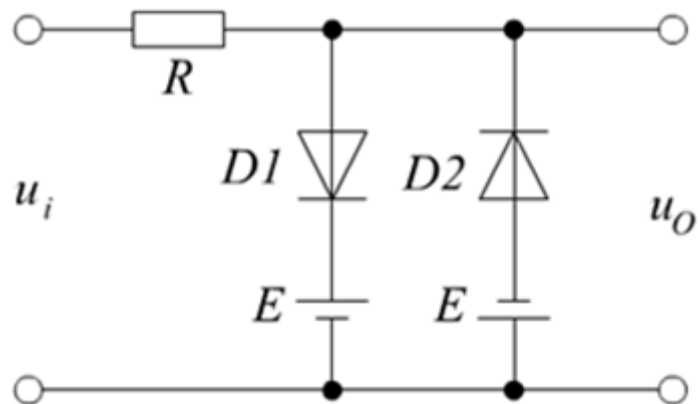
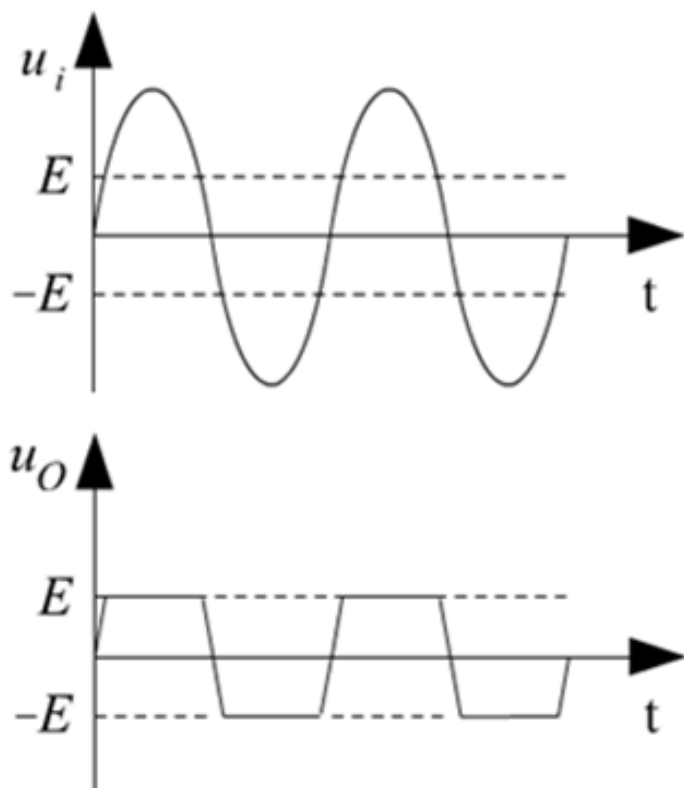
➤  $U_i < E$ ,  $D$  导通,  $V_d = 0$ ,  $U_o = E$ ;





## 2、上、下双向限幅电路

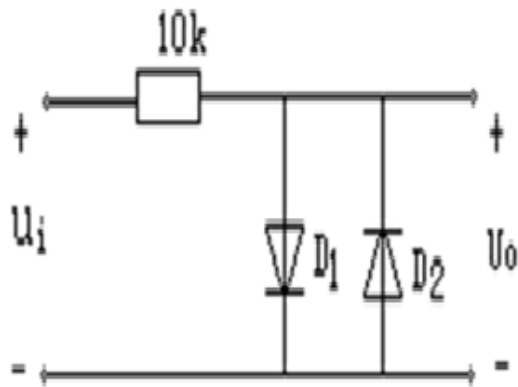
■ 上、下限幅器的组合。



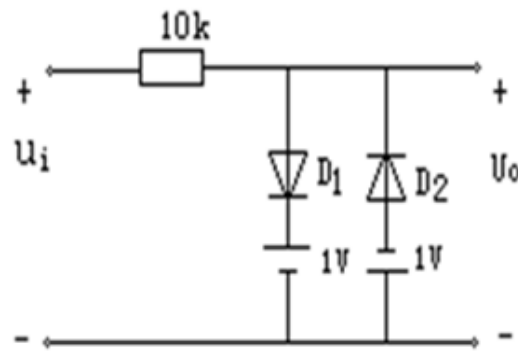


# 典型题解

■ 在图示的电路中，设  $u_i = 5\sin\omega t(\text{V})$ ，试画出  $u_o$  的波形及传输特性曲线。二极管为 2CP11（硅管， $U_{on} = 0.7\text{V}$ ）。

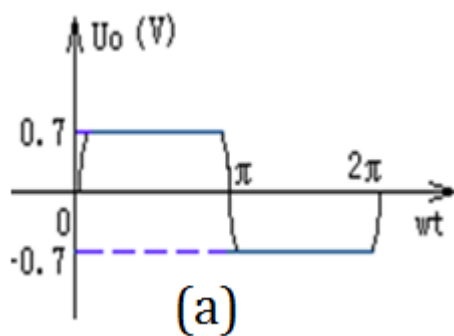


(a)



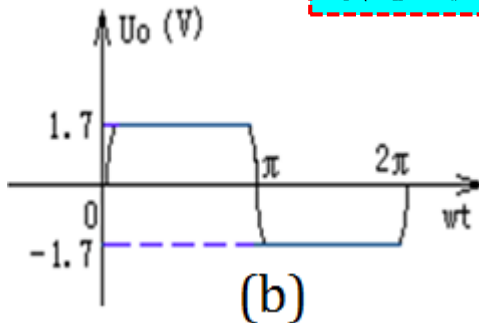
(b)

**$U_o$  波形：**

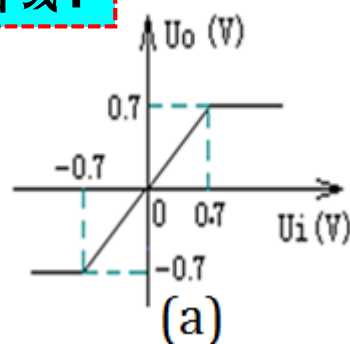


(a)

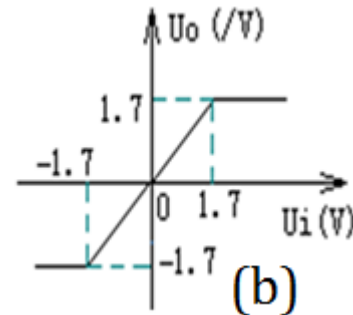
**转移特性曲线：**



(b)



(a)



(b)



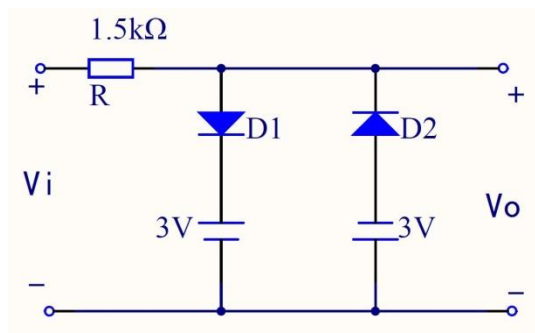


# 典型题解

**例：**二极管大信号折线模型参数： $V_r = 0.7V$ ， $r = 100\Omega$ ，试求：

(1)画出电路的电压传输特性 ( $V_o$ - $V_i$ ),  $V_i$ 的取值范围 $-10V \leq V_i \leq 10V$ ;

(2)若 $V_i = 4\sin(\omega t)V$ ,画出 $V_o$ 波形。



**解：** (1) 该电路为双限幅电路，

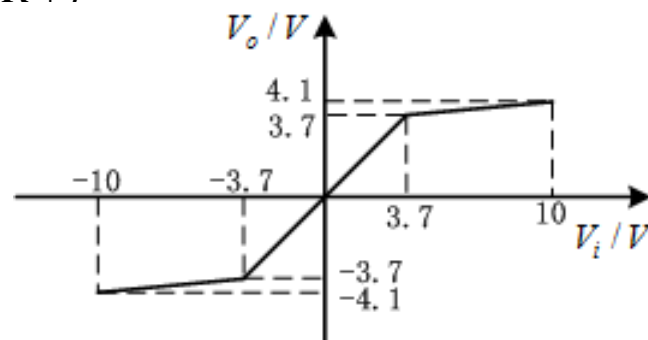
1) 当 $-3.7 < V_i < 3.7V$ 时， $D1$ 、 $D2$ 均截止，则 $V_o = V_i$ ;

