

理实一体化教材

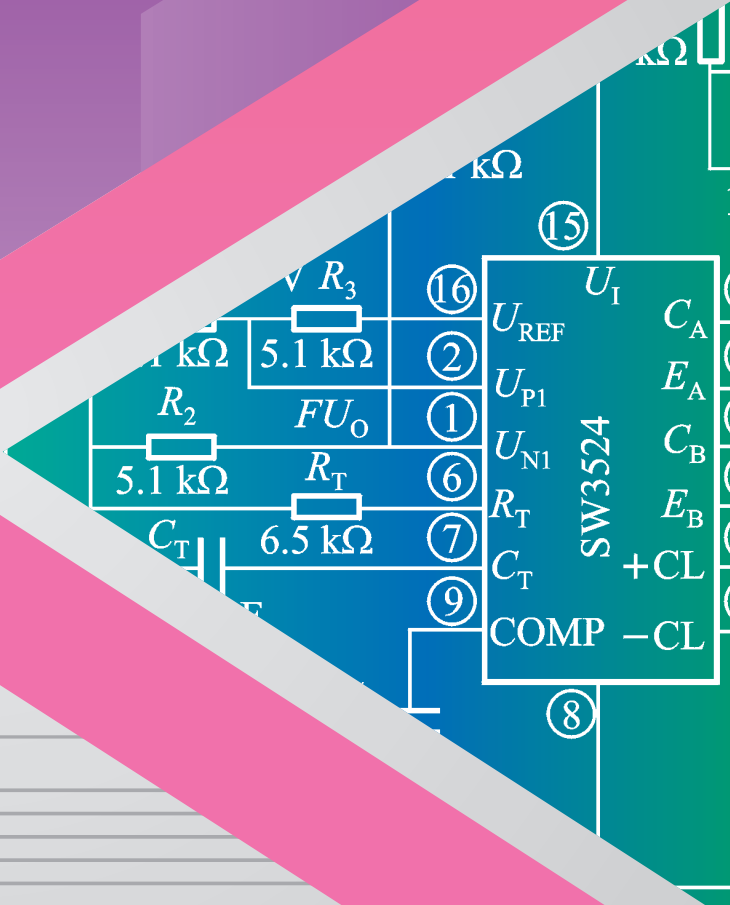
周洁 主编

模拟电子技术

MONI DIANZI JISHU



云南大学出版社
YUNNAN UNIVERSITY PRESS





图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 周洁主编. — 昆明: 云南大学出版社, 2020

理实一体化教材

ISBN 978-7-5482-3730-3

I. ①模… II. ①周… III. ①模拟电路—电子技术—教材 IV. ①TN710.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第137016号

特约编辑: 韩 雪

责任编辑: 蔡小旭

策 划: 孙吟峰 朱 军

封面设计: 王嫣一

理实一体化教材

模拟电子技术

MONI DIANZI JISHU

周洁 主编

出版发行: 云南大学出版社

印 装: 昆明理焯印务有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 13

字 数: 300千

版 次: 2020年2月第1版

印 次: 2020年2月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-5482-3730-3

定 价: 55.00元

地 址: 昆明市一二一大街182号(云南大学东陆校区英华园内)

邮 编: 650091

电 话: (0871) 65031071 65033244

E-mail: market@ynup.com

本书若有印装质量问题, 请与印厂联系调换, 联系电话: 64167045。



《模拟电子技术》编委会

主 编 周 洁

副主编 王昱婷 张榆进

参 编 车 博 施 佳 杨 熹 尹自永
晋崇英 张 雷 陆学聪 七林农布
蔡宇镭 雷 钧

总 序

根据《国家职业教育改革实施方案》中对职业教育改革提出的服务 1 + X 的有机衔接,按照职业岗位(群)的能力要求,重构基于职业工作过程的课程体系,及时将新技术、新工艺、新规范纳入课程标准和教学内容,将职业技能等级标准等有关内容融入专业课程教学,遵循育训结合、长短结合、内外结合的要求,提供满足于服务全体社会学习者的技术技能培训要求,我们编写了这套系列教材。将理论和实训合二为一,以“必需”与“够用”为度,将知识点作了较为精密的整合,内容深入浅出,通俗易懂。既有利于教学,也有利于自学。在结构的组织方面大胆打破常规,以工作过程为教学主线,通过设计不同的工程项目,将知识点和技能训练融于各个项目之中,各个项目按照知识点与技能要求循序渐进编排,突出技能的提高,符合职业教育的工学结合,真正突出了职业教育的特色。

