

第 1 章 二极管及应用

内容提要

本章在简单介绍半导体的基本知识后，重点介绍了半导体二极管的结构、特性、主要参数及二极管的各种应用，最后介绍了特殊二极管的知识，为后面的学习奠定基础。

1.1 二极管

1.1.1 半导体基本知识

所谓半导体是指导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。半导体具有光敏性（导电能力随光线照射强度的增大而增强）、热敏性（导电能力随温度的升高而增强）、掺杂特性（在纯净半导体中掺入微量的杂质元素，则其导电能力大大增强）。半导体理论证实，在半导体中存在两种能够导电的带电粒子：带负电的自由电子（简称电子）和带正电的空穴。它们在外电场的作用下都有定向移动的效应，运载电荷形成电流，称为载流子，如图 1.1 所示。

纯净的不含杂质的半导体称为本征半导体。在本征半导体中掺入不同杂质能形成两种杂质半导体。

N 型半导体（又称电子型半导体），其内部自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。如在硅单晶体中掺入微量五价磷元素，可得到 N 型硅。

P 型半导体（又称空穴型半导体），其内部空穴数量多于自由电子数量，即空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。如在硅单晶体中掺入微量三价硼元素，可得到 P 型硅。

如果通过专门技术把 P 型半导体和 N 型半导体结合起来，在它们的交界处就会形成一个特殊的薄层，称为 PN 结。PN 结对来自两个方向的电流呈现不同的性质，在外加电压足够大时，电流只能从 P 区流向 N 区，反方向是不能导通的，即 PN 结具有单向导电性。

1.1.2 二极管简介

半导体二极管，实际上是由一个 PN 结加上电极引线与外壳制成的。由 P 区引出的电极称为阳极或正极，由 N 区引出的电极称为阴极或负极。因 PN 结具有单向导电性，所以二极管也具有单向导电性。如图 1.2 所示为二极管的外形、内部结构示意和符号（用 VD 表示）。

二极管按所用半导体材料可分为硅（Si）二极管和锗（Ge）二极管，不同材料二极管的导电性能存在差异，通常使用的这两种半导体器件，硅要比锗的热稳定性好得多。按用途分类除了普通二极管外，还有稳压二极管、发光二极管、光电二极管、变容二极管等；按内部

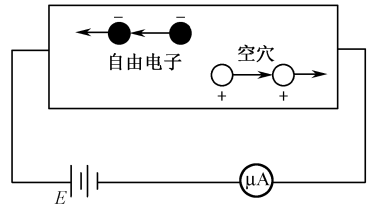


图 1.1 半导体的两种载流子

结构可分为点接触型二极管、面接触型二极管。不同结构的二极管所能通过的电流大小不同，如图 1.3 所示。

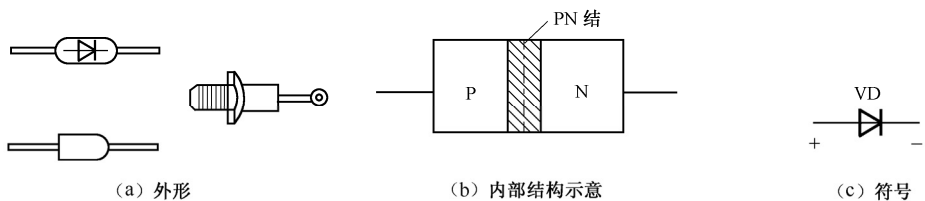


图 1.2 二极管的外形、内部结构示意图和符号

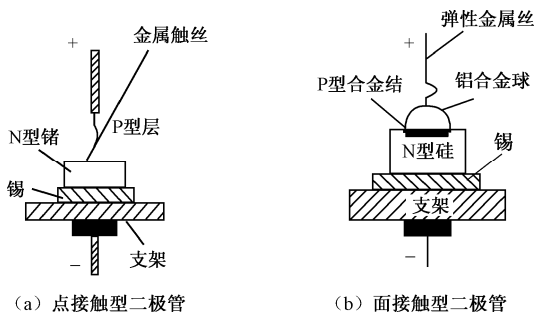


图 1.3 二极管的结构

点接触型二极管是由一根很细的金属丝热压在 N 型锗晶片上制成的，由于金属触丝与 N 型半导体的接触面很小，允许通过电流也很小，但结电容小，工作频率高，适合做高频检波器件。面接触型二极管是用合金法制成的，PN 结面积较大，允许通过较大电流和具有较大功率容量，结电容较大，适于较低频率下工作，一般用做整流器件。