2) 当 $V_i \geq 3.7V$ 时， $D1$ 导通， $D2$ 截止，则

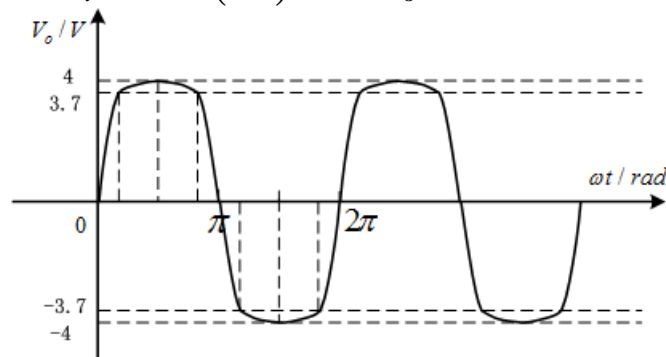
$$V_o = \frac{r}{R+r}(V_i - 3.7) + 3.7 = 0.0625V_i + 3.46875$$

3) 当 $V_i \leq -3.7V$ 时， $D1$ 截止， $D2$ 导通，则

$$V_o = \frac{r}{R+r}(V_i + 3.7) - 3.7 = 0.0625V_i - 3.46875$$



(2)  $V_i = 4\sin(\omega t)V$ 时,  $V_o$ 波形如下



**讨论：** (1)能够判断电路的基本功能为限幅；  
(2)当限幅支路存在电阻时，则对输出电压限幅的电平不再为恒定值。



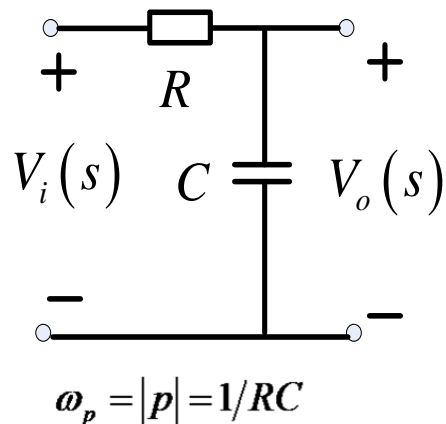
# 3、钳位电路

■ 基本功能：将信号**直流电平**移动到指定电平，而**不改变波形**；

■ 常用钳位电路： 1) 顶部钳位电路； 2) 底部钳位电路；

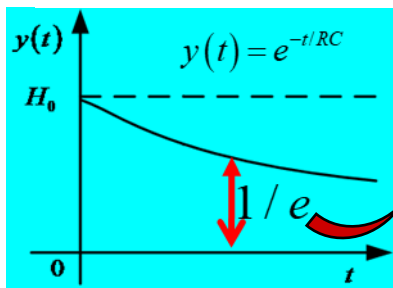
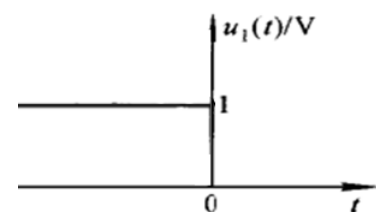
■ 原理：**D管理想导电特性**+**RC电路电容的充、放电特性**：

单极点低通系统



→ **RC电路的时间响应**

(1) 放电过程



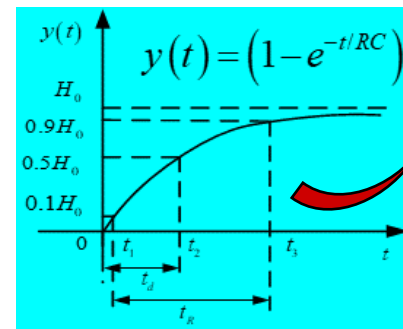
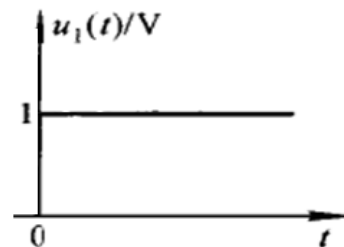
下降时间：

时间常数

$$\tau = RC$$

→  $\tau$  足够大，C 缓慢放电

(2) 充电过程



上升时间：

$$t_R = \frac{2.2}{\omega_h} = 2.2 \tau$$

→  $\tau$  足够小，C 快速充电；





# (1) 顶部钳位电路

■ 目标: 保持信号不失真, 而将信号**顶部电平**钳制在**指定电平**上;

## ■ 工作原理

➢  $V_i$  从0上升, 大于  $V_B$ ,

D 导通, 对 C 充电;

充电时间:  $\tau_1 = r_d \cdot C \approx 0$

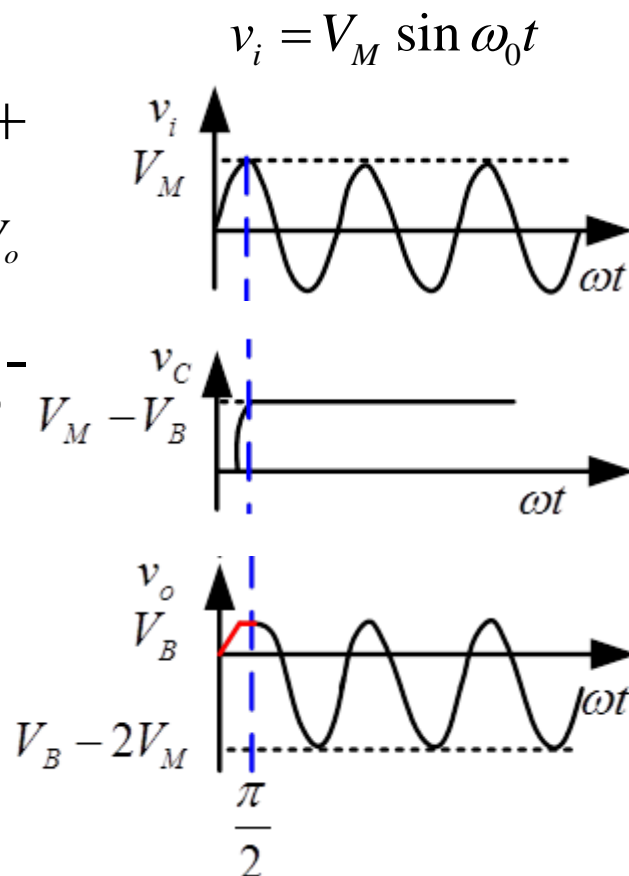
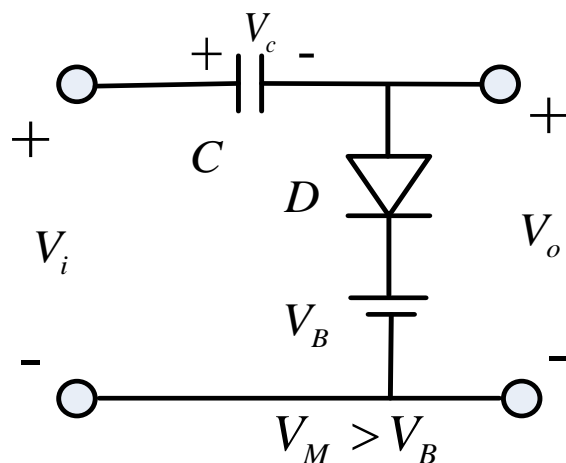
电容端压:  $v_c = V_M - V_B$

输出:  $v_o = V_B$

➢  $V_i$  过顶点, D 截止, C 开始放电;

放电时间:  $\tau_2 = r_d \cdot C \approx \infty$

输出:  $v_o = v_i - v_c = V_M \sin \omega_0 t - (V_M - V_B)$



信号顶部电平钳制在  $V_B$





## (2) 底部钳位电路

■ 目标: 保持信号不失真, 而将信号底部电平钳制在指定电平上;

■ 原理:

➢  $V_i$  正半周, D 截止;

➢  $V_i$  负半周, 且  $v_i < -V_B$ ,

D 导通, C 快速充电;

