

第5章 半导体二极管及直流稳压电源



第5章 半导体二极管及直流稳压电源

- 5.1 半导体的基础知识
- 5.2 半导体二极管
- 5.3 晶体二极管电路的分析方法
- 5.4 晶体二极管的应用及直流稳压电源
- 5.5 半导体器件型号命名及方法



5.1 半导体的基础知识

■ 根据物体导电能力(电阻率)的不同, 来划分, 可分为: 导体、绝缘体和半导体。

- 1. 导体: 容易导电的物体。如: 铁、铜等
- 2. 绝缘体: 几乎不导电的物体。如: 橡胶等
- 3. 半导体:
 - 半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的物体。在一定条件下可导电。
 - 典型的半导体有硅Si和锗Ge以及砷化镓GaAs等。



5.1 半导体的基础知识

■ 根据物体导电能力(电阻率)的不同, 来划分, 可分为: 导体、绝缘体和半导体。

➤ 半导体特点:

- 1) 在外界能源的作用下, 导电性能显著变化。光敏元件、热敏元件属于此类。
- 2) 在纯净半导体内掺入杂质, 导电性能显著增加。二极管、三极管属于此类。

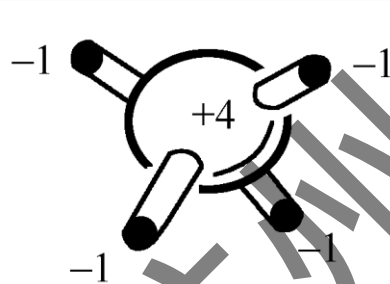


5.1.1 本征半导体

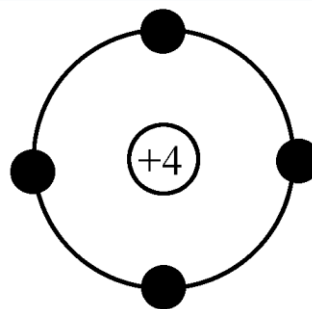
- 1. 本征半导体——纯净的晶体结构的半导体。
制造半导体器件的半导体材料的纯度要达到99.9999999%，常称为“九个9”。电子技术中用的最多的是硅和锗。

无杂质

稳定的结构
- 硅和锗都是4价元素，它们的外层电子都是4个，称为价电子。其简化原子结构模型如下图：



(a) 三维模型



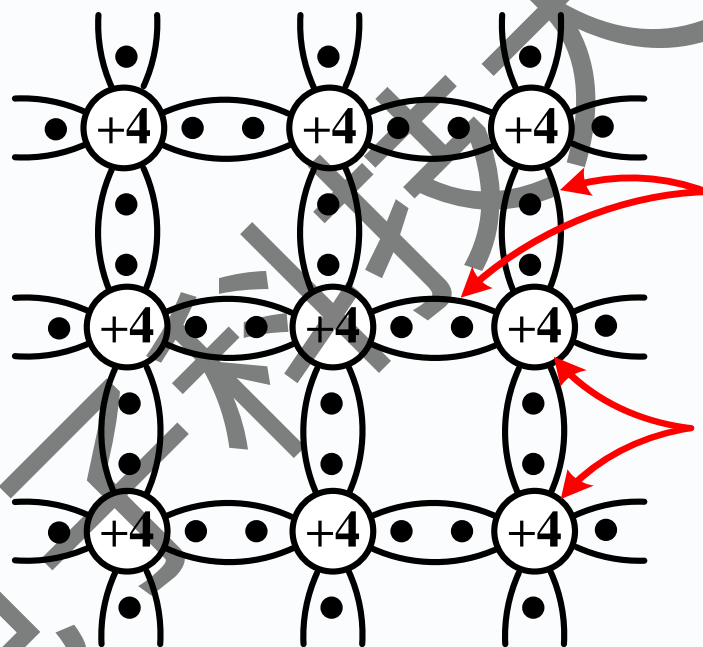
(b) 平面模型



2.本征半导体的共价键结构

每个原子的四个价电子分别与周围的四个原子的价电子形成**共价键**。

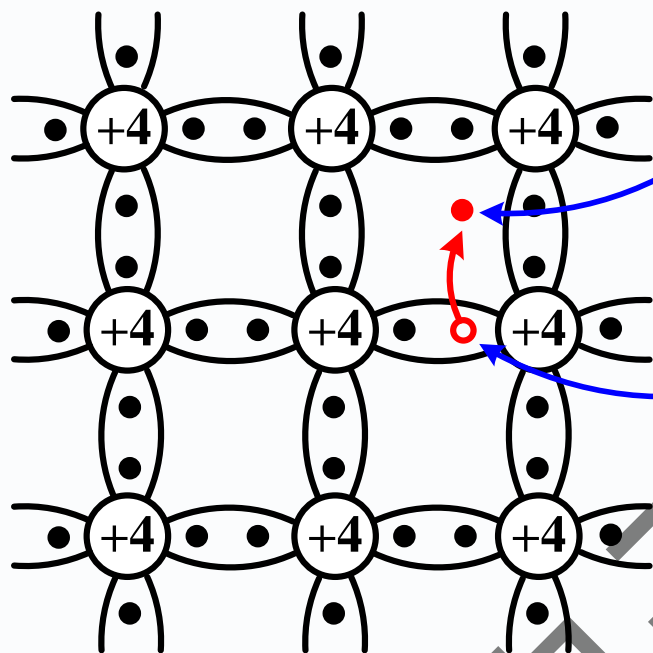
共价键中的价电子为这些原子所共有，并为它们所束缚，在空间形成排列有序的晶体。



两个电子的共价键

正离子芯

3. 本征半导体中的两种载流子



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

这一现象称为**本征激发(热激发)**

自由电子的产生使共价键中留有一个空位置，称为空穴

自由电子与空穴相碰同时消失，称为**复合**。

动态平衡

由于随机热振动致使共价键被打破而产生空穴—电子对

一定温度下，自由电子与空穴对的浓度一定；温度升高，热运动加剧，挣脱共价键的电子增多，自由电子与空穴对的浓度加大。

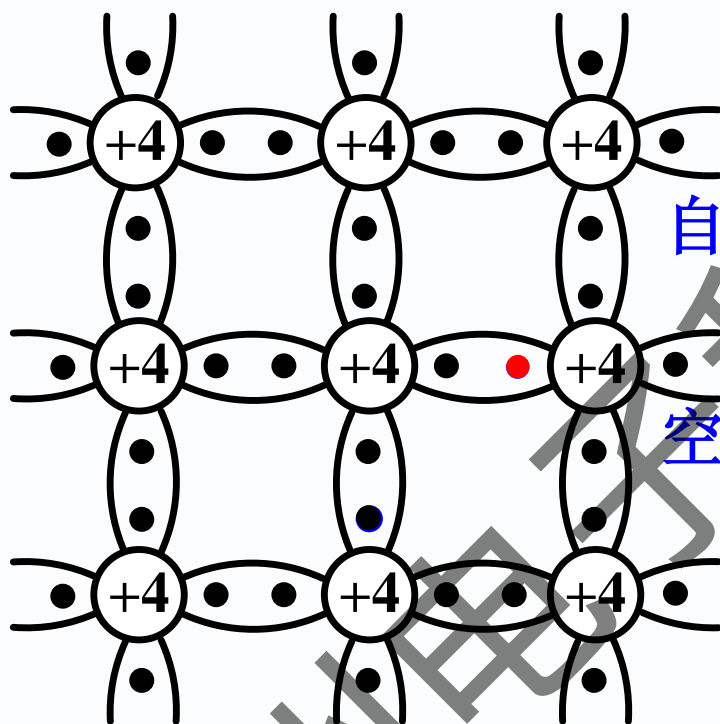


空穴的移动

- 由于共价键中出现了空穴，在外加能源的激发下，邻近的价电子有可能挣脱束缚补到这个空位上，而这个电子原来的位置又出现了空穴，其它电子又有可能转移到该位置上。这样一来在共价键中就出现了**电荷迁移**——电流。
- 电流的方向与电子移动的方向相反，与空穴移动的方向相同。本征半导体中，产生电流的根本原因是由于共价键中出现了空穴。



空穴的移动



自由电子

空穴

空穴的运动

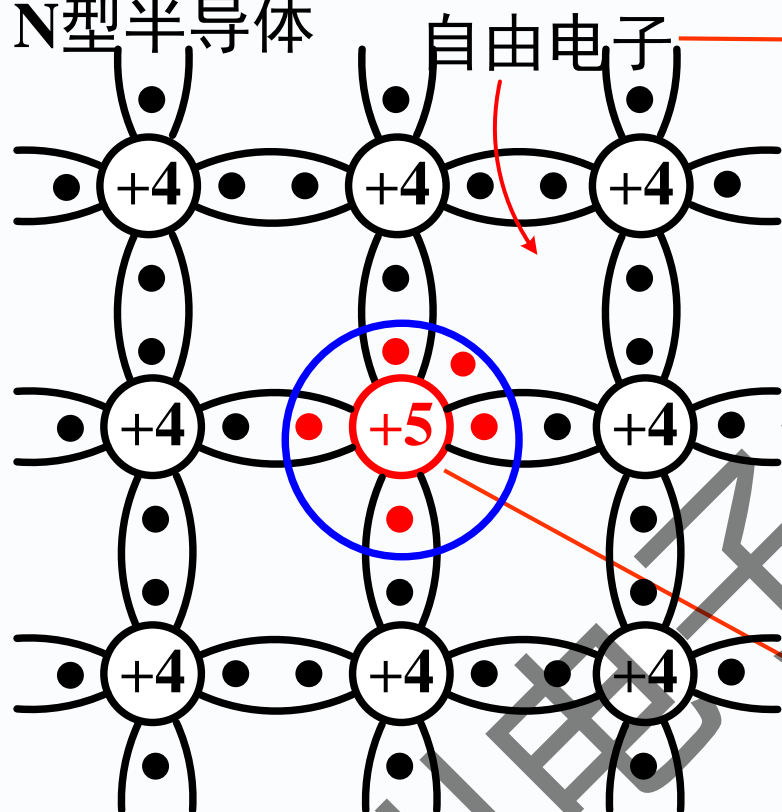
空穴的运动实质上是价电子填补空穴而形成的。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

5.1.2 杂质半导体

1. N型半导体



多数载流子

空穴比未加杂质时的数目多了？少了？为什么？

杂质半导体主要靠多数载流子导电。掺入杂质越多，多子浓度越高，导电性越强，实现导电性可控。

施主正离子

磷 (P)

施主杂质

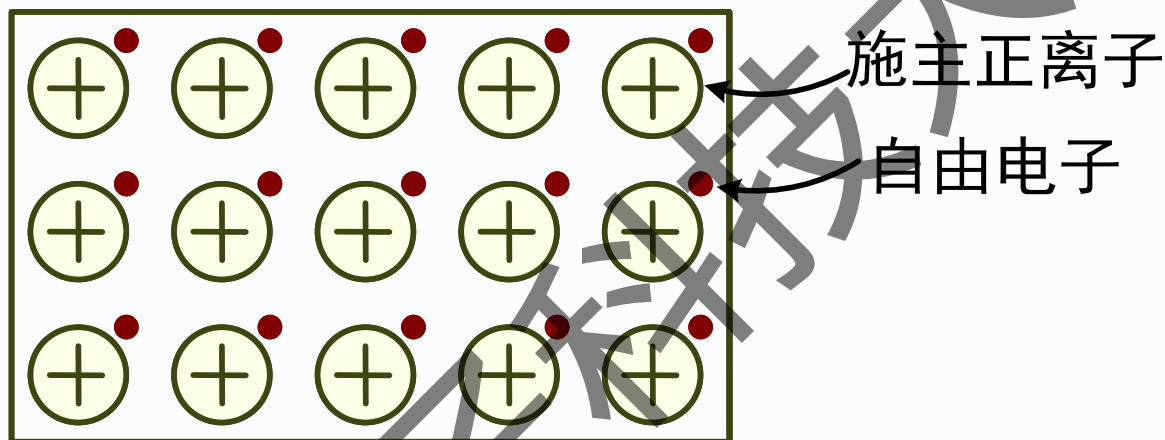
在N型半导体中自由电子是多数载流子，它主要由杂质原子提供；空穴是少数载流子，由热激发形成。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

5.1.2 杂质半导体

N型半导体的结构示意图如图所示：

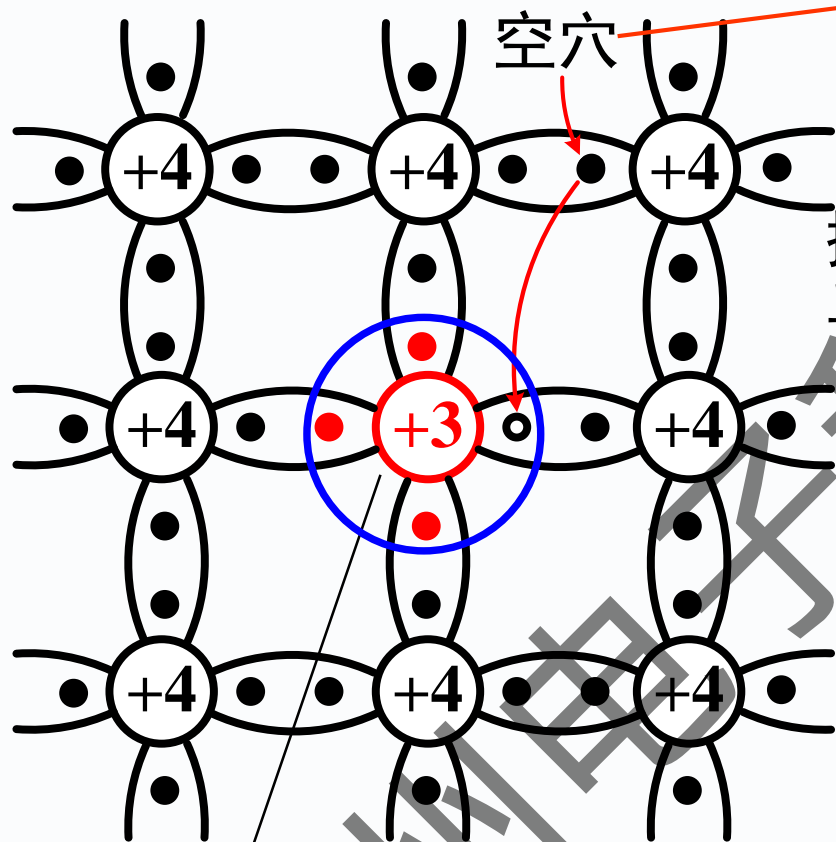


所以，N型半导体中的导电粒子有两种：

自由电子——多数载流子（由两部分组成）

空穴——少数载流子

2. P型半导体



多数载流子

空穴

硼 (B)

受主杂质

受主负离子

P型半导体主要靠空穴导电，掺入杂质越多，空穴浓度越高，导电性越强，

在杂质半导体中，温度变化时，载流子的数目变化吗？

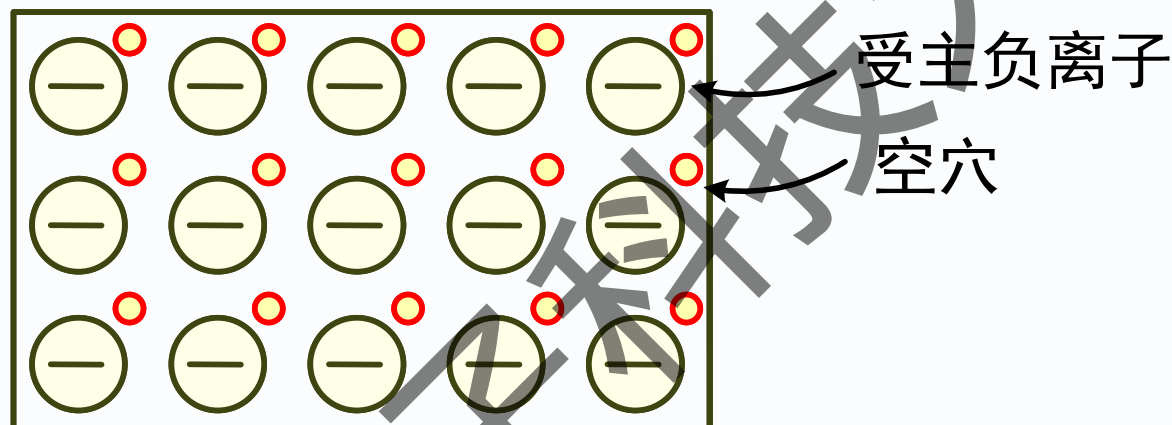
在P型半导体中空穴是多数载流子，它主要由掺杂形成；自由电子是少数载流子，由热激发形成。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. P型半导体

P型半导体的结构示意图如图所示：



P型半导体中：

空穴是多数载流子，主要由掺杂形成；
电子是少数载流子，由热激发形成。

本节中的有关概念

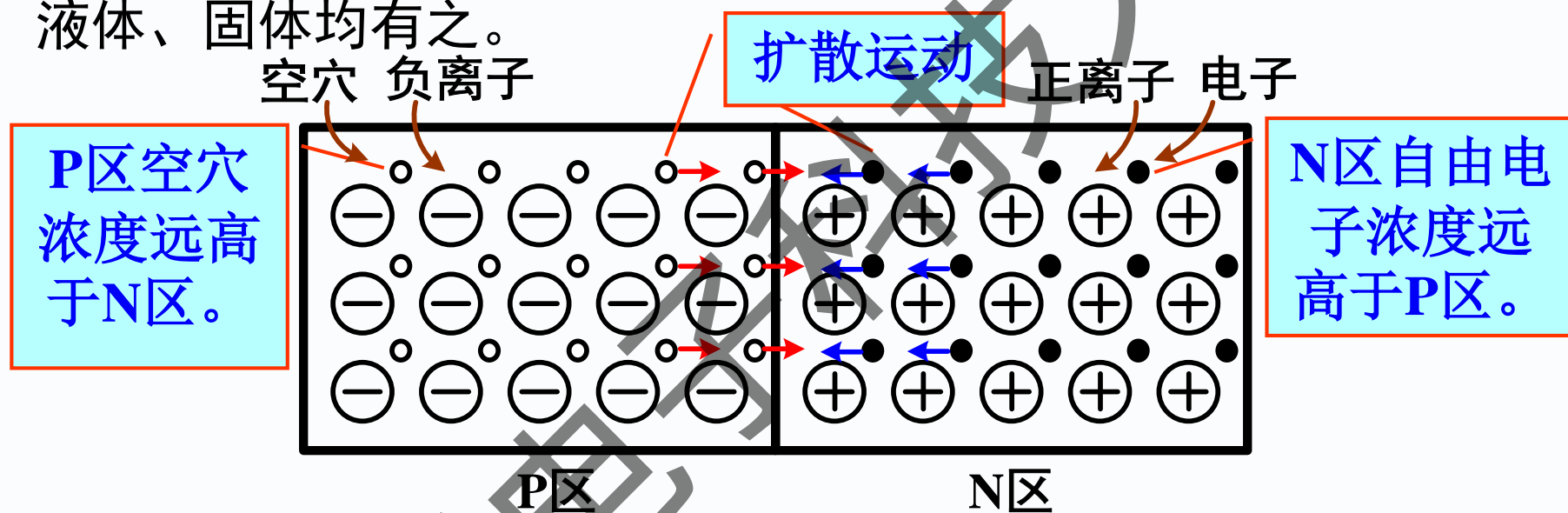
- 本征半导体、杂质半导体
- 施主杂质、受主杂质
- N型半导体、P型半导体
- 自由电子、空穴
- 多数载流子、少数载流子



5.1.3 PN结的形成及特性

1. PN 结的形成

物质因浓度差而产生的运动称为扩散运动。气体、液体、固体均有之。

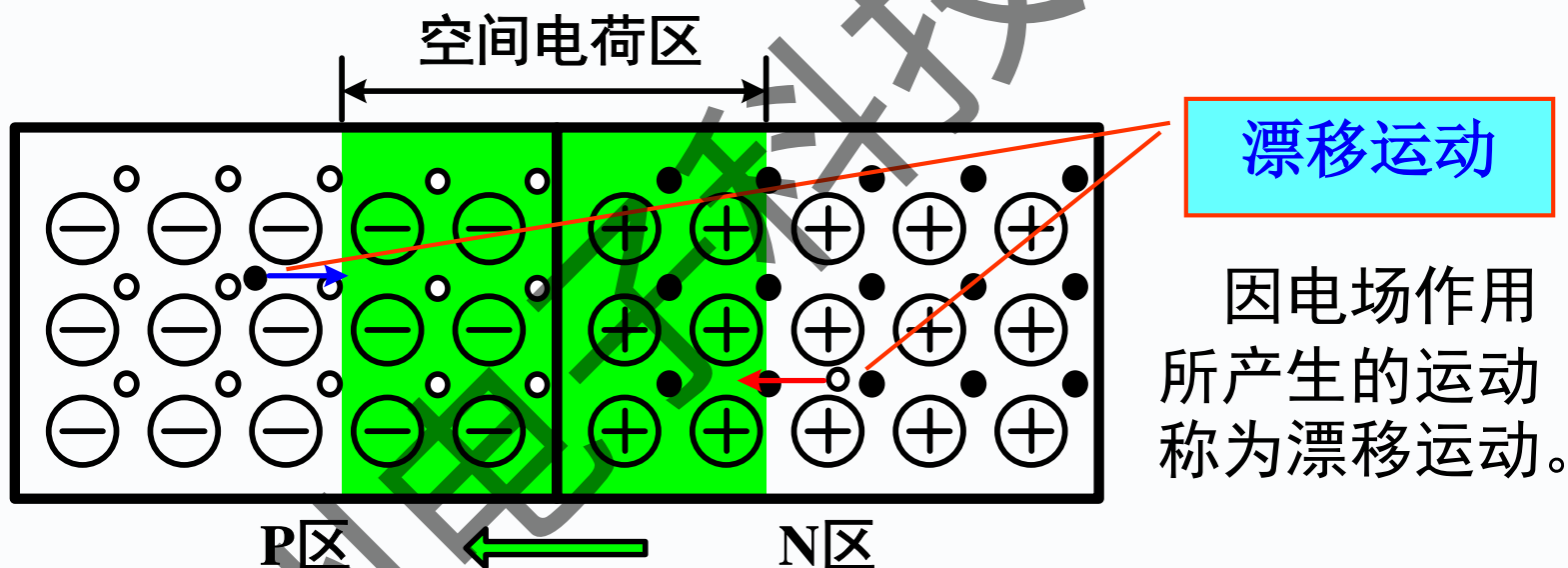


扩散运动使靠近接触面P区的空穴浓度降低、靠近接触面N区的自由电子浓度降低，产生内电场。

1. PN 结的形成

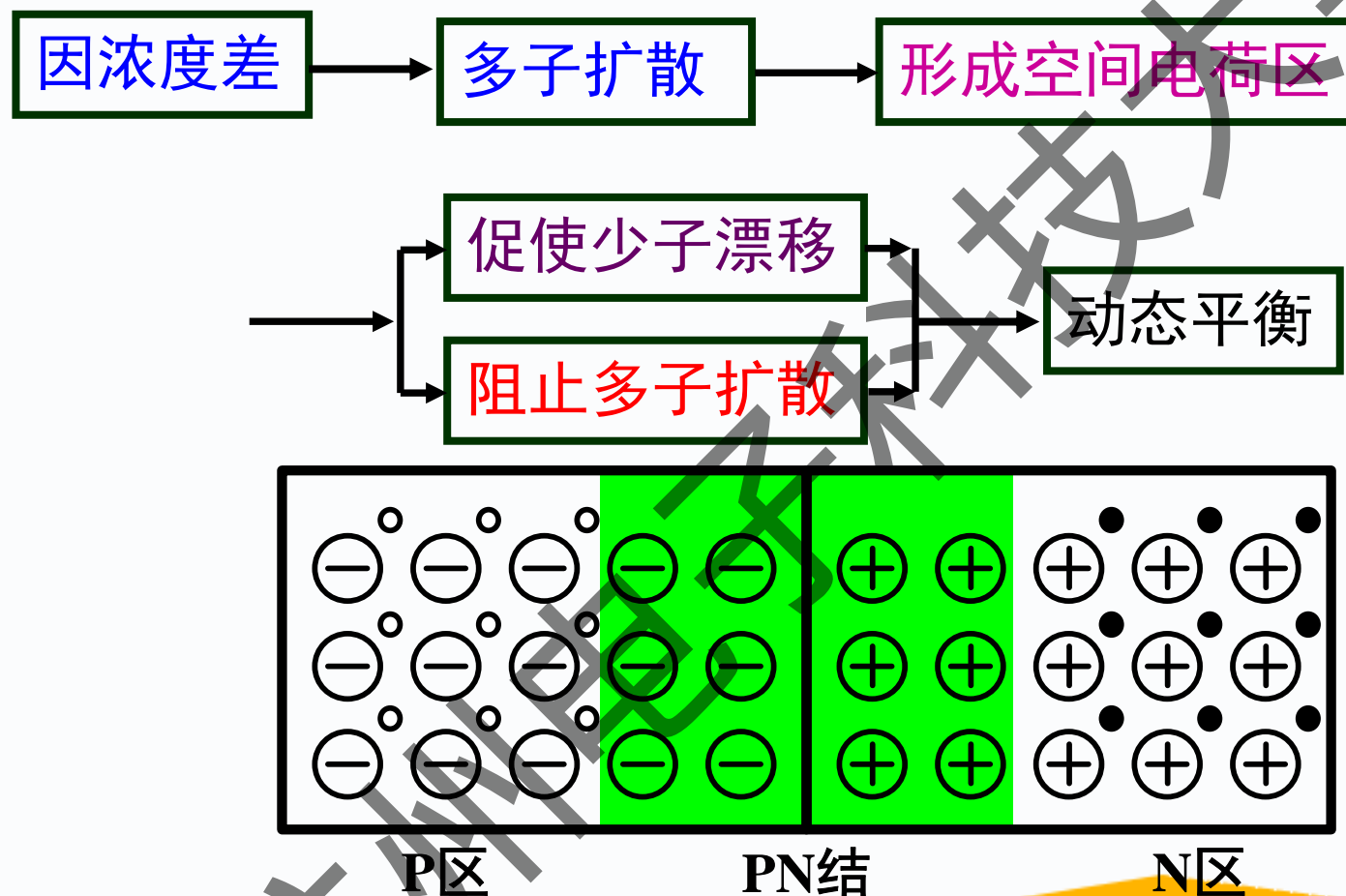
由于扩散运动使P区与N区的交界面缺少多数载流子，形成内电场，从而阻止扩散运动的进行。

内电场使空穴从N区向P区、自由电子从P区向N区运动。

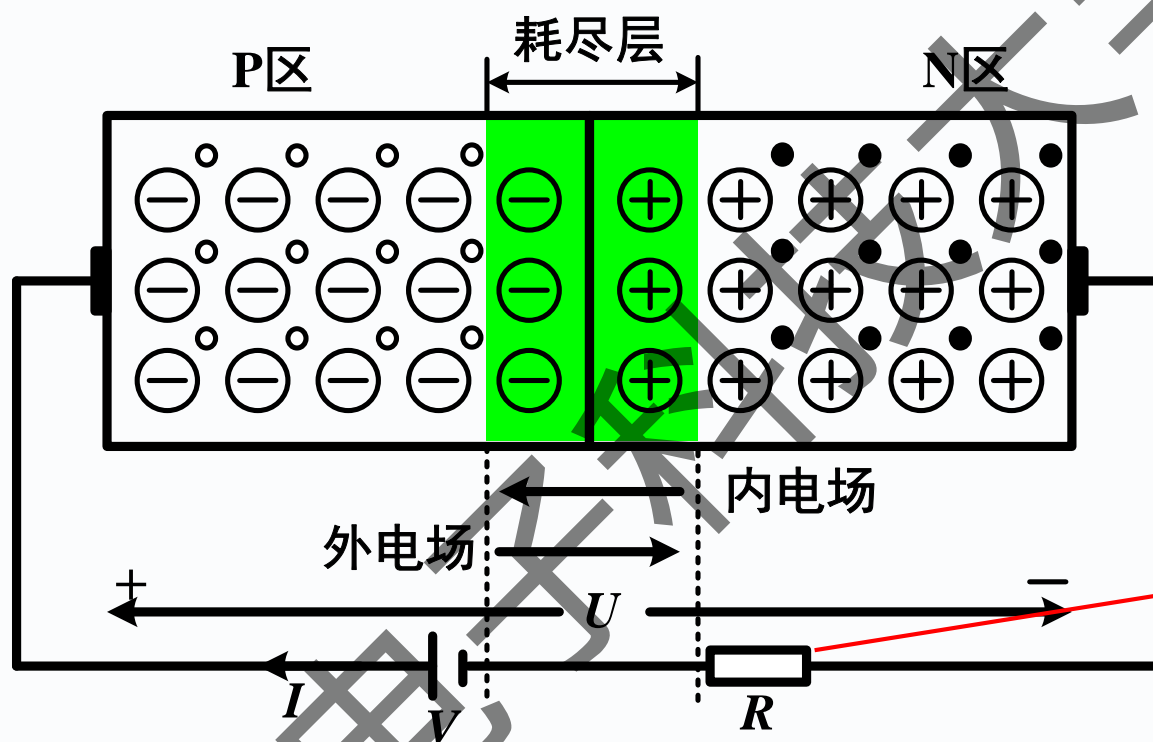


参与扩散运动和漂移运动的载流子数目相同，达到动态平衡，就形成了PN结。

1. PN 结的形成



2. PN 结的单向导电性



必要吗?