1.1.3 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是指二极管两端的电压和其中流过的电流之间的关系曲线。

图 1.4 (a) 所示是测试二极管正向伏安特性的电路。R 为限流电阻，调节电位器 R_p 使二极管两端正向电压从零开始逐渐增大，读出电压表 (V) 和对应的毫安表 (mA) 数据，画出正向伏安特性曲线。图 1.4 (b) 所示是测试二极管反向伏安特性的电路。图 1.5 给出了较为典型的硅管伏安特性曲线。

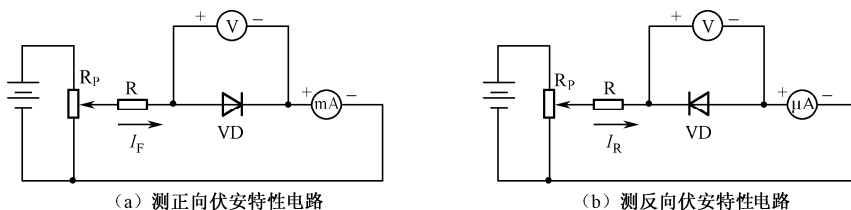


图 1.4 测试二极管伏安特性电路

1. 正向特性

二极管阳极接高电位，阴极接低电位，称为二极管的正向偏置，如图 1.4 (a) 所示。

死区：由图 1.5 可见，对某一给定的二极管，当外加的正向电压低于一定值时，其正向电流很小，几乎为零。而当正向电压超过此值时，正向电流增长很快，这个正向电压的定值通常被称为“死区电压”，其大小与材料及环境温度有关。一般来说，硅管的死区电压约为 0.5V，锗管的死区电压约为 0.1V。

正向工作区：当二极管正向电压超过死区电压后，正向电流变化很大，而电压的变化极小，硅管的导通电压约为 0.6~0.7V，锗管的导通电压约为 0.2~0.3V。通常认为二极管正向导通后电压固定在某个值，这个值被称为导通电压，以后我们在讨论计算时，统一取硅管的导通电压为 0.7V，锗管的导通电压为 0.3V。

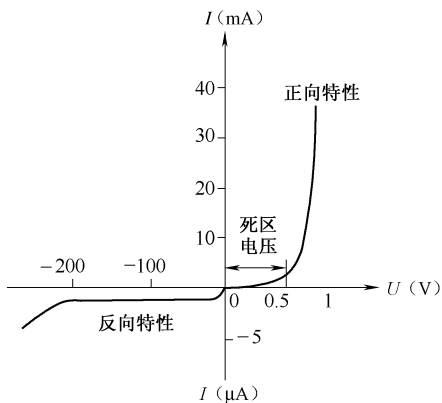


图 1.5 硅二极管伏安特性曲线

2. 反向特性

二极管阳极接低电位，阴极接高电位，称为二极管的反向偏置，如图 1.4 (b) 所示。

反向截止区：当外加电压为负时，即加以反向电压，由图 1.5 可见，反向电流很小，且在某一范围内基本保持不变，称为反向饱和电流。由于半导体的热敏特性，反向饱和电流将随温度的升高而增大。

反向击穿区：当外加电压过高而超过某一值时，则反向电流突然增大，二极管失去了单向导电性，这种现象称为反向击穿，此时的反向电压称为反向击穿电压。

1.1.4 二极管的主要参数

二极管的特性除用伏安特性曲线表示外，还可用它的参数来说明，二极管的主要参数有如下几个。

1. 最大整流电流 I_{FM}

最大整流电流 I_{FM} 是指二极管长时间使用时，允许通过的最大正向平均电流。使用时工作电流要小于这个电流，否则，电流过大，将有可能使二极管烧坏。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

