

北京工业学院电视教育小组 编

半导体电路基础

(第二册)

第二分册

科学出版社



半导体电路基础

(第二册 第二分册)

北京工业学院电视教育小组 编

科学出版社

· 1979

内 容 简 介

本书是为教育部和中央广播事业局共同举办的电视教育讲座编写的电子技术教材。

本书共分四册，第一册包括半导体器件，低频小信号放大电路，负反馈及低频功率放大电路。

第二册分两个分册，内容包括直流放大电路，整流和滤波电路，直流稳压电源及自激正弦波振荡器，最后还介绍了半导体电路实验和电子测量仪器。

第三、四册为半导体脉冲数字电路。

本书可供具有中等文化程度的工人、知识青年阅读，也可供大专院校、中等专业学校有关专业的师生参考。

半 导 体 电 路 基 础

(第二册 第二分册)

北京工业学院电视教育小组 编

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年12月第一版 开本：787×1092 1/32

1979年12月第一次印刷 印张：9

印数：0001—341,000 字数：182,000

统一书号：15031·208

本社书号：1281·15—7

定 价： 0.65 元

目 录

第七章 半导体直流稳压电源	593
第一节 硅稳压管及其稳压电路	594
一、硅稳压管	594
二、硅稳压管的稳压原理和它的特性	597
三、硅稳压管稳压电路	601
第二节 串联型半导体管直流稳压电源	607
一、最简单的串联型半导体管稳压电源	607
二、带有放大环节的稳压电源	610
三、串联型稳压电源的基本组成	618
四、串联型半导体管稳压电源的设计举例	621
第三节 串联型稳压电路性能的改进	628
一、具有补偿电阻的稳压电路	628
二、具有辅助电源的稳压电路	631
三、具有恒流负载的稳压电路	632
四、具有温度补偿的稳压电路	635
五、关于比较放大级的联接	639
第四节 可调式稳压电源及保护电路	641
一、输出可调稳压电源的主要问题	642
二、扩大输出电压调节范围的措施	643
三、稳压电源中调整管的过载和短路保护	648
第五节 稳压电源的调试及安装中的注意事项	651
一、稳压电源的调试	651
二、技术指标的测定	654
三、安装电路时应注意的事项	655
第六节 应用电路举例	656
一、简易稳压电源	656
二、单管放大半导体管稳压电源	656

三、放大部分为恒流负载的稳压电源	658
四、硅集成稳压电源	660
小结	663
思考题	665
练习题	666
附表	668
第八章 自激正弦波振荡器	673
第一节 LC 正弦波振荡器的工作原理	674
一、LC 并联振荡回路中的振荡现象	674
二、从放大电路到振荡器	676
三、产生自激振荡的条件	679
四、振荡的建立和稳定	680
第二节 半导体管 LC 振荡器	687
一、变压器反馈 LC 振荡器	687
二、电感三点式振荡器	693
三、电容三点式振荡器	697
四、三点式振荡器相位条件的判别方法及加强正反馈的措施	700
五、三种 LC 振荡器的比较	701
第三节 LC 振荡器的设计与调整	703
一、LC 振荡器设计中要考虑的几个问题	703
二、LC 振荡器的调整	705
第四节 频率稳定度	710
一、频率稳定度的概念	710
二、影响频率稳定度的因素	710
三、稳定频率的措施	712
第五节 RC 振荡器	715
一、RC 移相式振荡器	716
二、相位落后的 RC 移相振荡器	721
三、RC 桥式振荡器	723

第六节 石英晶体振荡器	731
一、石英晶体的结构和特性	731
二、石英谐振器及其等效电路	733
三、石英晶体振荡器	737
第七节 振荡器应用举例	742
一、电视机本地振荡器	742
二、12MHz 高频率稳定度 LC 振荡器	743
三、通信载波机中的石英晶体振荡器	745
小结	746
思考题	748
练习题	752
半导体电路实验和电子测量仪器简介	753
半导体电路实验	753
实验一 半导体三极管的判别和直流参数的测定	754
实验二 直流稳压电路的调整和测试	758
实验三 LC 振荡电路的调试和研究	762
实验四 阻容耦合放大电路的调试和研究	765
实验五 射极输出器的调试和研究	768
实验六 结型场效应管性能的研究和放大电路的调试	771
实验七 低频功率放大电路的调试和研究	776
实验八 差动放大电路的调试和研究	779
实验九 运算放大器的应用	782
电子测量仪器简介	790
一、万用表和电子伏特计	790
二、万用表桥和 Q 表	805
三、电子示波器	810
四、测量用信号源	818
五、电子计数器和数字式仪表	826
六、半导体管特性图示仪	836
七、仪表系统中常用的传感器	840