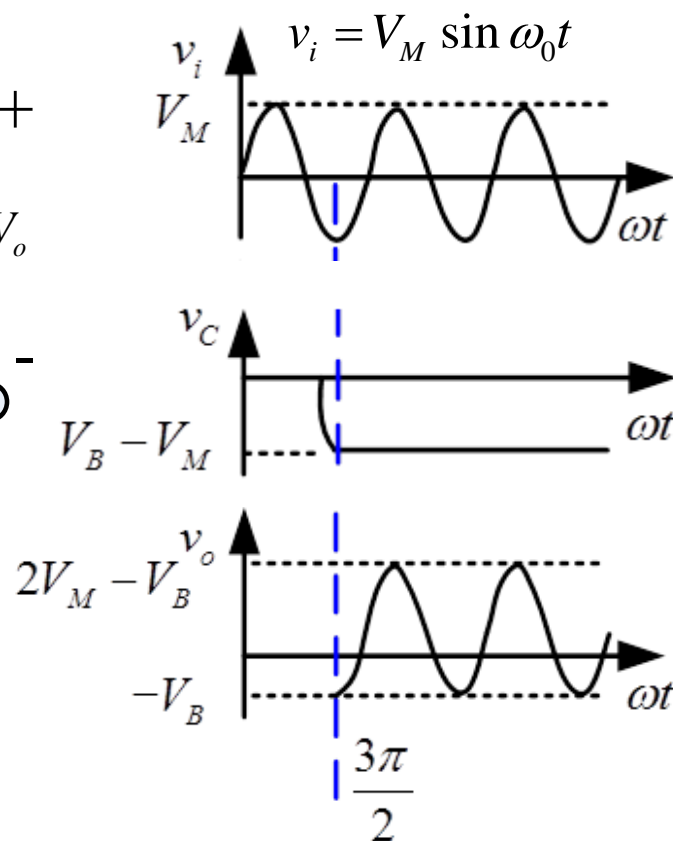
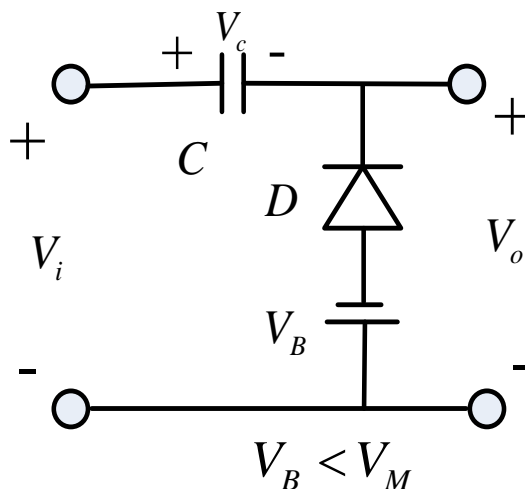
充电时间:  $\tau_1 = r_d \cdot C \approx 0$

电容端压:  $v_c = V_B - V_M$

输出:  $v_o = -V_B$

➢  $V_i$  过负顶点, D 截止, C 开始放电;

放电时间:  $\tau_2 = r_d \cdot C \approx \infty$



输出:  $v_o = v_i - v_c = V_M \sin \omega_0 t - (V_B - V_M) \Rightarrow$

信号底部电平钳制在  $-V_B$

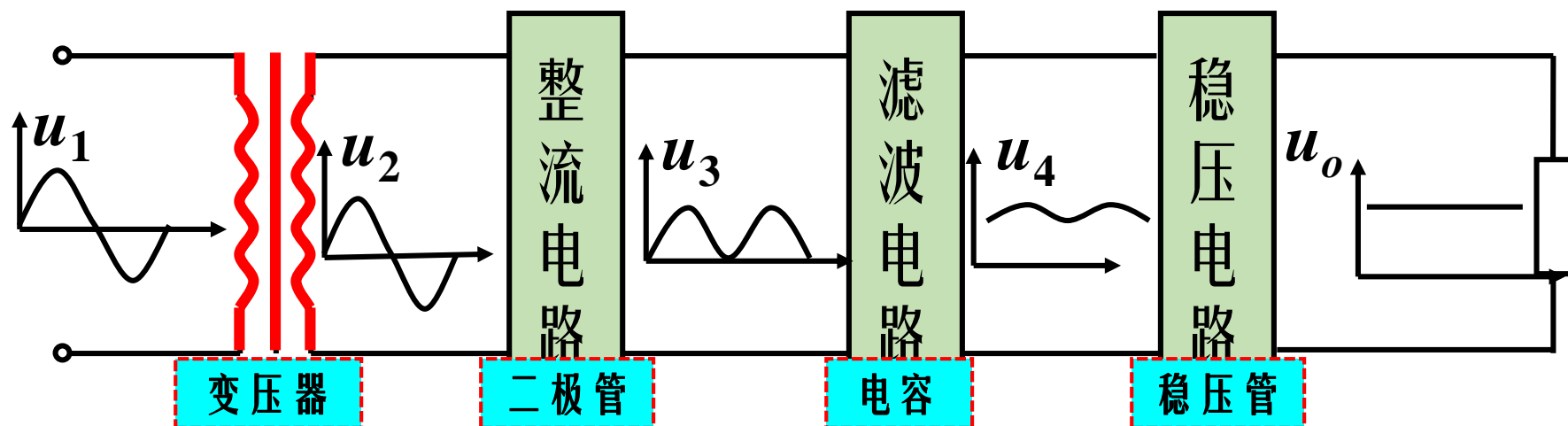
同样适合其他波形





## 4、整流、滤波电路

■ 应用背景：如何从220交流电获取低压直流稳压源？

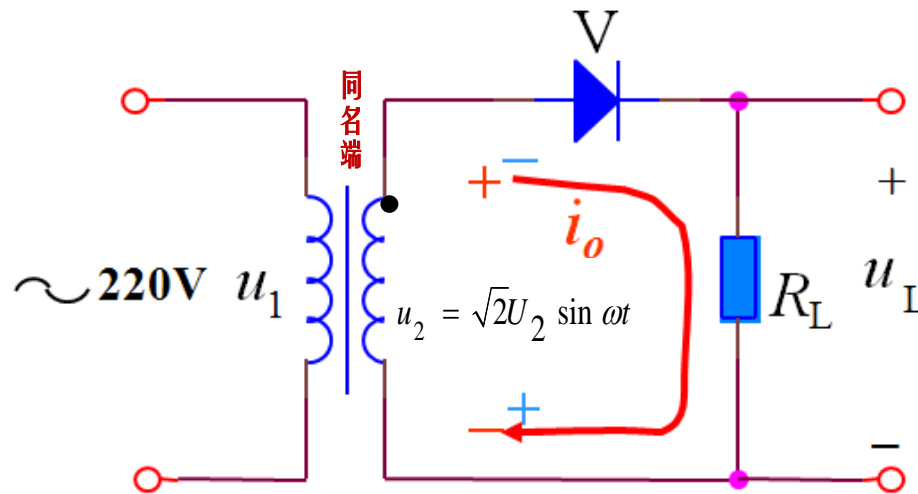


- ❖ 电源变压：将交流电  $u_1$  变为合适的交流  $u_2$ 。
- ❖ 整流电路：将交流  $u_2$  变为脉动直流电压  $u_3$ 。
- ❖ 滤波电路：将脉动直流电压  $u_3$  转变为平滑的直流电压  $u_4$ 。
- ❖ 稳压电路：清除电网波动及负载变化,保持输出  $u_o$  的稳定。



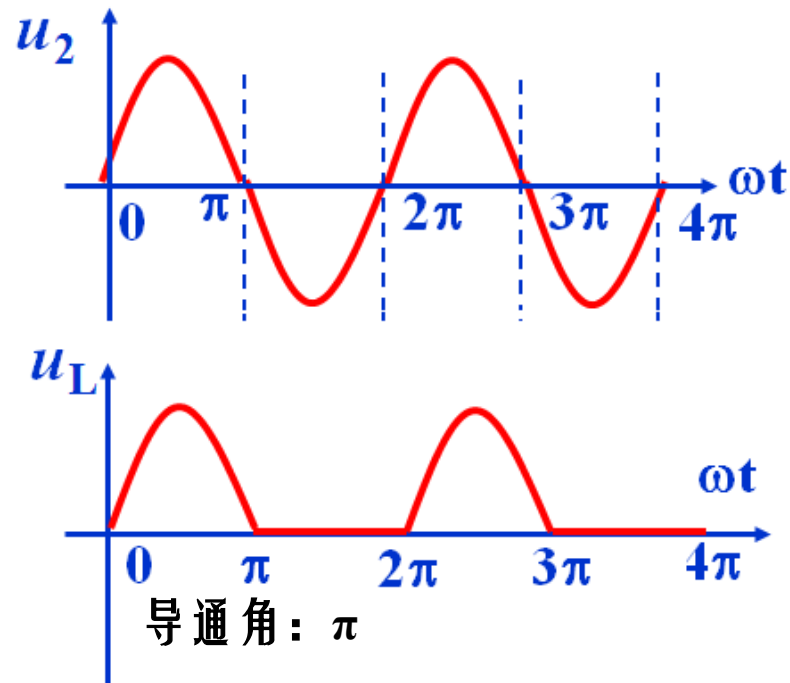


# 4.1 半波整流电路



$u_2 > 0$  时 二极管导通,  $u_L = u_2$

$u_2 < 0$  时: 二极管截止,  $u_L = 0$



(1) 输出电压平均值  $U_L$ : 
$$U_O = U_L = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45 U_2$$