最高反向工作电压 U_{RM} 是指允许加在二极管两端的最大反向电压。最高反向工作电压一般为击穿电压的 1/2 或 2/3。

1.2 二极管的应用

利用二极管的单向导电性，可以组成开关、整流、限幅、钳位、隔离等应用电路。

1. 开关

二极管在数字电路中应用时，常将其理想化为一个无触点开关器件（如小电键为有触点

开关器件)。二极管正向导通时,正向压降为 $0V$,相当于开关闭合;二极管反向截止时,视其反向电流为 $0A$,相当于开关断开。

2. 整流

整流就是指将交流电变为直流电。利用二极管的单向导电性可组成各种整流电路,图 1.6 所示为一个单相半波整流电路。

由于二极管 VD 的单向导电性,在 u_2 的正半周,其极性是上正下负,二极管因承受正向电压而导通,负载电阻 R_L 两端的电压为 u_o ;在 u_2 的负半周,其极性是上负下正,二极管因承受反向电压而截止,负载电阻 R_L 上没有电压。因此在负载 R_L 上得到的是半波整流电压 u_o ,图 1.7 为其工作波形。

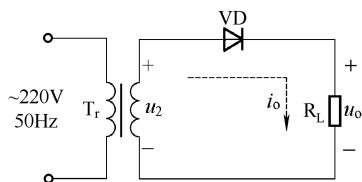


图 1.6 单相半波整流电路

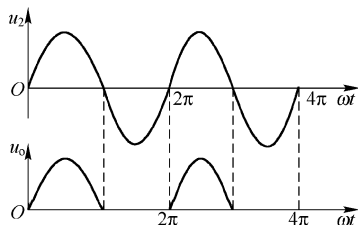


图 1.7 单相半波整流工作波形

3. 限幅

当输入信号幅度变化较大时,限制输出信号幅度的电路称为限幅电路,如图 1.8 所示。

假定二极管是理想的,当输入电压 u_i 为正半周时,且 $u_i \geq E$ (E 为直流电压),二极管 VD 导通,将输出 u_o 的幅度限制在 $u_o = E$ 上;当 $u_i < E$ 时,二极管承受反向电压而截止,二极管 VD 两端相当于开路, $u_o = u_i$ 。从波形图中不难看出,输出电压幅度被限制在 $u_o \leq E$ 以下。

4. 钳位

在图 1.9 所示电路中,输入端 A 的电位 $U_A = 0V$,输入端 B 的电位 $U_B = 3V$,输出端 Y 的电位应为多少呢?

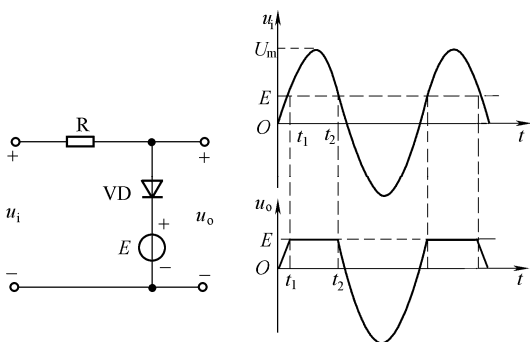


图 1.8 二极管限幅电路及波形

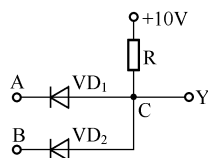


图 1.9 钳位电路

由于 A 端电位比 B 端低，因此二极管 VD_1 优先导通，则 VD_1 正极端 C 点电位 $U_C = 0.7V \approx 0V$ ，此时 VD_2 负极端电位 $U_B = 3V$ ，正极端电位为 $0V$ ，承受反向电压，因而截止。

这里 VD_1 起钳制电位的作用，把输出端 Y 的电位钳制在 $0V$ 。二极管这种作用称为钳位。

5. 隔离

在图 1.9 所示电路中，注意到 VD_2 两边的电位不同， VD_2 把输入端 B 和输出端 Y 隔离开来， VD_2 在这里的作用称为隔离，即把两种不同电位的电路隔离开来，互不影响，电子电路中常常要用到这一点。

*6. 检波

在广播、电视及通信中，为了使声音、图像能远距离传送，需要将一低频信号“装载”到高频信号（叫载波信号）上，以便从天线上发射出去，这个过程称为调制。经高频传送以后，在接收端将低频信号从已调制信号（高频信号）中取出，称为检波或解调。

