

第 3 章

晶体二极管及其应用电路

【学习目标】

1. 了解半导体的基本知识：本征半导体、掺杂半导体；掌握 PN 结的基本特性。
2. 理解半导体二极管的伏安特性和主要参数。
3. 了解几种常用的二极管：硅稳压二极管、发光二极管、光电二极管等。
4. 掌握单相半波、桥式全波整流电路的电路组成、工作原理与性能特点；了解电容滤波电路的工作原理。
5. 了解硅稳压管的稳压特性及稳压电路的稳压原理。

3.1 晶体二极管

3.1.1 晶体二极管的单向导电特性

1. 晶体二极管

1) 外形

如图 3.1.1 (a) 所示，晶体二极管由密封的管体和两条正、负电极引线所组成。管体外壳的标记通常表示正极。

2) 图形、文字符号

如图 3.1.1 (b) 所示，晶体二极管的图形由三角形和竖杠所组成。其中，三角形表示正极，竖杠表示负极，D 为晶体二极管的文字符号。

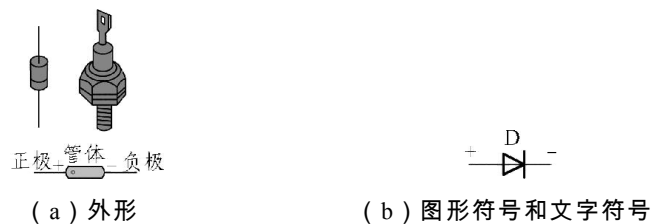


图 3.1.1 晶体二极管的外形和符号

2. 晶体二极管的单向导电性

(1) 正极电位 > 负极电位，二极管导通；

(2) 正极电位 < 负极电位，二极管截止。

即二极管正偏导通，反偏截止。这一导电特性称为二极管的单向导电性。

【例 3-1-1】 如图 3.1.2 所示电路中，当开关 S 闭合后， H_1 、 H_2 两个指示灯，哪一个可能发光？

解：由电路图可知，开关 S 闭合后，只有二极管 D_1 正极电位高于负极电位，即处于正向导通状态，所以 H_1 指示灯发光。

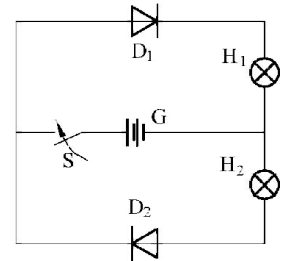


图 3.1.2 例 3-1-1 电路图

3.1.2 PN 结

二极管由半导体材料制成。

1. 半导体

导电能力介于导体与绝缘体之间的一种物质，如硅 (Si) 或锗 (Ge) 半导体。

半导体中，粒子有能够运载电荷的自由电子与空穴。自由电子带负电，空穴带与自由电子等量的正电。

载流子：在电场的作用下定向移动的自由电子和空穴，如图 3.1.3 所示。

2. 本征半导体

本征半导体是不加杂质的纯净半导体晶体。如本征硅或本征锗。

本征半导体电导率低，为提高导电性能，需掺杂，形成杂质半导体。

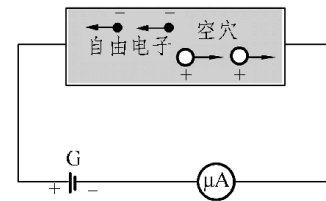


图 3.1.3 半导体的两种载流子

3. 杂质半导体

为了提高半导体的导电性能，在本征半导体 (4 价) 中掺入硼或磷等杂质所形成的半导体即杂质半导体。

根据掺杂的物质不同，可分为两种：

(1) P 型半导体：本征硅 (或锗) 中掺入少量硼元素 (3 价) 所形成的半导体，如 P 型硅。其中，多数载流子为空穴，少数载流子为电子。

(2) N 型半导体：本征硅 (或锗) 中掺入少量磷元素 (5 价) 所形成的半导体，如 N 型硅。其中，多数载流子为电子，少数载流子为空穴。

将 P 型半导体和 N 型半导体使用特殊工艺连在一起，形成 PN 结。

4. PN 结

N型和P型半导体之间的特殊薄层叫作PN结。

PN结是各种半导体器件的核心。

PN结具有单向导电特性。即：P区接电源正极，N区接电源负极，PN结导通；反之，PN结截止。