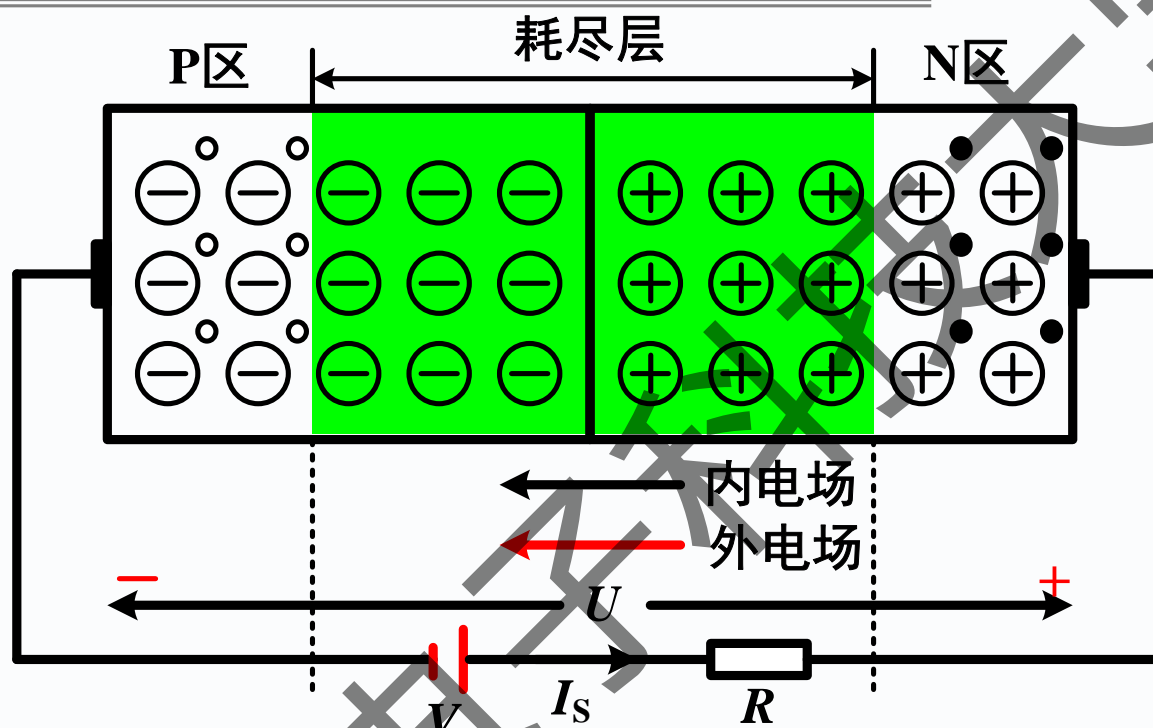
PN结加正向电压导通:

耗尽层变窄, 扩散运动加剧, 由于外电源的作用, 形成扩散电流, PN结处于导通状态。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. PN 结的单向导电性



PN结加反向电压截止：

耗尽层变宽，阻止扩散运动，有利于漂移运动，形成漂移电流。由于电流很小，故可近似认为其截止。

2. PN 结的单向导电性

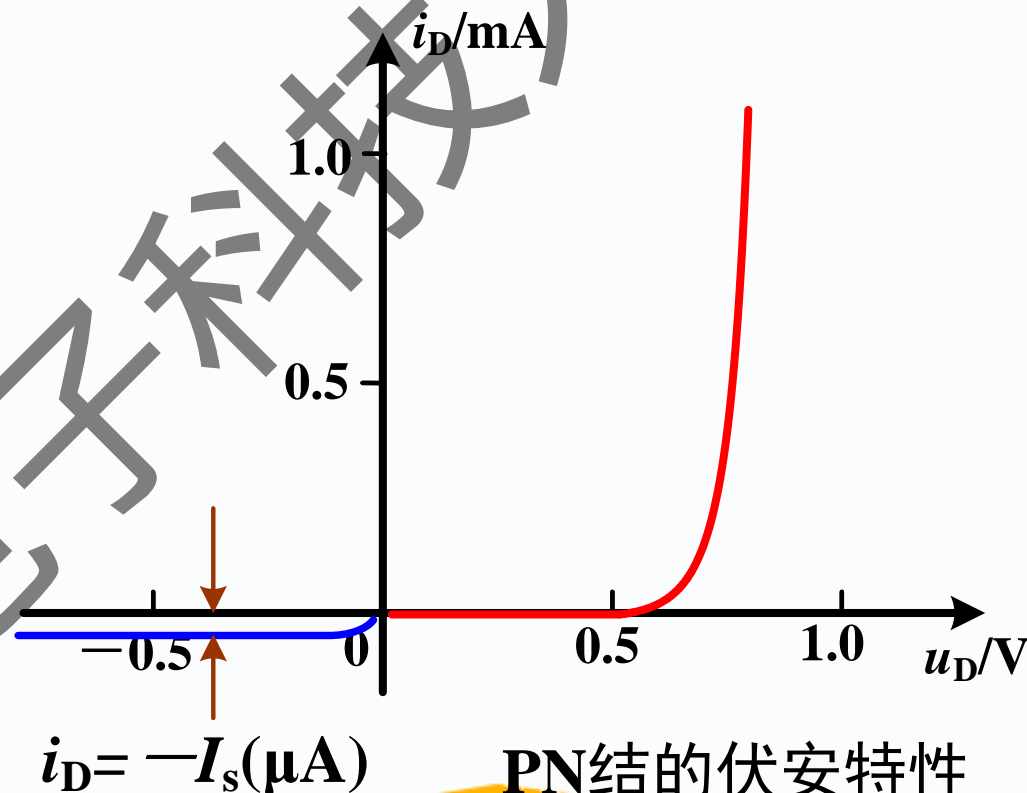
当外加电压使PN结中P区的电位高于N区的电位，称为加**正向电压**，简称**正偏**；反之称为加**反向电压**，简称**反偏**。

(1) PN结加正向电压时

低电阻
大的正向扩散电流

(2) PN结加反向电压时

高电阻
很小的反向漂移电流



2.PN 结的单向导电性

(2) PN结加反向电压时

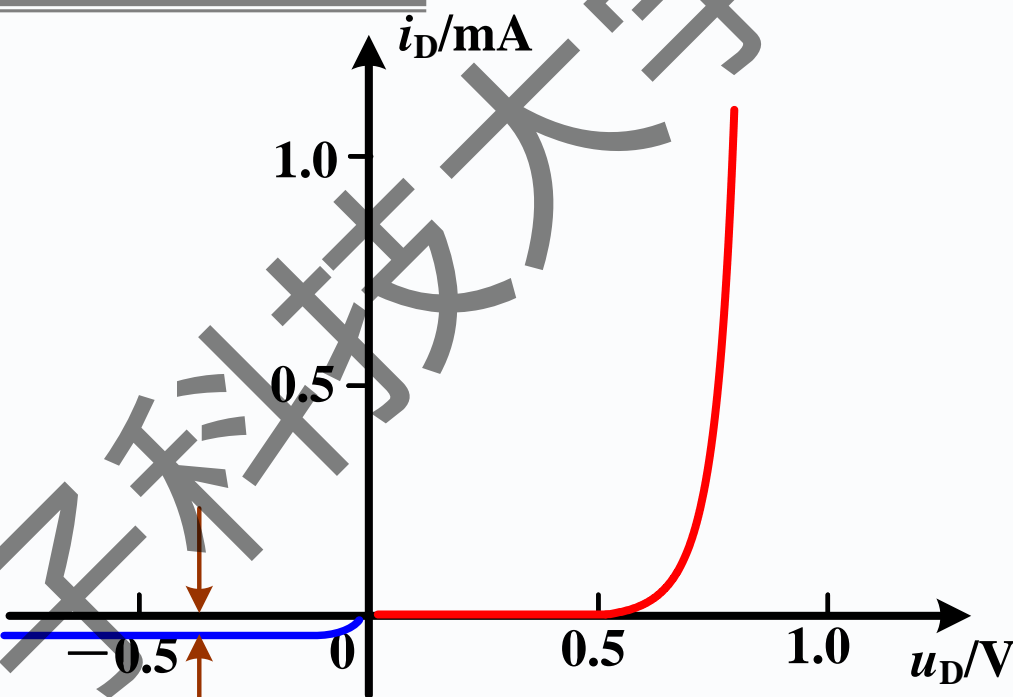
高电阻
很小的反向漂移电流

在一定的温度条件下，由本征激发决定的少子浓度是一定的，故少子形成的漂移电流是恒定的，

$$i_D = -I_s (\mu\text{A})$$

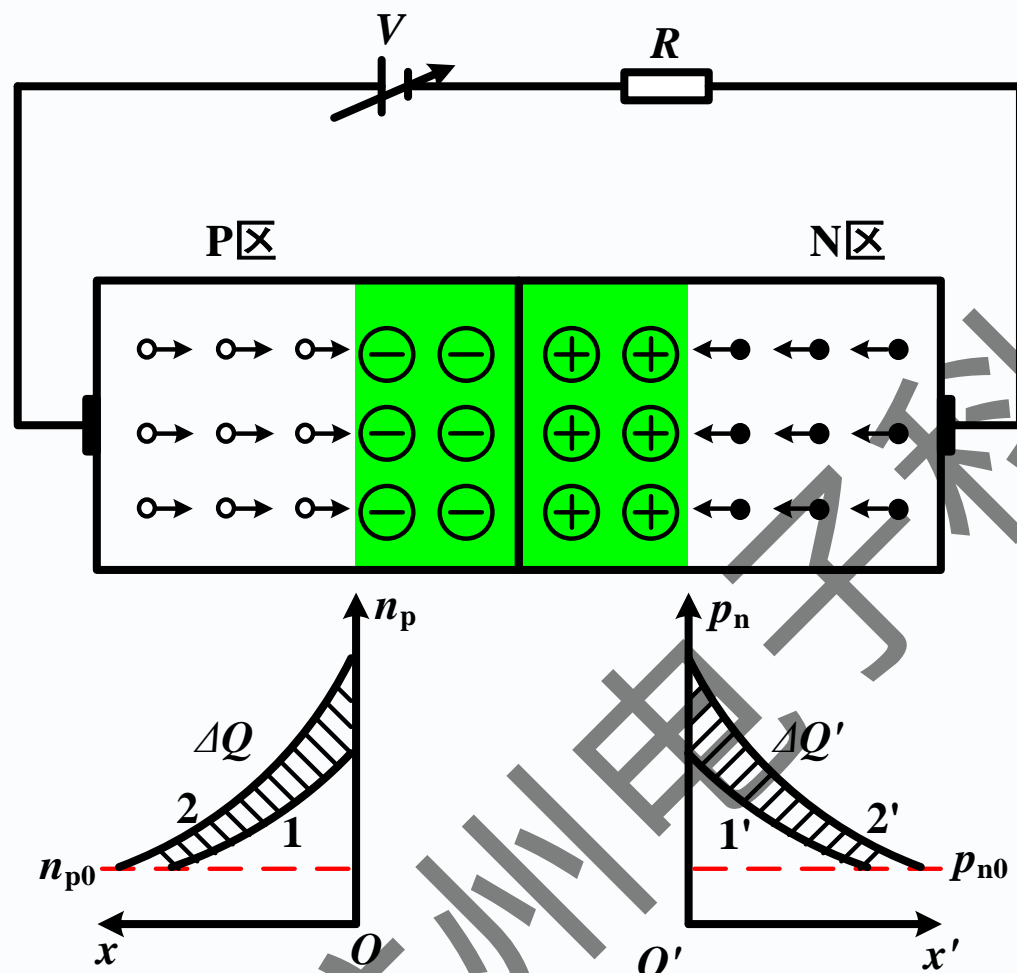
PN结的伏安特性

基本上与所加反向电压的大小无关，这个电流也称为反向饱和电流。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

3. PN结的电容效应



扩散电容示意图

(1) 扩散电容 C_D

是由多数载流子在扩散过程中积累而引起的。

正向电压时，载流子积累电荷量发生变化，相当于电容器充电和放电的过程

—— 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。

3. PN结的电容效应

(2) 势垒电容 C_T

是由 PN 结的空间电荷区变化形成的。
空间电荷区的正负离子数目发生变化，如同电容的放电和充电过程。

势垒电容的大小可用下式表示：
$$C_T = \epsilon \frac{S}{l}$$

ϵ ：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 随外加电压 U 而变化，因此势垒电容 C_T 不是一个常数。

结电容

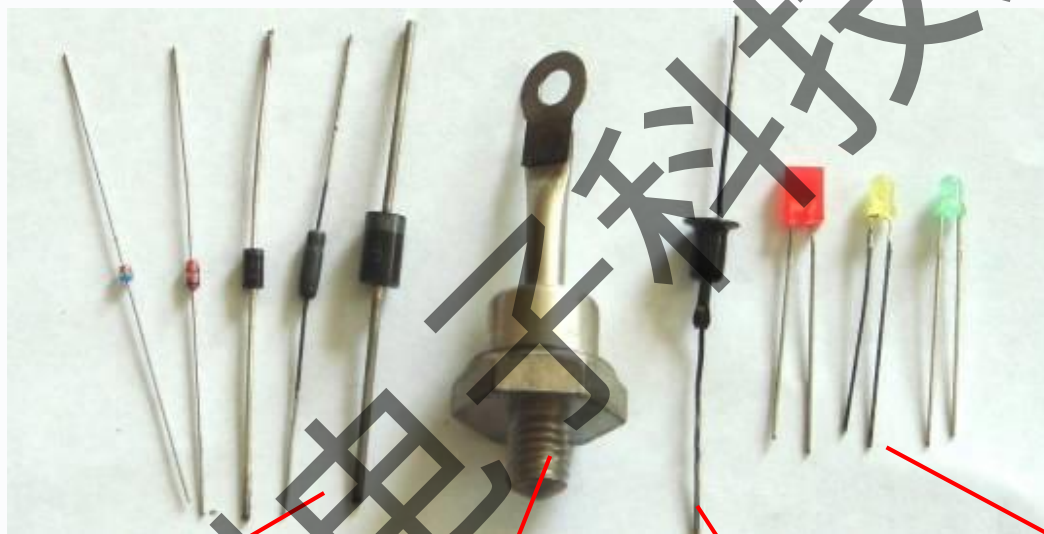
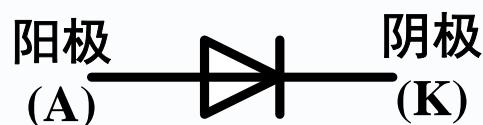
$$C_j = C_T + C_D$$



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

5.2 半导体二极管

将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管。



小功率
二极管

大功率
二极管

稳压
二极管

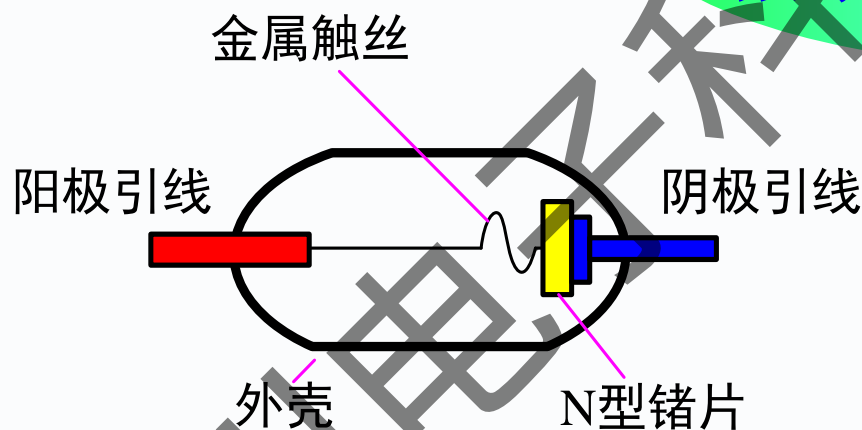
发光
二极管

1. 半导体二极管的结构

二极管按结构分有**点接触型**、**面接触型**两大类。

(1) 点接触型二极管

PN结面积小，结电容小，用于检波和变频等高频电路。



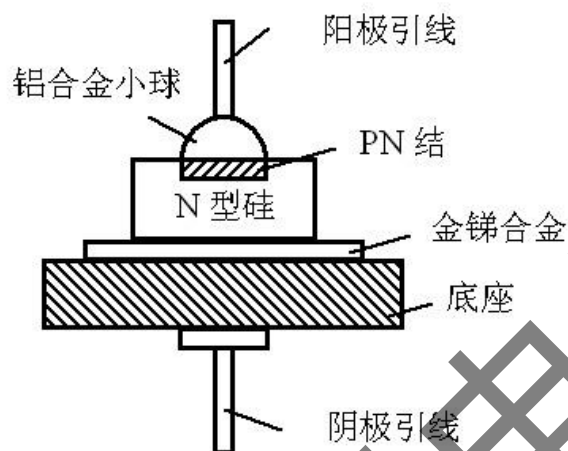
二极管的结构示意图

(a)点接触型

1. 半导体二极管的结构

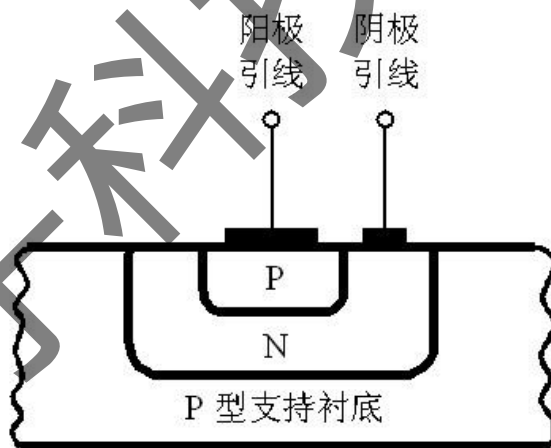
(2) 面接触型二极管

PN结面积大，用于
工频大电流整流电路。



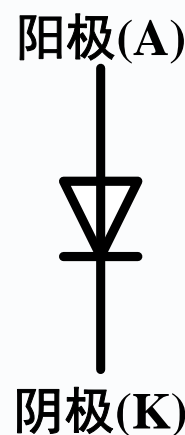
(a)

(a)面接触型



(b)

(b)集成电路中的平面型



(c)

(c)代表符号

2. 二极管的伏安特性

$$i = I_S (e^{u/U_T} - 1)$$

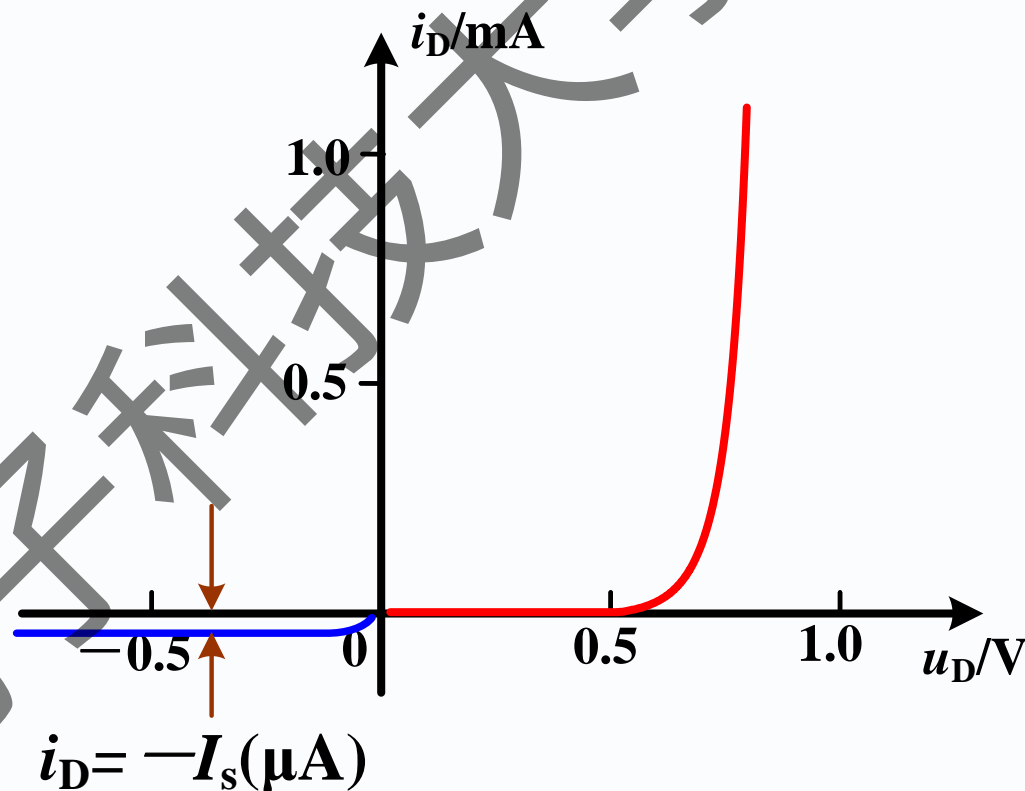
其中

I_S ——反向饱和电流

U_T ——温度的电压当量

且在常温下 ($T=300\text{K}$)