二极管检波电路如图 1.10 所示，输入信号 u_i 为已调制高频信号，即带有低频信号的特征，由收音机、电视机接收后，首先由检波二极管 VD 将此信号的负半周去掉得 u_A ，然后利用电容器 C 将 u_A 信号中的高频信号滤去，留下低频信号 u_o ，可以再放大这一低频信号，送给负载（扬声器或显像管），还原成声音或图像。

*7. 续流

图 1.11 所示是继电器触点的保护电路。续流二极管 VD 并联在继电器电感线圈 J 两端，当继电器触点断开时，电感线圈的电流突然被切断，继电器线圈会产生很高的自感电动势 e_L （方向如图所示），与电源电压叠加作用到继电器触点上，并产生火花。增设续流二极管以后，由它提供通路（正偏、导通），将电感的磁场能量消耗于续流电路中，把自感电动势 e_L 限定在很低数值（ $0.7V$ ），从而保护了继电器触点和晶体管不受损坏。二极管的这种作用称为续流。

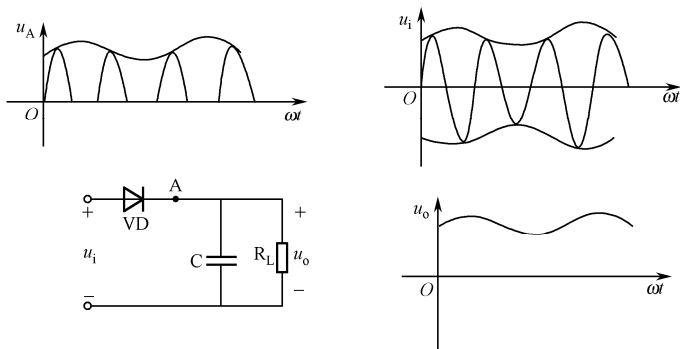


图 1.10 二极管检波电路及波形

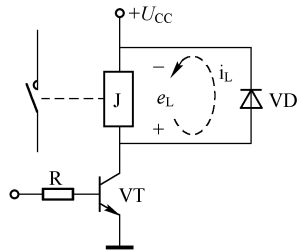


图 1.11 二极管续流保护电路

续流二极管通常应用在开关电源、继电器电路、晶闸管电路中，一般选择快速恢复二极管或者肖特基二极管。续流二极管的极性不能接错，即二极管的负极接直流电的正极。续流二极管工作在正向导通状态，并不是工作在击穿状态或高速开关状态。

1.3 特殊二极管

1.3.1 稳压管

稳压管是一种特殊的面接触型硅二极管，其符号和伏安特性曲线如图 1.12 所示。

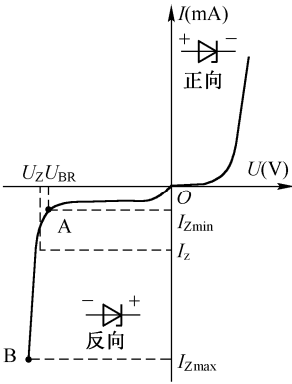


图 1.12 稳压管的符号和伏安特性曲线

其正向特性曲线与普通二极管基本相同。但反向击穿特性曲线很陡且稳压管的反向击穿是可逆的，故它可长期工作在反向击穿区 AB 段而不致损坏。正常情况下稳压管工作在反向击穿区，由于曲线很陡，反向电流在很大范围内变化时，稳压管两端的电压却几乎稳定不变，稳压管就是利用这一特性在电路中起稳压作用的。只要反向电流不超过其最大稳定电流，就不会引起破坏性的热击穿，因此，在电路中稳压管常串联一适当的限流电阻。

与一般二极管不同，稳压管的主要参数有以下几个。

- (1) 稳定电压 U_Z 。稳定电压是指稳压管在正常工作时管子两端的电压。
- (2) 稳定电流 I_Z 。稳定电流是指保持稳定电压 U_Z 时的工作电流。
- (3) 最大稳定电流 I_{Zmax} 。最大稳定电流是指稳压管通过的最大反向电流。稳压管在工作时电流不应超出这个值。
- * (4) 动态电阻 r_Z 。动态电阻是稳压管两端电压变化量与通过的电流变化量之比，即