晶体二极管之所以具有单向导电性，其原因是内部具有PN结。其正、负极分别对应于PN结的P型和N型半导体，如图3.1.4所示。

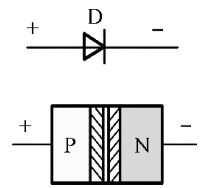


图 3.1.4 PN 结

3.1.3 二极管的伏安特性

1. 定义

二极管两端的电压和流过的电流之间的关系曲线叫作二极管的伏安特性。

2. 测试电路

测试二极管伏安特性的电路如图3.1.5所示。



图 3.1.5 测试二极管伏安特性电路

3. 伏安特性曲线

二极管伏安特性曲线如图3.1.6所示。

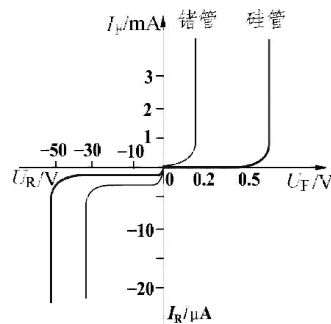


图 3.1.6 二极管伏安特性曲线

4. 特点

1) 正向特性

① 正向电压 U_F 小于门坎电压 U_T 时，二极管 D 截止，正向电流 $I_F = 0$ 。其中，门槛电压

$$U_T = \begin{cases} 0.5 \text{ V (Si)} \\ 0.2 \text{ V (Ge)} \end{cases}。$$

② $U_F > U_T$ 时，D 导通， I_F 急剧增大。导通后 D 两端电压基本恒定：导通电压 $U_{on} = \begin{cases} 0.7 \text{ V (Si)} \\ 0.3 \text{ V (Ge)} \end{cases}$

结论：正偏时电阻小，具有非线性。

2) 反向特性

反向电压 $U_R < U_{RM}$ (反向击穿电压) 时，反向电流 I_R 很小，且近似为常数，称为反向饱和电流； $U_R > U_{RM}$ 时， I_R 剧增，此现象称为反向电击穿；对应的电压 U_{RM} 称为反向击穿电压。

结论：反偏时电阻大，存在电击穿现象。

【做一做】 二极管的简单测试。

用万用表检测二极管如图 3.1.7 所示。



图 3.1.7 万用表检测二极管

1. 判别正负极性

万用表测试条件： $R \times 100 \Omega$ 或 $R \times 1 \text{ k}\Omega$ ；

将红、黑表笔分别接二极管两端。所测电阻小时，黑表笔接触处为正极，红表笔接触处为负极。

2. 判别好坏

万用表测试条件： $R \times 1 \text{ k}\Omega$ ；

- (1) 若正反向电阻均为零，二极管短路；
- (2) 若正反向电阻非常大，二极管开路；
- (3) 若正向电阻约几千欧姆，反向电阻非常大，则二极管正常。

3.1.4 二极管的分类、型号和参数

1. 分类

- (1) 按材料分：硅管、锗管；
- (2) 按 PN 结面积分：点接触型 (电流小，高频应用)、面接触型 (电流大，用于整流)；
- (3) 按用途分：整流二极管、稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管，如图 1.1.8 所示。

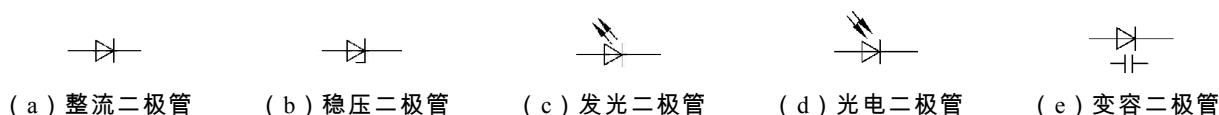


图 3.1.8 二极管图形符号

2. 型号命名

国产二极管的型号命名由五部分组成：第一部分用数字“2”表示为二极管，第二部分用字母表示二极管的材料与极性，第三部分用字母表示二极管的类别，第四部分用数字表示序号，第五部分用字母表示二极管的规格号，如图 3.1.9 所示。