第七章 半导体直流稳压电源

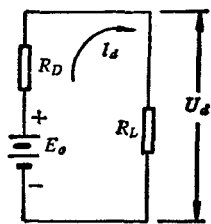
在现代化的通讯、雷达、计算机及各种电子仪器中，半导体线路虽有千差万别，但都需要稳定的直流电源供电，尤其是在半导体化的精密仪器或设备中，要求电源的稳定度更高。因此，由前章讨论的整流滤波电路供给直流电源，往往是达不到要求的，这是因为

(1) 交流电网不稳定，引起整流电路输出电压的变化。

交流电网供电通常是很不稳定的，电压变化可从 -20% 变至 $+10\%$ ，即电压高时可达 240V ，而低时只有 180V 。所以，整流电路的输出电压，也按同样的比例变化。

(2) 负载电流变化时，引起整流电路输出电压的变化。

图 7-1 所示是整流电路的等效电路。它是由一个理想的直流电势 E_0 和一个内阻 R_D 所组成。由图可见，当负载电流 I_d 变化时，输出电压 U_d 也变化，即不稳了。如当 $I_d = 0$ 时，输出电压等于空载电压，即



$U_d = E_0$ ；当 I_d 增大时，由于内阻 R_D 上的压降 $I_d R_D$ 增大，输出电压 $U_d = E_0 - I_d R_D$ 自然就减小了。

例如整流电路空载电压 $E_0 = 12\text{V}$ ，内阻 $R_D = 5\Omega$ 。当负载电流增到 0.5A 时，输出电压就降低为 $U_d = E_0 - I_d R_D = 12 - 5 \times 0.5 = 9.5\text{V}$ 。

(3) 整流滤波后，输出端的纹波仍较大。

直流电源中的纹波大了,对某些电路,特别是对小信号放大电路是极其有害的。

为了解决上面存在的问题,得到输出电压稳定,纹波又小的直流电压,必须在整流滤波之后加接稳压电路。

目前,供给半导体电路用的稳压电源,主要有两种电路。

(1) 用硅稳压二极管做成的稳压电路。这种稳压电路的特点是: 电路简单、元件少、设计调试方便,在负载电流变化小的条件下,可获得很好的稳压效果。但因输出电流受稳压管电流的限制,不易做得很大,而且输出电压由稳压管的型号决定,不能任意调节。

(2) 用半导体三极管做成的串联型稳压电路。这种稳压电路可获得非常稳定的直流电压,而且输出电压和电流不象硅稳压管那样受限制,因此获得了广泛的应用。

下面将分别予以讨论。

第一节 硅稳压管及其稳压电路

一、硅稳压管

硅稳压管是按照特殊工艺制造出来的面结合型半导体二极管,图 7-2 是它的符号和典型的伏安特性曲线。由图可见,它与前章讨论的整流二极管特性曲线是十分相似的。但利用二极管进行整流时,加在二极管上的反向电压不应超过其反向击穿电压,否则,整流二极管便会因为反向击穿时电流过大而烧坏。因此,作为整流管应严防击穿现象发生。而稳压管正是利用二极管的反向击穿效应,其条件是应限制击穿时的反向电流,不致烧坏稳压管,这种击穿是可逆的(即当外加电压切断后,P-N 结的阻挡层仍旧可以恢复)。只要限制工作