$$U_T = \frac{kT}{q} = 0.026\text{V} = 26\text{mV}$$



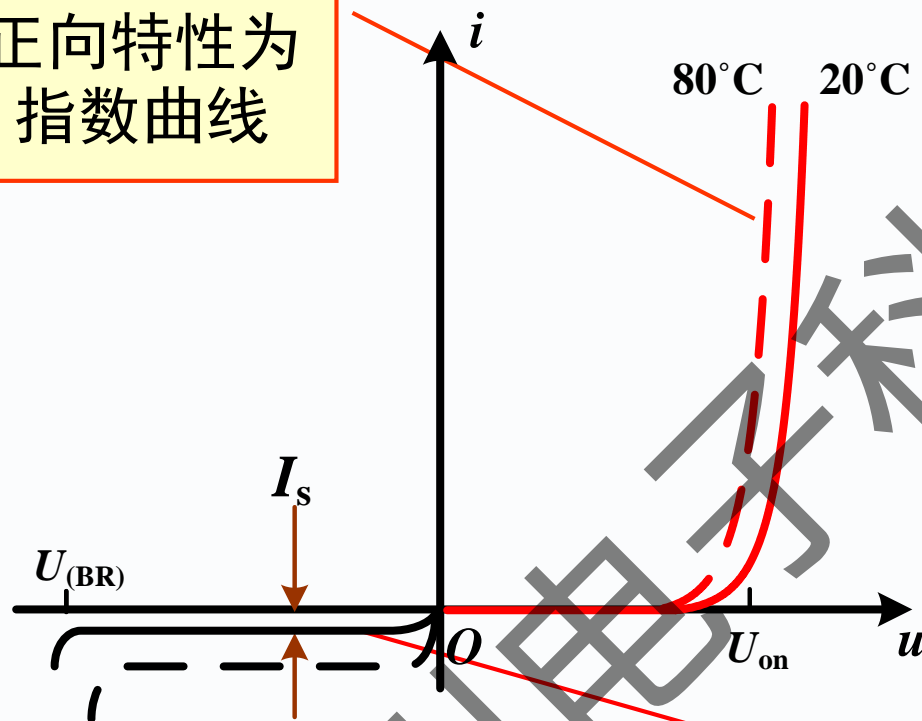
二极管的伏安特性



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. 二极管的伏安特性

正向特性为
指数曲线



伏安特性受温度影响

$$i = I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$$

若正向电压 $u \gg U_T$, 则

$$i \approx I_s e^{\frac{u}{U_T}}$$

若反向电压 $|u| \gg U_T$, 则

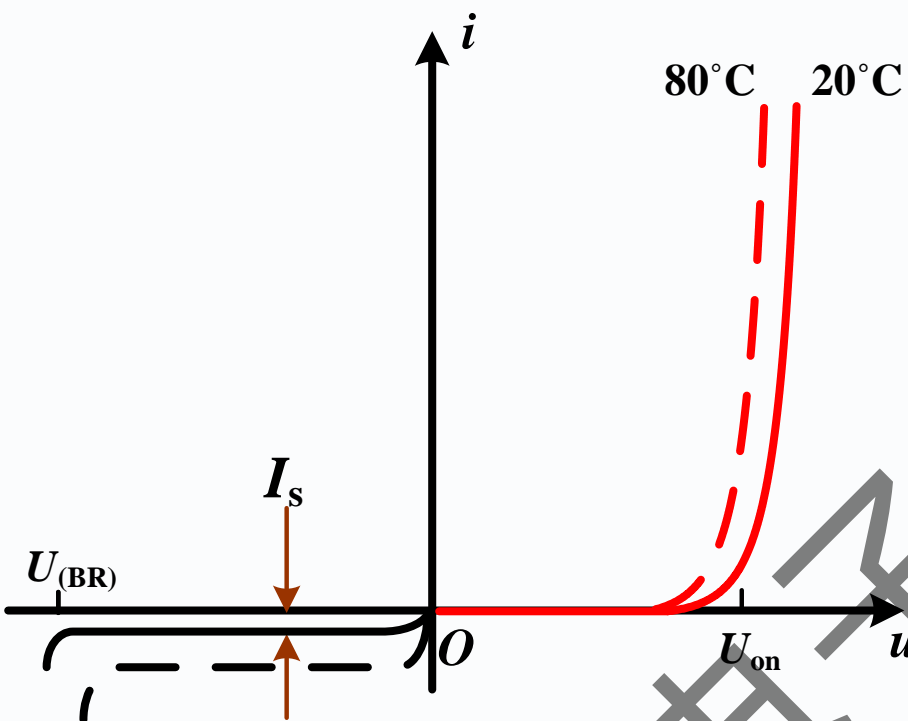
$$i \approx -I_s$$

反向特性为横轴的平行线



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. 二极管的伏安特性



伏安特性受温度影响

$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow$

→ 在电流不变情况下管压降 $u \downarrow$

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

增大1倍/ 10°C

伏安特性受温度影响

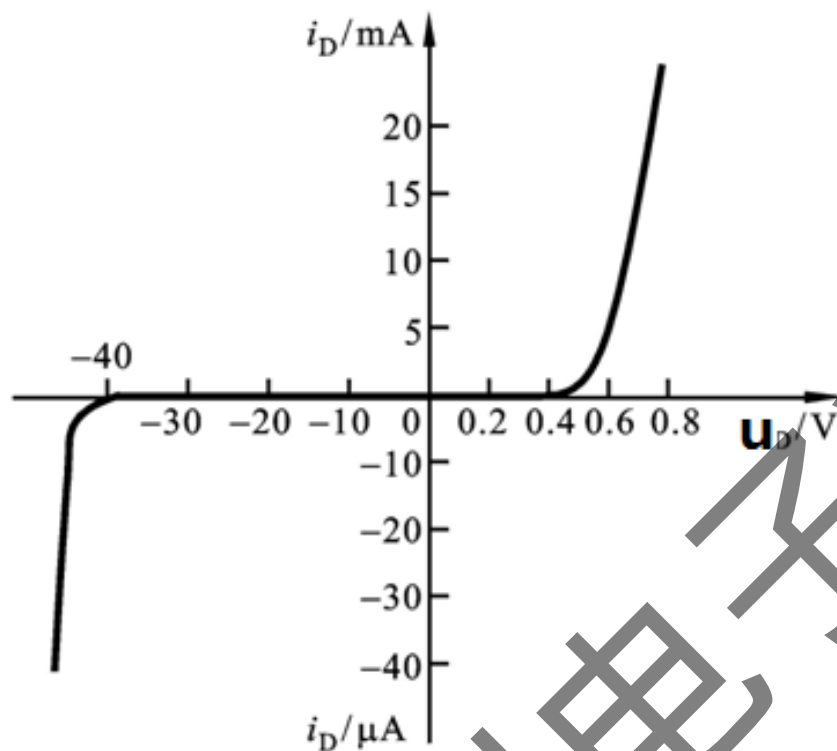
$T (^{\circ}\text{C}) \uparrow$

→ 正向特性左移, 反向特性下移

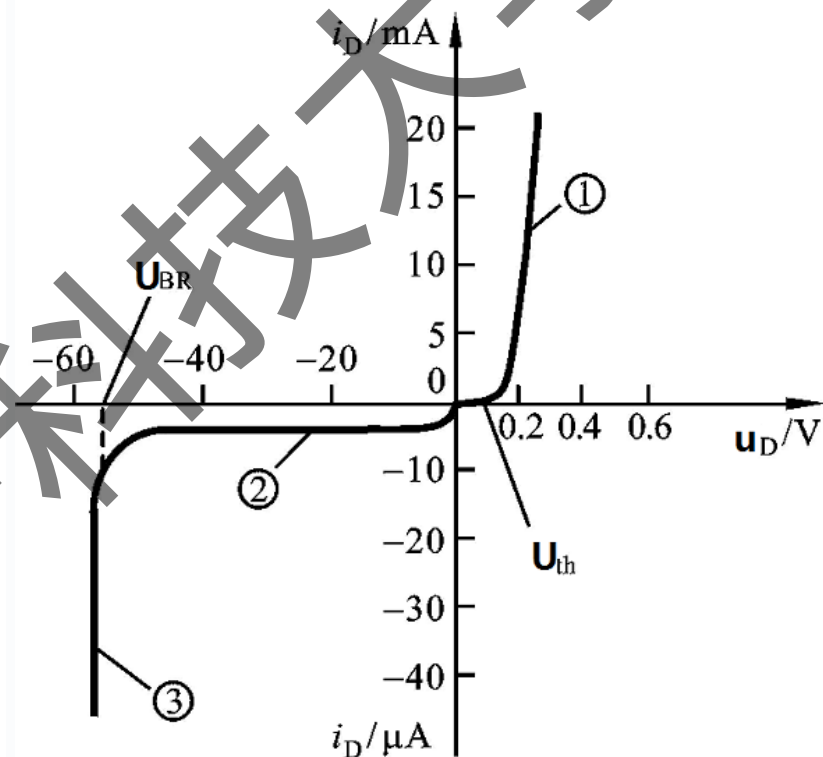


电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. 二极管的伏安特性



硅二极管2CP10的伏安特性



锗二极管2AP15的伏安特性

2. 二极管的伏安特性

当 $u_D > 0$ 即处于正向特性区域。正向区又分为两段：

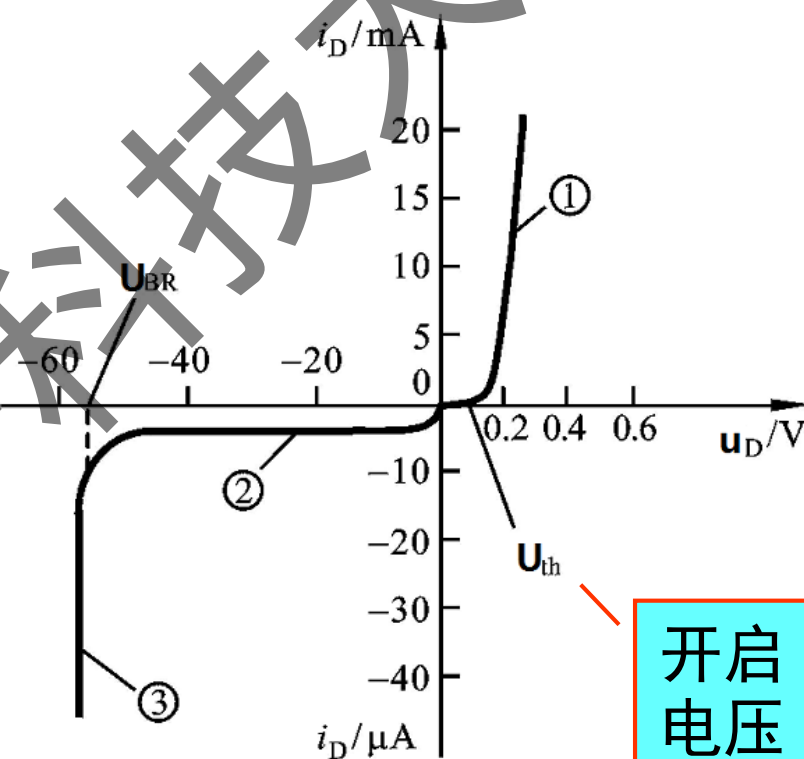
当 $0 < u_D < U_{th}$ 时，正向电流为零， U_{th} 称为死区电压或开启电压。

当 $u_D > U_{th}$ 时，开始出现正向电流，并按指数规律增长。

硅二极管的死区电压

$U_{th} = 0.5 \text{ V}$ 左右，

锗二极管的死区电压 $U_{th} = 0.1 \text{ V}$ 左右。



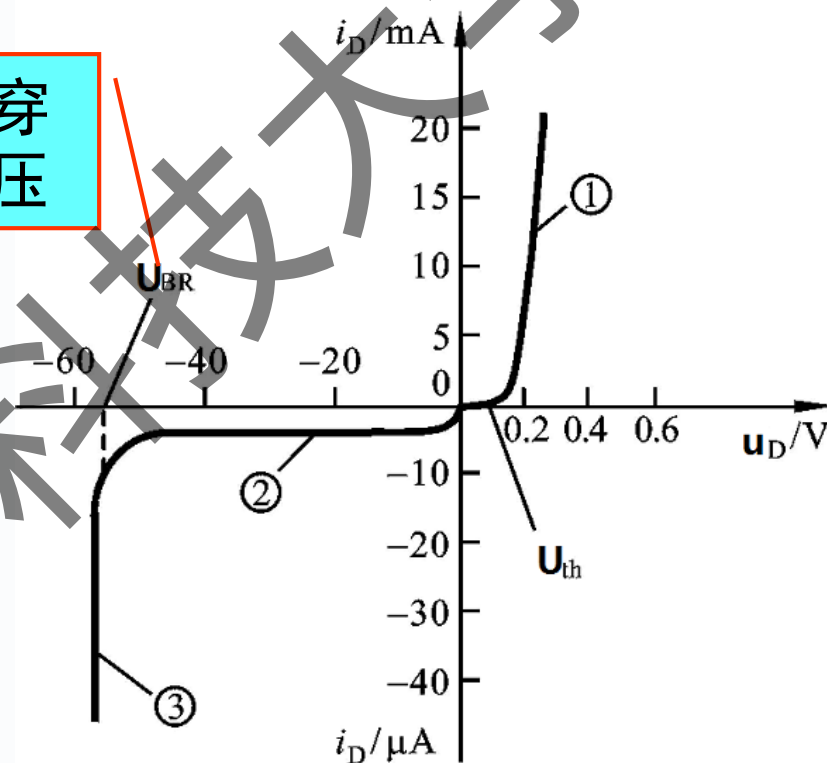
2. 二极管的伏安特性

当 $u_D < 0$ 时，即处于反向特性区域。反向区也分两个区域：

当 $U_{BR} < u_D < 0$ 时，反向电流很小，且基本不随反向电压的变化而变化，此时的反向电流也称**反向饱和电流 I_S** 。

当 $u_D \geq U_{BR}$ 时，反向电流急剧增加， U_{BR} 称为**反向击穿电压**。

击穿电压



锗二极管2AP15的伏安特性

2. 二极管的伏安特性

二极管伏安特性特征参数

材料	开启电压	导通电压	反向饱和电流
硅Si	0.5V	0.5~0.8V	1 μ A以下
锗Ge	0.1V	0.1~0.3V	几十 μ A

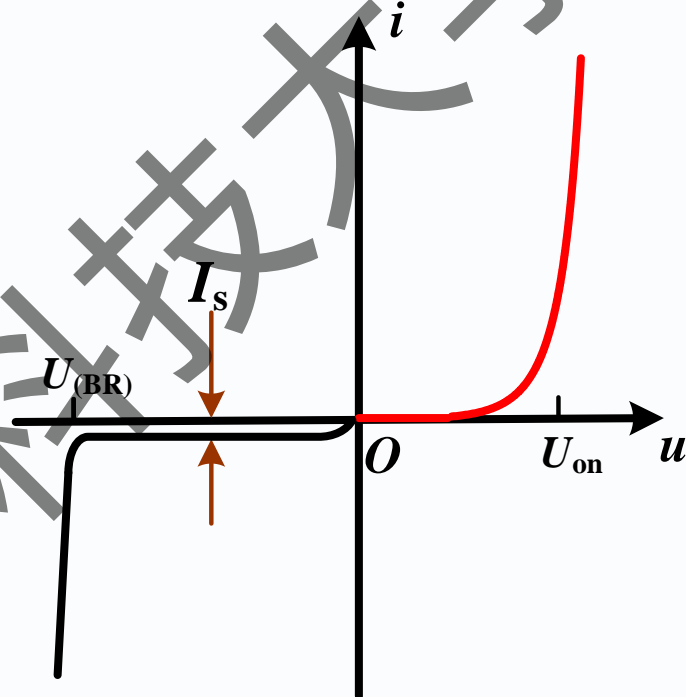


二极管的反向击穿

当PN结的反向电压增加到一定数值时，反向电流突然快速增加，此现象称为PN结的**反向击穿**。

雪崩击穿 } 电击穿——可逆
齐纳击穿 }

热击穿——不可逆



PN结被击穿后，PN结上的压降高，电流大，功率大。当PN结上的功耗使PN结发热，并超过它的耗散功率时，PN结将发生热击穿。这时PN结的电流和温度之间出现恶性循环，最终将导致PN结烧毁。

5.2.3 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_F

二极管长期连续工作时，允许通过二极管的最大整流电流的平均值。

(2) 反向击穿电压 U_{BR} 和最大反向工作电压 U_R

二极管反向电流急剧增加时对应的反向电压值称为反向击穿电压 U_{BR} 。

为安全计，在实际工作时，最大反向工作电压 U_{RM} 一般只按反向击穿电压 U_{BR} 的一半计算。



5.2.3 二极管的主要参数

(3) 反向电流 I_R 在室温下，在规定的反向电压下，一般是最大反向工作电压下的反向电流值。硅二极管的反向电流一般在纳安(nA)级；锗二极管在微安(μA)级。
即 I_S

(4) 最高工作频率 f_M

(5) 极间电容 C_J



5.3 晶体二极管电路的分析方法

5.3.1 晶体二极管的模型

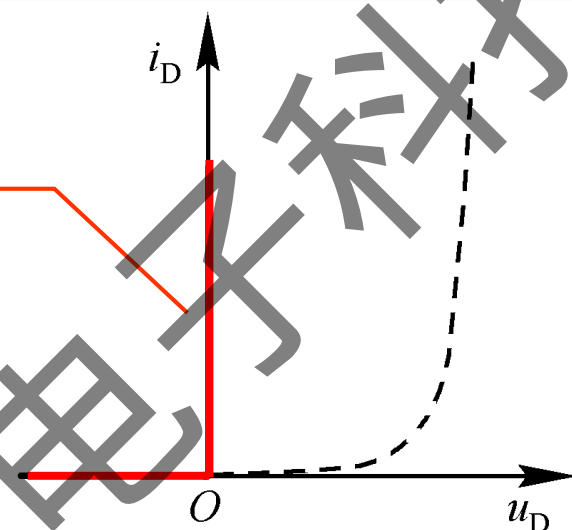
1. 二极管的简化模型

将指数模型 $i = I_S (e^{u/U_T} - 1)$ 分段线化，得到二极管特性的等效模型。

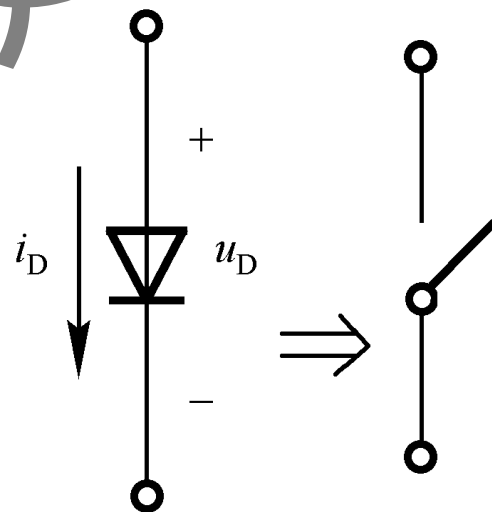
(1) 理想模型

理想
二极管

理想开关
导通时 $u_D = 0$
截止时 $I_S = 0$



(a) 特性曲线近似



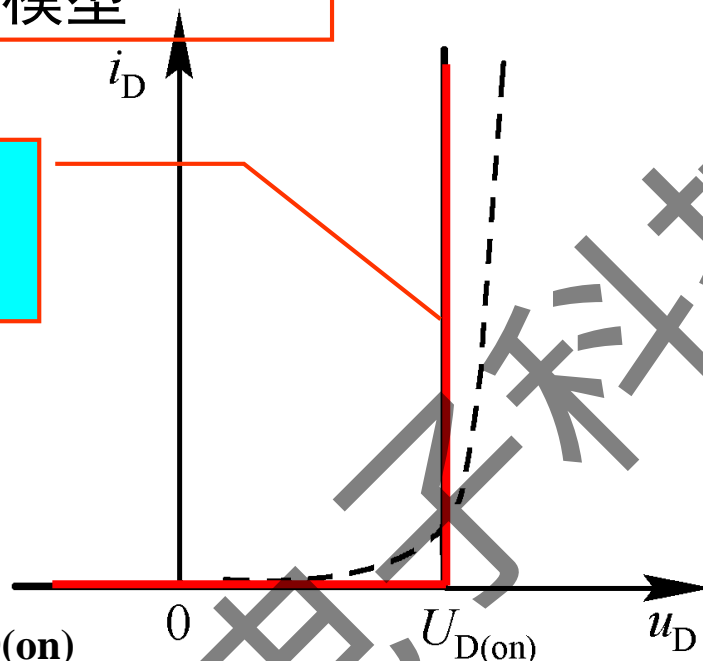
(b) 等效电路

5.3 晶体二极管电路的分析方法

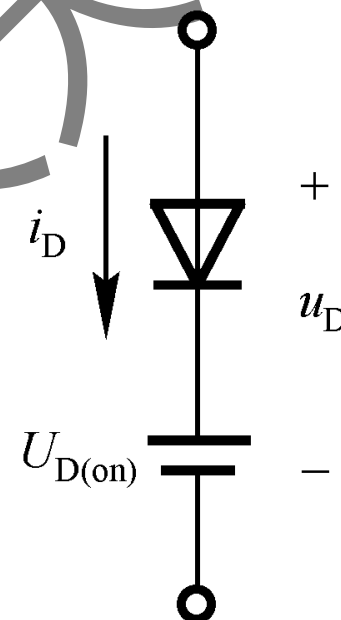
(2) 恒压降模型

近似分析
中最常用

导通时 $u = U_{D(on)}$
截止时 $I_S = 0$



(a) 特性曲线近似

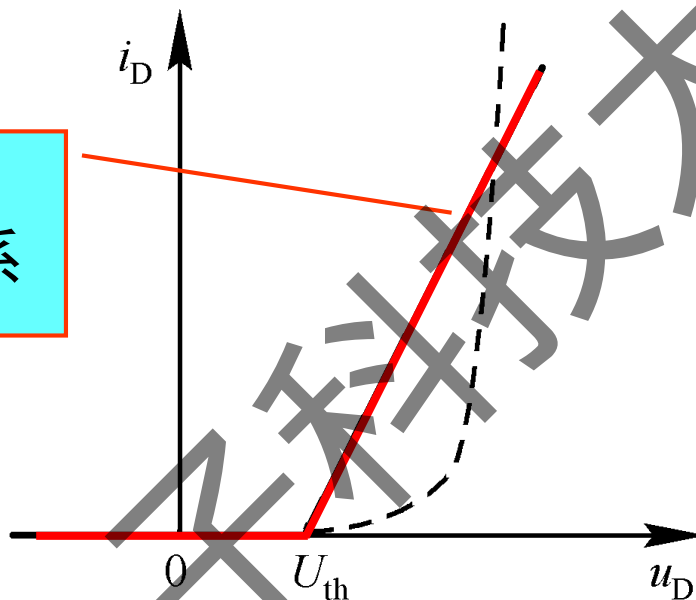
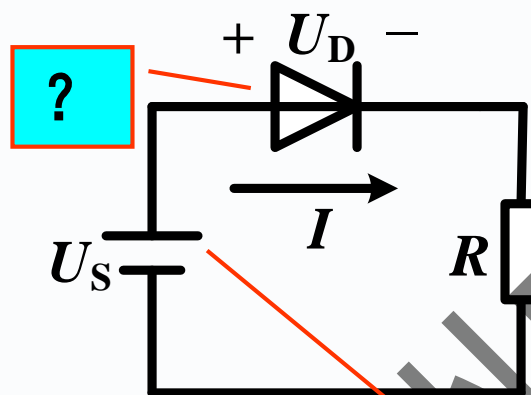


(b) 等效电路

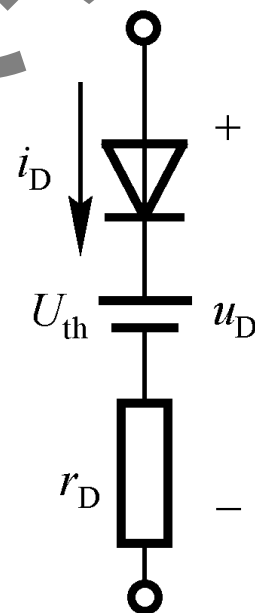
5.3 晶体二极管电路的分析方法

(3) 折线模型

导通时 Δi_D 与 Δu_D 成线性关系



(a) 特性曲线近似



(b) 等效电路

100V? 5V? 1V?

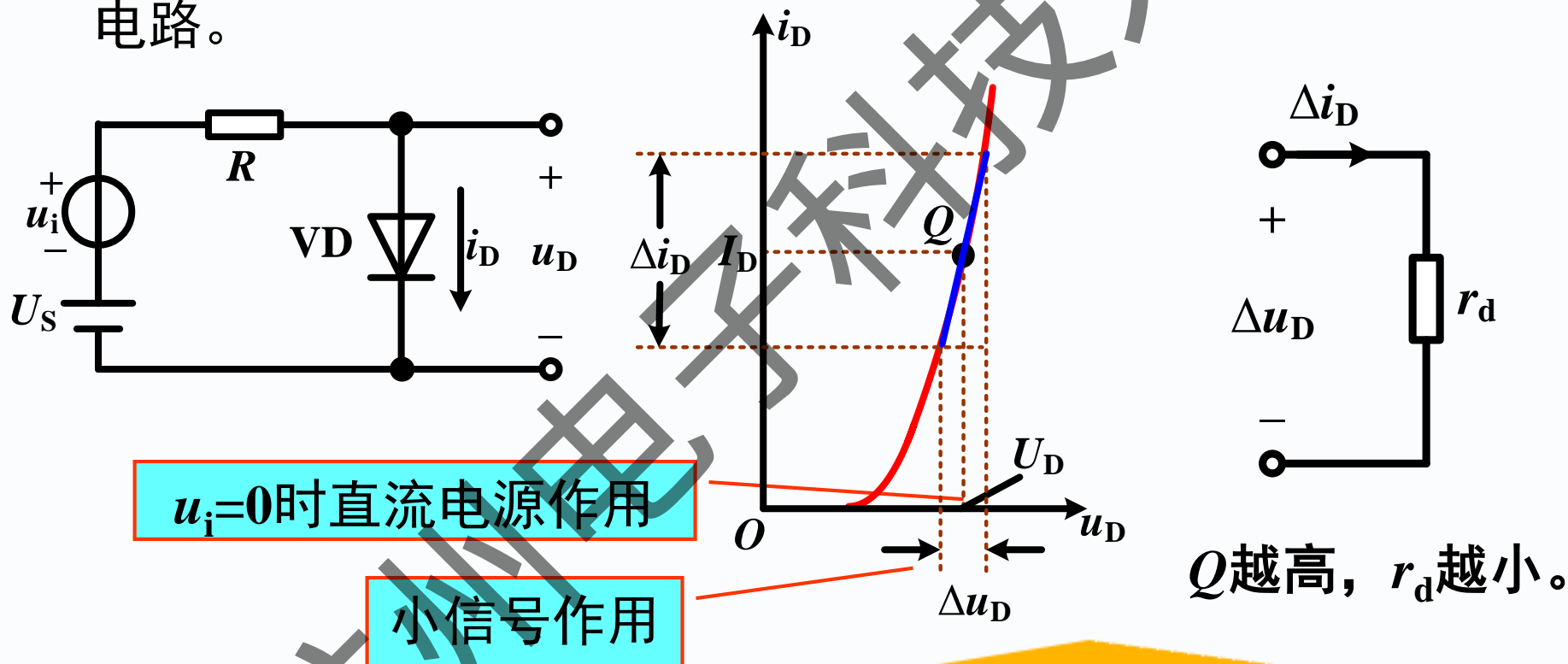
应根据不同情况选择不同的等效电路!