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

r_Z 愈小，由 ΔI_Z 引起的 ΔU_Z 变化愈小。可见，动态电阻小的稳压管稳压性能好。

1.3.2 发光二极管

发光二极管简称 LED，是一种把电能直接转换成光能的固体发光器件。发光二极管也是由 PN 结构成的，具有单向导电性，当发光二极管加上正向电压时能发出一定波长的光，采用不同的材料，可发出红、黄、绿等不同颜色的光。图 1.13 所示为发光二极管外形及其图形符号。

发光二极管常用做显示器件，可单个使用，也可做成七段式或矩阵式数字显示器件。工作电流一般在几至几十毫安之间。

发光二极管的测试一般用万用表 $R \times 1k\Omega$ 挡，方法和普通二极管一样。正常情况下，发光二极管的正向电阻为 $15k\Omega$ 左右，反向电阻为无穷大。若发光二极管的灵敏度高，测正向电阻时，可见其管芯发光。

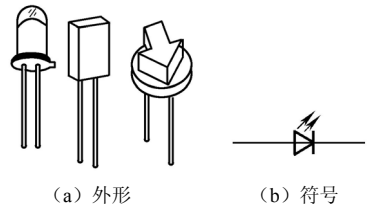


图 1.13 发光二极管外形及符号

1.3.3 光电二极管

光电二极管又称为光敏二极管，是一种将光信号转换为电信号的半导体器件，其外形及符号如图 1.14 所示。它由一个 PN 结构成，具有单向导电性，其管壳上有一个用有机玻璃透镜封闭的窗口，入射光通过透镜正好照射在二极管上。使用时，其 PN 结工作在反向偏置状态，在光的照射下，反向电流随光照强度的增加而上升，这时的反向电流称为光电流。光电二极管常用做传感器的光敏器件。

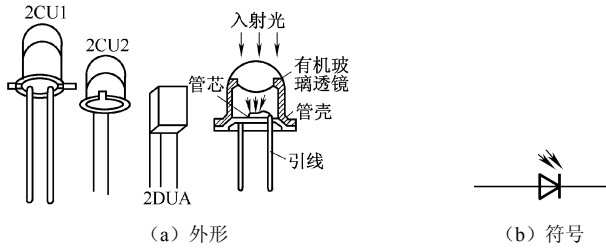


图 1.14 光电二极管外形及符号

光电二极管的测试一般用万用表 $R \times 1k\Omega$ 挡，当用手捂住或用黑纸片遮住光电二极管的窗口时，测出正向电阻为 $(10 \sim 20) k\Omega$ 左右，反向电阻为无穷大。当受光线照射时，正向电阻不变，反向电阻明显变小，说明管子是好的。

图 1.15 所示为光电传输系统，发光二极管将电信号转变为光信号，通过光缆传输，然后再由光电二极管接收，再现电信号。图的左边为发光二极管发射电路，右边为光电二极管接收电路。在发射端，1 个 $0 \sim 5V$ 的脉冲信号通过 500Ω 的电阻作用于发光二极管 (LED)，这个驱动电路可使 LED 产生 1 个数字光信号，并作用于光缆，由 LED 发出的光约有 20% 耦合到光缆。在接收端，传送的光中约有 80% 耦合到光电二极管，这样在接收电路的输出端便复原为 $0 \sim 5V$ 电平的数字信号。

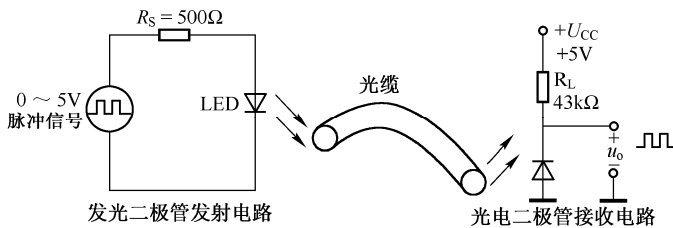


图 1.15 光电传输系统

*1.3.4 变容二极管

变容二极管是利用 PN 结之间电容可变的原理制成的半导体器件。PN 结类似于一个平板电容器，其符号如图 1.16 所示。变容二极管工作在反向偏置状态，其电容量一般为 (几十~几百) pF ，且随反偏电压 $0 \sim 30V$ 的升高而减小 (约 15 倍)。