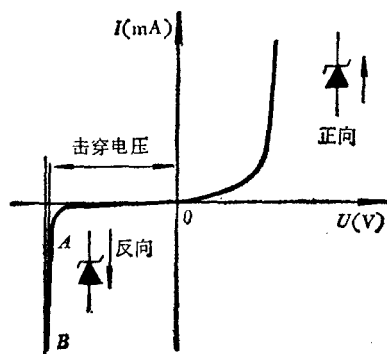


图 7-2 稳压管特性曲线

电流,使其功率损耗不超过额定值,硅稳压管就可以长期工作在击穿状态。这种击穿是“雪崩”击穿和“齐纳”击穿所致,因此这种硅稳压管也称为“齐纳”二极管。

为了更好地掌握硅稳压二极管的特性,下面分别对“雪崩”、“齐纳”击穿现象进行讨论。

1. 雪崩击穿

根据第一章的讨论,我们知道,当二极管加有反向电压时, P-N 结的空间电荷区中的内电场强度随着电压的加大而加大,形成反向电流的双方的少数载流子,在电场中的漂移速度加快,动能增大。随着内电场的加强,被加快的载流子获得愈来愈大的动能,以致最终会出现这样的情形:当这些具有足够能量的载流子在与中性(未电离的)半导体原子相碰时,使此中性原子的某一共价键破裂,从而产生一电子空穴对,即使中性原子电离,这一新的电子空穴对,又在电场中加速而获得能量,又相碰产生更多的电子空穴对。这个过程就象在陡峻的积雪山坡上,有一个小的雪球,从雪山上滚下来一样,越滚越大,可以造成一次大的雪崩一样,所以这种过程被称为雪

崩击穿。这种现象表现在伏安特性曲线上,如图 7-2 中的 AB 线段所示。它的特点是:当电压有一很小的变化时,电流就有很大的变化。这个过程是可以恢复的,一旦外电压撤去,电场减小,就能恢复原状,但常常由于电流上升,使温度升高,造成象熔化、烧坏等永久性的损坏,这是雪崩击穿的间接效应。因此,使用硅稳压管时,既要利用雪崩击穿效应,又一定要注意不能让电流过大,烧坏稳压管。

由上分析可见,雪崩击穿的发生,是 P-N 结内电场增强的结果。当反向电压还不够时,少数载流子受电场加速的作用较弱,漂移速度较小,动能也较小,当它碰撞中性原子时,还不能使中性原子电离,因而不能产生电子空穴对,雪崩击穿也就不会发生。可见在相同的外加电压作用下,如果能够使 P-N 结内电场强度降低些,击穿就不会发生。怎样使内电场强度降低呢?只要使 P-N 结变宽一些就可以了。这是因为相同的外加电压作用在 P-N 结两端时,P-N 结越宽,建立的外电场(单位: V/cm)就越弱,因而 P-N 结内的总电场强度也就越弱。怎样使 P-N 结变宽呢?经数学分析得知,只要降低材料的杂质浓度就可以实现,这里不详细讨论了。

综上所述,杂质浓度越低的材料,P-N 结越宽;反之,P-N 结越窄。在相同的外加电压作用下,P-N 结较宽的内部总电场强度要比 P-N 结较窄的来得低。电场较弱时,少数载流子的漂移速度较小、动能也较小,不能使中性原子电离,也就不能发生雪崩击穿。这时,只有增高反向电压,才能得到所需要的较强的电场,使中性原子电离,发生雪崩击穿,也就是提高了击穿电压的数值。又因为杂质浓度越低的材料,电阻率越高,由此可知,材料的电阻率越高时,雪崩击穿电压越高。

2. 齐纳击穿

当材料的掺杂浓度比较高，也即电阻率比较低时，P-N结的宽度变得十分薄。例如掺杂浓度达 $10^{18}/\text{cm}^3$ 的锗二极管，它的P-N结宽只有 $0.04\mu\text{m}$ 。少数载流子在这样薄的P-N结中漂移运动时，由于途径比较短，它们跟中性原子相碰的机会必然很少，即不容易产生碰撞电离。但是，这时在比较低的反向电压作用下，也能观察到击穿现象，这又是什么原因呢？原来，对于特别薄的P-N结，只要加上不大的反向电压，P-N结内的电场强度就可以达到非常高的数值。在上述宽度为 $0.04\mu\text{m}$ 的P-N结上，如果加上1V的反向电压，电场强度就可以达到 $2 \times 10^5 \text{V}/\text{cm}$ 。在这样大的场强作用下，P-N结内部以及靠近P-N结的P型区中的价电子就可以从共价键上被拉出来，从而产生大量的场致激发电子空穴对，使得P-N结的反向电流突然增大，这就是所谓的齐纳击穿。