本系列教材可作为高职高专学校电气自动化、供用电技术,应用电子技术、电子信息工程技术、机电一体化等相关专业的教材和短期培训的教材,也可供广大工程技术人员学习和参考。

目 录

项目一 半导体器件	(1)
任务一 半导体二极管	(1)
任务二 半导体三极管	(13)
任务三 场效应管	(21)
【习题一】	(31)
项目二 放大电路基础	(36)
任务一 单管放大电路的研究	(36)
任务二 多级放大电路及负反馈放大电路的研究	(63)
任务三 场效应管的应用	(72)
【习题二】	(78)
项目三 功率放大电路	(83)
任务一 OCL 互补对称功率放大电路	(83)
任务二 OTL 互补对称功率放大电路	(87)
【习题三】	(93)
项目四 集成运算放大器的线性应用	(96)
任务一 集成运算放大器基本电路	(96)
任务二 积分、微分电路	(119)
任务三 有源滤波电路	(125)
【习题四】	(135)

项目五 集成运算放大器的非线性应用	(139)
任务一 RC 正弦波振荡电路	(139)
任务二 LC 正弦波振荡电路	(146)
任务三 电压比较器	(154)
任务四 非正弦波产生与变换电路	(163)
【习题五】	(172)
项目六 直流稳压电源	(177)
任务一 整流、滤波及稳压电路的研究	(177)
任务二 滤波电路	(182)
任务三 稳压电路	(186)
【习题六】	(195)

项目一 半导体器件

任务一 半导体二极管

【任务描述】

- (1)理解半导体的基本知识。
- (2)理解二极管的单向导电性。
- (3)熟悉二极管的实际应用。
- (4)了解其他类型的二极管。

【知识学习】

一、本征半导体

物质按导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。物质的导电性能取决于原子结构。导体一般为低价元素，绝缘体一般为高价元素和分子物质，半导体一般为4价元素的物质，其导电性能介于导体和绝缘体之间，所以称为半导体。

本征半导体：纯净的晶体结构的半导体称为本征半导体。常用的半导体材料是硅和锗，它们都是4价元素，在原子结构中最外层轨道上有4个价电子。在晶体中，每个原子都和周围的4个原子用共价键的形式互相紧密地联系起来。共价键中的价电子由于热运动而获得一定的能量，其中少数能够摆脱共价键的束缚而成为自由电子，同时必然在共价键中留下空位，称为空穴，这种由于热运动而激发自由电荷的过程称为本征激发。空穴带正电，电子带负电。如图1.1.1所示。

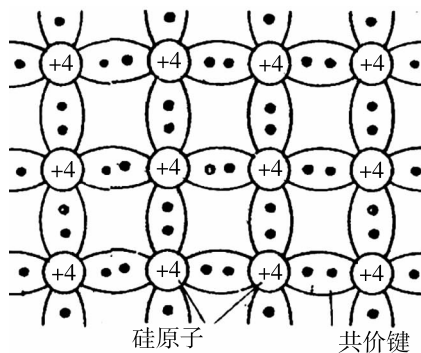


图 1.1.1 硅和锗原子结构图

半导体的导电性：在外电场作用下，半导体中的自由电子产生定向移动，形成电子电流；另一方面，自由电子也按一定方向依次填补空穴，即空穴产生了定向移动，形成所谓的空穴电流。由此可见，半导体中存在着两种载流子：带负电的自由电子和带正电的空穴。本征激发中自由电子与空穴是同时成对产生的，因此，它们的浓度是相等的。价电子在热运动中获得能量摆脱共价键的束缚，产生电子-空穴对。同时自由电子在运动过程中失去能量，与空穴相遇，使电子-空穴对消失，这种现象称为复合。在一定的温度下，载流子的产生与复合过程是相对平衡的，即载流的浓度是一定的。本征半导体中的载流子浓度，除了与半导体材料本身的性质有关以外，还与温度有关，而且随着温度的升高，基本上按指数规律增加。所以半导体载流子的浓度对温度十分敏感。半导体的导电性能与载流子的浓度有关，但因本征载流子在常温下的浓度很低，所以它们的导电能力很差。

二、杂质半导体

在本征半导体中虽然存在两种载流子，但因本征载流子的浓度很低，所以它们的导电能力很差。当我们人为地、有控制地掺入少量的特定杂质时，其导电性将产生质的变化。掺入杂质的半导体称为杂质半导体。