(2) 输出电流平均值  $I_o$ : 
$$I_L = U_L / R_L = 0.45 U_2 / R_L$$

(3) 二极管最高反压: 
$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2$$

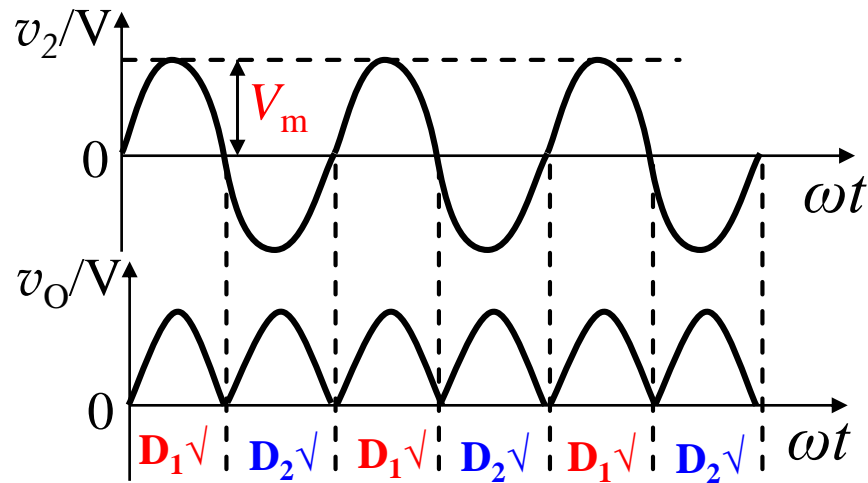
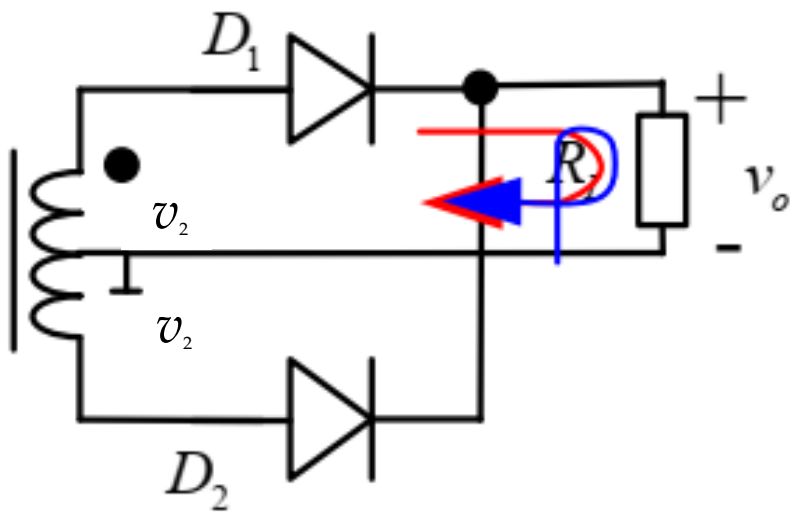
二极管如何选择?





## 4.2 全波整流电路

全波整流电路需要一个**中心抽头变压器**。



(1) 输出电压平均值  $U_L$ :

$$U_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9 U_2$$

(2) 输出电流平均值  $I_o$ :  $I_L = U_o / R_L = 0.9 U_2 / R_L$

(3) 二极管最高反压:  $U_{RM} = 2\sqrt{2} U_2$

二极管如何选择?





## 典型题解

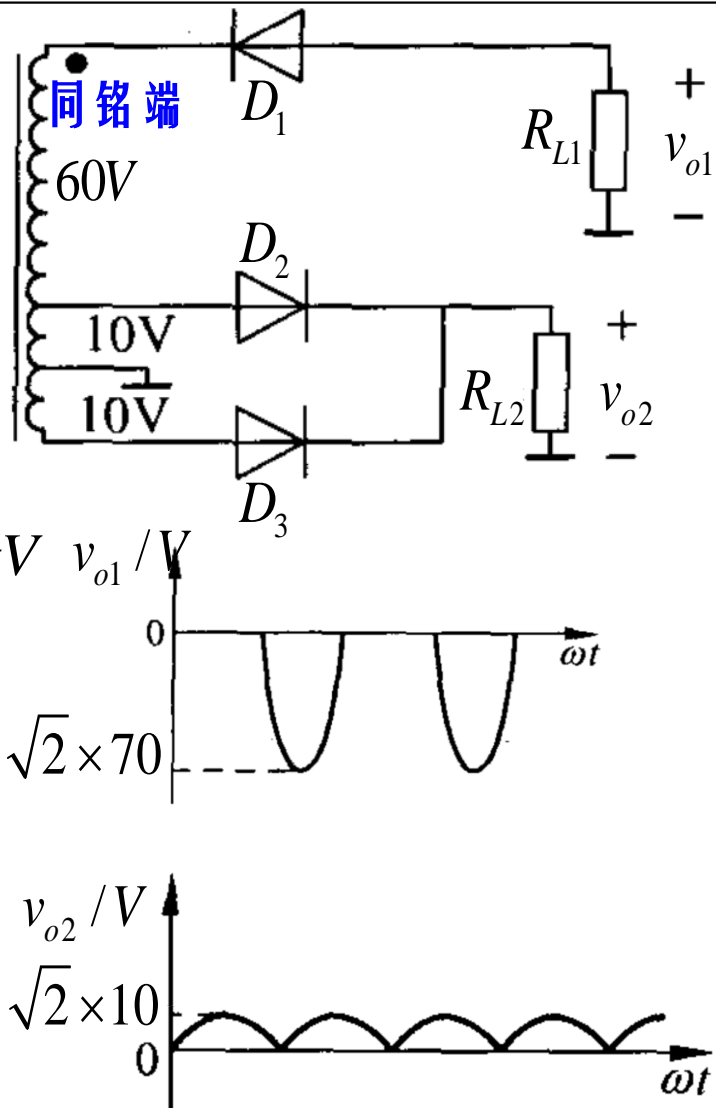
■ 在图示的整流电路中，副边电压的有效值  $v_2$  如图所示，请画出  $v_{o1}$  和  $v_{o2}$  的波形，并求它们的平均电压。

解：分析得出： $D_1$ 、 $R_{L1}$  为半波整流电路，  
其输入的交流电压有效值为： $60+10=70\text{V}$

由于  $D_1$  在负半周期导通，所以  $v_{o1} = -\sqrt{2} \times 70 \sin \omega t \text{V}$   $v_{o1} / \text{V}$