出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2. 交流小信号等效模型

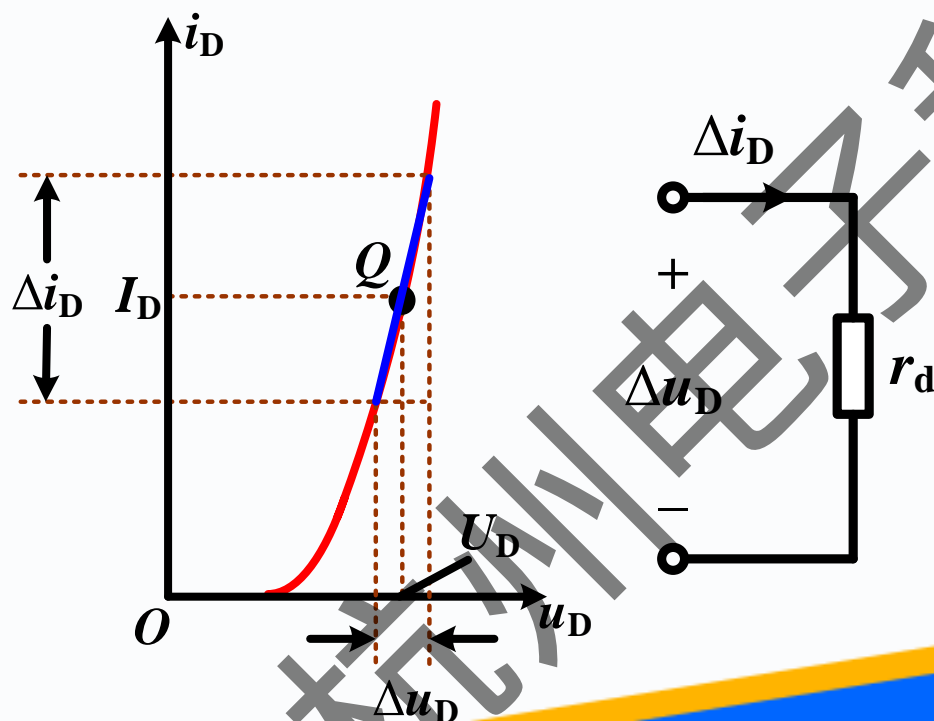
当二极管在静态基础上有一动态信号作用时，则可将二极管等效为一个电阻，称为动态电阻，也就是微变等效电路。



2. 交流小信号等效模型

根据 $i = I_S (e^{u/U_T} - 1)$

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\Delta i_D}{\Delta u_D} \approx \frac{di_D}{du_D} = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{u_D}{U_T}} \approx \frac{I_D}{U_T} \quad \text{在 } Q \text{ 点上} \quad \text{即} \quad r_d \approx \frac{U_T}{I_D}$$



$$r_d \approx \frac{U_T}{I_D} = \frac{26(\text{mV})}{I_D(\text{mA})} \quad (\text{室温下})$$

静态电流



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

5.3.2 晶体二极管电路的分析方法

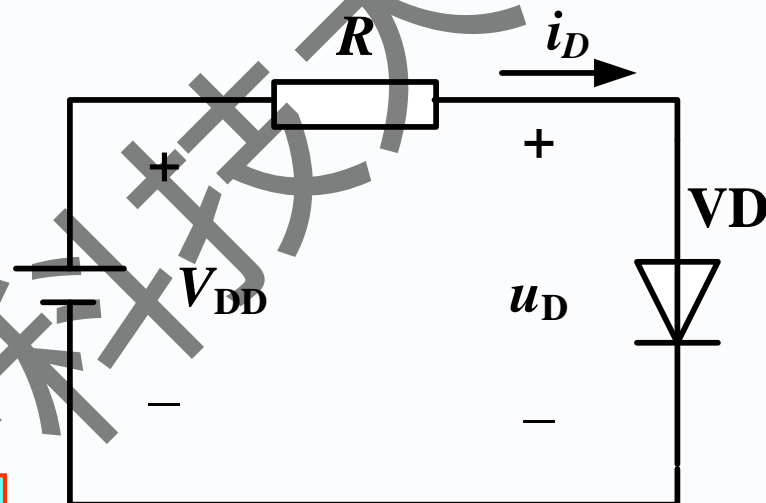
1. 数值解法

$$u_D = V_{DD} - i_D R$$

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

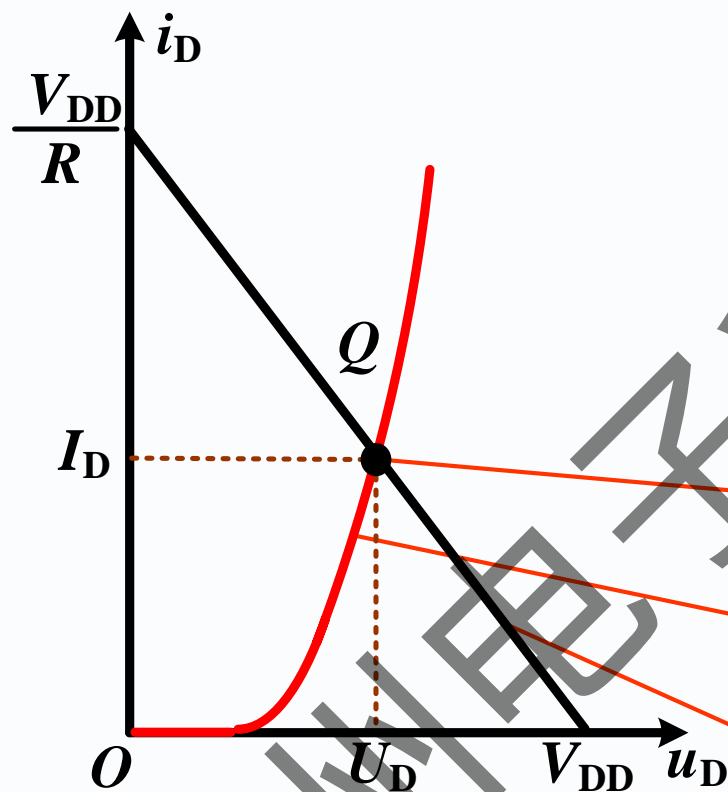
联立求解

迭代法



5.3.2 晶体二极管电路的分析方法

2. 图解分析法

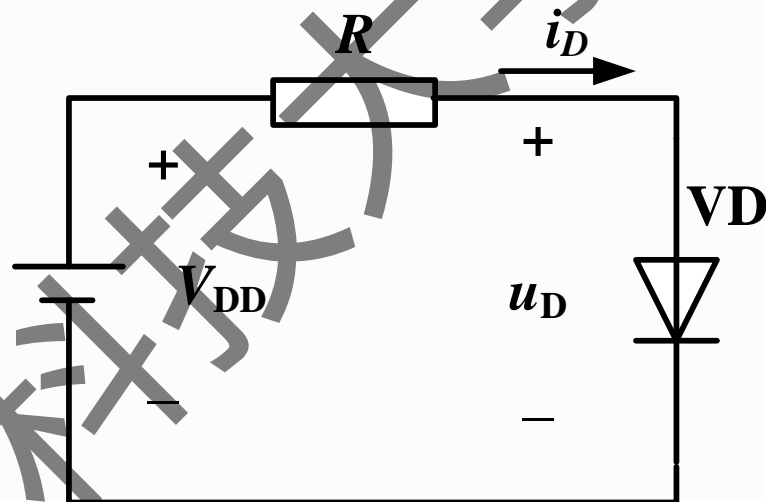


工作点

二极管伏安关系

负载线

$$u_D = V_{DD} - i_D R$$



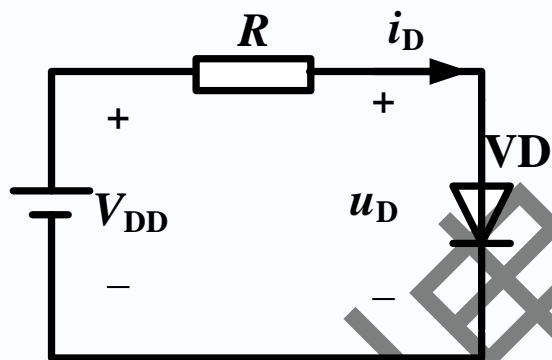
电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

3. 简化模型分析法

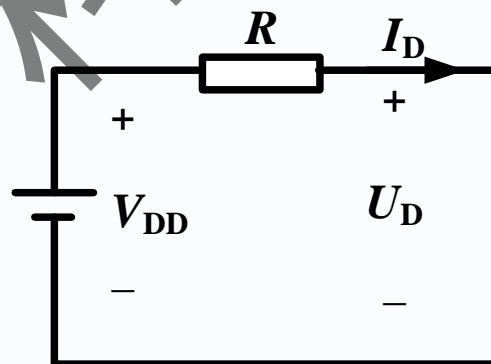
对如图所示简单二极管电路，采用不同的简化模型，得到不同的电路

(1) **理想模型**，用短路线代替导通的二极管

$$U_D = 0V, I_D = V_{DD}/R$$



简单二极管电路

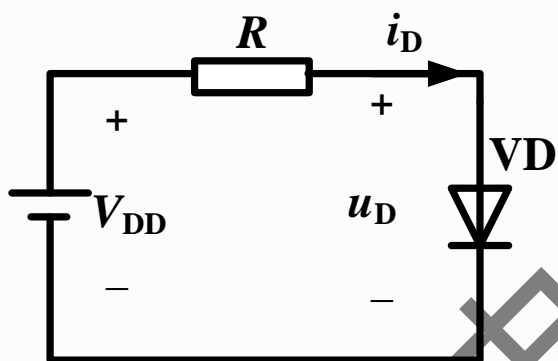


(a) 理想模型电路

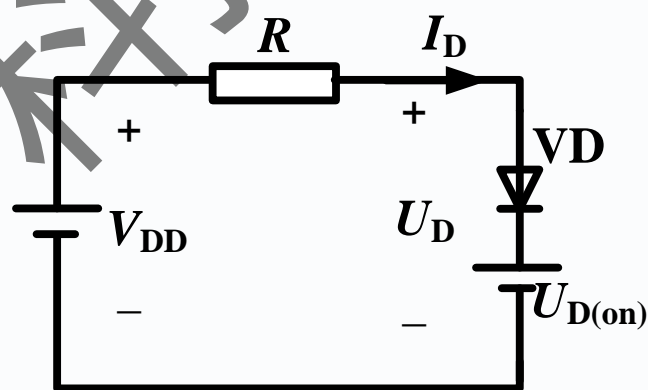
3. 简化模型分析法

(2) **恒压降模型**时，用恒压降模型等效电路代替二极管

$$U_D = 0.7\text{V}, I_D = \frac{V_{DD} - U_{D(\text{on})}}{R}$$



简单二极管电路

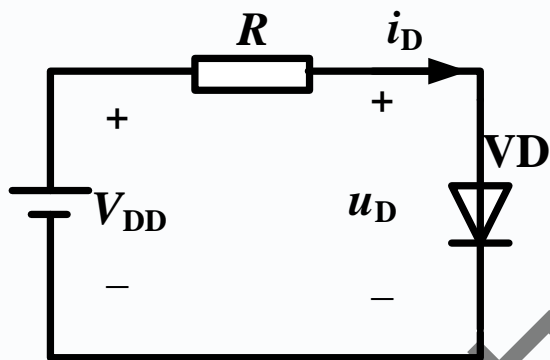


(b) 恒压降模型电路

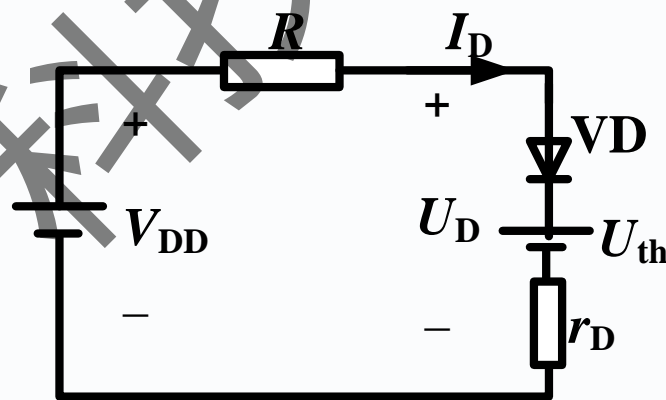
3. 简化模型分析法

(3) **折线模型**，用折线模型等效电路代替二极管

$$I_D = \frac{V_{DD} - U_{th}}{R + r_D}, U_D = U_{th} + I_D r_D$$



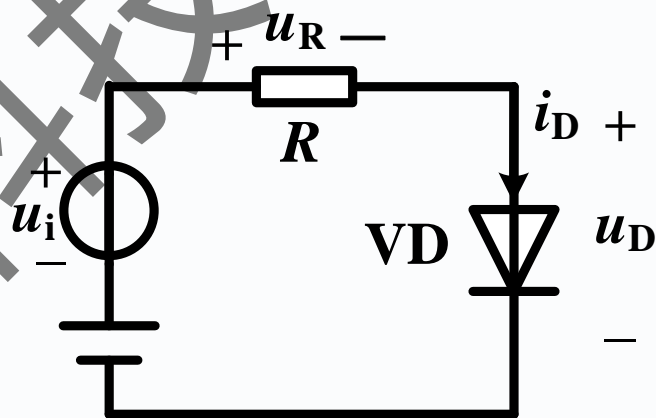
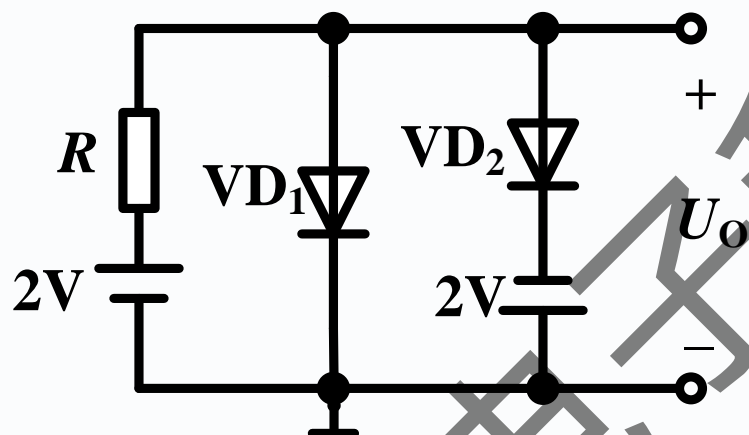
简单二极管电路



(c) 折线模型电路

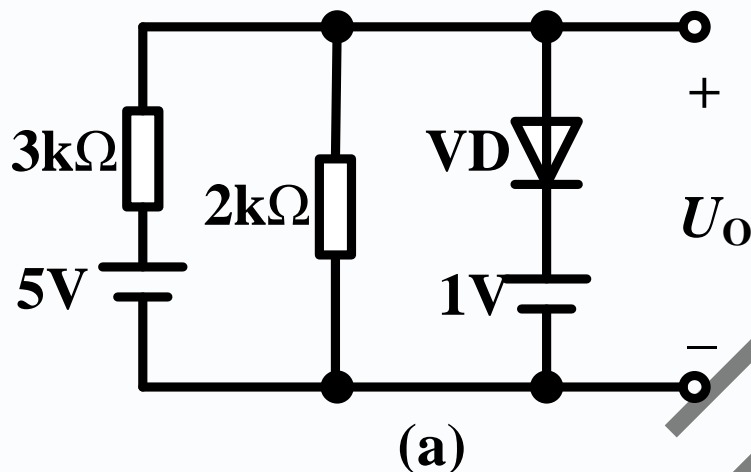
讨论

- 判断二极管工作状态的方法？
- 什么情况下应选用二极管的什么等效电路？



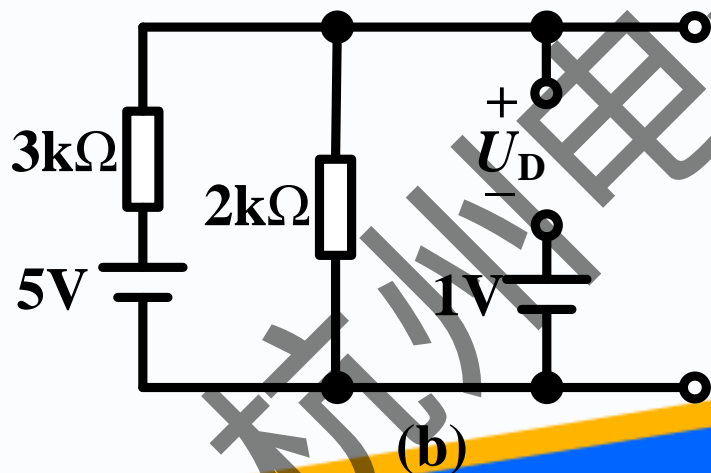
3. 简化模型分析法

【例】电路如图(a)所示。试用理想模型求输出电压 U_o 。



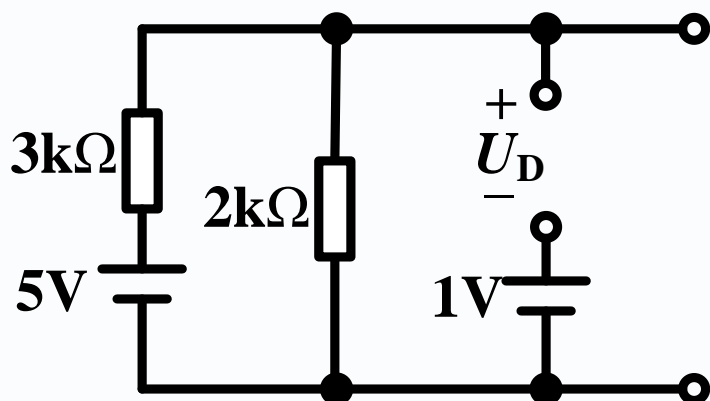
解：(1) 断开VD，如图(b)，求 U_D 。

注意： U_D 的参考方向应与二极管的方向相一致



$$U_D = \frac{2}{2+3} \times 5 - 1 = 1(\text{V})$$

3. 简化模型分析法

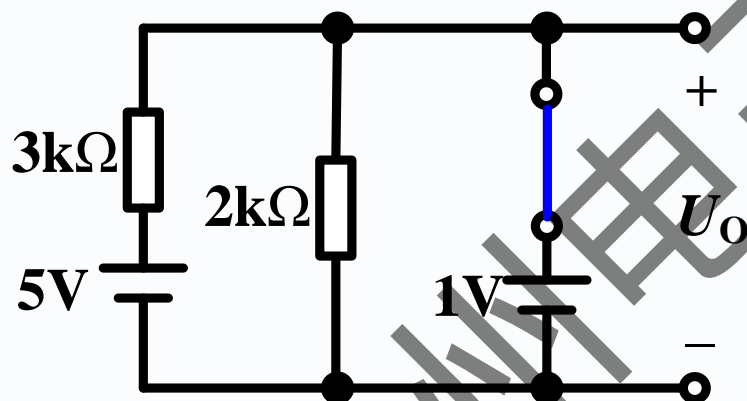


(b)

(2) 理想模型

$U_D > 0V$, $\therefore VD$ 导通

用导通时的理想模型(导线)代替二极管, 得到图(c)

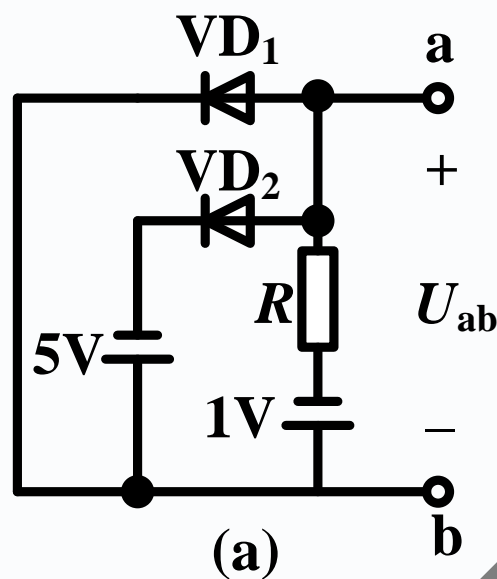


(c)

由此求得: $U_O = 1V$

3. 简化模型分析法

【例】电路如图(a)所示，求输出电压 U_o 。



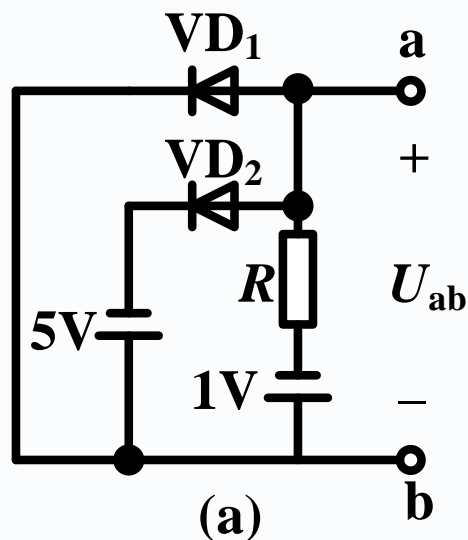
此电路有两个二极管，首先仍按前述方法断开二极管，求出 U_{D1} 和 U_{D2}

若 U_{D1} 、 U_{D2} 均不满足导通条件，则两管均截止；

若一管满足、另一管不满足，则一管导通，另一管截止；

若两管均满足导通条件，则压差大者优先导通。

3. 简化模型分析法



解：理想模型

由图(b)可以得到：

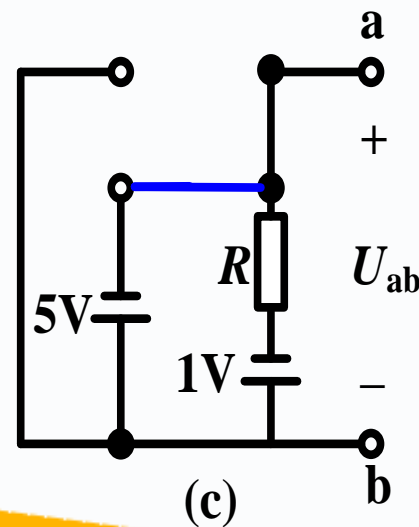
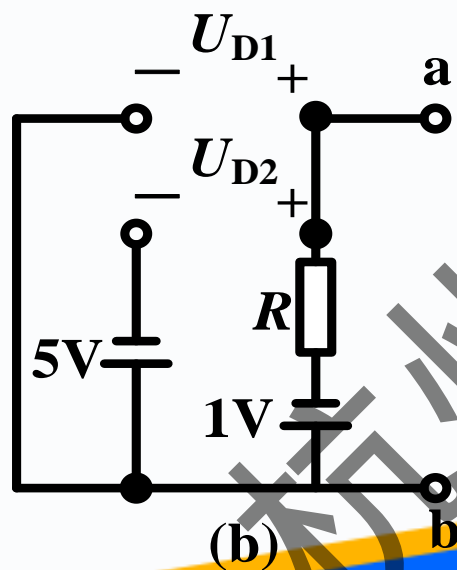
$$U_{D1} = -1(\text{V}) < 0$$

$$U_{D2} = -1 + 5 = 4(\text{V}) > 0$$

$\therefore \text{VD}_1$ 截止, VD_2 导通

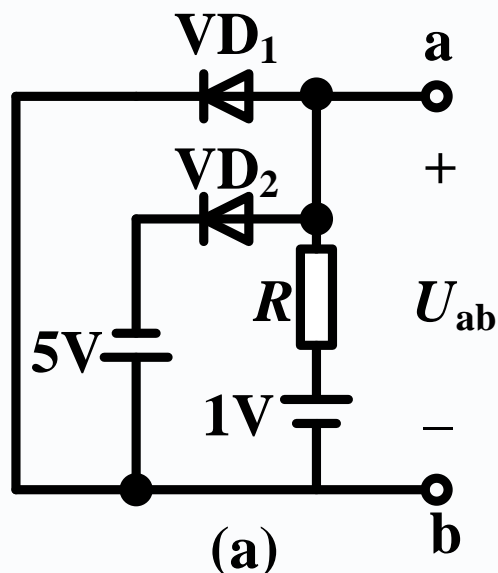
得到图(c)

$$\therefore U_{ab} = -5(\text{V})$$



3. 简化模型分析法

【例】 电路如图(a)所示，理想二极管，求输出电压 U_o 。



解：

$$U_{D1} = 1(\text{V}) > 0$$

$$U_{D2} = 1 + 5 = 6(\text{V}) > 0$$

$U_{D2} > U_{D1} \therefore \text{VD}_2$ 先导通

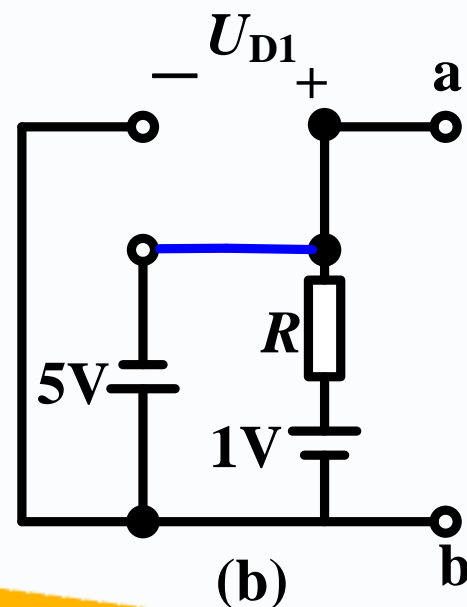
由图(b)重求 U_{D1}

$$U_{D1} = -5(\text{V}) < 0$$

$\therefore \text{VD}_1$ 截止

$$\therefore U_{ab} = -5(\text{V})$$

为什么不是
 $U_{D1} = 1(\text{V})$?