1. N型半导体

在本征半导体中掺入微量5价元素，如磷、锑、砷等，原来晶格中的某些硅(锗)原子会被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层有5个价电子，因此它与周围4个硅(锗)原子组成共价键时，还多余1个价电子。它不受共价键的束缚，而只受自身原子核的束缚，因此，它只要得到较少的能量就能成为自由电子，并留下带正电的杂质离子，杂质离子不能参与导电。由于杂质原子可以提供自由电子，故称为施主原子(杂质)，这种杂质半导体中电子浓度比同一温度下的本征半导体中的电子浓度大好多倍，这就大大加强了半导体的导电能力，我们把这种掺杂的半导体称为N型半导体。在N型半导体中电子浓度远远大于空穴的浓度，主要靠电子导电，所以称自由电子为多数载流子(多子)；空穴为少数载流子(少子)。

2. P型半导体

在本征半导体中，掺入微量3价元素，如硼、铝、镓、铟等，则原来晶格中的某些硅(锗)原子被杂质代替。杂质原子的3个价电子与周围的硅原子形成共价键时，会出现空穴，在室温下，这些空穴能吸引邻近的电子来填充，使杂质原子变成带负电荷的离子。这种杂质因能够吸收电子被称为受主原子(杂质)，我们称这种掺杂的半导体为P型半导体。P型半导体中空穴是多数载流子，而自由电子是少数载流子。

3. 杂质半导体的导电性能

在杂质半导体中，多子是由杂质原子提供的，而本征激发产生的少子浓度则因与多子复合机会增多而大为减少。杂质半导体中多子越多，则少子越少。微量的掺杂可以使半导体的导电能力大大加强。

另外，杂质半导体中少子虽然浓度很低，但它却对温度非常敏感，会影响半导体器件的性能。至于多子，因其浓度基本上等于杂质原子的浓度，所以受温度影响不大。

三、PN 结

在一块本征半导体上，用工艺使其一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体，则在两种半导体的交界处形成了 PN 结。PN 结是构成半导体器件的基础。

1. PN 结的形成

PN 结的形成如图 1.1.2 所示

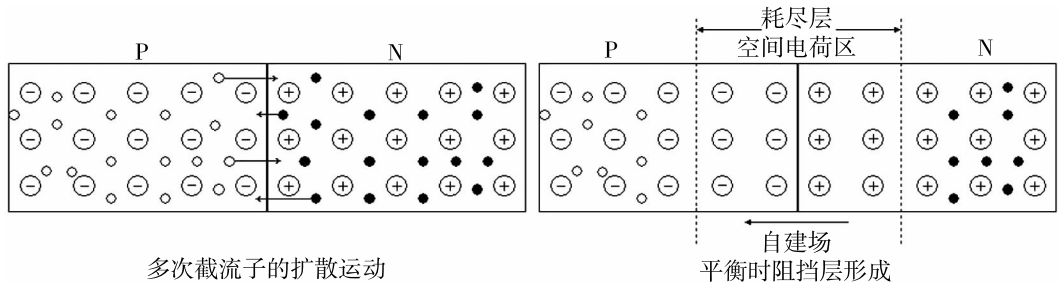


图 1.1.2 PN 结的形成

(1) 扩散运动：多子由于浓度不同产生的运动，称为扩散运动。随着扩散的进行就在 P、N 的交界面处产生了空间电荷区，称耗尽层或者阻挡层，同时也会产生电场（自建电场，也称内电场）。

(2) 漂移运动：在自建电场的作用下，少子在电场力作用下的运动称为漂移运动。

(3) 动态平衡：当扩散运动和漂移运动的速度相同时，就达到了动态平衡，此时空间电荷区不再扩大，宽度稳定下来，就形成了 PN 结。

2. PN 结的单向导电特性

在 PN 结外加不同方向的电压，就可以破坏原来的平衡，从而呈现出单向导电特性。

(1) PN 结外加正向电压。

若将电源的正极接 P 区，负极接 N 区，则称此为正向接法或正向偏置。此时外加电压在阻挡层内形成的电场与自建电场方向相反，削弱了自建电场，使阻挡层变窄，此时扩散作用大于漂移作用，在电源的作用下，多数载流子向对方区域扩散形成电流，其方向由电源正极通过 P 区、N 区到达电源负极。