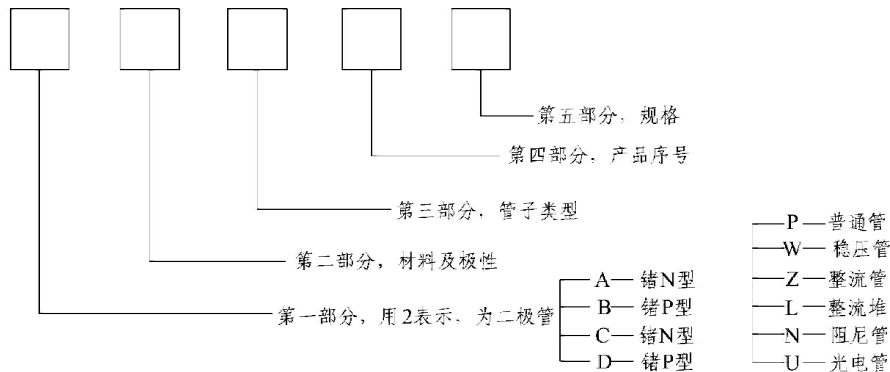


图 3.1.9 国产二极管的型号命名

例如：整流二极管——2CZ82B，稳压二极管——2CW50。

3. 主要参数

1) 普通整流二极管

- ① 最大整流电流 I_{FM} ：二极管允许通过的最大正向工作电流平均值。
- ② 最高反向工作电压 U_{RM} ：二极管允许承受的反向工作电压峰值。
- ③ 反向漏电流 I_R ：规定的反向电压和环境温度下，二极管反向电流值。

2) 稳压二极管

稳定电压 U_Z 、稳定电流 I_Z 、最大工作电流 I_{ZM} 、最大耗散功率 P_{ZM} 、动态电阻 r_z 等。

3.2 晶体二极管整流电路

整流：把交流电变成直流电的过程。

二极管单相整流电路：把单相交流电变成直流电的电路。

整流原理：利用二极管的单向导电特性，将交流电变成脉动的直流电。

单相整流电路分类如图 3.2.1 所示。

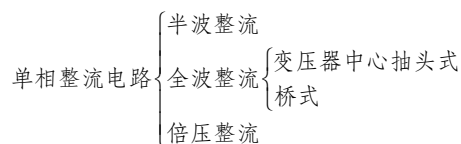


图 3.2.1 单相整流电路分类

3.2.1 单相半波整流电路

1. 电 路

单相半波整流电路如图 3.2.2 (a) 所示。图中，D 为整流二极管，把交流电变成脉动直流电；T 为电源变压器，用于把 u_1 变成整流电路所需的电压 u_2 。

2. 工作原理

设 u_2 为正弦波，波形如图 3.2.2 (b) 所示。

(1) u_2 正半周时，A 点电位高于 B 点电位，二极管 D 正偏导通，则 $u_L \approx u_2$ ；

(2) u_2 负半周时，A 点电位低于 B 点电位，二极管 D 反偏截止，则 $u_L \approx 0$ 。

由波形可见， u_2 一周期内，负载只有单方向的半个波形，这种大小波动、方向不变的电压或电流称为脉动直流电。上述过程说明，利用二极管单向导电性可把交流电 u_2 变成脉动直流电 u_L 。由于电路仅利用 u_2 的半个波形，故称为半波整流电路。

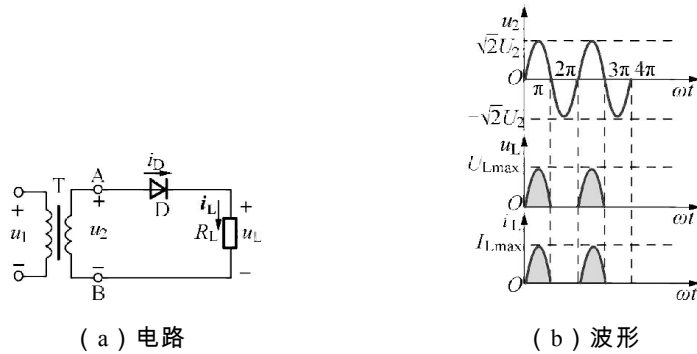


图 3.2.2 单相半波整流电路

3. 负载和整流二极管上的电压和电流

(1) 负载电压：

$$U_L = 0.45U_2 \quad (3.2.1)$$

(2) 负载电流：

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{0.45U_2}{R_L} \quad (3.2.2)$$

(3) 二极管正向电流：

$$I_U = I_L = \frac{0.45U_2}{R_L} \quad (3.2.3)$$

(4) 二极管反向峰值电压：

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 \approx 1.41U_2 \quad (3.2.4)$$

选管条件：

- (1) 二极管允许的最大反向电压应大于承受的反向峰值电压；
- (2) 二极管允许的最大整流电流应大于流过二极管的实际工作电流。

电路缺点：电源利用率低，纹波成分大。

解决办法：全波整流。

【想一想】 有一直流负载，电阻为 $1.5\text{ k}\Omega$ ，要求工作电流为 10 mA ，如果采用半波整流电路，试求电源变压器的二次电压，并选择适当的整流二极管。