以上分析可见，齐纳击穿电压比较低，而雪崩击穿电压比较高。对于硅P-N结来说，理论计算指出：击穿电压小于5V的P-N结，主要属于齐纳击穿；击穿电压大于7V的P-N结，主要属于雪崩击穿；在5—7V之间，齐纳击穿与雪崩击穿二者同时都有。

二、硅稳压管的稳压原理和它的特性

1. 稳压原理

上面讨论的雪崩击穿和齐纳击穿，都可以被我们用来稳定电压，下面就来说明怎样利用P-N结的击穿现象来达到稳压的目的。

图7-3所示为硅稳压管的伏安特性曲线。 $U_{z\text{min}}$ 是P-N

结开始击穿时的电压，小于它时，P-N 结不击穿，反向电流极小，几乎等于零； U_{zmax} 表示反向电压大于它时，P-N 结的

击穿现象更为严重，因而使流过稳压管 P-N 结的电流过大，P-N 结将过热而烧坏。

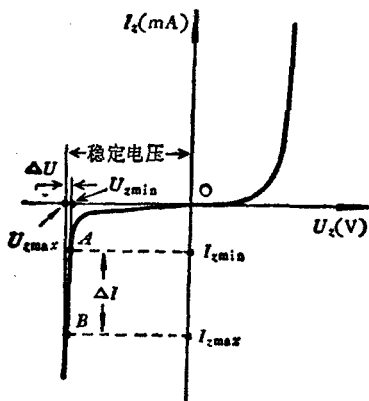


图 7-3 硅稳压管的伏安特性曲线

I_{zmin} 和 I_{zmax} 是对应反向击穿电压为 U_{zmin} 和 U_{zmax} 时流过 P-N 结的电流。从图 7-3 中的 AB 段曲线可以看出，当流过 P-N 结中的电流被限制在 I_{zmin} 和 I_{zmax} 之间变化时，P-N 结两端的反向电压变化甚

微，稳压作用就是利用这段曲线电压变化甚微而实现的。

为什么不同型号的稳压管，它的稳压数值不一样呢？由前面讨论的击穿现象可知：稳压管的击穿电压就是它的稳定电压。因此，只要我们利用 P-N 结的不同击穿现象和掺杂多少，制作出与它相对应的稳压管，就可以稳定不同数值的电压。

2. 硅稳压管的特性

(1) 动态电阻 R_z

由图 7-3 所示可见，硅稳压管是一个非线性元件，它的直流电阻不是常数，因此稳压管在击穿状态时可用动态电阻 R_z 来描述。

$$R_z = \frac{\text{电压变化量 } \Delta U}{\text{电流变化量 } \Delta I} \quad (7-1)$$

因此

$$\Delta U = R_z \Delta I \quad (7-2)$$

由此可见, AB 线段斜率越陡, 对于同样的交流变化量 ΔI , 稳压管两端的电压变化 ΔU 就越小, 即动态电阻越小, 动态电阻越小, 说明稳压性能越好。所以, 常把稳压管看做一个恒压源 E_w 和一个动态电阻 R_z 相串联, E_w 就是稳压管 D_z 两端的空载电压值, 如图 7-4 所示。

这里还应进一步指出, 不同的稳压管其动态电阻是不同的, 就是同一个稳压管其动态电阻也是随工作电流的不同而不同, 图 7-5 是稳压管 2CW19 的动态电阻和工作电流的关

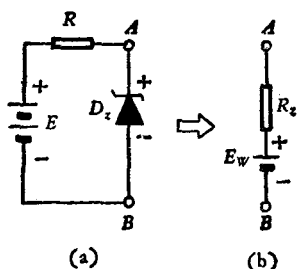


图 7-4 稳压管等效电路

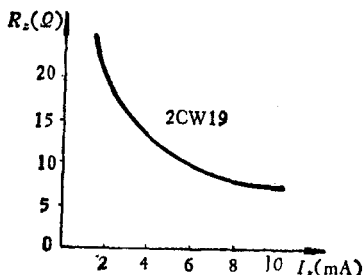


图 7-5 动态电阻和工作电流的关系曲线

系曲线。当工作电流为 2mA 时, 动态电阻约为 20Ω ; 工作电流为 4mA 时, 动态电阻约为 12Ω , 因此, 为了使稳压效果好, 工作电流要选得大一些, 使它的动态电阻较小, 但又不能超过管子的最大允许电流(或最大耗散功率), 使管子烧坏。