其平均值为： $V_{o1} = -70 \times 0.45 = -31.5\text{V}$

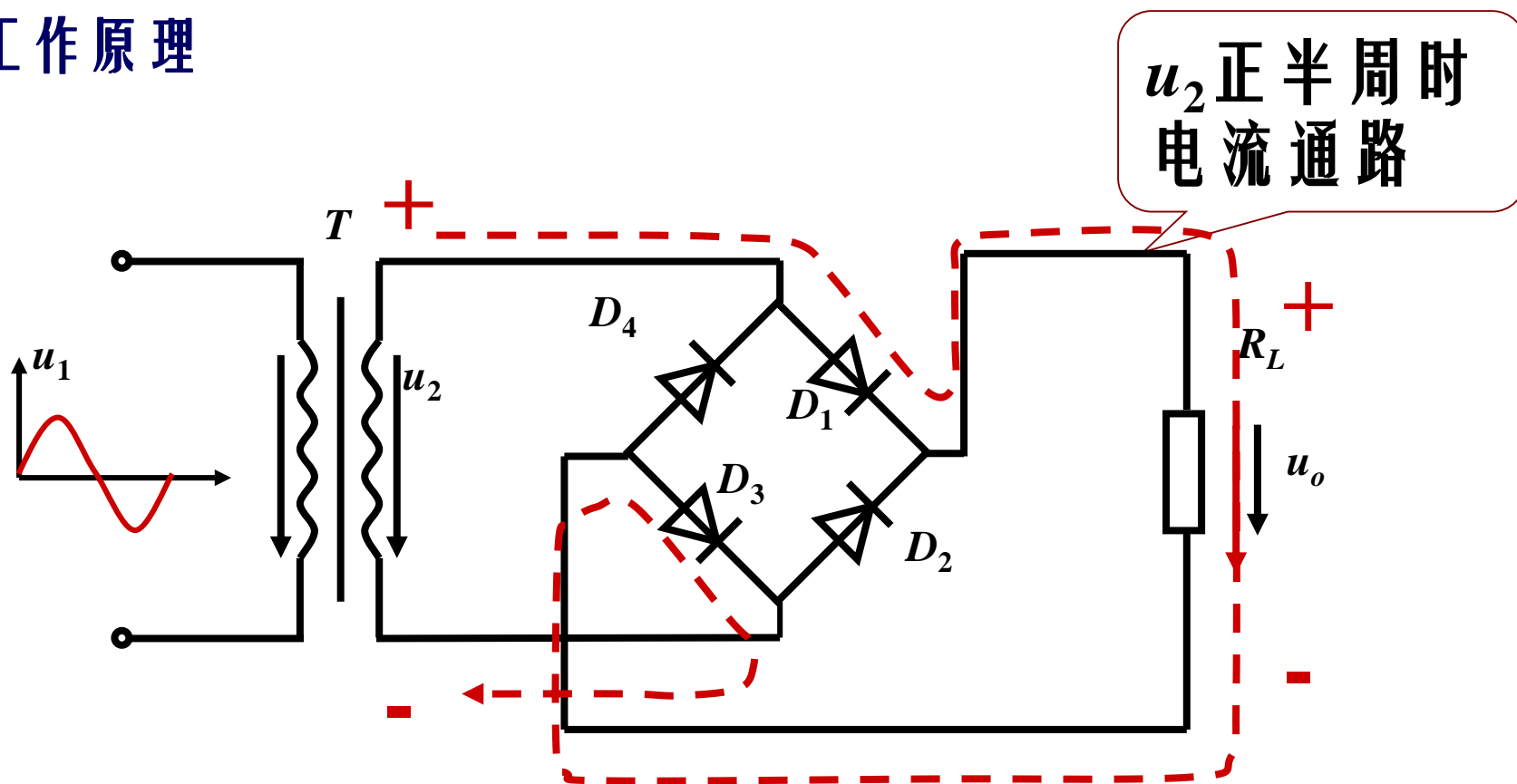
由  $D_2$ 、 $D_3$ 、 $R_{L2}$  组成的是全波整流电路， $v_{o2}$  波形  
如图所示，其平均值： $v_{o2} = 10 \times 0.9 = 9\text{V}$