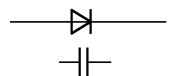


图 1.16 变容二极管符号

变容二极管的用途是在高频调谐、通信等电路中作为可变电

容器使用。例如，在电视机的频道选择器中，利用它来微调选择电视台的频道。

变容二极管的测试一般用万用表 $R \times 1k\Omega$ 挡，方法和普通二极管一样。若正向电阻为几千欧，反向电阻为无穷大，说明管子是好的。

*1.3.5 肖特基二极管

肖特基二极管的特点是：正向导通电压（约为 $0.4V$ ）较低、功耗较低、电流大和开关时间很短。该类管 PN 结电容很小，约 $1pF$ ，肖特基二极管既可在超高频及甚高频段作为检波管，又适用于高速开关电路及高速数字电路。

肖特基二极管是利用金属（铝）和半导体（硅）的直接相接来代替 PN 结，其导通状态转换到截止状态的开关时间相当短；正向特性曲线很陡，死区电压约为 $0.4V$ 。与硅、锗二极管相比，肖特基二极管因其特性曲线曲率较小，具有较低的动态电阻，应用在检波电路中可明显提高效率。肖特基二极管反向电流较大，而且所允许的最高反向电压（约 $70V$ ）低于普通的硅二极管。它的正向电流最大可达 $3000A$ ，所以适用于低压整流、高频或开关电路中。

二端型肖特基二极管可以用万用表 $R \times 1\Omega$ 挡测量。正常时，正向电阻为 $2.5 \sim 3.5\Omega$ ，反向电阻为无穷大。三端型肖特基二极管应先测出其公共端，判别出是共阴对管，还是共阳对管，然后再分别测量两个二极管的正、反向电阻。

此外，还有很多其他不同用途的二极管，例如，检波二极管、阻尼二极管、开关二极管、红外光电二极管、红外发光二极管、激光二极管等。我国国产半导体二极管器件的型号采用国家标准 GB294—74 的规定。国外半导体器件型号标准不一，可参看其他有关资料。

*1.3.6 无引线片状二极管

无引线片状二极管即贴片二极管，目前应用广泛，其体积小、重量轻、高频性能好、形状简单、尺寸标准化，焊点处于元件的两端，便于自动化装配。片状二极管的尺寸很小，通常用缩减的符号来表示元件的基本参数。

常见的无引线片状二极管有：稳压二极管、肖特基二极管、开关二极管、变容二极管和复合二极管等 5 种类型。复合二极管是指把两个以上的二极管封装在一起，减小数目和体积，以满足不同需要，其组合形式如图 1.17 所示。

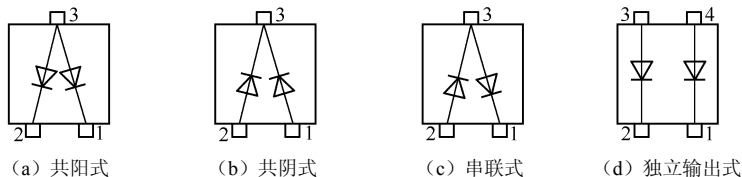


图 1.17 复合二极管的组合形式

片状二极管的主要封装形式见图 1.18 所示，肖特基二极管的封装常采用图 1.18 (a)、(b) 所示形式；稳压二极管的封装 $2 \sim 30V$ 、 $0.5W$ 采用图 1.18 (b) 所示形式， $1W$ 采用图 1.18 (c) 所示形式；复合二极管的封装常采用图 1.18 (b)、(c) 等所示形式。