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

3. 简化模型分析法

【例5.3.1】电路如图5.3.8(a)所示 $R=1\text{k}\Omega$, $U_{\text{REF}}=3\text{V}$ 为直流参考电压源。当 $u_i=6\sin\omega t(\text{V})$ 试分别用理想模型和恒压降模型分析该电路，画出相应的输出电压 u_o 的波形。

解：（1）理想模型

$$u_D = u_i - U_{\text{REF}}$$

当 $u_D < 0$ ，即 $u_i < U_{\text{REF}}$ 时，二极管截止，

$$u_o = u_i$$

当 $u_D > 0$ ，即 $u_i > U_{\text{REF}}$ 时，二极管导通，

$$u_o = U_{\text{REF}} = 3\text{V}$$

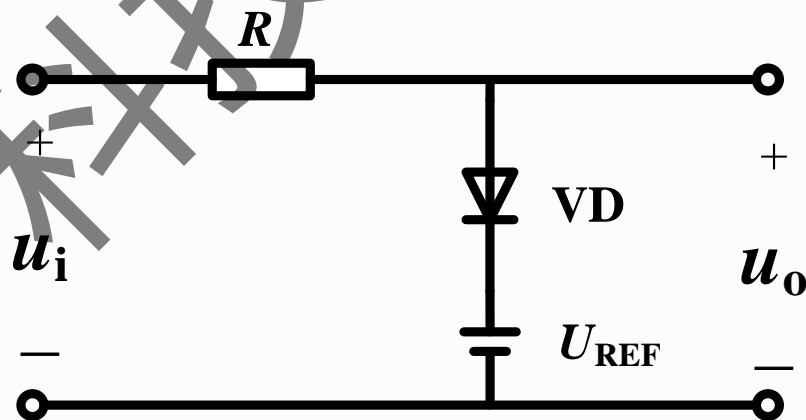
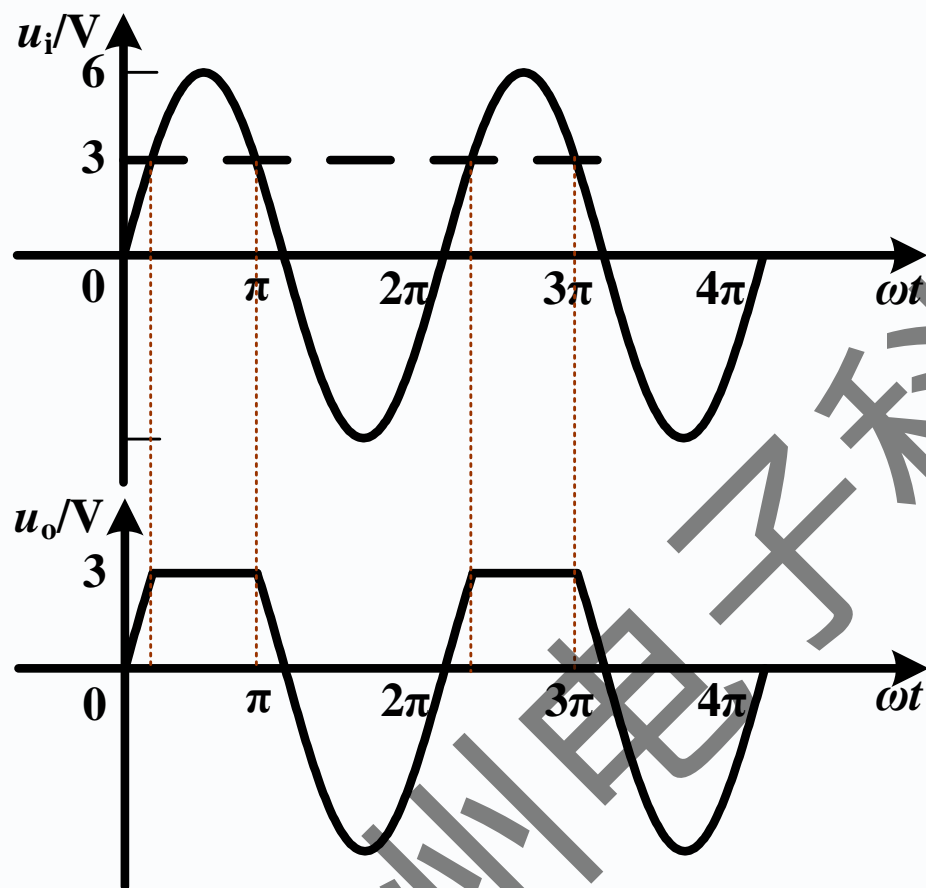


图5.3.8 (a) 限幅电路

3. 简化模型分析法



理想模型

$$u_i < U_{REF}$$

$$u_o = u_i$$

$$u_i > U_{REF}$$

$$u_o = U_{REF} = 3V$$

波形如图(b)所示

(b) 理想模型时的波形



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

3. 简化模型分析法

解：（2）恒压降模型

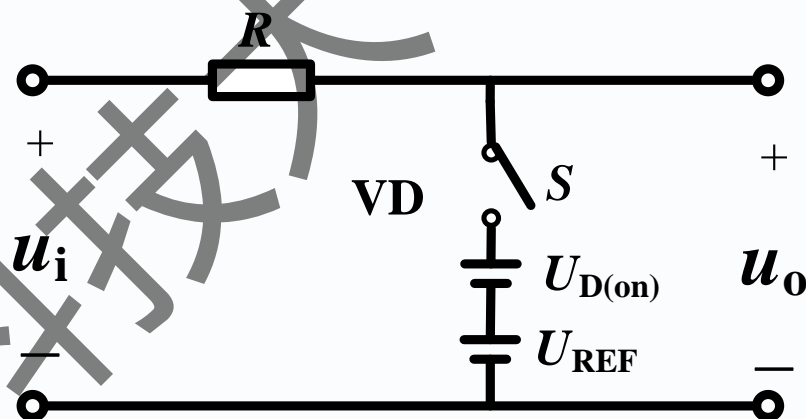
$$u_D = u_i - U_{REF}$$

当 $u_D < U_{D(on)}$ ，即 $u_i < U_{REF} + U_{D(on)}$ 时，
二极管截止，

$$u_o = u_i$$

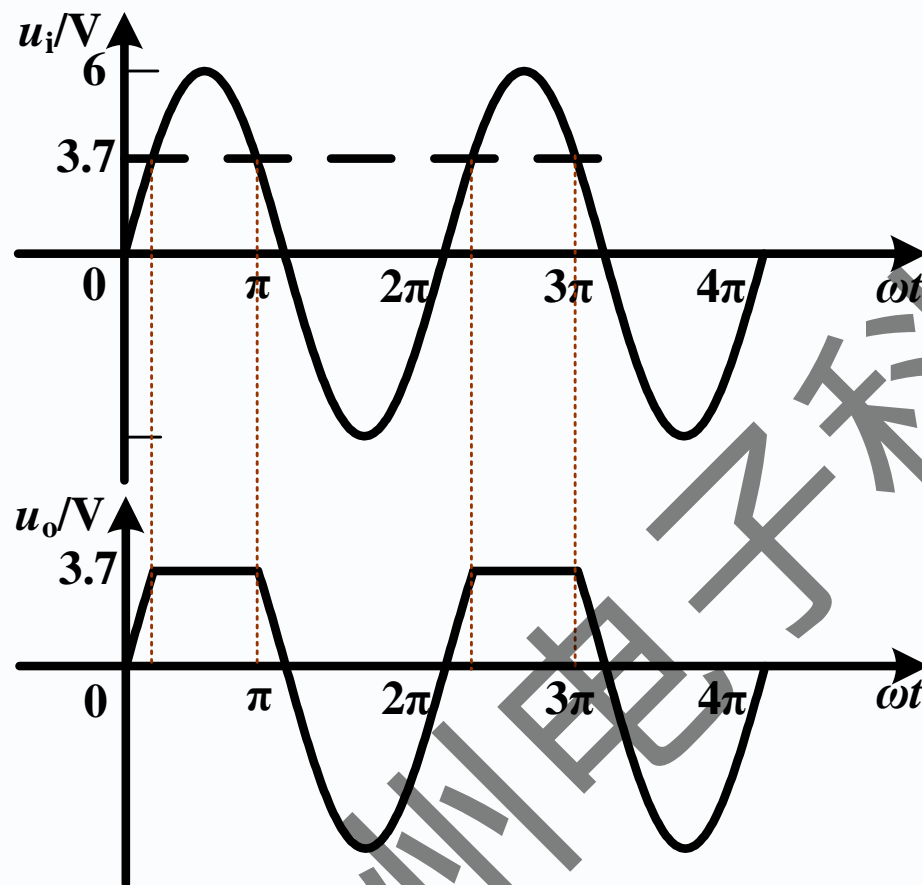
当 $u_D > U_{D(on)}$ ，即 $u_i > U_{REF} + U_{D(on)}$ 时，
二极管导通，

$$u_o = U_{REF} + U_{D(on)} = 3.7V$$



(c) 恒压降模型

3. 简化模型分析法



恒压降模型

$$u_i < U_{REF} + U_{D(on)}$$

$$u_o = u_i$$

$$u_i > U_{REF} + U_{D(on)}$$

$$u_o = U_{REF} + U_{D(on)} = 3.7V$$

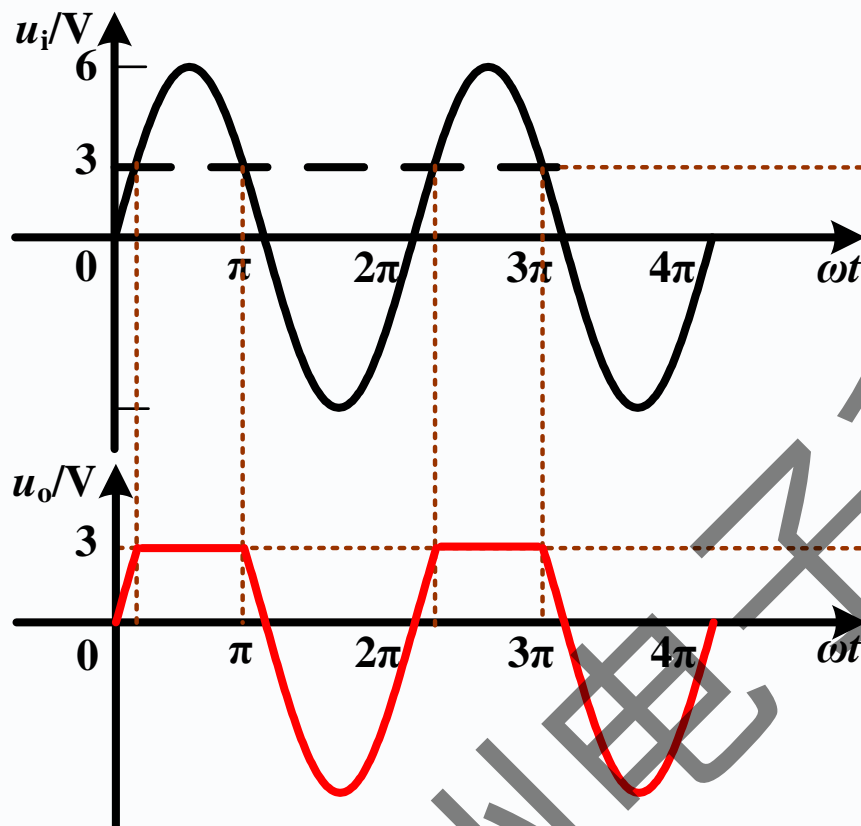
波形如图5.3.8(d)所示

(d) 恒压降模型时的波形

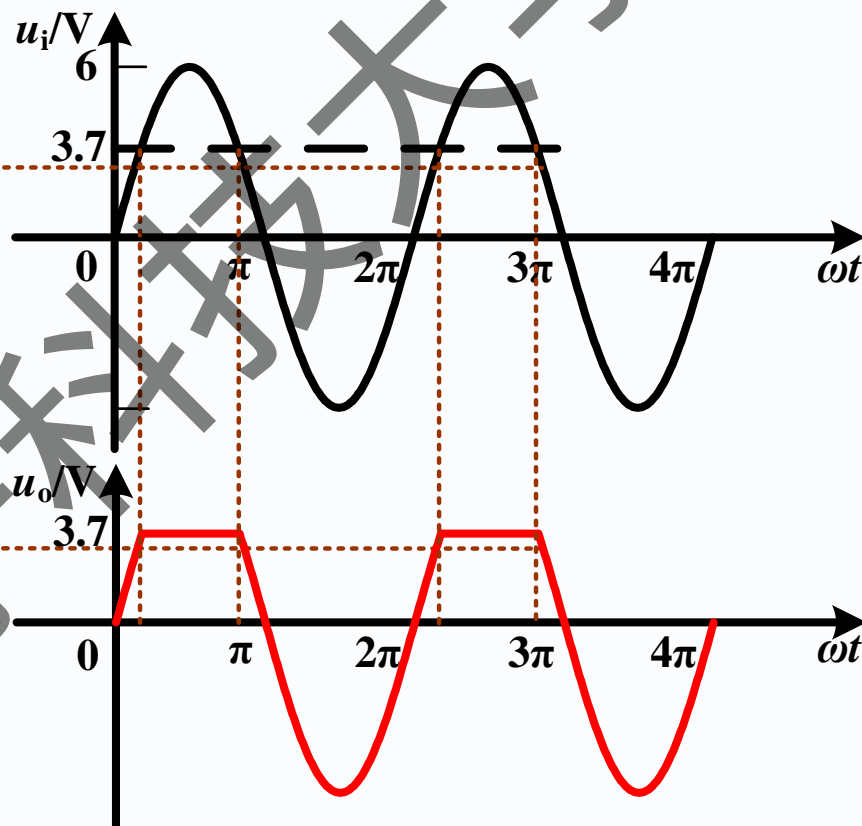


电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

3. 简化模型分析法



(b) 理想模型时的波形

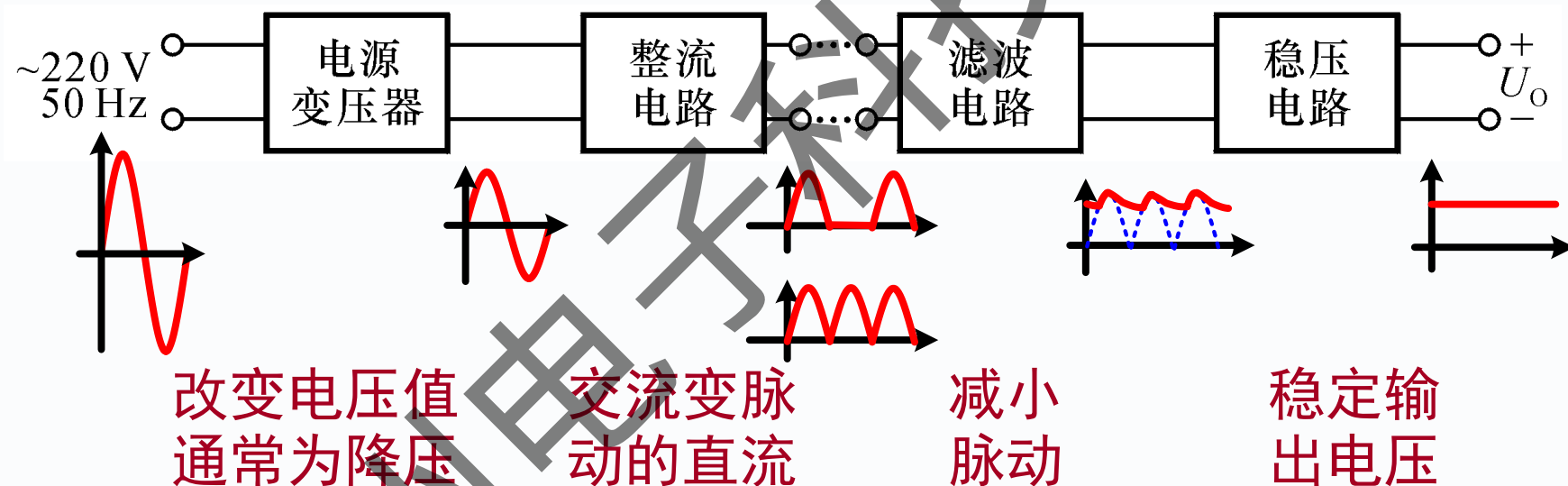


(d) 恒压降模型时的波形

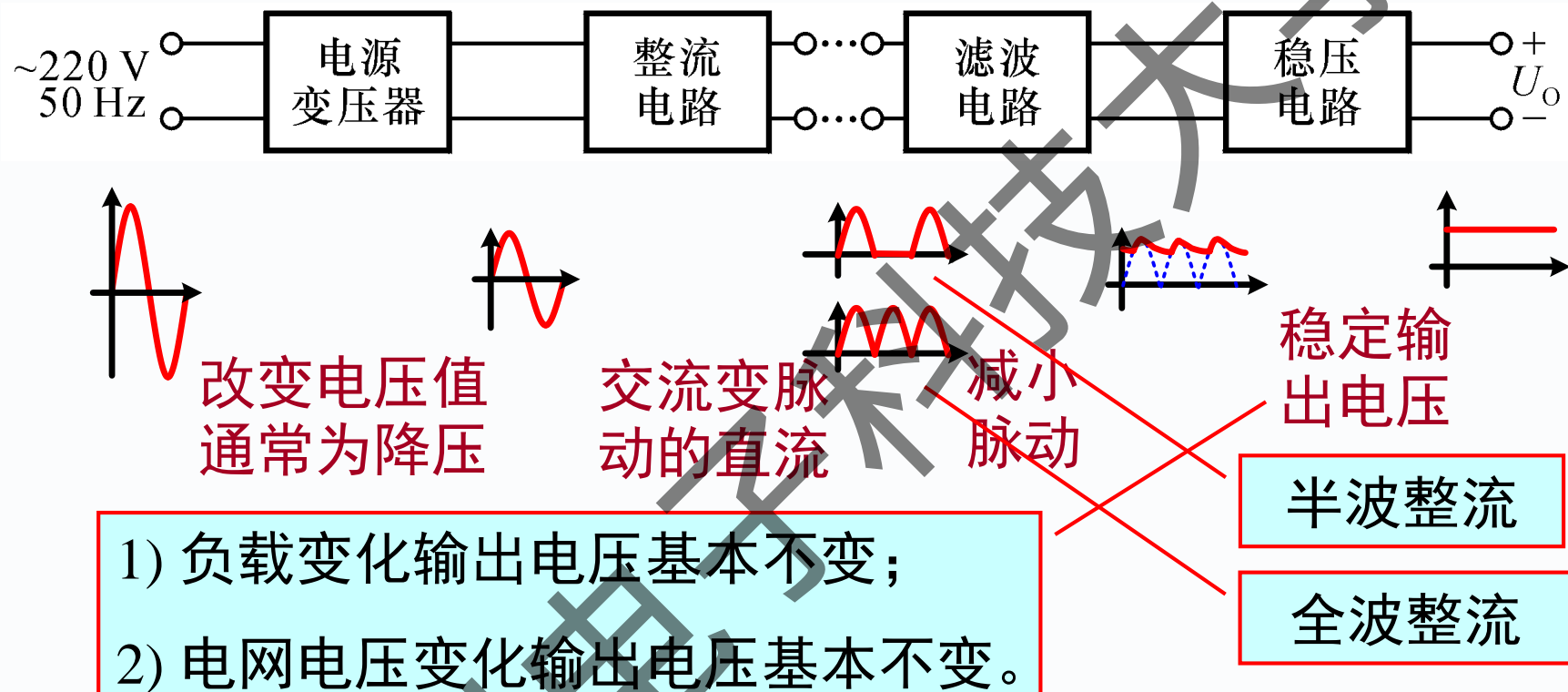
5.4 晶体二极管的应用及直流稳压电源

直流电源的组成及各部分的作用

直流电源是能量转换电路，将220V（或380V）50Hz的交流电转换为直流电。



5.4 晶体二极管的应用及直流稳压电源

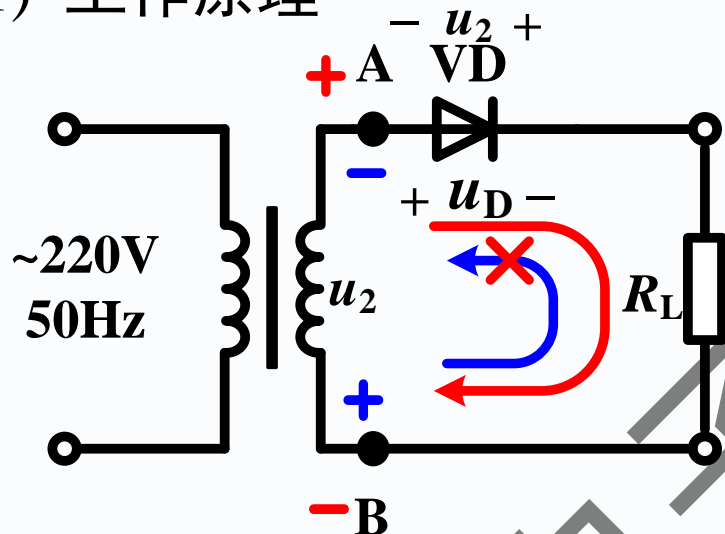


在分析电源电路时要特别考虑的两个问题：允许电网电压波动 $\pm 10\%$ ，且负载有一定的变化范围。

5.4.2. 小功率整流滤波电路

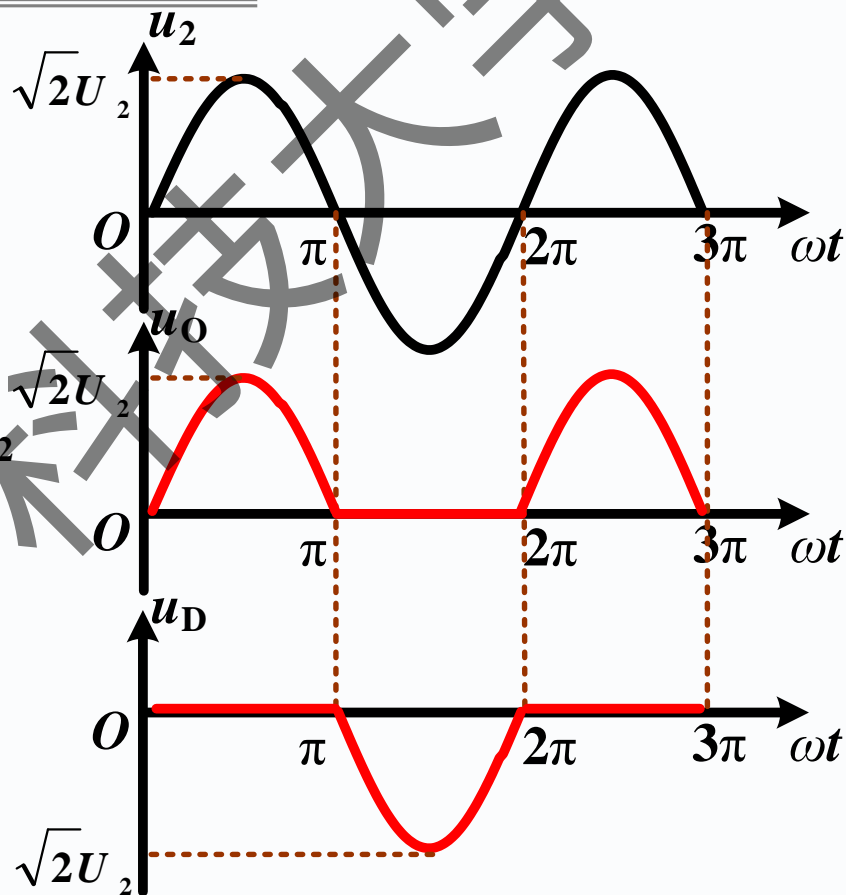
1. 半波整流电路

(1) 工作原理



u_2 的正半周, D 导通,
 $A \rightarrow VD \rightarrow R_L \rightarrow B$, $u_O = u_2$ 。

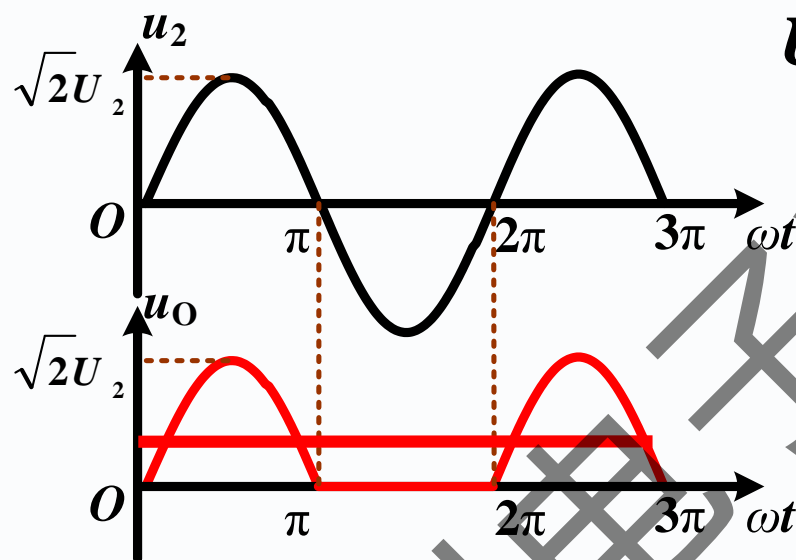
u_2 的负半周, D 截止, 承受反向电压, 为 u_2 ; $u_O = 0$ 。