## 5.3 桥式全波整流电路

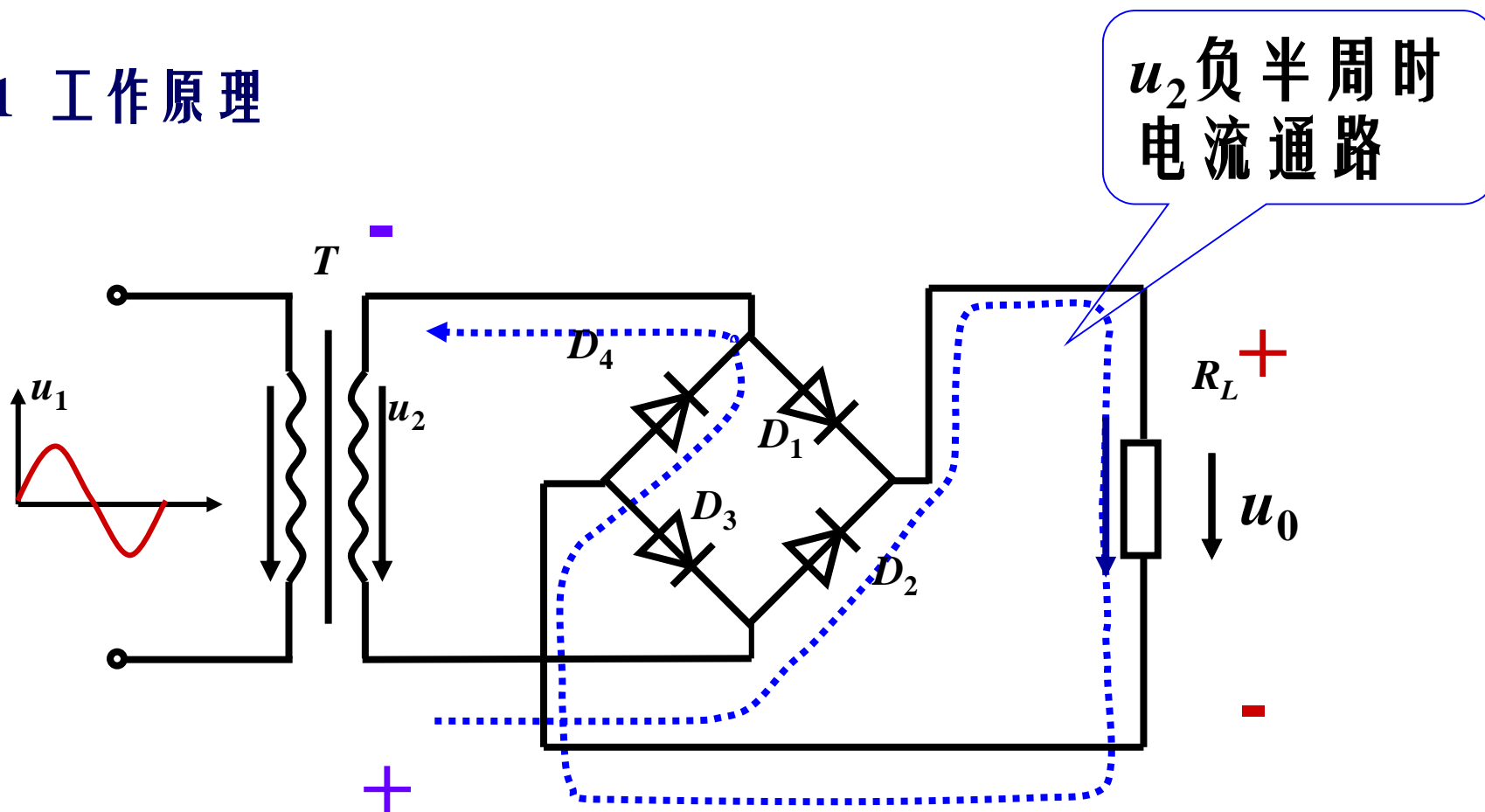
### 1 工作原理





## 4.3 桥式全波整流电路

### 1 工作原理

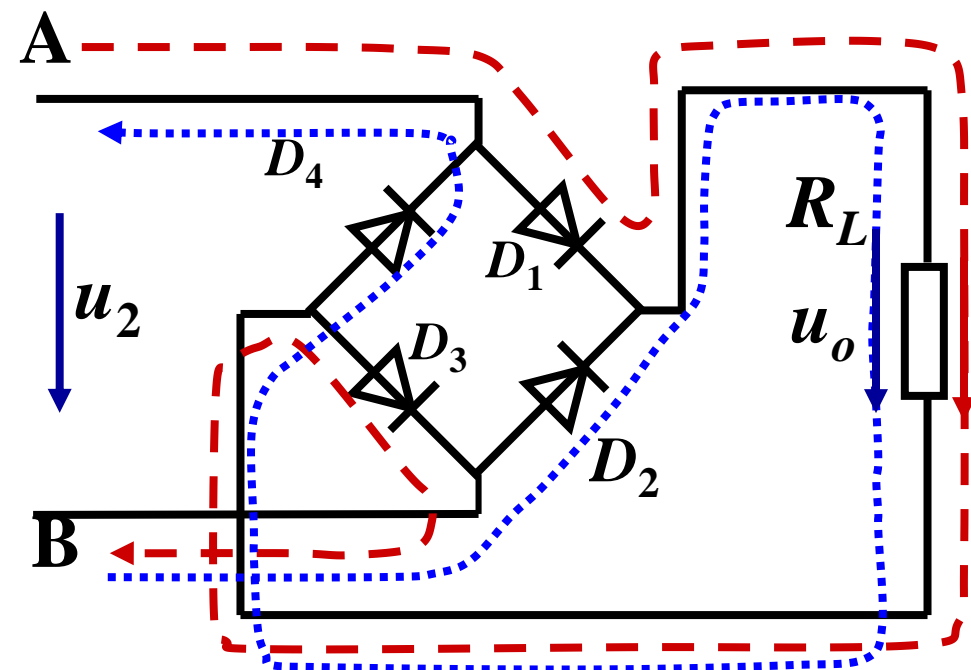
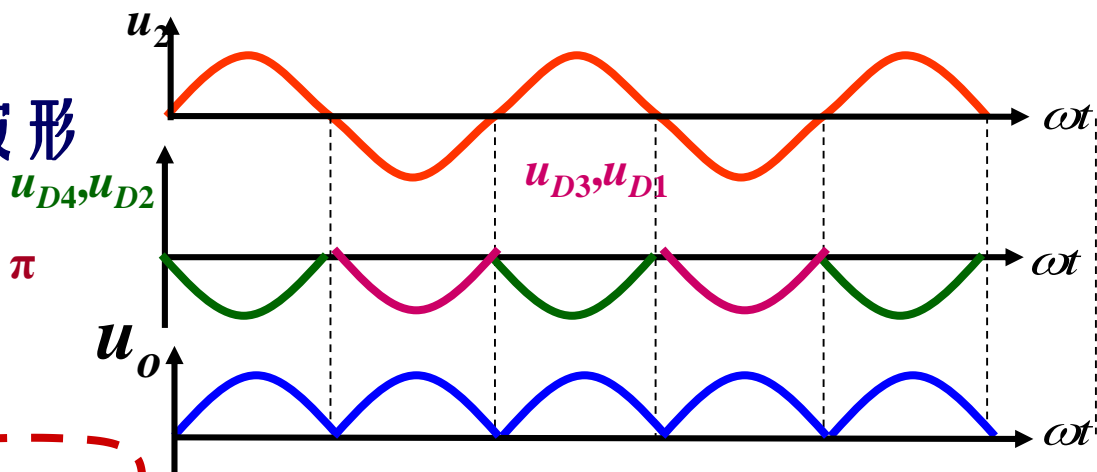




## 4.3 桥式全波整流电路

### ■ 输出波形及二极管上电压波形

e: 导通角:  $\pi$



$u_2 > 0$ 时	$u_2 < 0$ 时
$D_1, D_3$ 导通 $D_2, D_4$ 截止 电流通路: $A \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow B$	$D_2, D_4$ 导通 $D_1, D_3$ 截止 电流通路: $B \rightarrow D_2 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow A$
输出是脉动的直流电压!	





## 4.3 桥式整流电路参数计算

a. 整流输出电压平均值 ( $U_o$ )

$$U_o = U_L = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{2}U_2 |\sin \omega t| d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9U_2$$

b. 负载(平均)电流:  $I_L = \frac{0.9U_2}{R_L}$

c. 二极管平均电流:  $I_D = \frac{1}{2} I_o = 0.45 \frac{U_2}{R_L}$

d. 二极管最大反向电压:

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2$$







## § 4.4 电容滤波



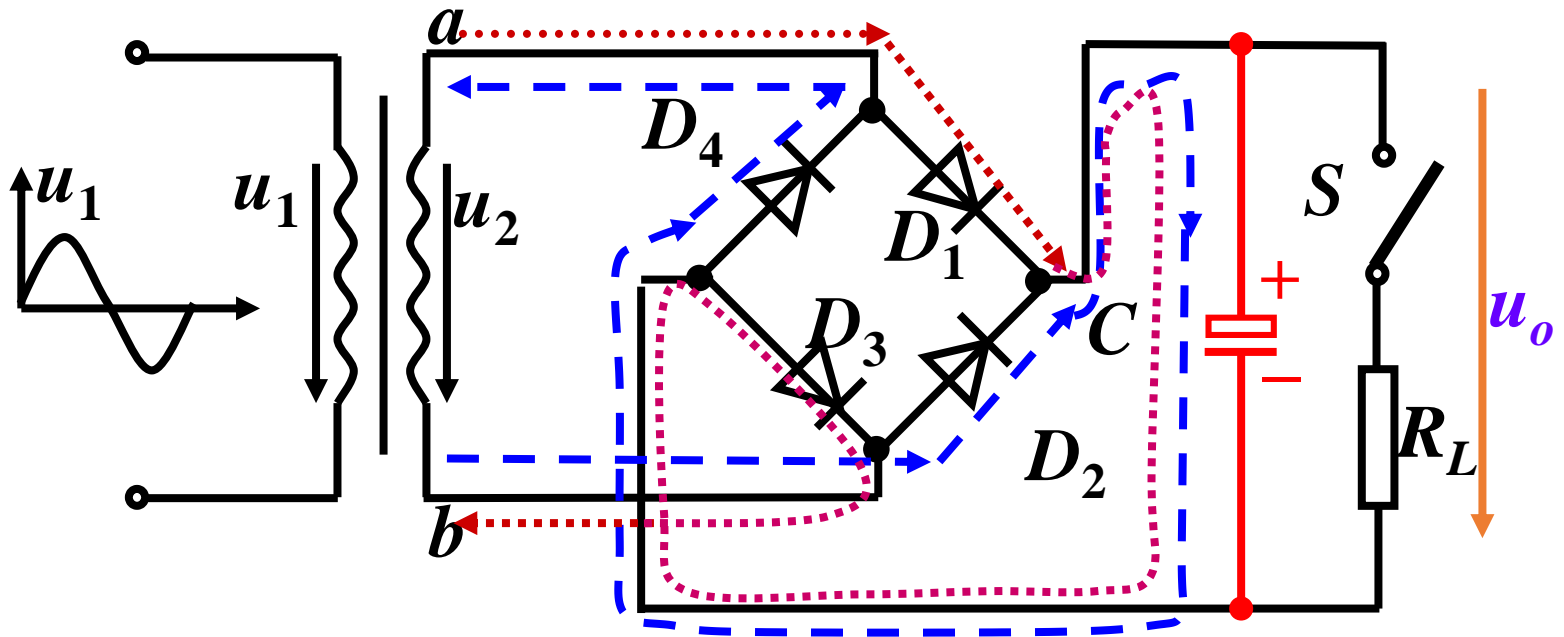
RC滤波电路的结构特点: 大电容  $C$  与负载  $R_L$  并联.