3.2.2 单相全波整流电路

全波整流电路分为变压器中心抽头式和桥式两种。

1. 变压器中心抽头式单相全波整流电路

1) 电路图

变压器中心抽头式单相全波整流电路如图 3.2.3 所示。 D_1 、 D_2 为性能相同的整流二极管； T 为电源变压器，作用是产生大小相等而相位相反的 u_{2a} 和 u_{2b} 。

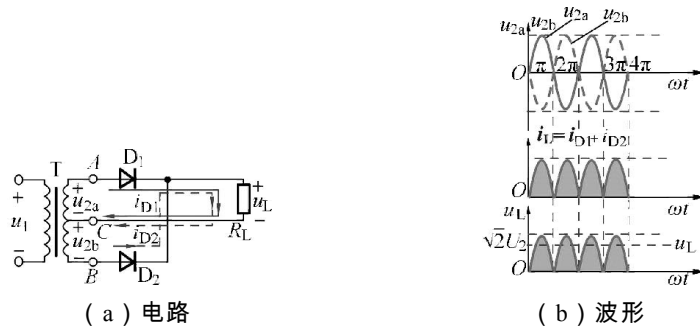


图 3.2.3 变压器中心抽头式全波整流电路

2) 工作原理

① u_1 正半周时， T 次级 A 点电位高于 B 点电位，在 u_{2a} 作用下， D_1 导通（ D_2 截止）， i_{D1} 自上而下流过 R_L ；

② u_1 负半周时， T 次级 A 点电位低于 B 点电位，在 u_{2b} 的作用下， D_2 导通（ D_1 截止）， i_{D2} 自上而下流过 R_L 。

可见，在 u_1 一周期内，流过二极管的电流 i_{D1} 、 i_{D2} 叠加形成全波脉动直流电流 i_L ，于是 R_L 两端产生全波脉动直流电压 u_L 。故电路称为全波整流电路。

3) 负载和整流二极管上的电压和电流

① 负载电压

$$U_L = 0.9U_2 \quad (3.2.5)$$

② 负载电流

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{0.9U_2}{R_L} \quad (3.2.6)$$

③ 二极管的平均电流

$$I_U = \frac{1}{2}I_L \quad (3.2.7)$$

④ 二极管承受反向峰值电压

$$U_{RM} = 2\sqrt{2}U_2 \quad (3.2.8)$$

缺点：单管承受的反向峰值压比半波整流高一倍，变压器 T 需中心抽头。

2. 单相桥式全波整流电路

1) 电路图

单相桥式全波整流电路如图 3.2.4 所示。D₁~D₄ 为整流二极管，电路为桥式结构。

2) 工作原理

① u_2 正半周时，如图 3.2.5 (a) 所示，A 点电位高于 B 点电位，则 U₁、U₃ 导通 (U₂、U₄ 截止)， i_1 自上而下流过负载 R_L；

② u_2 负半周时，如图 3.2.5 (b) 所示，A 点电位低于 B 点电位，则 U₂、U₄ 导通 (U₁、U₃ 截止)， i_2 自上而下流过负载 R_L。

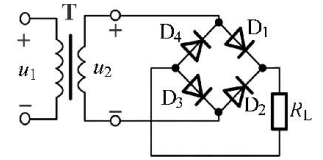
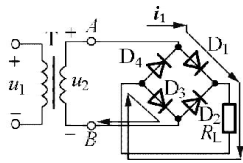
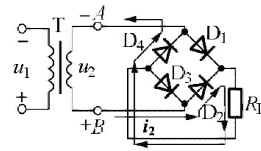


图 3.2.4 桥式整流电路



(a) u_2 为正半周时的电流方向



(b) u_2 为负半周时的电流方向

图 3.2.5 桥式整流电路工作过程

波形图如图 3.2.6 所示， u_2 一周期内，两组整流二极管轮流导通产生的单方向电流 i_1 和 i_2 叠加形成了 i_L 。于是负载两端得到全波脉动直流电压 u_L 。

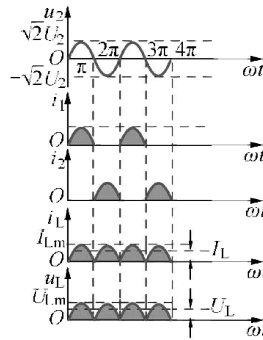


图 3.2.6 桥式整流电路工作波形图

3) 负载和整流二极管上的电压和电流

① 负载电压为

$$U_L = 0.9U_2 \quad (3.2.9)$$

② 负载电流为

$$I_L = \frac{U_L}{R_L} = \frac{0.9U_2}{R_L} \quad (3.2.10)$$

③ 二极管的平均电流为

$$I_D = \frac{1}{2} I_L \quad (3.2.11)$$

④ 如图 3.2.6 所示，二极管承受反向峰值电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 \quad (3.2.12)$$