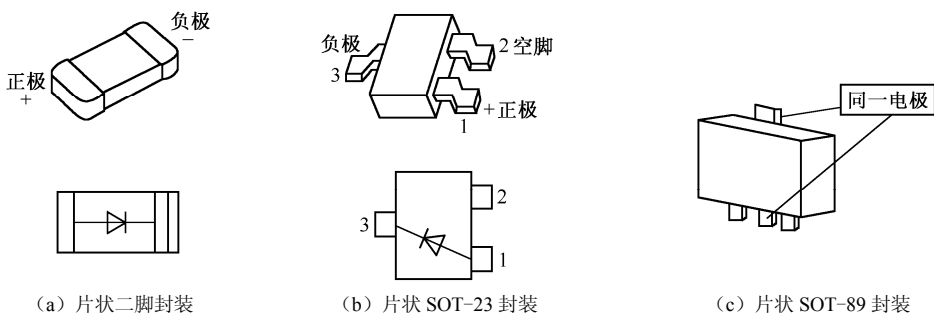


图 1.18 无引线片状二极管封装形式

1.4 二极管的简易测试

利用晶体管特性图示仪可以对二极管做较准确的测量。实验中常用万用表判别二极管的极性及好坏。

1. 二极管极性的判别

利用二极管正向电阻小、反向电阻大的特性就可测知其极性，测量方法如图 1.19 所示。先将指针式万用表调至欧姆挡的 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ 挡 ($R \times 1\Omega$ 挡电流太大， $R \times 10k\Omega$ 挡电压太高，都易损坏管子)，此时黑表笔接表内电池的负极，红表笔接表内电池的正极，将红黑两表笔交替接触二极管的两极，若测出一个阻值较大（几百千欧），而另一个阻值较小（几千欧以下），说明二极管是好的，且测得阻值较小那次黑表笔接的是二极管的正极。

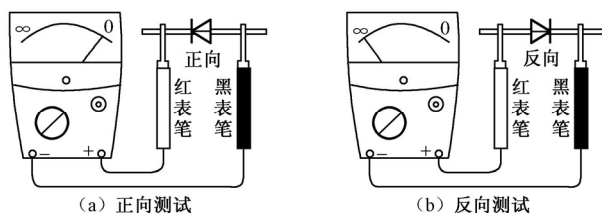


图 1.19 二极管性能简易测试

此外，还可从二极管上直接观察判断。有些二极管管壳上直接标出符号；一般新的发光二极管管脚短的一端为负极；有些整流二极管有色环端为负极；对于玻璃外壳的锗二极管，有色点或黑环端为负极。

2. 二极管好坏的测试

按照上述测试方法，若测得正、反向电阻都很大，说明管子内部断路。若正、反向阻值均近似 0Ω ，说明管子内部短路。若正、反向电阻相差太小，说明其性能变坏或失效。以上三种情况的二极管都不能使用。

用万用表电阻挡的不同量程测量同一个二极管的正、反向电阻值是不同的，因为二极管

是非线性元件，作用在二极管两端上的电压并不相等。但是，正、反向电阻间相差几百倍的规律是不变的。

利用数字万用表的测量方法同上。但要注意，其红表笔接表内电源正极。如 VC890C+ 型数字万用表，将黑表笔插入“COM”插孔，红表笔插入 V/ Ω 插孔；将量程开关转至“二极管”挡，并将表笔连接到待测二极管，读数为二极管正向电压降的近似值。

本章小结

(1) 杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体两类。电子和空穴是半导体中两种导电的载流子。