5.4.2. 小功率整流滤波电路

(2) $U_{O(AV)}$ 和 $I_{O(AV)}$ 的估算

已知变压器副边电压有效值为 U_2



$$U_{O(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$U_{O(AV)} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.45U_2$$

$$I_{O(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$$

5.4.2. 小功率整流滤波电路

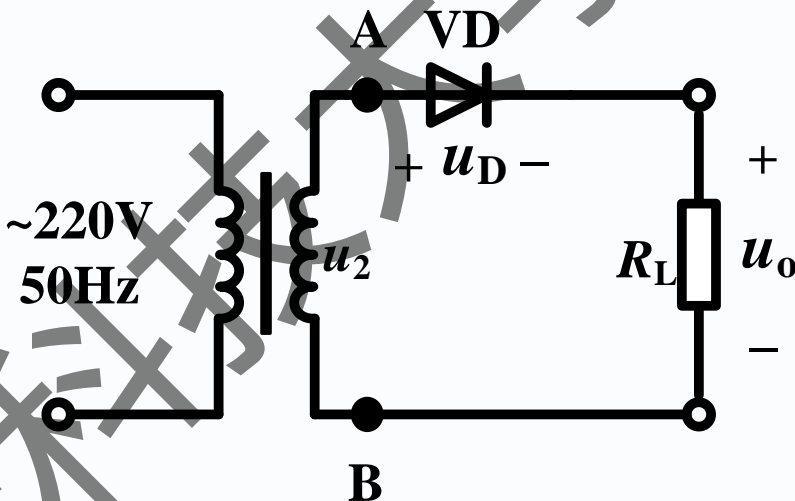
(3) 二极管的选择

$$U_{D(RM)} = \sqrt{2}U_2$$

$$I_{D(AV)} = I_{O(AV)} \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$$

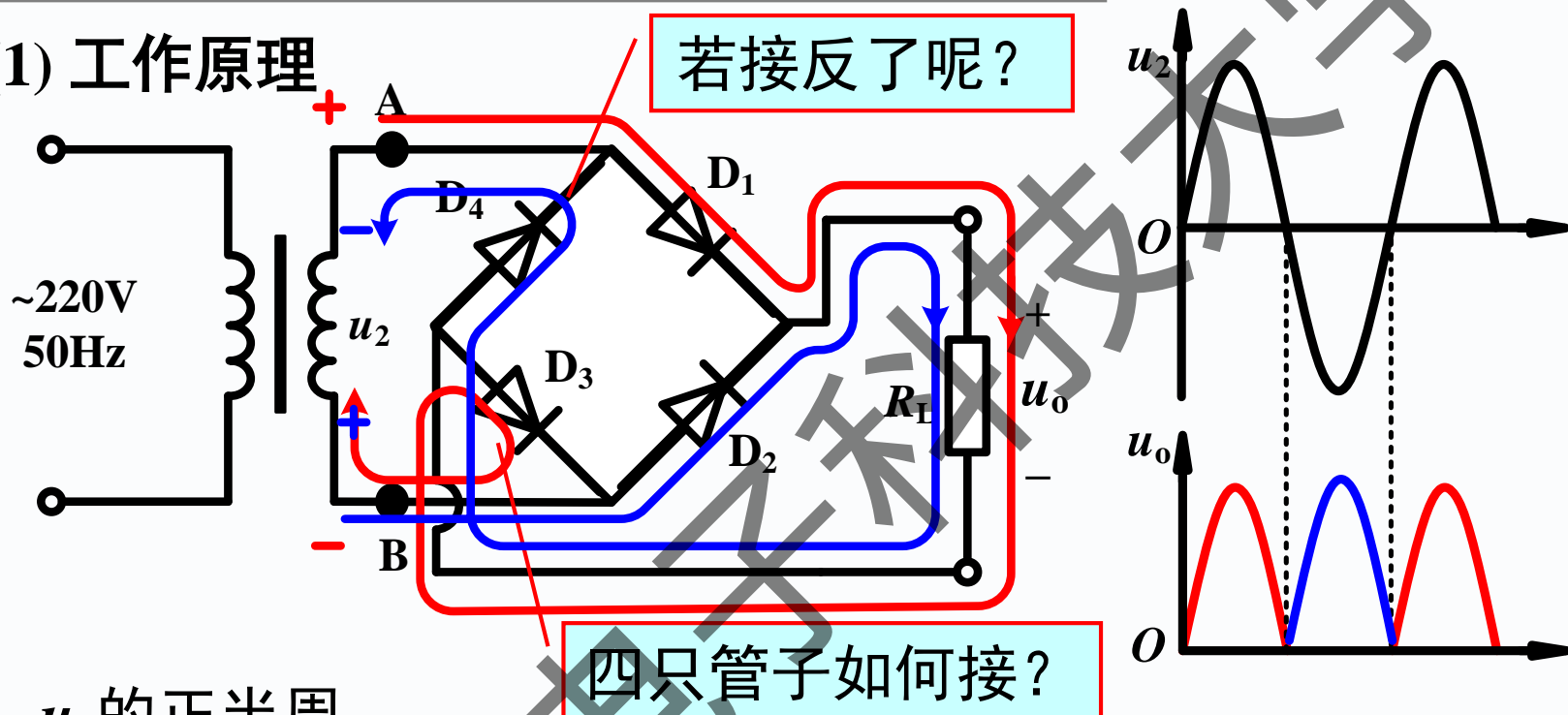
考虑到电网电压波动范围为 $\pm 10\%$ ，二极管的极限参数应满足：

$$\begin{cases} I_F > 1.1 \times \frac{0.45U_2}{R_L} \\ U_{DR} > 1.1\sqrt{2}U_2 \end{cases}$$



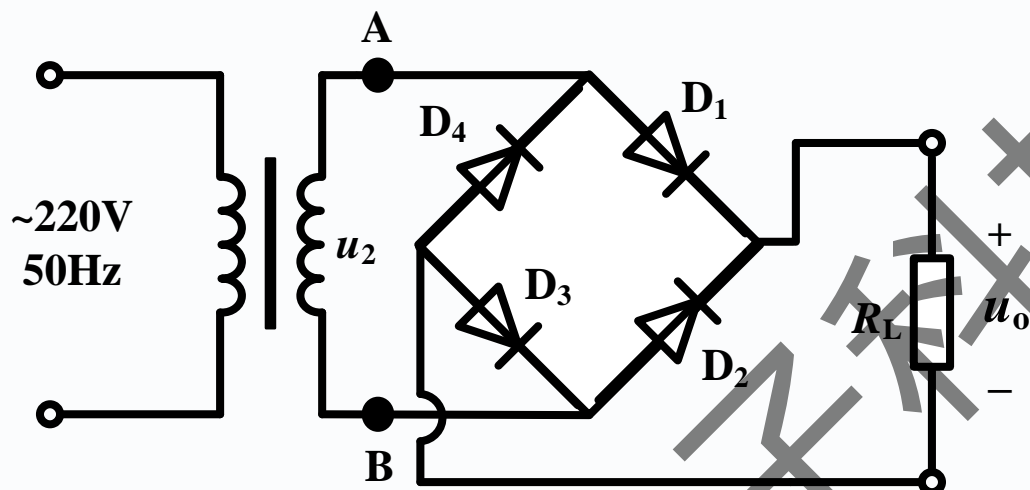
2、单相桥式整流电路

(1) 工作原理



2、单相桥式整流电路

(2) 输出电压和电流平均值的估算



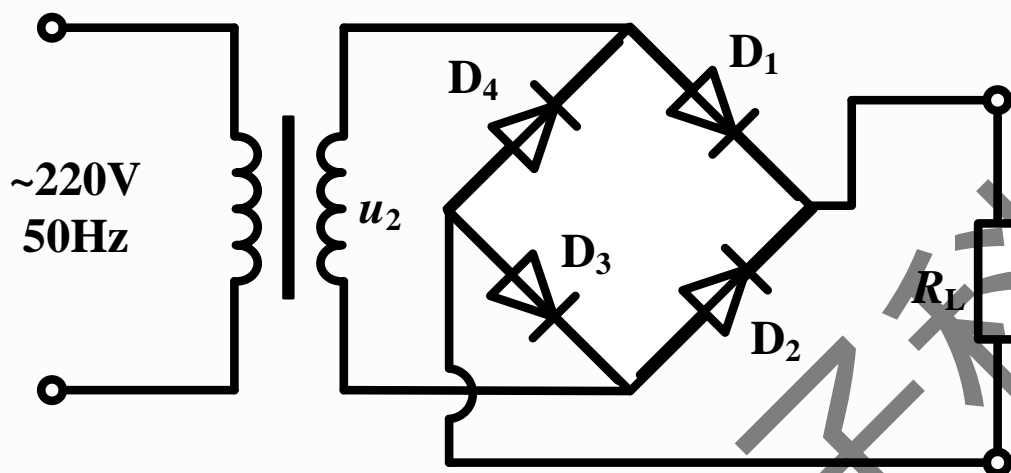
$$U_{O(AV)} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.9U_2$$

$$U_{O(AV)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$I_{L(AV)} = \frac{U_{O(AV)}}{R_L} \approx \frac{0.9U_2}{R_L}$$

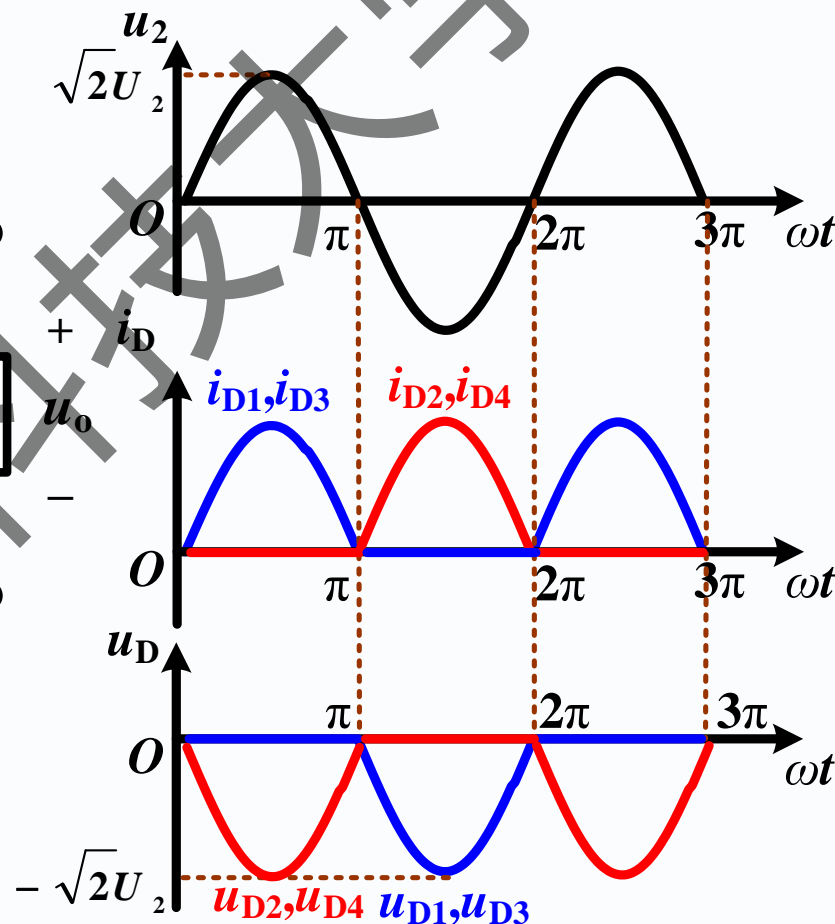
2、单相桥式整流电路

(3) 二极管的选择



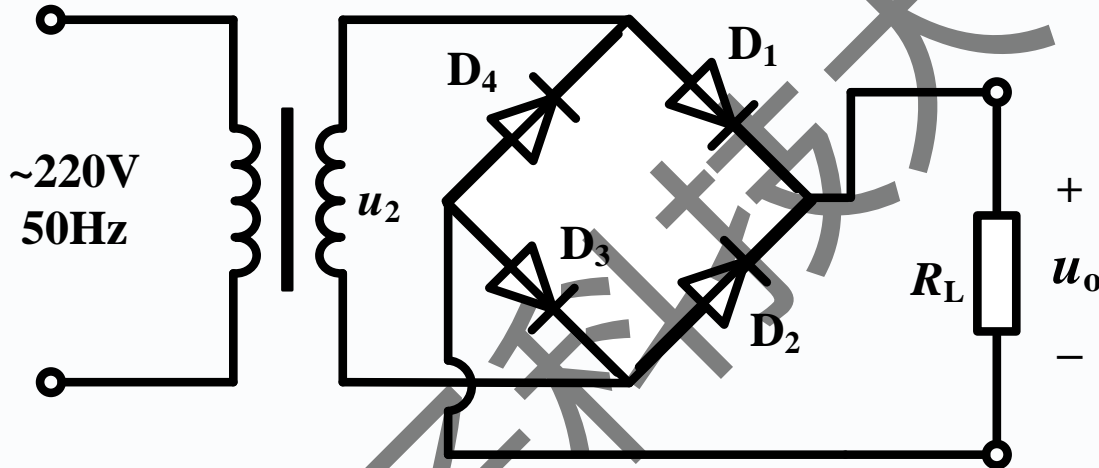
$$U_{D(RM)} = \sqrt{2}U_2$$

$$I_{D(AV)} = I_{O(AV)} \approx \frac{0.45U_2}{R_L}$$



2、单相桥式整流电路

(3) 二极管的选择



考虑到电网电压波动范围为 $\pm 10\%$ ，二极管的极限参数应满足：

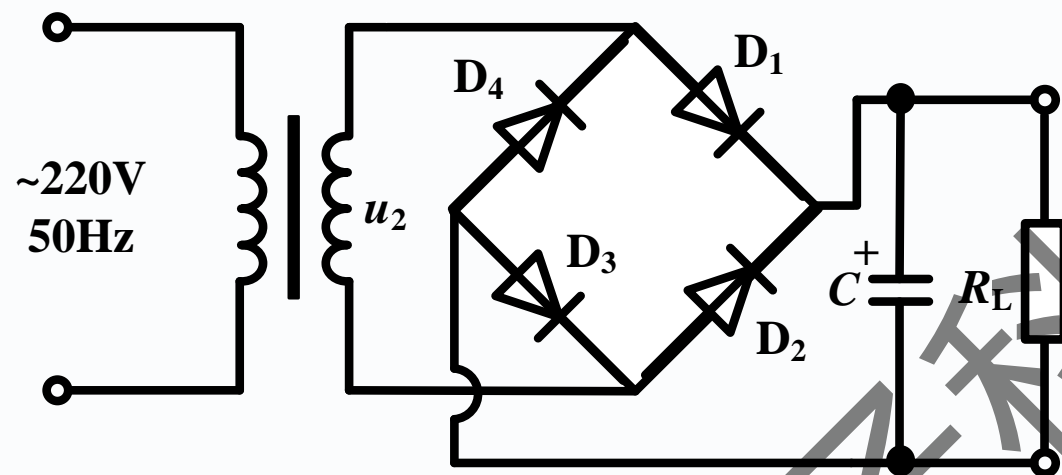
$$\begin{cases} I_F > 1.1 \times \frac{0.45U_2}{R_L} \\ U_{DR} > 1.1\sqrt{2}U_2 \end{cases}$$

与半波整流电路对二极管的要求相同

2、单相桥式整流电路

3.电容滤波电路

(1)工作原理



当 $|u_2| > |u_C|$ 时，有一对二极管导通，对电容充电， $\tau_{\text{充电}}$ 非常小

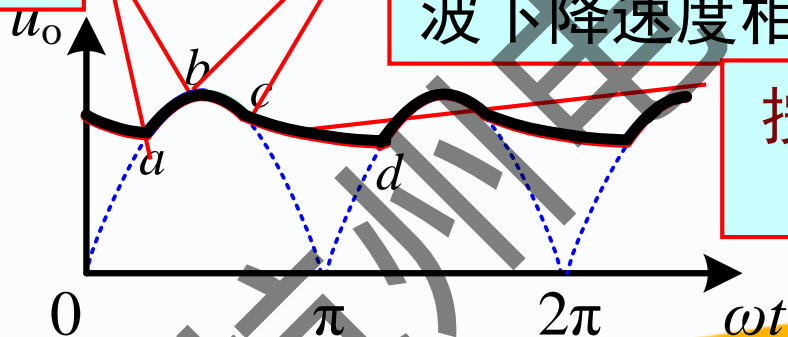
当 $|u_2| < |u_C|$ 时，所有二极管均截止，电容通过 R_L 放电， $\tau_{\text{放电}} = R_L C$ 。

滤波后，输出电压平均值增大，脉动变小。

充电

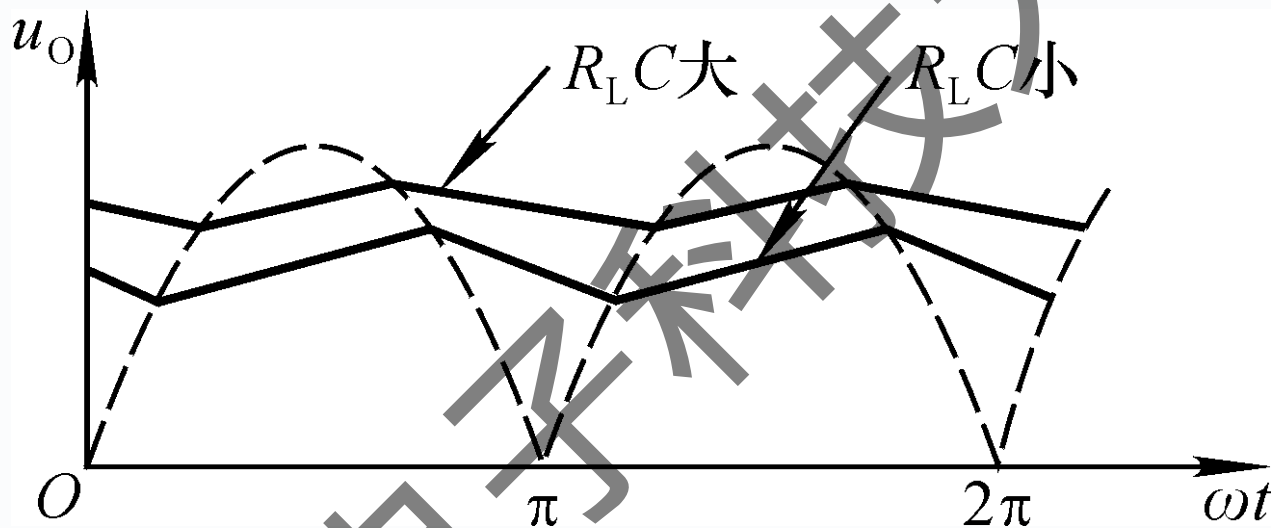
放电速度与正弦波下降速度相似

按指数规律下降



2、单相桥式整流电路

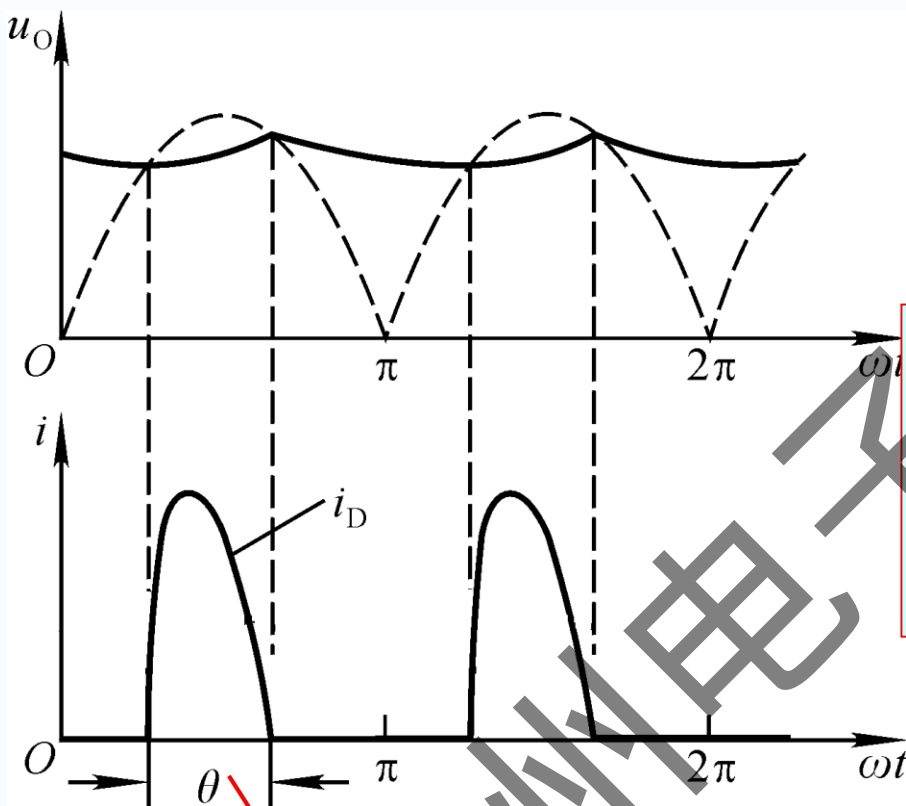
考虑整流电路的内阻



C 越大, R_L 越大, τ 越大, 放电越慢, 曲线越平滑, 脉动越小。

2、单相桥式整流电路

(2) 二极管的导通角



导通角

无滤波电容时 $\theta = \pi$ 。

有滤波电容时 $\theta < \pi$ ，且二极管平均电流增大，故其峰值很大！

$$\left\{ \begin{array}{l} C \uparrow \\ R_L \uparrow \end{array} \right. \rightarrow \tau_{\text{放电}} \uparrow \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{脉动} \downarrow \\ U_{O(AV)} \uparrow \\ \theta \downarrow \rightarrow i_D \text{的峰值} \uparrow \end{array} \right.$$

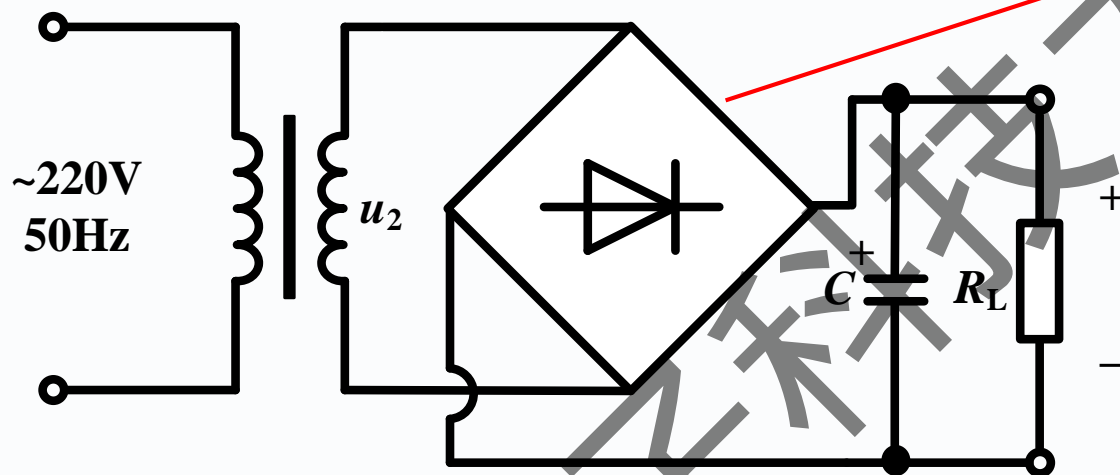
θ 小到一定程度，难于选择二极管！



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

2、单相桥式整流电路

(3) 电容的选择及 $U_{O(AV)}$ 的估算



整流桥的简化画法

当 $R_L C = (3 \sim 5) \frac{T}{2}$ 时, $U_{O(AV)} \approx 1.2U_{2\circ}$

C 耐压值 $> 1.1\sqrt{2}U_{2\circ}$

优缺点

简单易行, $U_{O(AV)}$ 高, C 足够大时交流分量较小; 不适于大电流负载。



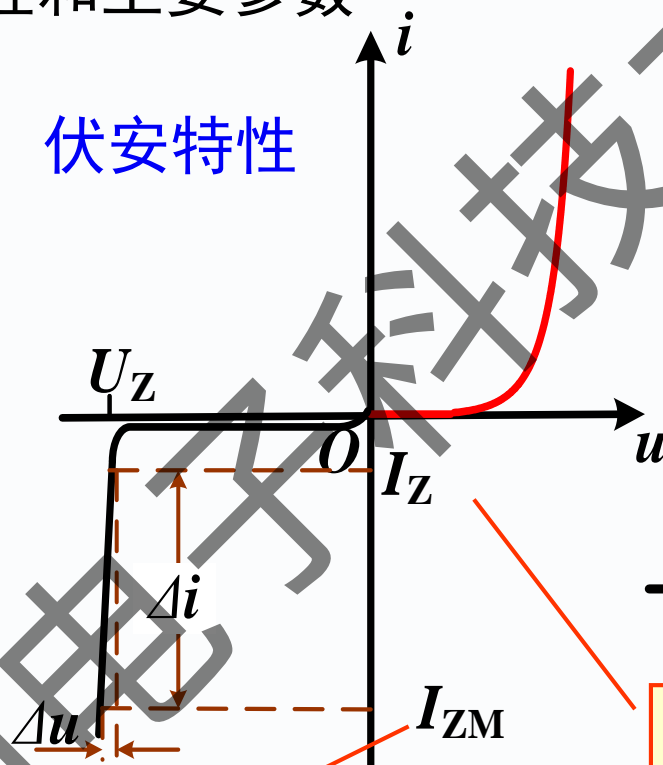
电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

5.4.3 稳压管稳压电路

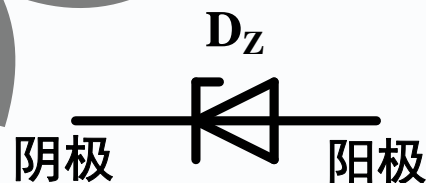
1. 稳压管的伏安特性和主要参数

由一个PN结组成，反向击穿后在一定的电流范围内端电压基本不变，为稳定电压。

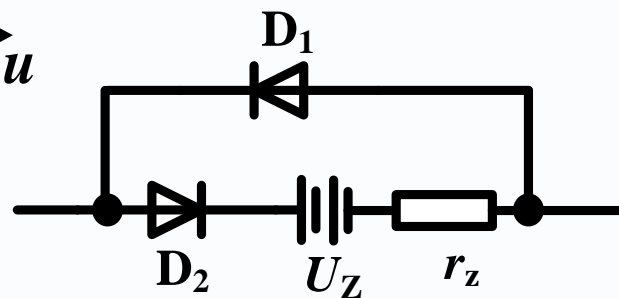
伏安特性



电路符号



等效电路



进入稳压区的最小电流

不至于损坏的最大电流

5.4.3 稳压管稳压电路

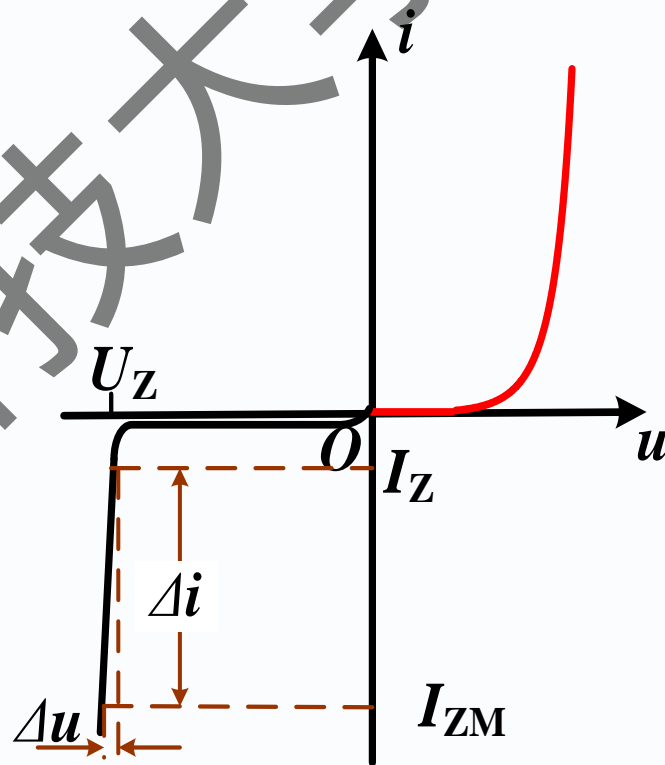
1. 稳压管的伏安特性和主要参数

稳定电压 U_Z : 稳压管的击穿电压

稳定电流 I_Z : 使稳压管工作在稳压状态的最小电流

最大耗散功率 P_{ZM} : 允许的最大功率, $P_{ZM} = I_{ZM} U_Z$

动态电阻 r_z : 工作在稳压状态时, $r_z = \Delta U / \Delta I$



5.4.3 稳压管稳压电路

2. 基本电路的组成

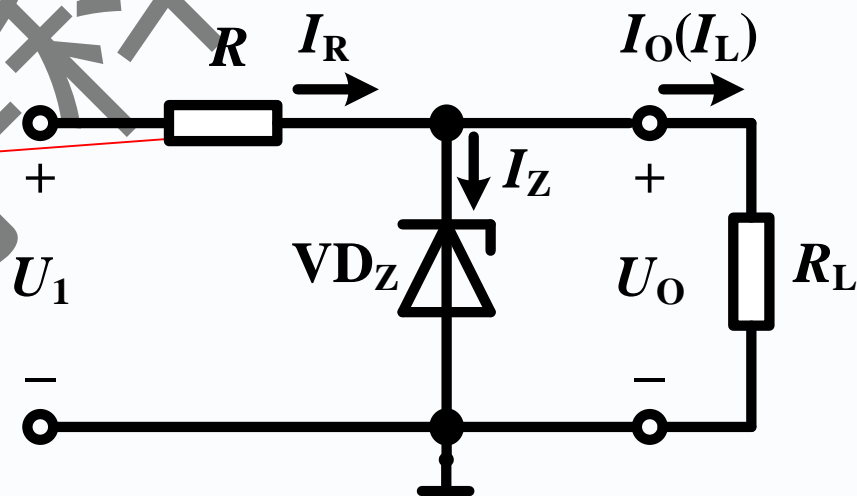
若稳压管的电流太小则不稳压，若稳压管的电流太大则会因功耗过大而损坏，因而稳压管电路中必需有限制稳压管电流的限流电阻！