图 3.2.7 桥式整流二极管承受的反向峰值电压

优点：输出电压高，纹波小， U_{RM} 较低，应用广泛。桥式整流电路简化画法如图 3.2.8 所示。

【例 3-2-1】 有一直流负载，需要直流电压 $U_L = 60\text{ V}$ ，直流电流 $I_L = 4\text{ A}$ 。若采用桥式整流电路，求电源变压器次级电压 U_2 ，并选择整流二极管。

解：因为 $U_L = 0.9U_2$ ，所以 $U_2 = \frac{U_L}{0.9} = \frac{60}{0.9} \approx 66.7\text{ (V)}$

流过二极管的平均电流为

$$I_U = \frac{1}{2} I_L = \frac{1}{2} \times 4 = 2\text{ (A)}$$

二极管承受的反向峰值电压为

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 = 1.41 \times 66.7 \approx 94\text{ (V)}$$

查晶体管手册，可选用整流电流为 3 A ，额定反向工作电压为 100 V 的整流二极管 2CZ12A ($3\text{ A}/100\text{ V}$) 四只。

整流元件组合件称为整流堆，常见的有半桥 2CQ 型，如图 3.2.9(a) 所示；全桥 QL 型，如图 3.2.9(b) 所示。

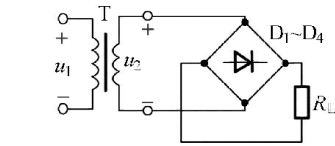


图 3.2.8 桥式整流电路简化画法



图 3.2.9 半桥和全桥整流堆

优点：电路组成简单、可靠。

3.3 滤波器和稳压器

3.3.1 滤波器

作用：滤除脉动直流电中的脉动成分。

种类：电容滤波器、电感滤波器、复式滤波器。

1. 电容滤波器

1) 电路

特点：电容器与负载并联。

2) 工作原理

利用电容器两端电压不能突变原理平滑输出电压。

在 $0 \sim t_1$ 期间，因 u_2 的作用，D 正偏导通，电容 C 充电，波形如图 3.3.1 (b) 中 OA 所示；

在 $t_1 \sim t_2$ 期间，因 $u_2 < u_C$ ，D 反偏截止，电容 C 通过负载放电，波形如图 3.3.1 (b) 中 AB 所示；

在 $t_2 \sim t_3$ 期间，因 $u_C > u_2$ ，D 正偏导通，电容再次充电，波形如图 3.3.1 (b) 中 BC 。



图 3.3.1 电容滤波电路

重复上述过程，可得近于平滑波形。这说明，通过电容的充放电，输出直流电压中的脉动成分大为减小。

全波整流电容滤波输出波形如图 3.3.2 所示。

工作原理与半波整流电路相同，不同点是： u_2 正、负半周内， D_1 、 D_2 轮流导通，对电容 C 充电两次，缩短了电容 C 向负载的放电时间，从而使输出电压更加平滑。

输出电压的估算公式为

$$U_L \approx 1.2U_2$$

应用：小功率电源。

【想一想】 一个桥式整流电容滤波电路如图 3.3.3 所示，电源由 220 V、50 Hz 的交流电压经变压器降压供电，负载电阻 R_L 为 40 Ω ，输出直流电压为 20 V，试求变压器二次电压，并估计滤波电容的耐压值和电容量。

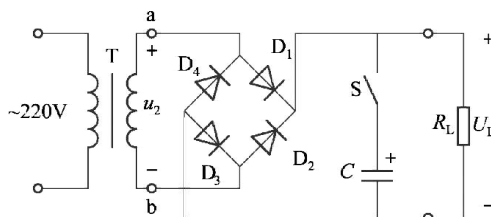
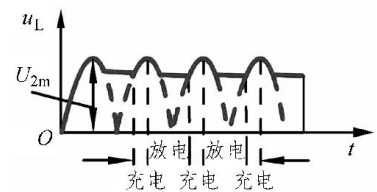