原理: 利用电容端压不能突变的特性, 滤掉输出电压中的交流成份, 保留其直流成份, 达到平滑输出波形的目的。





## § 4.4 电容滤波电路

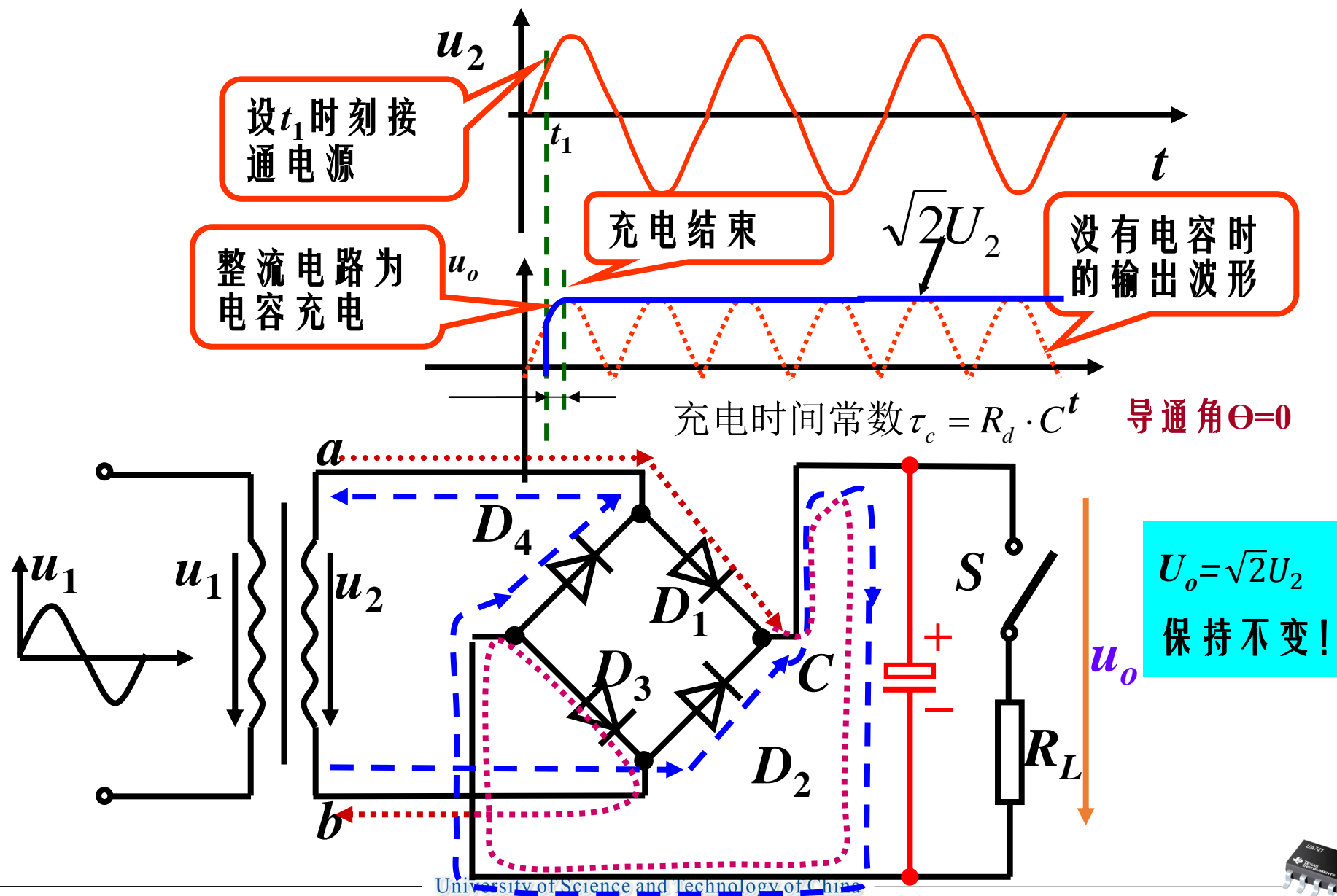


桥式整流电容滤波电路





## § 4.4 电容滤波电路(空载 $R_L=\infty$ )



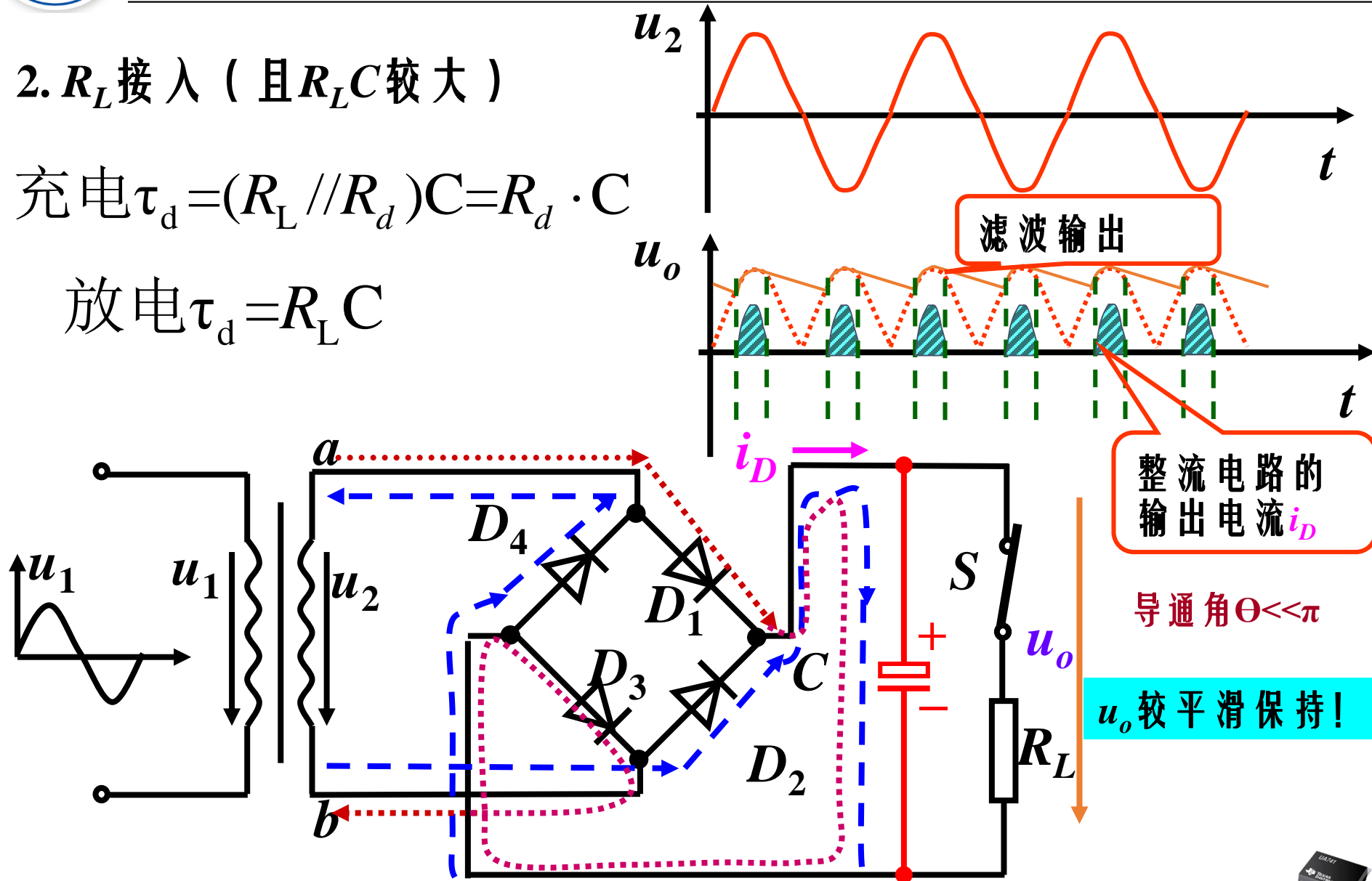


## § 4.4 电容滤波电路( $R_L$ 接入)

2.  $R_L$  接入 (且  $R_L C$  较大)