由于正向电流很大，此时，PN 结处于导通状态，它所呈现出的电阻为正向电阻，其阻值很小，正向电压愈大，正向电流就愈大。其电压和电流呈指数关系。

(2) PN 结外加反向电压。

若将电源的正极接 N 区，负极接 P 区，则称此为反向接法或反向偏置。此时外加电压在阻挡层内形成的电场与自建电场方向相同，增强了自建电场，使阻挡层变宽。此时漂移作用大于扩散作用，少数载流子在电场作用下作漂移运动，由于电流方向与加正向电压时相反，故称为反向电流。由于反向电流是由少数载流子所形成的，故反向电流很小，而且当外加电压超过零点几伏时，少数载流子基本全被电场拉过去形成漂移电流，此时反向电压再增加，载流子数也不会增加，因此反向电流也不会增加，

故称为反向饱和电流，即 $I_D = -I_S$

由于反向电流很小，此时，PN 结处于截止状态，呈现出的电阻称为反向电阻，其阻值很大，高达几百千欧以上。

可见，PN 结加正向电压，处于导通状态；加反向电压，处于截止状态，即 PN 结具有单向导电特性。

PN 结的电压与电流的关系为

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

I_D ——通过 PN 结的电流。

U ——PN 结两端的电压。

$U_T = \frac{kT}{q}$ ——称为温度电压当量， K 为玻耳兹曼常数； T 为绝对温度； q 为电子电量，在室温下即 $T = 300 \text{ K}$ 时， $U_T = 26 \text{ mV}$ ；

I_S ——反向饱和电流。

此方程称为 PN 结的伏安特性方程，用曲线表示此方程，称为伏安特性曲线。

3. PN 结的击穿

PN 结处于反向偏置时，在一定电压范围内，流过 PN 结的电流是很小的反向饱和电流。但是当反向电压超过某一数值 (U_B) 后，反向电流急剧增加，这种现象称为反向击穿， U_B 称为击穿电压。PN 结的击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。

(1) 雪崩击穿。

当反向电压足够高时，阻挡层内电场很强，少数载流子在结区内受强烈电场的加速作用，获得很大的能量，在运动中与其他原子发生碰撞时，有可能将价电子打出共价键，形成新的电子 - 空穴对。这些新的载流子与原先的载流子一起，在强电场作用下碰撞其他原子打出更多的电子 - 空穴对，如此链锁反应，使反向电流迅速增大，这种击穿称为雪崩击穿。

(2) 齐纳击穿。

所谓齐纳击穿，是指当 PN 结两边掺入高浓度杂质时，其阻挡层宽度很小，即使外加不太高的反向电压 (一般为几伏)，在 PN 结内部就可形成很强的电场 (可达到 $2 \times 10^6 \text{ V/cm}$)，将共价键的价电子直接拉出来，产生电 - 空穴对，使反向电流急剧增加，出现击穿 (齐纳击穿) 现象。

对于硅材料的 PN 结，击穿电压 U_B 大于 7 V 时通常是雪崩击穿， U_B 小于 4 V 时通常是齐纳击穿； U_B 在 $4 \sim 7 \text{ V}$ 时两种击穿均有。由于击穿破坏了 PN 结的单向导电性，因此在一般使用时应避免出现击穿现象。

需要指出的是，发生击穿并不意味着 PN 结被损坏。当 PN 结反向击穿时，只要注意控制反向电流的数值 (一般通过串接电阻 R 实现)，不使其过大，以免因过热而烧坏 PN 结，当反向电压降低时，PN 结的性能就可以恢复正常。但是发生雪崩击穿后，一般 PN 结就会损坏。稳压二极管正是利用了 PN 结的反向击穿特性来实现的，当流过 PN 结的电流发生变化时，结电压 U_B 保持基本不变。

4. PN 结的电容效应

(1) 势垒电容 C_T 。

势垒电容是由阻挡层内空间电荷引起的。空间电荷区是由不能移动的正负杂质离子所形成的，均具有一定的电荷量，所以在 PN 结储存了一定的电荷。当外加电压使阻挡层变宽时，电荷量增加，反之，外加电压使阻挡层变窄时，电荷量减少。在阻挡层中的电荷量随外加电压变化而改变，形成了电容效应，称为势垒电容，用 C_T 表示。势垒电容 C_T 不是一个常数，随电压变化而变化。一般 C_T 为几皮法 ~ 200 pF，我们可以利用此电容效应做成变容二极管，作为压控可变电容器。