图 3.3.3 桥式整流电容滤波电路原理图

2. 电感滤波器

1) 电路

电感滤波器如图 3.3.4 所示。特点：电感与负载串联。



图 3.3.4 带电感滤波器全波整流电路

2) 工作原理

利用流过电感电流不能突变原理平滑输出电流。

当电路电流增加时，电感存储能量；当电流减小时，电感释放能量。使负载电流比较平滑，从而得到比较平滑的直流电压。

应用：较大功率电源。

缺点：体积大、重量大。

3. 复式滤波器

结构特点：电容与负载并联，电感与负载串联。

性能特点：滤波效果好。

1) L 型滤波器

① 电路如图 3.3.5 所示。

② 原理：整流输出的脉动直流经过电感 L ，交流成分被削弱，再经过电容 C 滤波，就可在负载上获得更加平滑的直流电压。

③ 应用：较大功率电源中。

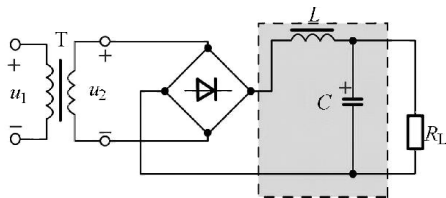


图 3.3.5 带 L 型滤波器的桥式整流电路

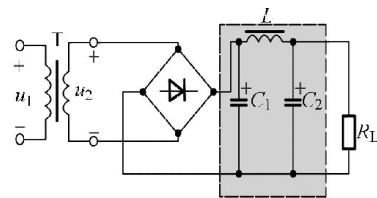


图 3.3.6 Π 型滤波器桥式整流电路

2) Π 型滤波器

① 电路如图 3.3.6 所示。

② 原理：整流输出的脉动直流经过电容 C_1 滤波后，再经电感 L 和电容 C_2 滤波，使脉动成分大大

降低，在负载上可获得平滑的直流电压。

③ 应用：小功率电源中。

3.3.2 硅稳压二极管稳压电路

硅稳压管的伏安特性及符号如图 3.3.7 所示。

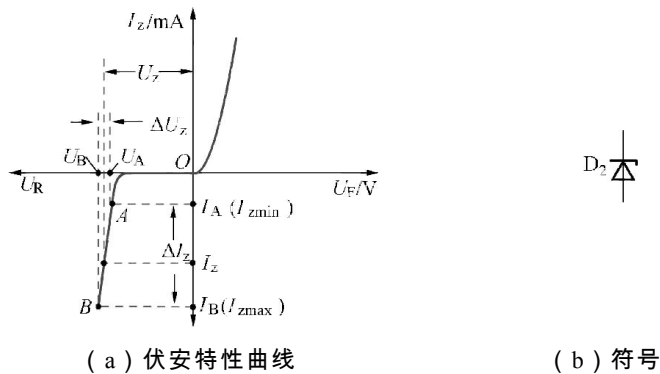


图 3.3.7 硅稳压管的伏安特性及符号

滤波电路：将脉动的直流电变成平滑的直流电。

稳压电路：抑制电网电压和整流电路负载的变化引起的输出电压变化，将平滑的直流电变成稳定的直流电。

1. 硅稳压二极管的特性

- (1) 稳压管工作在反向击穿状态。
- (2) 当工作电流 I_Z 满足 $I_A < I_Z < I_B$ 条件时，稳压管两端电压 U_Z 几乎不变。

2. 稳压二极管的主要参数

- (1) 稳定电压 U_Z ——稳压管在规定电流下的反向击穿电压。
- (2) 稳定电流 I_Z ——稳压管在稳定电压下的工作电流。
- (3) 最大稳定电流 I_{Zmax} ——稳压管允许长期通过的最大反向电流。
- (4) 动态电阻 r_Z ——稳压管两端电压变化量与电流变化量的比值，即 $r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$ 。此值越小，管子稳压性能越好。

3. 稳压管稳压电路的工作原理

1) 电路图

稳压管稳压电路如图 3.3.8 所示。 D_Z 为稳压管，起电流调整作用； R 为限流电阻，起电压调整作用。

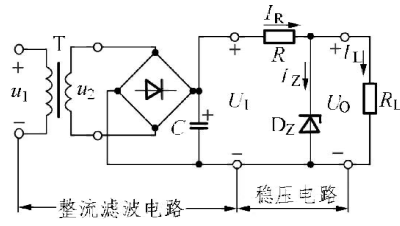


图 3.3.8 硅稳压管整流稳压电路

2) 电路的稳压过程

当 $U_O \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow U_R \downarrow \rightarrow U_O \uparrow$ 。

3) 应用

小功率场合。