稳压管的动态电阻 R_z 也随击穿电压 U_z 而变化, 图 7-6 所示是 2CW 系列稳压管 R_z 与击穿电压 U_z 的关系曲线。它告诉我们, 击穿电压在 7V 左右的稳压管的动态电阻较小, 随着 U_z 的增加或减小, R_z 都要增加, 因此, 要求我们尽可能选用 7V 左右的稳压管。

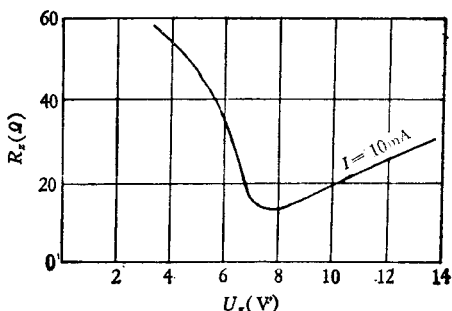


图 7-6 2CW 系列稳压管的 R_z-U_z 关系曲线

(2) 电压温度系数

当温度发生变化时, 稳压管的电压 E_w 也发生变化, 因而输出电压也随温度而变化。如图 7-7 所示是三种型号稳压管的击穿电压随温度变化的曲线, 图 7-8 所示是 2CW 系列稳压管温度系数与击穿电压的关系曲线。

由以上两组曲线可见, 对稳定电压 $U_z < 5\text{V}$ 的稳压管

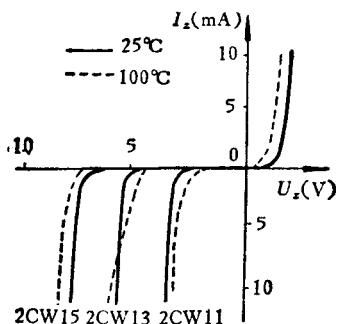


图 7-7 三种稳压管的击穿电压随温度变化的曲线

(如 2CW11), 稳定电压随温度升高而下降, 即具有负的温度系数 α_T (温度变化 1°C 时输出电压变化的百分率)。对稳定电压 $U_z > 7\text{V}$ 的稳压管 (如 2CW15), 稳定电压随温度的升高而升高, 即具有正的温度系数。同时由图 7-8 还可以看出, 稳定电压 U_z 越高, 电压温度系数

α_T 也越大。因此, 在需要稳定电压比较高时, 利用几个 5—7 V 的稳压管串联起来运用是比较有利的。

在温度稳定度要求较高的电路中, 可采用具有温度补偿

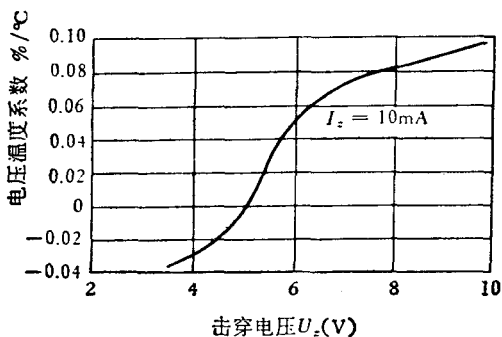


图 7-8 2CW 系列稳压管电压温度系数与击穿电压关系曲线

的稳压管,如 2DW7 系列(其参数见附表)。它是由一个正向硅稳压二极管和一个反向硅稳压二极管串接在一起,并封装在一个管壳内的硅稳压管,如图 7-9 所示。因为硅稳压二极管的正向特性也具有一定的稳压性能,且具有负的温度系数,从图 7-7 可以看出,它可以抵消一部分反向特性的正温度系数。因此,这种带有补偿的稳压管的温度系数 α_T ,可以做得非常小(低于 0.005%),它的温度系数比一般稳压管的温度系数小一、两个数量级。