(2) 扩散电容 C_D 。

多子在扩散过程中越过 PN 结成为另一方的少子，这种少子的积累也会形成电容效应。外加电压改变时，引起扩散区内积累的电荷量变化就形成了电容效应，其所对应的电容称为扩散电容，用 C_D 表示。扩散电容正比于正向电流。

PN 结的电容包括两部分：

$$C_j = C_T + C_D$$

一般来说，PN 结正偏时，扩散电容起主要作用， $C_j \approx C_D$ ；当 PN 结反偏时，势垒电容起主要作用， $C_j \approx C_T$ 。

5. 半导体二极管

半导体二极管由 PN 结加上引线和管壳构成。

(1) 二极管的种类。

按材料分：硅二极管和锗二极管

按结构分：点接触二极管[如图 1.1.3(a)所示]和面接触二极管[如图 1.1.3(b)所示]。

点接触二极管的特点是结面积小，因而结电容小，适用于在高频小电流下工作，主要应用于小电流的整流和检波、混频等。

面接触二极管的特点是结面积大，因而能通过较大的电流，但结电容也大，只能工作在较低频率下，可用于整流。

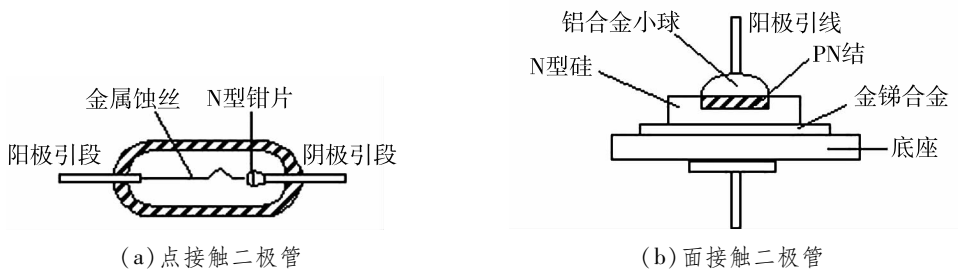


图 1.1.3 点接触二极管和面接触二极管

二极管的符号如图 1.1.4 所示。

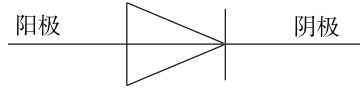


图 1.1.4 二极管的符号

(2) 二极管的特性。

二极管本质是就是一个 PN 结，但是对于真实的二极管器件，考虑到引线电阻和半导体的体电阻及表面漏电等因素，二极管的特性与 PN 结略有差别。二极管的伏安特性如图 1.1.5 所示。

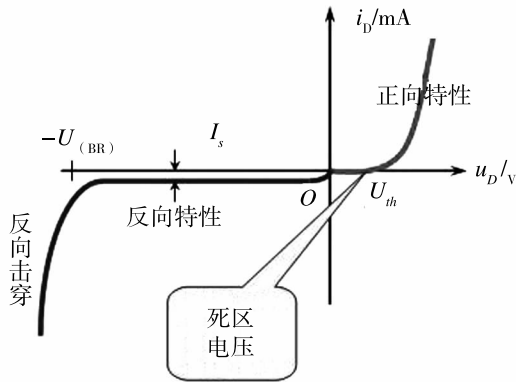


图 1.1.5 二极管伏安特性

① 正向特性。

正向电压低于某一数值 U_{th} 时，正向电流很小，只有当正向电压高于某一值 U_{th} 后，才有明显的正向电流。图 1.1.5 中 U_{th} 称为死区电压，硅管约为 0.5 V，锗管约为 0.1 V，导通后电压用 U_{on} 表示。在室温下，硅管的 U_{on} 为 0.6 ~ 0.8 V，锗管的 U_{on} 为 0.1 ~ 0.3 V。通常认为，当正向电压 $U < U_{on}$ 时，二极管截止； $U > U_{on}$ 时，二极管导通。

② 反向特性。

二极管加反向电压，反向电流数值很小，且基本不变，称为反向饱和电流。硅管的反向饱和电流为纳安(nA)数量级，锗管为微安数量级。当反电压加到一定值 U_{BR} 时，反向电流急剧增加，产生击穿。 U_{BR} 称为反向击穿电压，普通二极管的反向击穿电压一般在几十伏以上(高反压管可达几千伏)。