充电  $\tau_d = (R_L // R_d)C = R_d \cdot C$

放电  $\tau_d = R_L C$





## § 4.5 电容滤波电路特点

(1) 输出电压  $U_o$  与放电时间常数  $R_L C$  有关。

$R_L C$  愈大  $\rightarrow$  电容器放电愈慢  $\rightarrow U_o$  (平均值) 愈大

一般取  $\tau_d = R_L C \geq (3-5) \frac{T}{2}$

近似估算:  $U_o = (1.1-1.2) U_2$ 。

(2) 流过二极管瞬时电流很大。

$R_L C$  越大  $\rightarrow U_o$  越高

$\rightarrow$  负载电流的平均值越大；整流管导电时间越短  $\rightarrow i_D$  的峰值电流越大

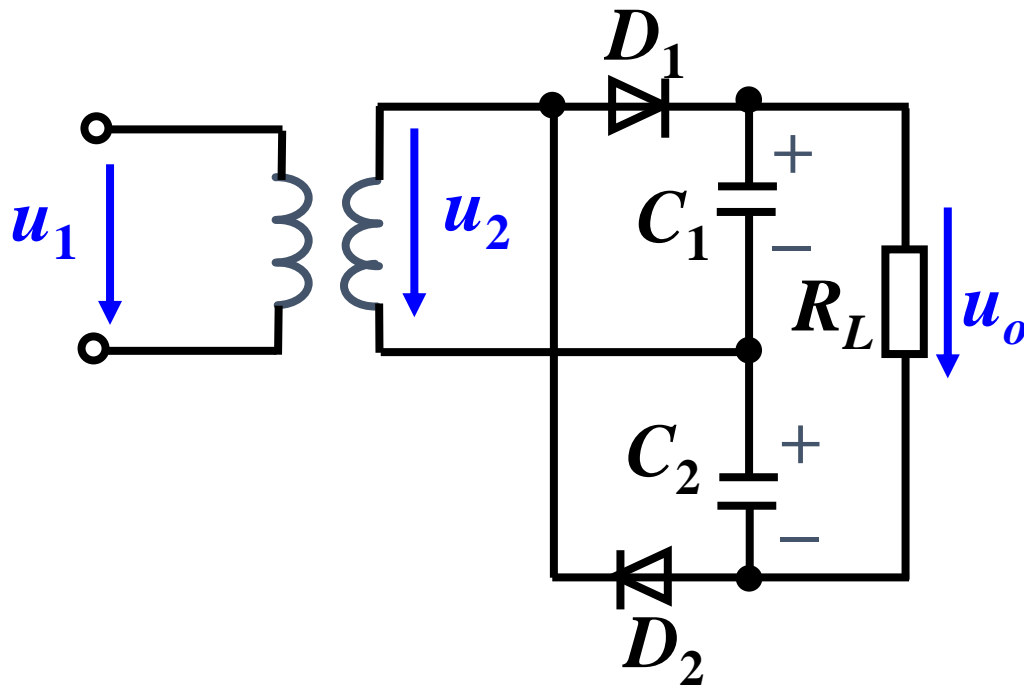
(3) 二极管  $D$  最大反压为:  $2\sqrt{2}U_2$





## 4.5 倍压整流电路

### 1 二倍压整流电路



负载上的电压： $u_o = 2\sqrt{2}U_2$

$u_2$ 的正半周时： $D_1$ 导通， $D_2$ 截止，理想情况下，电容 $C_1$ 的电压充到： $\sqrt{2}U_2$

$u_2$ 的负半周时： $D_2$ 导通， $D_1$ 截止，理想情况下，电容 $C_2$ 的电压充到： $\sqrt{2}U_2$

条件？

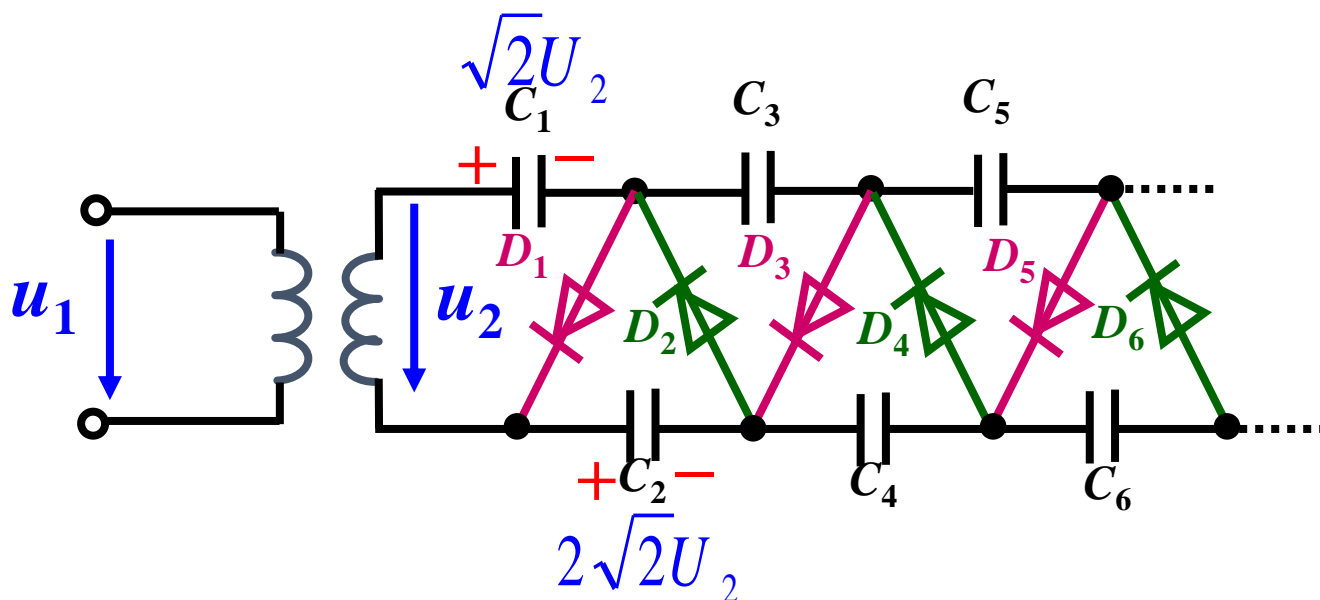
$R_L$ 大！负载电流较小！





## 4.5

# 多倍压整流电路



$u_2$  的第一个正半周:  $u_2$ 、 $C_1$ 、 $D_1$  构成回路,  $C_1$  充电到:  $\sqrt{2}U_2$

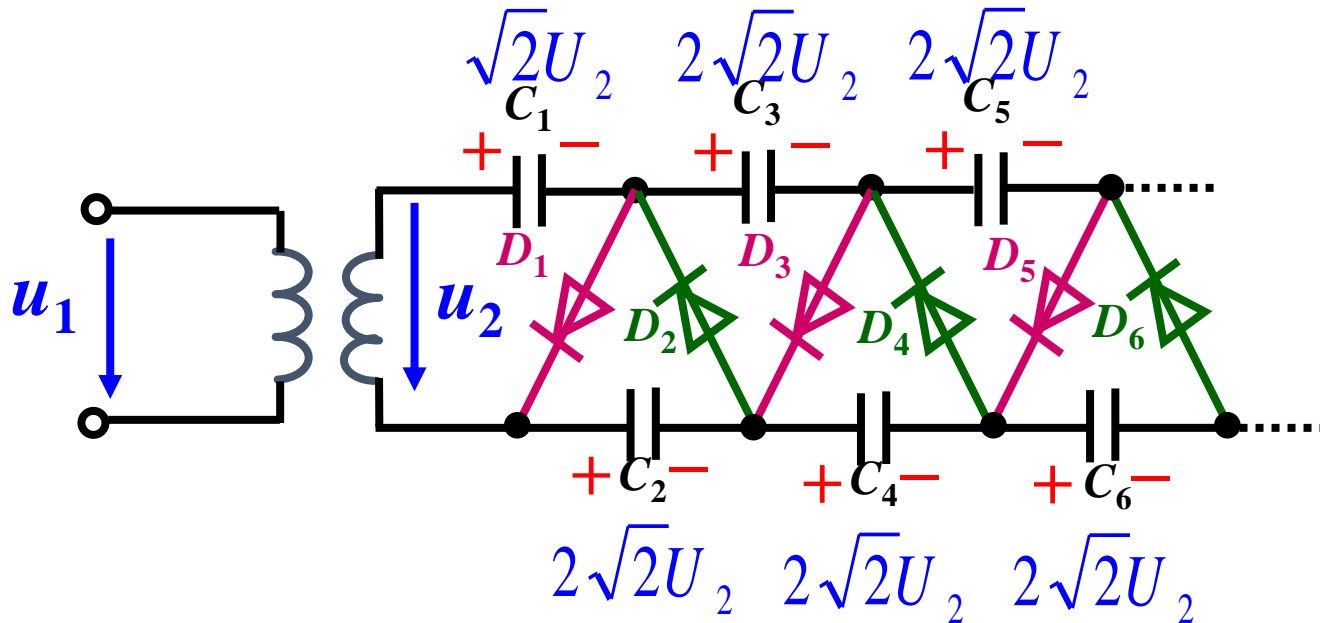
$u_2$  的第一个负半周:  $u_2$ 、 $C_2$ 、 $D_2$ 、 $C_1$  构成回路,  $C_2$  充电到:  $2\sqrt{2}U_2$





## 4.5

# 多倍压整流电路



$u_2$  的第二个正半周： $u_2$ 、 $C_1$ 、 $C_3$ 、 $D_3$ 、 $C_2$  构成回路， $C_1$  补充电荷， $C_3$  充电到： $2\sqrt{2}U_2$

$u_2$  的第二个负半周： $u_2$ 、 $C_2$ 、 $C_4$ 、 $D_4$ 、 $C_3$ 、 $C_1$  构成回路， $C_2$  补充电荷， $C_4$  充电到： $2\sqrt{2}U_2$

从不同端点可引出所需的多倍压直流输出。







# 本章小结

## ■ PN结二极管

- 熟悉PN结二极管形成机理与结构，掌握二极管非线性伏安特性曲线、工作区及其数学方程，牢记二极管导通电压及温度电压当量；
- 理解先静态后动态分析方法及二极管直流与交流电阻概念和求解方法；
- 掌握PN结二极管单向导电特性，熟练掌握二极管三种线性折线化直流模型和高低频交流模型；
- 掌握二极管电路的模型法分析方法，会针对含有1至多枚二极管电路进行直流或大信号分析；





# 本章小结

## ■ 稳压二极管及稳压电路

- 熟悉稳压二极管，掌握稳压二极管的工作原理与参数
- 掌握并联式稳压二极管电路的分析方法，判断稳压二极管工作状态方法；

## ■ 熟悉限幅电路、钳位电路及整流电路的基本结构和基本功能；掌握限幅电路、钳位电路及整流电路的基本分析方法。