限流电阻必不可少！

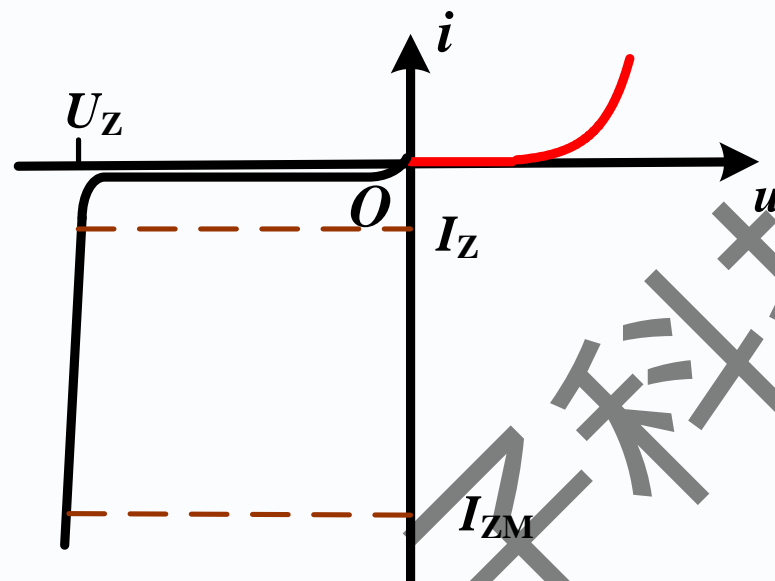
R 的作用

限流电阻

调整电阻

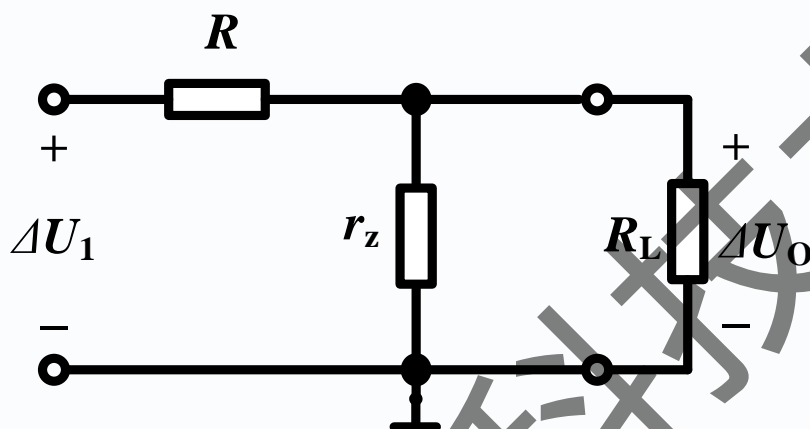


3. 稳压管稳压电路的主要性能指标



- (1) 输出电压 $U_O = U_Z$
- (2) 输出电流 $I_{DZ} \in [I_Z - I_{ZM}]$

3. 稳压管稳压电路的主要性能指标



(3) 稳压系数

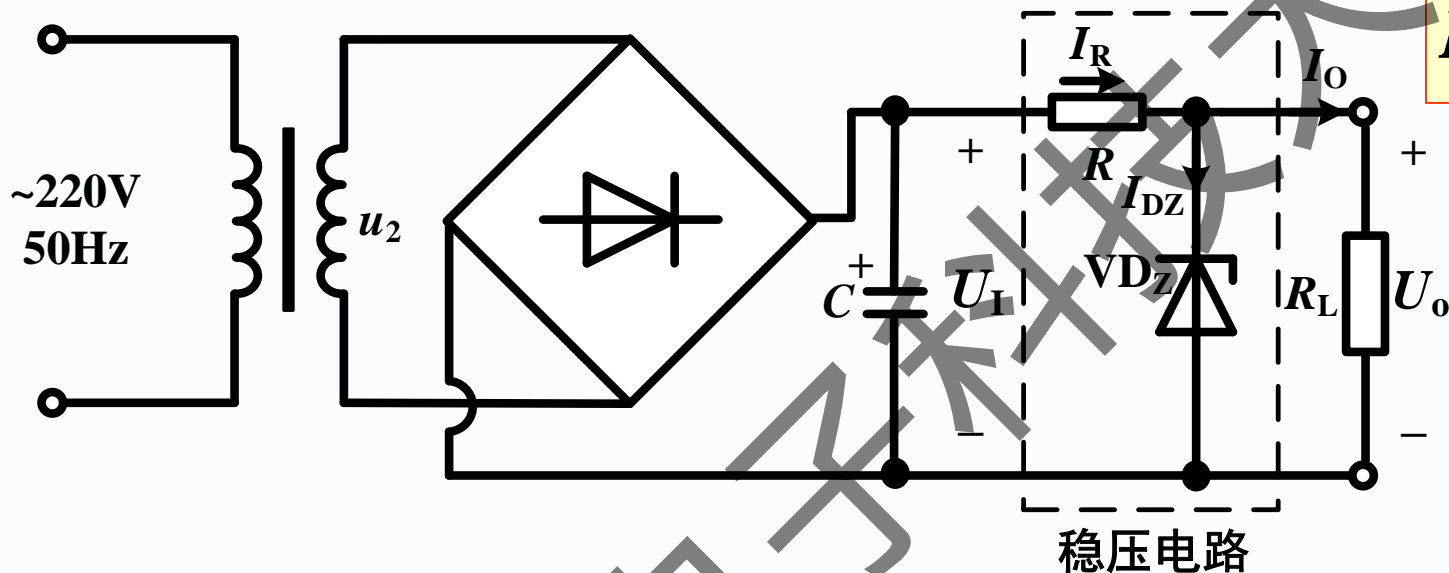
$$S_r = \left. \frac{\Delta U_O / U_O}{\Delta U_I / U_I} \right|_{R_L} = \left. \frac{\Delta U_O}{\Delta U_I} \cdot \frac{U_I}{U_O} \right|_{R_L} = \frac{r_z // R_L}{R + r_z // R_L} \cdot \frac{U_I}{U_O} \approx \frac{r_z}{R} \cdot \frac{U_I}{U_O}$$

(4) 输出电阻

$$R_o = r_z // R \approx r_z$$

特点：简单易行，稳压性能好。适用于输出电压固定、输出电流变化范围较小的场合。

4. 工作原理



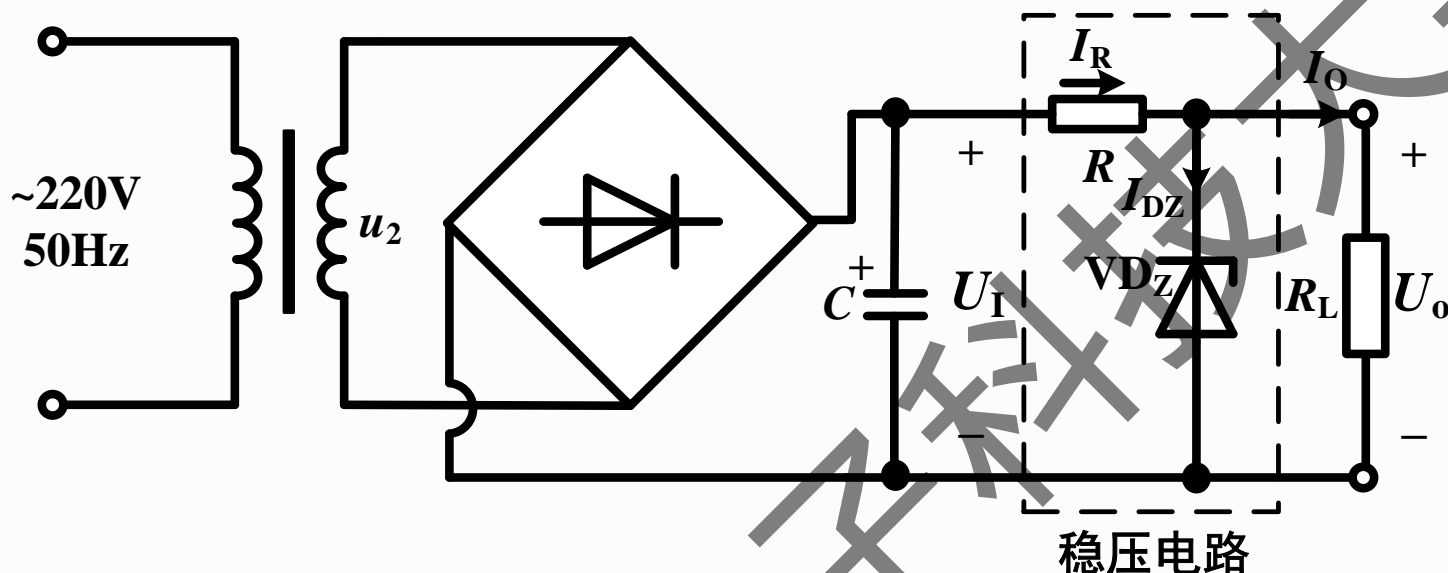
$$U_I = U_R + U_O$$

$$I_R = I_{DZ} + I_L$$

电网电压 $\uparrow \rightarrow U_I \uparrow \rightarrow U_O (U_{DZ}) \uparrow \rightarrow I_{DZ} \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O \downarrow$

若 $\Delta U_I \approx \Delta U_R$, 则 U_O 基本不变。利用 R 上的电压变化补偿 U_I 的波动

4. 工作原理



$$U_I = U_R + U_O$$

$$I_R = I_{DZ} + I_L$$

$$R_L \downarrow \rightarrow I_O \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_O (U_{DZ}) \downarrow$$

$$\rightarrow I_{DZ} \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow U_R \downarrow \rightarrow U_O \uparrow$$

若 $\Delta I_{DZ} \approx -\Delta I_O$ ，则 U_R 基本不变， U_O 也就基本不变。利用 I_{DZ} 变化补偿 I_L 的变化

5.稳压管稳压电路的设计

- (1) U_I 的选择 $U_I = (2 \sim 3) U_Z$
- (2) 稳压管的选择 $U_Z = U_O$ $I_{ZM} - I_Z > I_{Lmax} - I_{Lmin}$
- (3) 限流电阻的选择 保证稳压管既稳压又不损坏。

$$I_{DZmin} > I_Z \text{ 且 } I_{DZmax} < I_{ZM}$$



5.4.3 稳压管稳压电路

【例5.4.1】 硅稳压管电路如图所示。其中待稳定的直流电压 $U_I=18\text{V}$, $R=1\text{k}\Omega$, $R_L=2\text{k}\Omega$, 硅稳压管 VD_Z 的稳定电压 $U_Z=10\text{V}$, 动态电阻及未被击穿时的反向电流均可忽略。

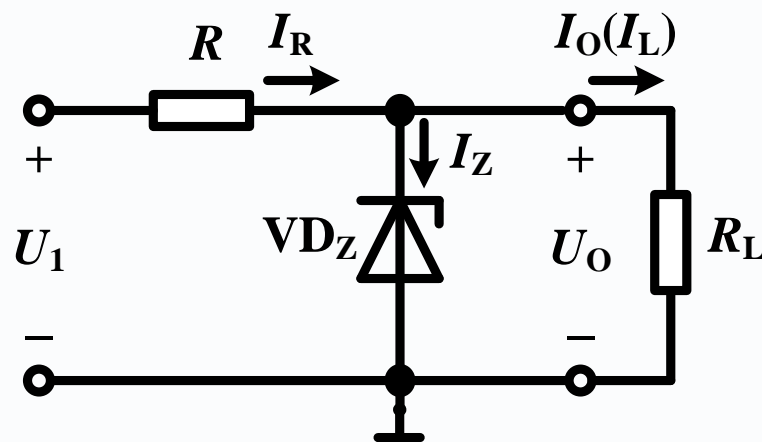
- (1) 试求 U_O 、 I_O 、 I_R 和 I_Z 的值。
- (2) 试求 R_L 值降低到多大时, 电路的输出电压将不再稳定。

解: (1)

$$U_I \times \frac{R_L}{R + R_L} = 18 \times \frac{2}{1 + 2} = 12(\text{V}) > U_Z$$

$$U_O = U_Z = 10(\text{V})$$

$$I_O = \frac{U_O}{R_L} = \frac{10}{2} = 5(\text{mA})$$



5.4.3 稳压管稳压电路

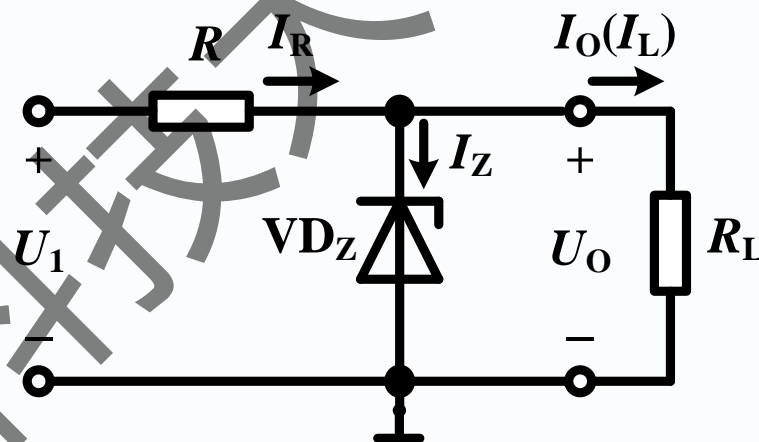
$$I_R = \frac{U_I - U_O}{R} = \frac{18 - 10}{1} = 8(\text{mA})$$

$$I_Z = I_R - I_O = 8 - 5 = 3(\text{mA})$$

(2) 当 $U_I \times \frac{R_L}{R + R_L} < U_Z$

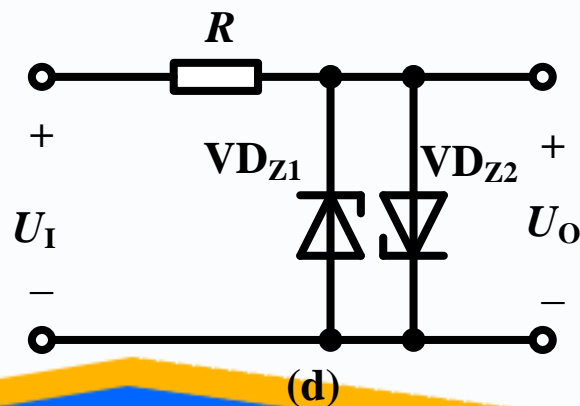
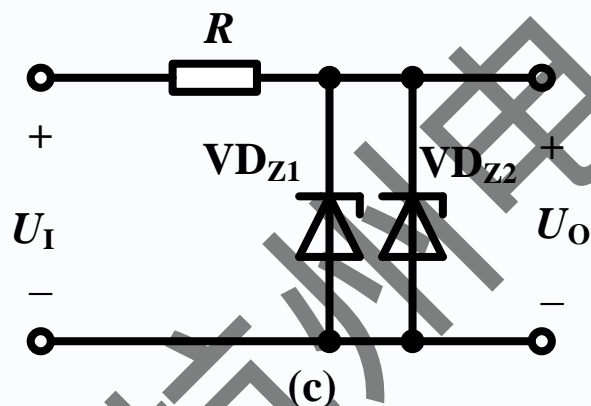
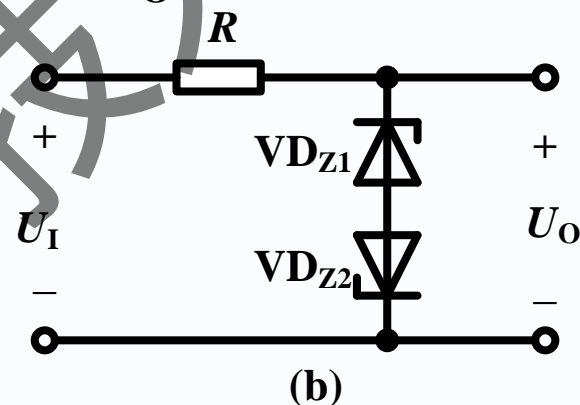
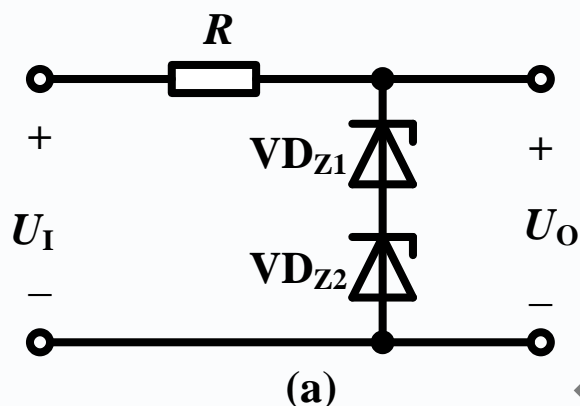
$$18 \times \frac{R_L}{1 + R_L} < 10$$

$$R_L < 1.25(\text{k}\Omega)$$

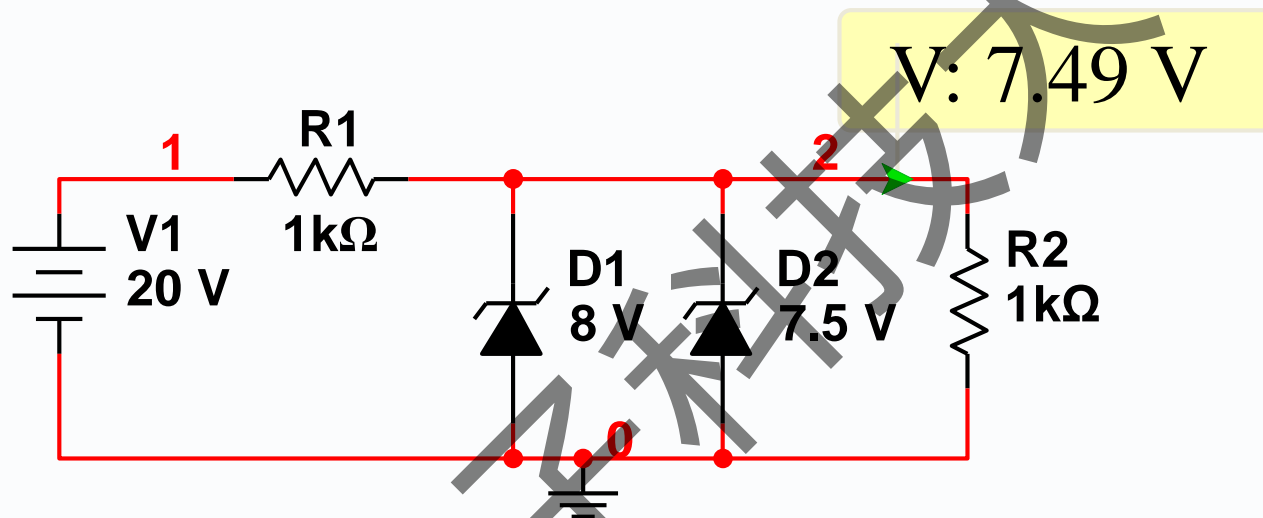


5.4.3 稳压管稳压电路

【例】：设 U_I 足够大， $U_{Z1}=8V$ ， $U_{Z2}=7.5V$ ， $U_{D(on)}=0.7V$ ，判断 VD_{Z1} ， VD_{Z2} 的导通情况，并求输出电压 U_O 。



5.4.3 稳压管稳压电路

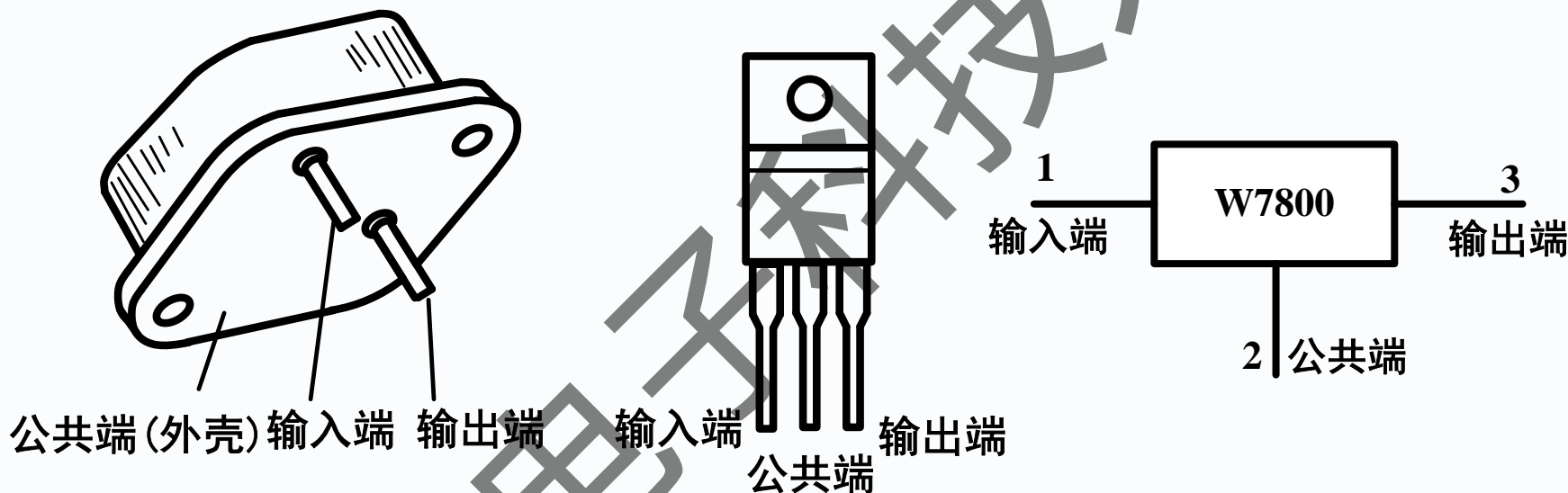


Multisim仿真结果

5.4.4 三端集成稳压器

1. 固定输出的三端稳压器 — W7800系列

(1) 简介



输出电压：5V、6V、9V、12V、15V、18V、24V

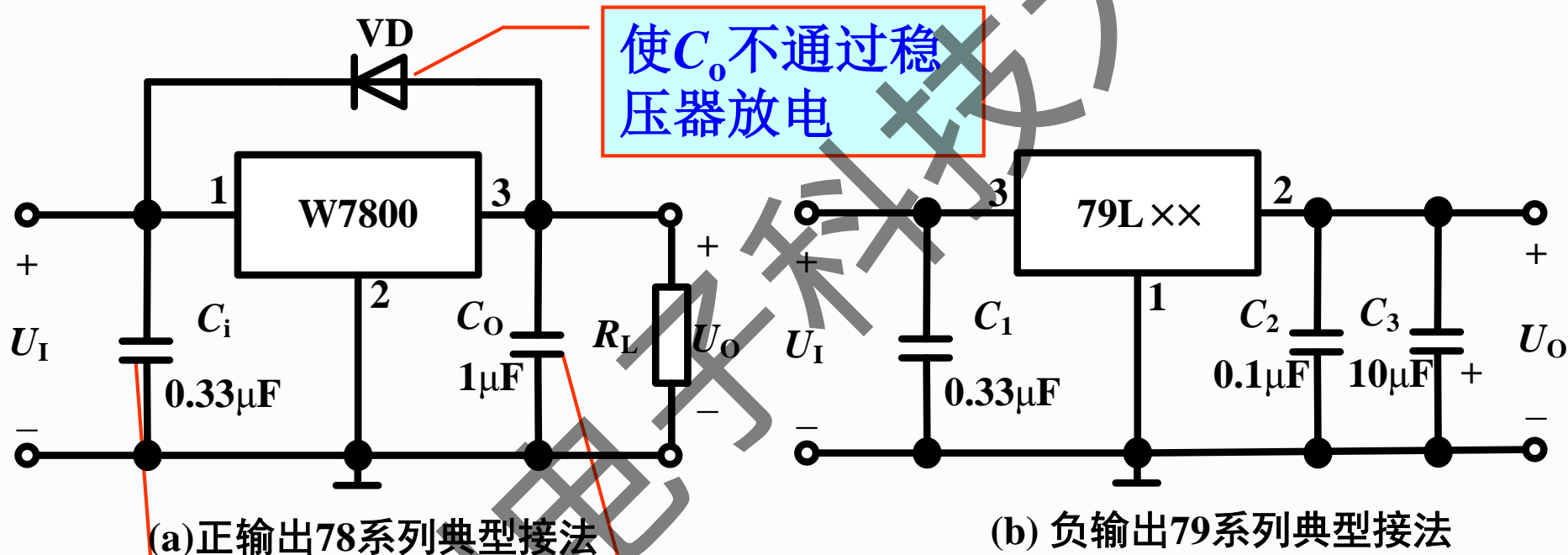
输出电流：1.5A（W7800）、0.5A（W78M00）、0.1A（W78L00）