③ 温度特性。

二极管的特性对温度很敏感，温度升高，正向特性曲线向左移，反向特性曲线向下移。其规律是：在室温附近，在同一电流下，温度每升高 1℃，正向电压减小 2 ~ 2.5 mV；温度每升高 10℃，反向电流增大 1 倍。

(3) 二极管的主要参数。

描述器件的物理量，称为器件的参数。它是器件特性的定量描述，也是选择器件的依据。各种器件的参数可从手册查得。二极管的主要参数有：

①最大整流电流 I_F 。

它是二极管允许通过的最大正向平均电流。工作时应使平均工作电流小于 I_F ，如超过 I_F ，二极管将因过热而烧毁。此值取决于 PN 结的面积、材料和散热情况。

②最大反向工作电压 U_R 。

这是二极管允许的最大反向工作电压，当反向电压超过此值时，二极管可能被击穿。为了留有余地，通常取击穿电压的一半作为 U_R 。

③反向电流 I_R 。

反向电流 I_R 指二极管未击穿时的反向电流值。此值越小，二极管的单向导电性越好，由于反向电流是由少数载流子形成的，所以 I_R 受温度的影响很大。

④最高工作频率 f_M 。

f_M 的值主要取决于 PN 结的结电容，结电容越大，则二极管允许的最高频率越低。

⑤二极管的直流电阻 R_D 。

加到二极管两端的直流电压与流过二极管的电流之比，称为二极管的直流电阻 R_D ，即

$$R_D = \frac{U_F}{I_F}$$

且由图 1.1.5 可看出， R_D 随工作电流加大而减小，故 R_D 呈非线性。用万用表测量出的电阻值为 R_D ，用不同档测量出的 R_D 值显然是不同的。二极管加正、反向电压所呈现的电流也不同。加正向电压时， R_D 为几十至几百欧，加反向电压时 R_D 为几百千欧至几兆欧。一般正反向电阻值相差越大，二极管的性能越好。

⑥二极管的交流电阻 r_d 。

在二极管工作点 Q 附近，电压的微变值 ΔU 与相应的微变电流值 ΔI 之比，称为该点的交流电阻 r_d ，即

$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

从其几何意义上讲，当 $\Delta U \rightarrow 0$ 时，

$$r_d = \frac{dU}{dI}$$

r_d 就是工作点 Q 处的切线斜率倒数（斜率为 dI/dU 即曲线在 Q 点的导数）。显然， r_d 也是非线的，即工作电流越大， r_d 越小。

6. 稳压二极管

(1) 稳压二极管的原理。

稳压二极管的工作原理是利用 PN 结的反向击穿特性，稳压二极管除具有普通二极管的特性外，还具有反向击穿后在一定范围内不会损坏而能正常工作的特性。由二极管的特性曲线可知，如果稳压二极管工作在反向击穿区，则当反向电流在较大范围内变化 ΔI 时，管子两端电压相应的变化 ΔU 却很小，这说明它具有很好的稳压特性。电路中的符号为图 1.1.6 中的 V_{DZ} 所示。

(2)用稳压二极管组成稳压电路。

稳压管组成的简单的稳压电路如图 1.1.6 所示。

注意以下几个问题：

①稳压二极管正常工作是在反向击穿状态下，外加电源正极接稳压二极管的 N 区(负极)，电源负极接稳压二极管的 P 区(正极)。

②稳压管应与负载并联。

③必须限制流过稳压管的电流 I_z ，即电路中必须串联限流电阻 R ，使 I_z 不超过规定值。

④还应保证流过稳压管的电流 I_z 大于某一数值(稳定电流)，以确保稳压管有良好的稳压特性。

⑤使用稳压管时限流电阻不可少，它确保③、④项内容。选好限流电阻是保证稳压电路正常工作的前提。

(3)稳压二极管的主要参数。

①稳定电压 U_z 。

稳定电压是稳压管工作在反向击穿时的稳定工作电压。由于稳定电压随工作电流的不同而略有变化，因而测试 U_z 时应使稳压管的电流为规定值。

稳定电压 U_z 是根据要求挑选稳压管的主要依据之一。不同型号的稳压管，其稳定电压的值不同。同一型号的稳压管，由于制造工艺的分散性，各个稳压管的 U_z 值也有小的差别。

例如：2DW7C 型号的二极管，其 $U_z = 6.1 \sim 6.5 \text{ V}$ 指的是同一型号的稳压管，有的稳压管的 U_z 可能是 6.1 V，有的可能是 6.5 V。