(2) 半导体二极管具有正向导通、反向截止的单向导电性。利用二极管的单向导电性，可以构成整流、限幅、钳位、检波及续流等应用电路。

(3) 特殊二极管既具有二极管的特性，又具有自身的特殊性能，包括稳压管、发光二极管、光电二极管、变容二极管等，对它们的工作原理和用途都进行了简单介绍。

习题 1

一、判断题（正确的打√，错误的打×）

1.1 用来制作半导体器件的是本征半导体，它的导电能力比杂质半导体强得多（ ）。

1.2 二极管的内部结构实质就是一个 PN 结。（ ）

1.3 最常用的半导体材料是硅，它的热稳定性比锗好得多。（ ）

1.4 用万用表 R \times 100 Ω 挡，测量一只晶体二极管，其正、反向电阻都呈现出很小的阻值，则这只二极管的 PN 结被击穿。（ ）

1.5 稳压管只能用于稳压，不能作为普通二极管使用。（ ）

二、选择题（单选）

1.6 把一个 6V 的蓄电池以正向接法直接加到二极管两端，会出现（ ）问题。

A. 正常 B. 被击穿 C. 内部断路

1.7 二极管的正极电位是 -10V，负极电位是 -9.3V，则该二极管处于（ ）状态。

A. 反偏 B. 正偏 C. 零偏

1.8 稳压管是特殊的二极管，它一般工作在（ ）状态。

A. 正向导通 B. 反向截止 C. 反向击穿 D. 死区

1.9 工作在正向偏置的特殊二极管是（ ）。

A. 稳压管 B. 发光二极管 C. 光电二极管 D. 变容二极管

1.10 适用于高频电路的特殊二极管是（ ）。

A. 稳压管 B. 发光二极管 C. 光电二极管 D. 变容二极管

三、填空题

1.11 二极管工作在正常状态时，若给其施加正向电压，二极管_____，若施加反向电压，则二极管_____，这说明二极管具有_____作用。

1.12 在判别硅、锗二极管时，当测出正向电压降为_____，此二极管为硅二极管；当测出正向电压降为_____，此二极管为锗二极管。

1.13 当加到二极管上的反向电压增大到一定数值时,反向电流会突然增大,此现象称为_____现象。

1.14 发光二极管是把_____能转变为_____能,工作于_____状态;光电二极管是把_____能转变为_____能,工作于_____状态。

1.15 整流就是将_____电变为_____电的过程。

四、解析题

1.16 图 1.20 所示 M 为动圈式电表,测量电流时为保护电表的脆弱转动部件不致因电源极性接错或通过电流太大而损坏,经常把二极管串联或并联到电路中,试说明各二极管所起的作用。



图 1.20

1.17 设图 1.21 中所示各二极管均为理想二极管。(1) 判断二极管 VD_1 、 VD_2 是导通还是截止;(2) 求 A、B 端电压 U_{AB} 和 C、D 端电压 U_{CD} 。

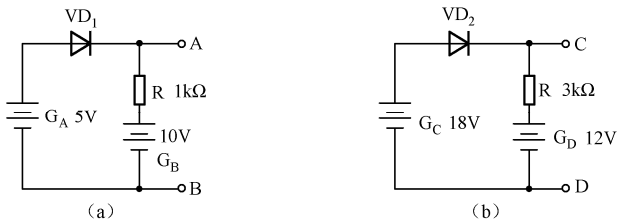


图 1.21

1.18 如图 1.22 所示,二极管正向压降忽略不计,将下列几种情况下输出端 F 点的电位和电阻 R、二极管 VD_A 、 VD_B 中流过的电流填入表 1.1 中。(1) $V_A = V_B = 0V$; (2) $V_A = 3V, V_B = 0V$; (3) $V_A = V_B = 3V$ 。

表 1.1

| A、B 端电位情况 | V_F | I_R | I_{VDA} | I_{VDB} |
|----------------------|-------|-------|-----------|-----------|
| $V_A = V_B = 0V$ | | | | |
| $V_A = 3V, V_B = 0V$ | | | | |
| $V_A = V_B = 3V$ | | | | |

1.19 图 1.23 所示是正向限幅电路,设二极管是理想的, E 为 $6V$,当输入电压 U_i 取不同的值时,试将输出电压 U_o 、电路中电流 I 的对应值及二极管的工作状态(若是截止的,还须写出二极管承受的反向电压值)填入表 1.2 中。

表 1.2

| U_i (V) | U_o (V) | I (mA) | 二极管状态 | 反向电压 (V) |
|-----------|-----------|----------|-------|----------|
| -6 | | | | |
| 0 | | | | |
| +3 | | | | |
| +9 | | | | |

1.20 如图 1.24 所示电路中，稳压管稳压值为 4V，电阻 $R_1 = 1\text{k}\Omega$ ， $R_2 = 4\text{k}\Omega$ ，当 U_i 取不同值时，试将稳压管的工作状态、流过 R_1 和 R_2 的电流及输出电压 U_o 的值填入表 1.3 中。

表 1.3

| U_i (V) | 稳压管 VZ 状态 | I_1 (mA) | I_o (mA) | U_o (V) |
|-----------|-----------|------------|------------|-----------|
| 2 | | | | |
| 4 | | | | |
| 8 | | | | |

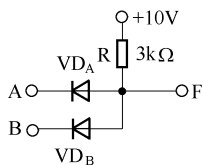


图 1.22

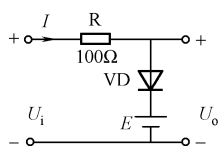


图 1.23

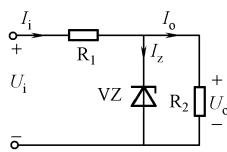


图 1.24