图 7-9

三、硅稳压管稳压电路

图 7-10 所示为最简单的采用硅稳压管 D_z 组成的稳压电路,图中 R 为限流电阻, R_L 为负载电阻。由整流滤波电路输出的直流电压 U_d 加到稳压电路的输入端 $A-A'$, 做稳压电路的输入电压, 稳压后的输出电压 U_L , 从稳压管两端 $B-B'$ 取出。输出电压 $U_L = U_d - IR$ 就是稳压管的稳定电压 U_z 。

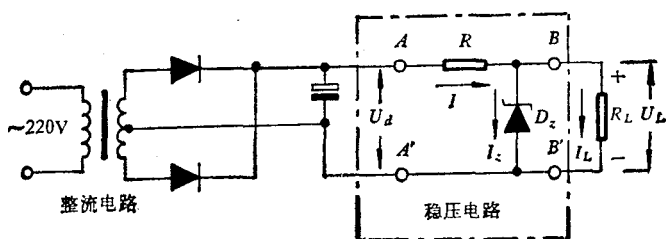


图 7-10 硅稳压管稳压电路

1. 稳压原理

当电网电压波动造成 U_d 增大，而引起输出电压 U_L 变大时，由图 7-3 硅稳压管的伏安特性曲线可知，稳压管 D_z 的工作电流 I_z 将增加，当然流过负载 R_L 中的电流 I_L 也增大。但 I_z 的增加量要比 I_L 的增加量要大得多，致使 U_d 的增量基本上都降落在 R 上，因而保持 U_L 基本不变。反之，当 U_d 减小而引起输出电压 U_L 减小时， I_z 的减小量比 I_L 的减小量要大得多，致使 U_d 的减小量，都变成串联电阻 R 上电压的减小量，这也可保持 U_L 基本不变。上述稳压过程，可简单表示如下：

$$U_d \uparrow \rightarrow U_L \uparrow \rightarrow I_z \uparrow \rightarrow I_z \uparrow + I_L = I \rightarrow IR \uparrow \rightarrow U_L \uparrow$$

如果电网电压不变而负载电流 I_L 改变时，比如 I_L 增大，在电阻 R 上的电压降加大，使输出电压减小时，同样由图 7-3 硅稳压管的伏安特性曲线可知，通过稳压管的电流 I_z 将减小，其减小量比负载电流 I_L 增加量要大得多，致使流过限流电阻 R 上的电流 I (或电压) 基本不变，也可以保证输出电压 U_L 基本不变。

2. 限流电阻 R 及稳压管的动态电阻 R_z 对稳压性能的影响

为了便于分析, 将图 7-10 中的稳压管用等效电路代替, 则稳压电路等效为如图 7-11 所示的电路. 为了说明限流电阻 R 及稳压管的动态电阻 R_z 对稳压性能的影响, 我们在这里提出二个说明稳压性能好坏的重要指标——稳压系数 S 和电源内阻 R_o .

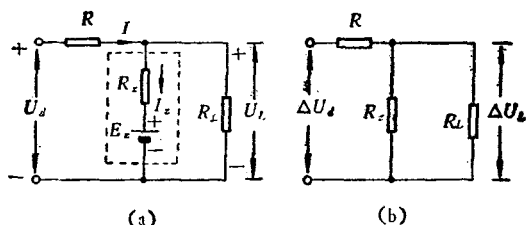


图 7-11 稳压电路的等效电路

所谓稳压系数, 就是在负载电阻一定的情况下, 输出电压的相对变化 $\Delta U_L/U_L$ 对输入电压的相对变化 $\Delta U_d/U_d$ 的比值. 对于图 7-11 所示的电路则为

$$S = \frac{\frac{\Delta U_L}{U_L}}{\frac{\Delta U_d}{U_d}} = \frac{\Delta U_L}{\Delta U_d} \frac{U_d}{U_L} = \frac{\frac{R_z R_L}{R_z + R_L}}{R + \frac{R_z R_L}{R_z + R_L}} \frac{U_d}{U_L} \approx \frac{R_z}{R} \frac{U_d}{U_L} \quad (7-3)$$

因为, 上式中一般都满足 $R \gg R_z$, $R_L \gg R_z$.

下面再讨论电源等效内阻 R_o (输出电阻), 它表示输入电压 U_d 不变时, 由于负载电流变化 ΔI_L 而引起的输出电压变化 ΔU_L , 即

$$R_o = -\frac{\Delta U_L}{\Delta I_L}$$