②稳定电流 I_z 。

稳定电流是指使稳压管正常工作时的最小电流，低于此值时稳压效果较差。工作时应使流过稳压管的电流大于此值。一般情况是，工作电流较大时，稳压性能较好，但电流要受二极管的功耗限制，即 $I_{z\max} = P_z / U_z$ 。工作时 I_z 应小于 $I_{z\max}$ 。

③电压温度系数 α 。

电压温度系数 α 指稳压管温度变化 1°C 时，所引起的稳定电压变化的百分比。

一般情况下，稳定电压大于 7 V 的稳压管， α 为正值。而稳定电压小于 4 V 的稳压管， α 为负值。稳定电压在 4 ~ 7 V 的稳压管，其 α 较小，即稳定电压值受温度影响较小，性能比较稳定。

④动态电阻 r_z 。

$$r_z = \Delta U / \Delta I$$

r_z 越小，则稳压性能越好。

⑤额定功耗 P_z 。

$$P_z = U_z I_z$$

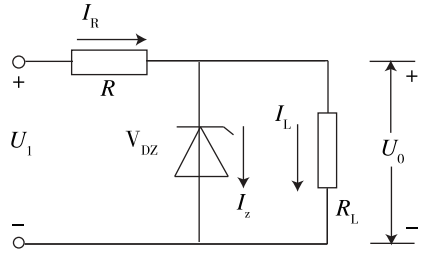


图 1.1.6 稳压管电路

7. 二极管的应用

二极管的应用基础，就是二极管的单向导电特性，因此，在应用电路中，关键是判断二极管的导通或截止。二极管(硅管)导通时一般用电压源 $U_D = 0.7 \text{ V}$ (如是锗管用 0.3 V) 代替，或近似用短路线代替。截止时，一般将二极管断开，即认为二极管反向电阻为无穷大。二极管可用于整流电路、限幅电路等，二极管还可组成门电路，可实现一定的逻辑运算。

8. 其他二极管

(1) 发光二极管。

发光二极管简称 LED(light emitting diode)，它是一种将电能转换为光能的半导体器件，由化合物半导体制成。它也是由一个 PN 结组成，当加正向电压时，P 区和 N 区的多数载流子扩散至对方与少子复合，复合过程中产生光辐射而使二极管发光。发光二极管电路符号如图 1.1.7(a) 所示。

关于发光二极管作以下说明：

- ① 发光二极管常用作显示器件，如指示灯等。
- ② 发光二极管伏安特性与普通二极管特性相似，发光工作时加正向电压。
- ③ 要加限流电阻，工作电流一般为几毫安至几十毫安，典型电流为 10 mA 左右，高亮度的 50 mA 即可。电流越大，发光越强。
- ④ 发光二极管导通时管压降为 $1.7 \text{ V} \sim 3.5 \text{ V}$ 。

(2) 光电二极管。

光电二极管是将光能转换为电能的半导体器件。光电二极管被光照射时，产生大量的电子-空穴，从而提高了少子的浓度，在反向偏置下，产生漂移电流，从而使反向电流增加。这时外电路的电流随光照的强弱而改变。需要说明一点的是，光电二极管应用时要反向偏置。光电二极管电路符号如图 1.1.7(b) 所示。

(3) 光电耦合器件。

将光电二极管和发光二极管组合起来可构成二极管光电耦合器。它以光为媒介传递电信号。光电耦合器件如图 1.1.7(c) 所示。

(4) 变容二极管。

利用 PN 结的势垒电容随外加反向电压的变化特性可制成变容二极管。变容二极管主要用于高频电子线路，如电子调谐器等。应用是它也是加反向电压。

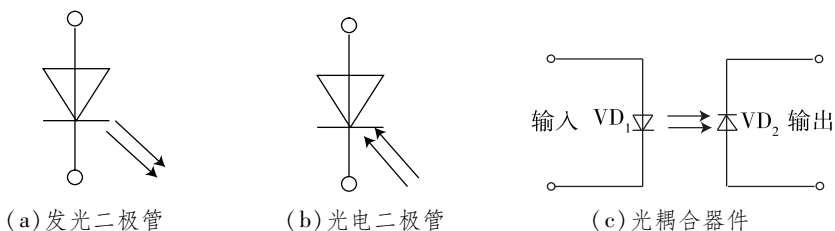


图 1.1.7 特殊二极管