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

(2) 基本应用

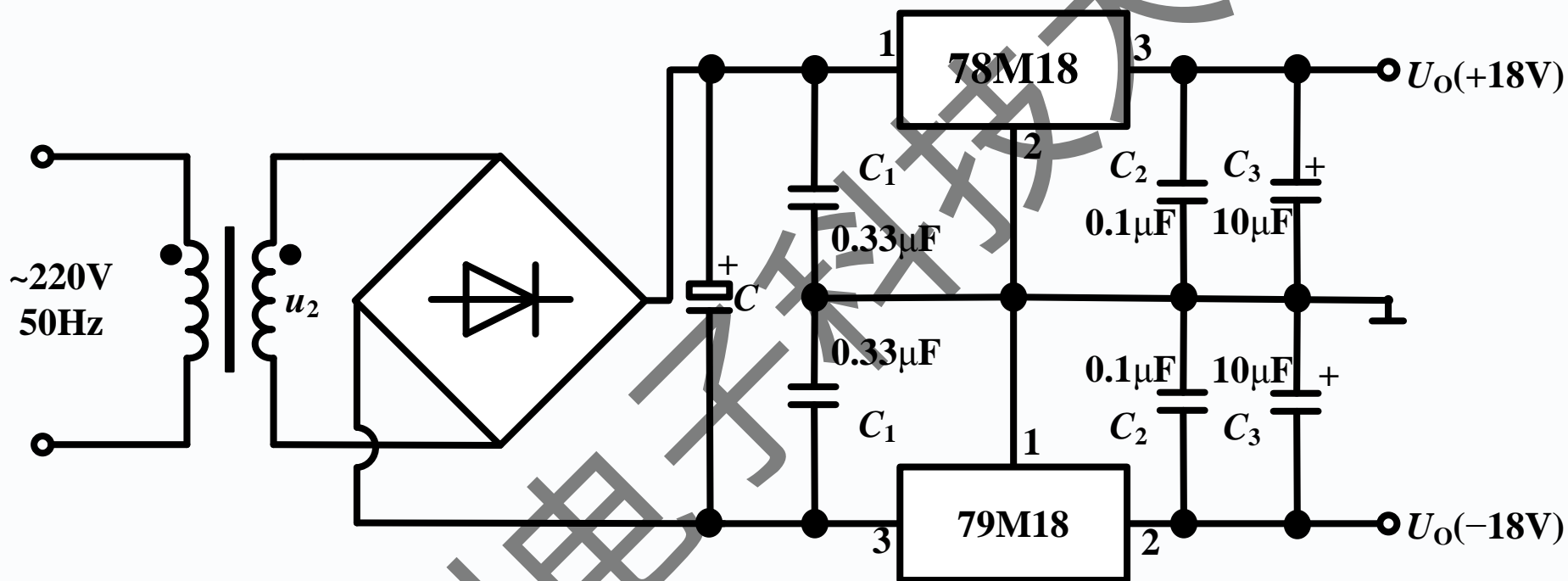
将输入端接整流滤波电路的输出，将输出端接负载电阻。



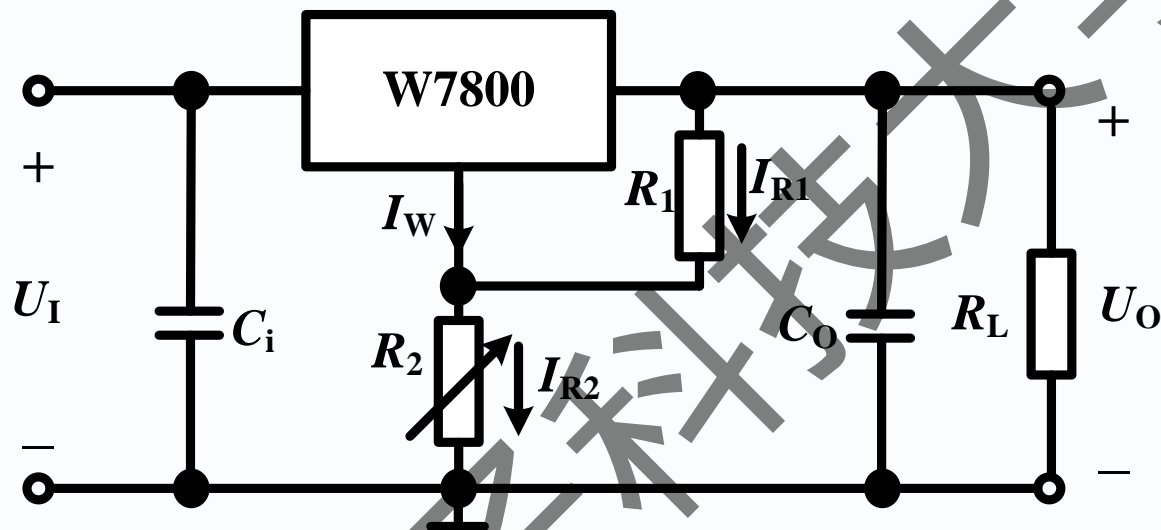
抵销长线电感效应，
消除自激振荡

消除高频噪声

(3) 具有正、负两路输出的稳压电路



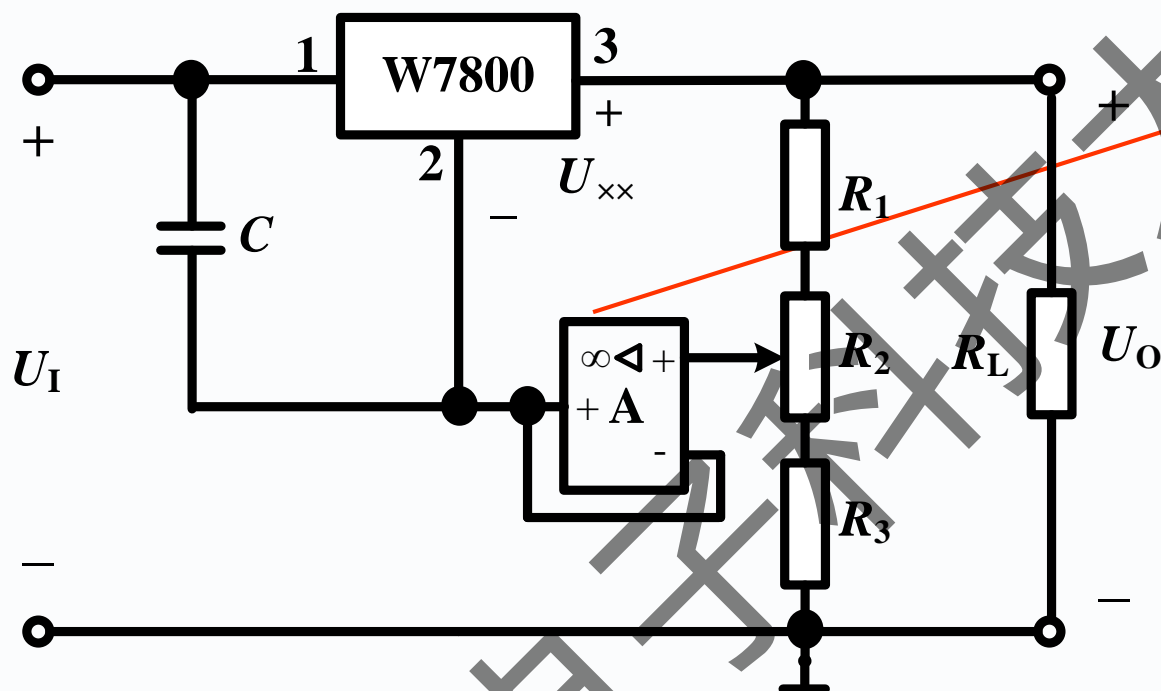
(4) 输出电压扩展电路



$$U_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U'_O + I_W R_2$$

I_W 为几mA(常可忽略), U'_O 与三端稳压器参数有关。
调节 R_2 , 则能调节输出电压 U_O 。

(4) 输出电压扩展电路



隔离作用

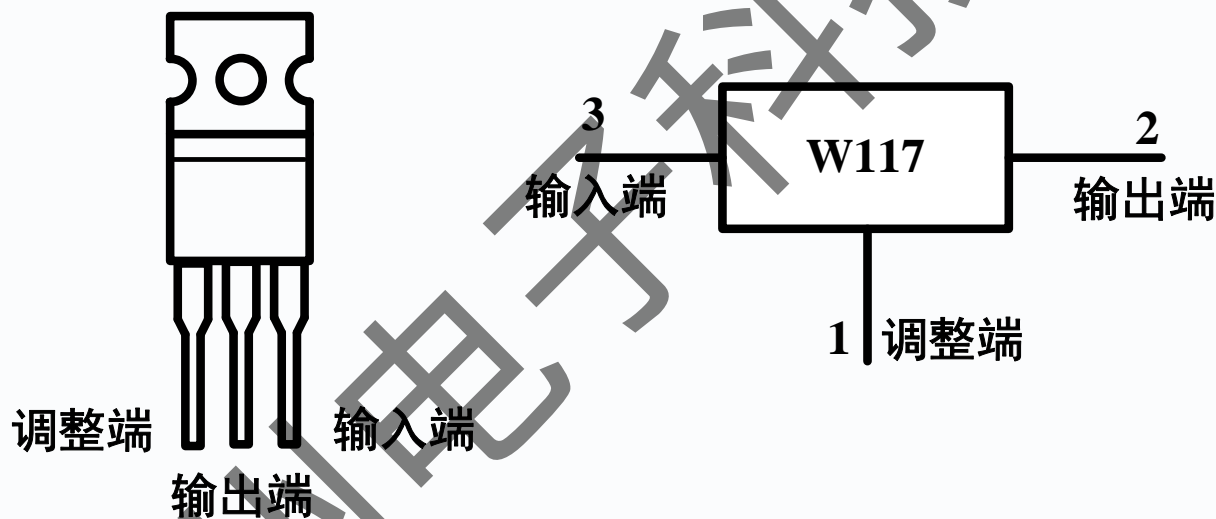
$$U_{\text{omax}} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1} \cdot U_{\text{xx}}$$

$$U_{\text{omin}} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2} \cdot U_{\text{xx}}$$

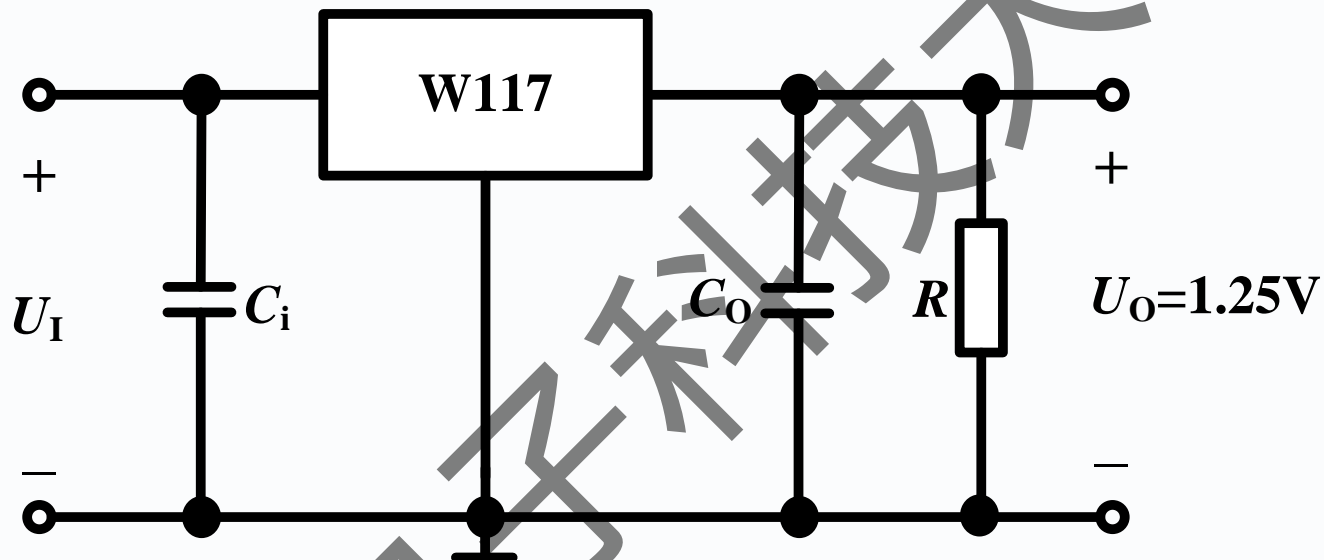
2. 基准电压源三端可调式稳压器 W117

(1) 简介

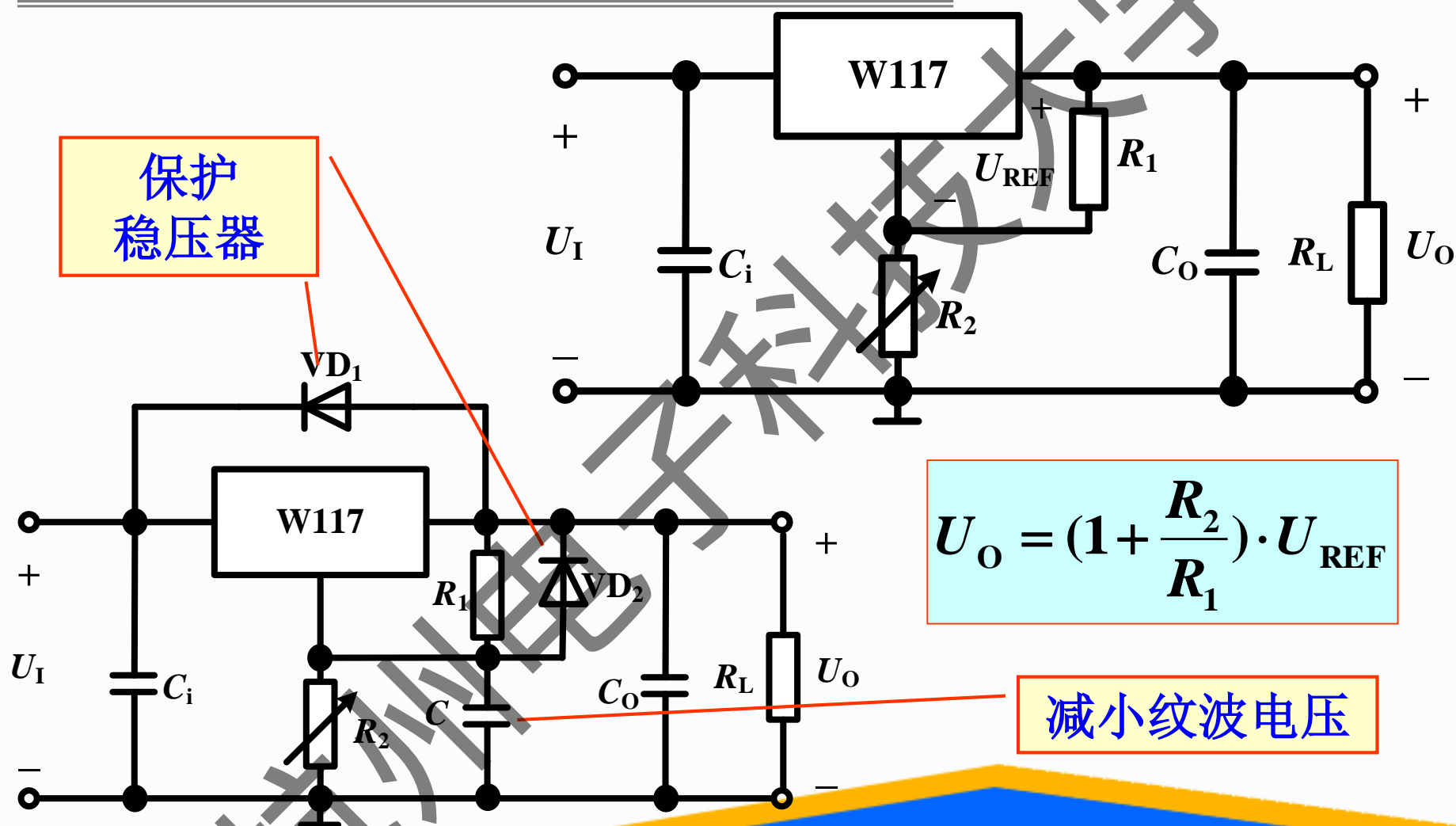
输出电压 $U_{\text{REF}} = 1.25\text{V}$ ，调整端电流只有几微安。



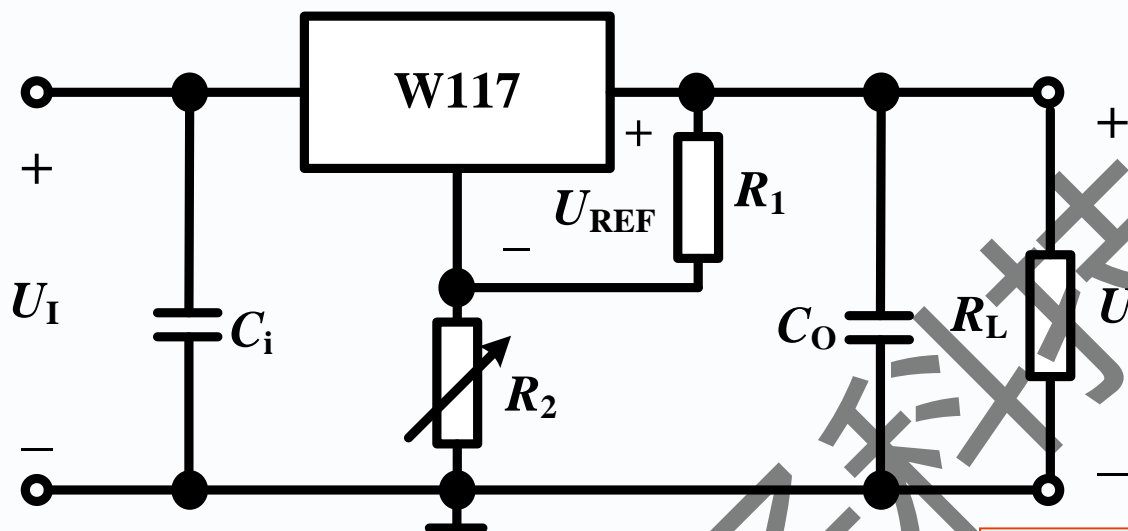
(2) 基本应用



(2) 基本应用



讨论：W117的应用



$$3V \leq U_I - U_O \leq 40V$$

$$3mA \leq I_O \leq 1.5A$$

决定于 I_{Omin}

1. R_1 的上限值为多少？
2. U_O 可能的最大值为多少？
3. 输出电压最小值为多少？

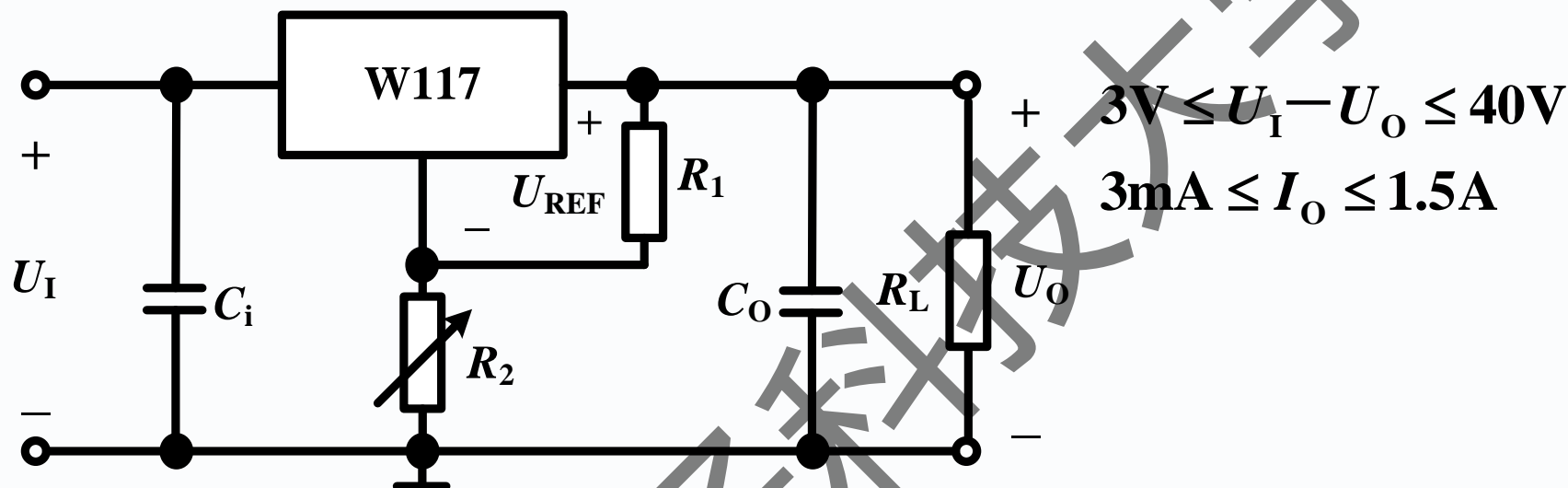
两种情况：1. 已知 U_I
2. 自己选取 U_I

决定于 W117 的输出



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

讨论：W117的应用



根据输出电压表达式

4. $U_{Omax} = 30V$, 选取 R_1 、 R_2 ;

5. 已知电网电压波动 $\pm 10\%$, 输出电压最大值为 $30V$, U_I 至少取多少伏?

输入电压最低、输出电压最高时, $U_{Imin} - U_{Omax} > 3V$ 。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

5.4.4 三端集成稳压器

【例5.4.2】 电路如图5.4.14所示，集成稳压器7824的2、3端电压 $U_{32}=U_{\text{REF}}=24\text{V}$ ，求输出电压 U_O 和输出电流 I_O 的表达式，说明该电路具有何种作用。

解：

$$U_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_O = U_- = U_2$$

$$U_{32} = U_O - U_2$$

$$U_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_{32}$$

$$I_O = \frac{U_O}{R_1 + R_2} = \frac{U_{32}}{R_1}$$

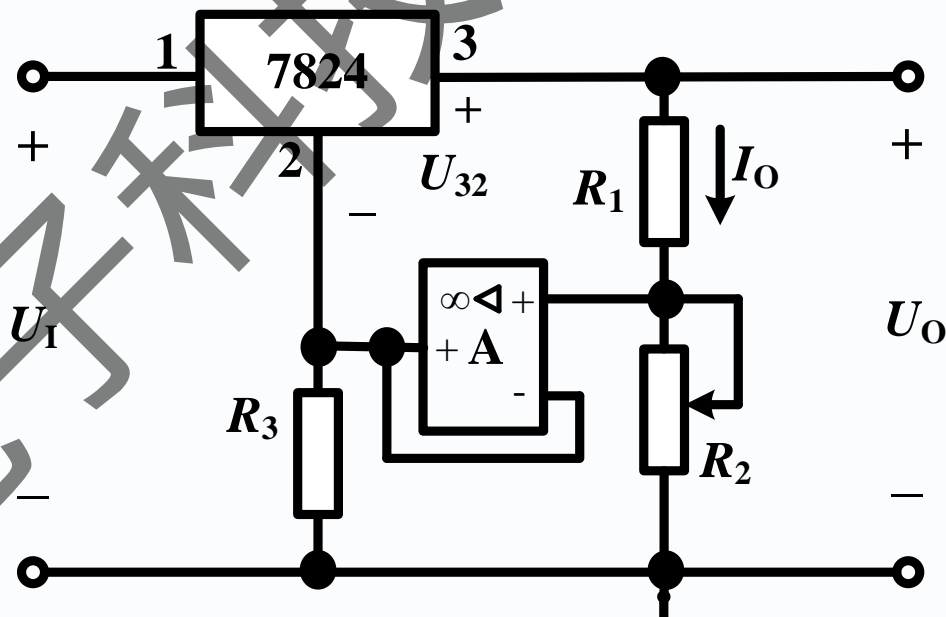
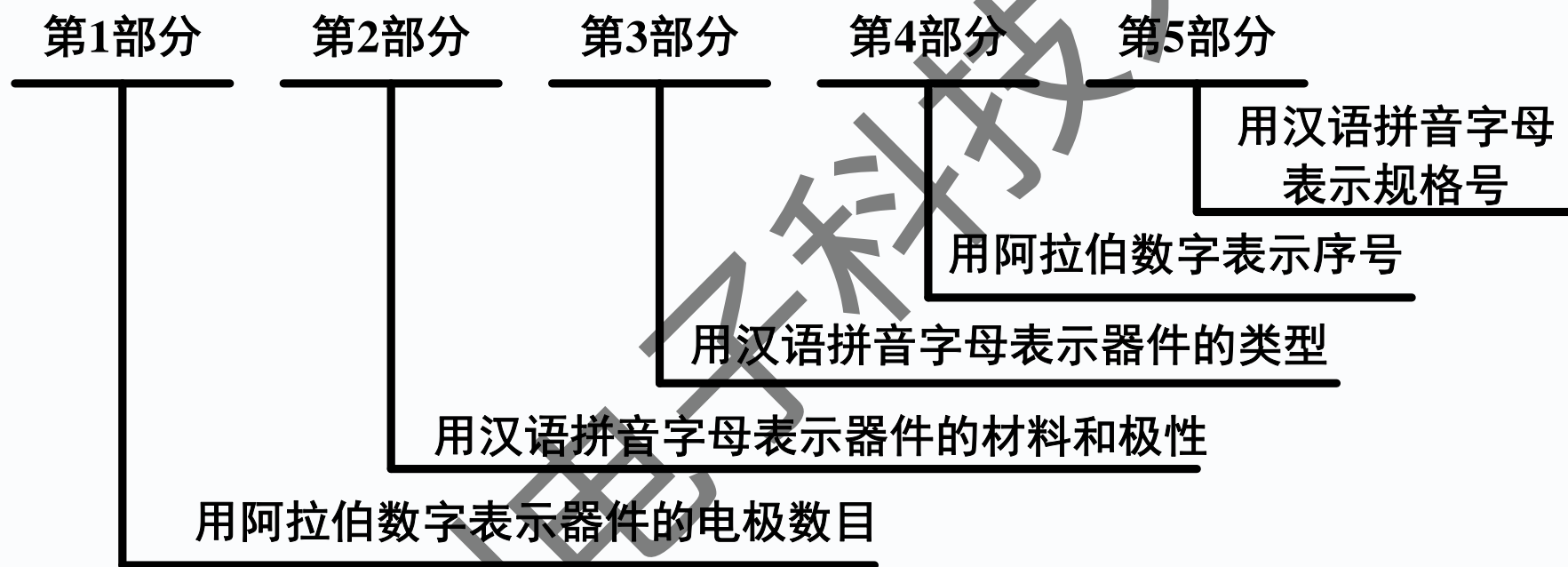


图5.4.14 例5.4.2电路图

5.5 半导体器件型号命名及方法

半导体器件的型号命名由5部分组成



2CP21A:

普通N型硅材料二极管，序号21，规格号A



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY