

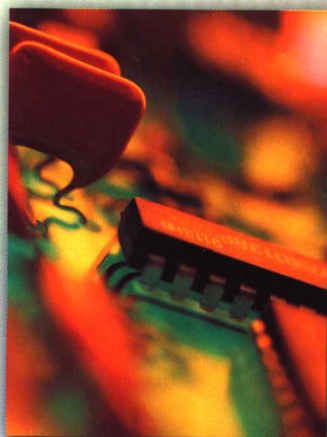
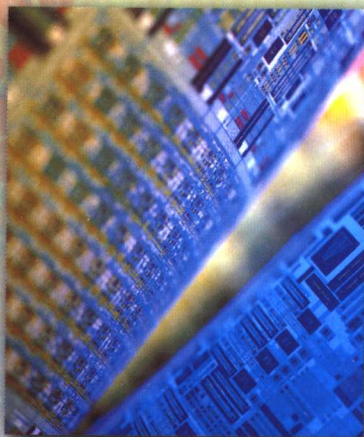


高等学校“十一·五”精品规划教材

● 立体化教材 ●

电子技术基础

曾令琴 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

TN/80

2008



高等学校“十一五”精品规划教材

电子技术基础

曾令琴 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书根据国家颁布的《电子技术基础课程教学基本要求》编写。主要内容有：半导体基础与常用器件，基本放大电路，集成运算放大器，数学逻辑基础，逻辑门与组合逻辑电路，触发器，时序逻辑电路，存储器和数/模与模/数转换器。

全书行文流畅，内容先进，概念清楚，注重实际，目标明确，便于自学。同时，教材注意应用型和技能型人才培养目标的需求，在内容编排上注意了理论与工程实际相结合，是技术性很强的一本通用教材。这不但可以作为应用型本科教材，而且也可作为高职、高专教材，还可供相关工程技术人员学习，或供电子技术爱好者参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术基础/曾令琴主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

高等学校“十一五”精品规划教材

ISBN 978-7-5084-5068-1

I. 电… II. 曾… III. 电子技术—高等学校—教材
IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 166979 号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 电子技术基础
作 者	曾令琴 主编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 13.25 印张 314 千字
版 次	2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	23.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

当今电子科技日新月异，新技术发展层出不穷，相关电子技术知识和技能的掌握更加显得至关重要。抓住机遇，寻求发展，适应变革，站稳脚跟的制胜法宝就是学习、学习、再学习，终生学习。

为适应应用型人才和技能型人才培养需要，满足相关层次院校对电子技术基础知识和相关技能的教学需要，我们编写了这本适用于信息类、工程机械、环境工程、水文水资源、机电一体化、数控等诸多非电类专业适用的《电子技术基础》教材。本教材也可以作为从事相关工程技术人员的学习用书。

电子技术基础是实用性极强的一门技术基础课程，通过学习可有助于人们收集、整理、描述电子工业有关信息，建立相关电子电路模型，进而解决电子工业实用中的问题，直接为社会创造价值。本教材根据近年来电子技术发展的情况，根据“够用为度，注重实践”的原则，将模拟电子技术和数字电子技术、计算机存储器及数、模接口等内容前后呼应地融为一体，分散难点，加强重点，力求基本概念由浅入深表述清楚、语言精练准确；注意避开高深难懂的理论推导，使其剖析浅显易懂；把握教材内容的实用性，体现电子技术的先进性和前瞻性，较好地反映和适应电子技术与电子工业发展的现状和趋势。教材体现的教学内容及组织体系，凝聚了编者多年来进行教学研究和教学改革的经验与体会，教学的可操作性和适用性很强。

教材的每一章都编写了章后检测试题，教材的每一节后均设有与学习目标紧密相关的“重要知识点学习检测”；在理论联系实际的基础上编排了与学习内容相关的技能训练，具有较强的教学评估性。为了达到更为理想的教学和学习效果，本教材配备有编者精心制作的、与本教材相配套的多媒体教学课件。课件主体是教学中极易操作的 PowerPoint 形式，其中采用了大量的电子器件实物图以加强学习者的感性认识；编排了形象、生动的动画演示，强化了教材中的各个重点、难点的剖析；组织了较多的例题、练习题、思考题，以促进教学互动，是教师教学和学习者自学的极佳助手。

全书由曾令琴担任主编，并策划了全书内容及组织结构；范文军担任副主编，赵瑜青、葛玉萍参编。全书共分9章，其中第1章、第2章和第4章由曾令琴编写；第3章、第8章和第9章由范文军编写；第5章由葛玉萍编写；第6章和第7章由赵瑜青编写。

作为教学改革的试用教材，结构模式和内容取舍具有一定的探索性，难免出现一些不妥和疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

2008年1月

目 录

前言

第 1 章 常用半导体器件	1
1.1 概述	1
1.2 半导体技术基本知识	2
1.3 二极管	5
1.4 双极型三极管	13
1.5 单极型三极管（场效应管）	18
1.6 第 1 章技能训练	21
第 1 章检测题	27
第 2 章 基本放大电路	31
2.1 基本放大电路的概念及工作原理	31
2.2 基本放大电路的静态分析	37
2.3 基本放大电路的动态分析	42
2.4 共集电极放大电路	46
2.5 功率放大器和差动放大电路简介	49
2.6 放大电路中的负反馈	52
第 2 章检测题	55
第 3 章 集成运算放大器	58
3.1 集成运算放大器的简介及传输特性	58
3.2 集成运放的应用	63
第 3 章检测题	71
第 4 章 数字逻辑基础	75
4.1 数字逻辑的基本概念及基本逻辑关系	75
4.2 数制与码制	78
4.3 逻辑代数及其化简	85
第 4 章检测题	93

第 5 章 逻辑门与组合逻辑电路	96
5.1 基本逻辑门电路	96
5.2 组合逻辑电路的分析和设计	105
5.3 常用的组合逻辑电路器件	109
第 5 章检测题	120
第 6 章 触发器	124
6.1 基本 RS 触发器	124
6.2 钟控 RS 触发器	127
6.3 主从型 JK 触发器	130
6.4 维持阻塞 D 触发器	133
第 6 章检测题	137
第 7 章 时序逻辑电路	140
7.1 时序逻辑电路的分析方法和设计思路	140
7.2 集成计数器	146
7.3 寄存器	158
7.4 555 定时电路	166
第 7 章检测题	172
第 8 章 存储器	175
8.1 存储器基本知识	175
8.2 随机存取存储器 RAM	178
8.3 可编程逻辑器件	183
第 8 章检测题	189
第 9 章 数/模与模/数转换器	192
9.1 数/模转换器 (DAC)	192
9.2 模/数转换器 (ADC)	198
第 9 章检测题	204

第1章 常用半导体器件

学习目的和要求

了解本征半导体、P型和N型半导体的特征及PN结的形成过程；熟悉二极管的伏安特性及其分类、用途；理解三极管的电流放大原理，掌握其输入和输出特性的分析方法；理解双极型和单极型三极管在控制原理上的区别；初步掌握工程技术人员必须具备的分析电子电路的基本理论、基本知识和基本技能。

1.1 概述

半导体器件是在20世纪50年代初发展起来的电子器件，具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点。常用半导体器件包括半导体二极管、三极管、场效应管、晶闸管等，种类繁多，各成系列，产品品种数以千计，是构成集成电路的基本单元。现代化的电子设备都是以半导体器件和集成电路为基础的，因此半导体器件是近代电子学的重要组成部分，也是电子技术中必不可少的重要部件。观察图1.1所示实用电子线路板，线路板上除了集成电路，还包含大量的二极管、三极管和场效应管等半导体器件。为了正确和有效地运用这些常用半导体器件，相关工程技

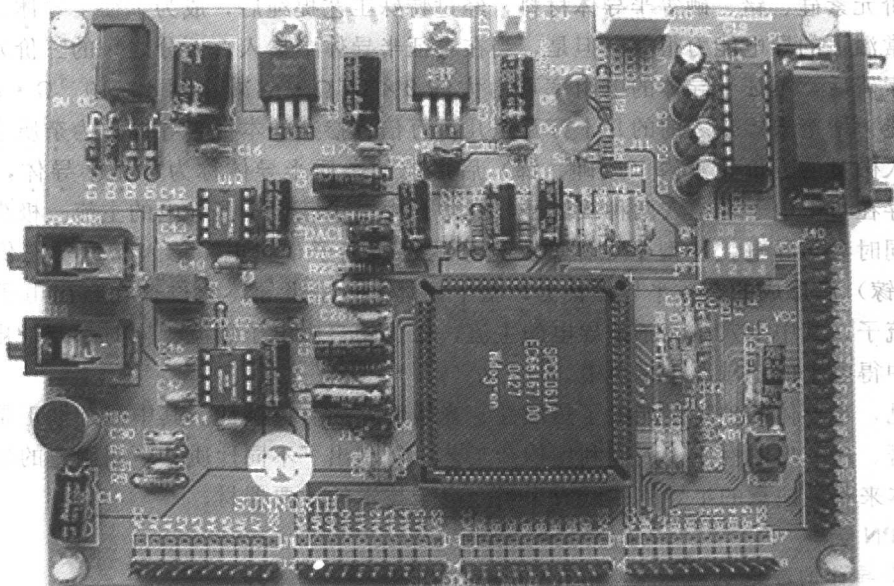


图 1.1 实用电子线路板

术人员必须首先了解这些器件的结构原理及其外引线表现出来的电压、电流关系，即对常用半导体器件的性能有一个基本的认识。本章首先介绍半导体的特性、半导体中载流子的运动，重点阐明PN结的单向导电性，然后介绍二极管、三极管等。

1.2 半导体技术基本知识

1.2.1 半导体的独特性能

半导体的导电性能虽然介于导体和绝缘体之间，但是却能够引起人们的很大兴趣，其原因在于半导体自身存在的一些独特性能。同一块半导体，其导电能力在不同情况下会有非常大的差别，一会儿像地地道道的导体，一会儿又像典型的绝缘体，人们正是利用半导体的这种独特性能，制成各种类型的电子器件。

有些半导体对温度的反应特别灵敏：当周围环境温度增高时，其导电能力显著增加；温度下降时，其导电能力随之明显下降。利用半导体的这种热敏性，人们可以把它制成自动控制用的热敏元件，如市场上销售的双金属片、铜热电阻、铂热电阻、热电偶及半导体热敏电阻等。其中以半导体热敏电阻为探测元件的温度传感器应用广泛，这是因为在元件允许工作条件范围内，半导体热敏电阻器具有体积小、灵敏度高、精度高的特点，而且制造工艺简单、价格低廉。

还有些半导体对光照敏感：有光线照射在这些半导体上时，它们表现出像导体一样很强的导电能力；当无光照时，它们变得又像绝缘体那样不导电。利用半导体的这种光敏性，人们又研制出各种自动控制用的光电元器件，如基于半导体光电效应的光电转换传感器，广泛应用于精密测量、光通信、计算技术、摄像、夜视、遥感、制导、机器人、质量检查、安全报警以及其他测量和控制装置中的半导体光敏元件等。

四价元素硅、锗、硒等半导体材料，经过特殊工艺提纯后，成为本征半导体。本征半导体在常温下的导电能力很差。但是，当在本征半导体中掺入百万分之一的三价元素硼或五价元素磷后，本征半导体的电阻率可由大约 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右，即导电能力增至未掺杂之前的几十万乃至几百万倍，掺杂的本征半导体称为杂质半导体。

掺入微量的五价元素磷（或砷、锑）后形成的杂质半导体称为N型半导体，N型半导体中存在自由电子和空穴两种载流子，其中自由电子载流子是导电的主流，极少的空穴载流子同时参与导电，N型半导体中失电子的定域离子带正电。掺入微量的三价元素硼（或镉、镓）后形成的杂质半导体称为P型半导体，P型半导体中也存在自由电子和空穴两种载流子，其中空穴载流子是导电的主流，极少的自由电子载流子同时参与导电，P型半导体中得电子的定域离子带负电。

可见，半导体的独特性能除了热敏性、光敏性，还有掺杂性。其中掺杂性正是半导体的最显著、最突出的性质。人们利用掺杂工艺，研制出了不同性质、不同用途的半导体器件，使本来不受注意的半导体一跃成为当今电子技术的主要器材。

1.2.2 PN结

1. 半导体的导电机理

杂质半导体中都有一种载流子占导电主流，称为多数载流子。多数载流子一般不受环

境温度的影响，其数量大小仅取决于所掺杂质的浓度。杂质半导体中的少数载流子通常和多数载流子同时参与导电。少数载流子对温度非常敏感，如果周围环境温度不变时，少数载流子的数量不变；当周围环境温度发生变化时，少数载流子的数量随之变化很大。

半导体中多数载流子和少数载流子同时参与导电，是它在导电机理上与金属导体的本质区别。因为，金属导体内部只有自由电子一种载流子参与导电。

杂质半导体的导电能力虽然很强，但它们并不能称为半导体器件。

2. PN 结的形成

由于 P 区的多数载流子是空穴，少数载流子是电子；N 区的多数载流子是电子，少数载流子是空穴，因此在交界面两侧明显地存在着两种载流子的浓度差。这样，P 区的多子空穴载流子和 N 区的多子自由电子载流子都要从浓度高的区域向浓度低的区域扩散。扩散的结果使 N 区的多子复合掉了 P 区的多子，在 P 区和 N 区的交界处只留下了干净的带电杂质离子区，这些带电离子不能任意移动，形成了空间电荷区，如图 1.2 所示。

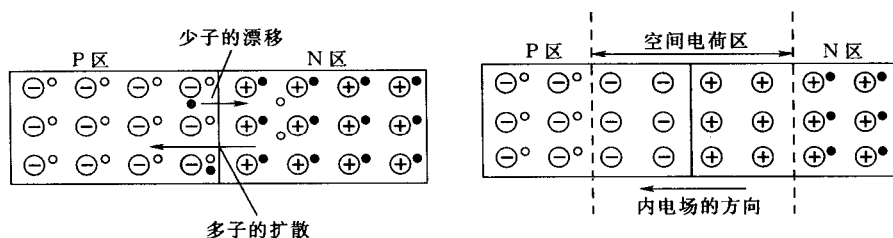


图 1.2 PN 结的形成

空间电荷区中的载流子均被扩散的多子“复合”掉了，或者说在扩散过程中被消耗尽了，因此，有时又把空间电荷区称为耗尽层。

出现了空间电荷区以后，由于正负电荷之间的相互作用，在空间电荷区内形成了一个内电场。内电场的方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区，与多数载流子扩散运动的方向相反。显而易见，内电场对扩散运动起阻碍作用，由此把空间电荷区还称为阻挡层。

在 PN 结形成的过程中，扩散运动越强，复合掉的多子数量越多，空间电荷区也就越宽。另一方面，空间电荷区的内电场又对扩散运动起阻挡作用，而对 N 区和 P 区中的少子漂移起推动作用，少子漂移运动的方向正好与扩散运动方向相反。从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区所失去的空穴，从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区所失去的电子，即漂移运动的结果是使空间电荷区变窄。

多子的扩散和少子的漂移在 PN 结形成的过程中既相互联系、又相互矛盾。初始阶段，扩散运动占优势，随着扩散运动的进行，空间电荷区不断加宽，内电场逐步加强；内电场的加强又阻碍了扩散运动，使得多子的扩散逐步减弱。扩散运动的减弱显然伴随着漂移运动的不断加强。最后，当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时，将形成一个稳定的空间电荷区，这个相对稳定的空间电荷区就称为 PN 结。

空间电荷区内基本不存在导电的载流子，因此电导率很低而相当于介质。在 PN 结两侧的 P 区和 N 区则电导率相对较高，相当于导体，因此，PN 结具有电容效应，这种效应

称为PN结的结电容。

在电子技术中，PN结是一切半导体器件的“元概念”和技术起始点。

3. PN结的特性

PN结在无外加电压的情况下，扩散运动和漂移运动处于动态平衡状态，动态平衡状态下通过PN结的电流为零。这时，如果在PN结两端加上电压，扩散运动与漂移运动的平衡就会被破坏，PN结将显示出其单向导电的性能。PN结的单向导电性是构成半导体器件的主要工作机理。

(1) PN结正向偏置。把电源电压的正极与P区引出端相连，负极与N区引出端相连时，称PN结正向偏置，简称PN结正偏。PN结正偏时，外部电场的方向是从P区指向N区，显然与内电场的方向相反，这时外电场驱使P区的空穴进入空间电荷区抵消一部分负电荷，同时N区的自由电子进入空间电荷区抵消一部分正电荷，结果使空间电荷区变窄，内电场被削弱。内电场的削弱使多数载流子的扩散运动得以增强，形成较大的扩散电流（扩散电流就是通常所称的电流，是由多子的定向移动形成的）。在一定范围内，外电场越强，正向电流越大。PN结对正向电流呈低电阻状态，这种情况在电子技术中称为PN结正向导通。PN结的正向导通作用原理如图1.3所示。

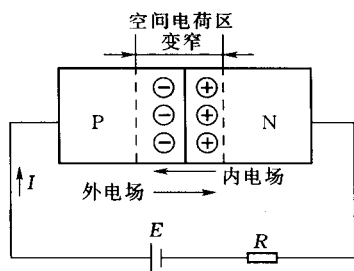


图 1.3 PN结正向偏置

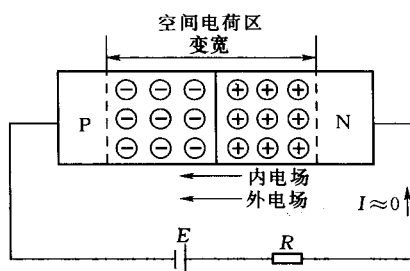


图 1.4 PN结反向偏置

(2) PN结反向偏置。把电源的正、负极位置换一下，即P区接电源负极，N区接电源正极，就构成了PN结的反向偏置。PN结反向偏置时，外加电场与空间电荷区的内电场方向一致，同样会导致扩散与漂移运动平衡状态的破坏。外加电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走，使空间电荷区变宽，内电场继续增强，造成多数载流子扩散运动难于进行，同时加强了少数载流子的漂移运动，形成由N区流向P区的反向电流。但由于常温下少数载流子恒定且数量不多，故反向电流极小，而电流小说明PN结的反向电阻很高，通常可以认为反向偏置的PN结不导电，基本上处于截止状态，这种情况在电子技术中称为PN结的反向阻断。PN结的反向阻断作用原理如图1.4所示。

当外加的反向电压在一定范围内变化时，反向电流几乎不随外加电压的变化而变化。这是因为反向电流是由少子漂移形成的，在热激发下，少子数量增多，PN结反向电流增大。换句话说，只要温度不发生变化，少数载流子的浓度就不变，即使反向电压在允许的范围内增加再多，也无法使少子的数量增加，这里反向电流趋于恒定，因此反向电流又称为反向饱和电流。值得注意的是，反向电流是造成电路噪声的主要原因之一，因此，在设计电路时，必须考虑温度补偿问题。

PN 结的上述“正向导通，反向阻断”作用，说明 PN 结具有单向导电性。

本节重要知识点学习检测

1. 半导体具有哪些独特性能？在导电机理上，半导体与金属导体有何区别？
2. 何谓本征半导体、杂质半导体？N 型半导体和 P 型半导体有何不同？各有何特点？
3. 何谓 PN 结？PN 结具有什么导电特性？

1.3 二 极 管

1.3.1 半导体二极管

1. 半导体二极管的类型

半导体二极管实际上就是一个 PN 结外引两个电极构成的。按材料不同可分为硅二极管和锗二极管；按结构不同又可分为点接触型、面接触型和平面型三类。

(1) 点接触型二极管。如图 1.5 (a) 所示。点接触型二极管是用一根细金属丝和一块半导体熔焊在一起构成 PN 结的，因此 PN 结的结面积很小，结电容量也很小，不能通过较大电流。但点接触型二极管的高频性能好，常常用于高频小功率场合，如高频检波、脉冲电路及计算机里的高速开关元件。

(2) 面接触型二极管。如图 1.5 (b) 所示。面接触型二极管一般用合金方法制成较大的 PN 结，由于其结面积较大，因此结电容量也大，允许通过较大的电流，适宜用作大功率低频整流器件。

(3) 平面型二极管。如图 1.5 (c) 所示。这类二极管采用二氧化硅作保护层，可使 PN 结不受污染，而且大大减少了 PN 结两端的漏电流。平面型二极管的质量较好，批量生产中产品性能比较一致。平面型二极管结面积较小的用作高频管或高速开关管，结面积较大的用作大功率调整管。

目前，大容量的整流元件一般都采用硅管。二极管的型号中，通常硅管用 C 表示，如 2CZ31 表示为 N 型硅材料制成的管子型号；锗管一般用 A 表示，如 2AP1 为 N 型锗材料制成的管子型号。

二极管的电路符号如图 1.5 (d) 所示，P 区引出的电极为正极（阳极），N 区引出的电极为负极（阴极）。

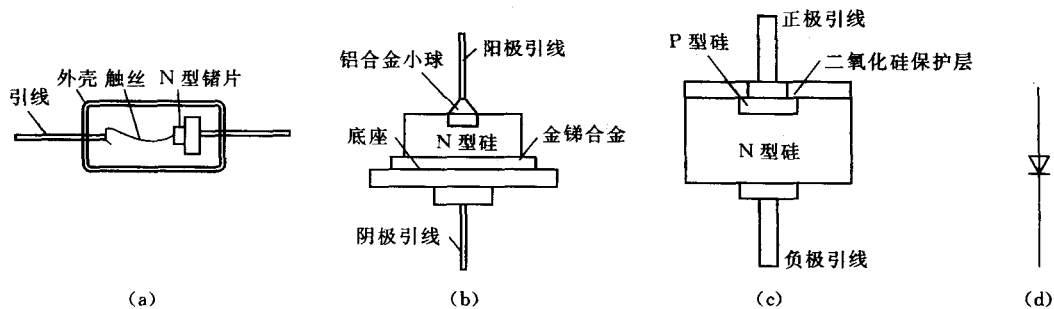


图 1.5 半导体二极管的结构类型及电路图符号

(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 平面型；(d) 图形符号

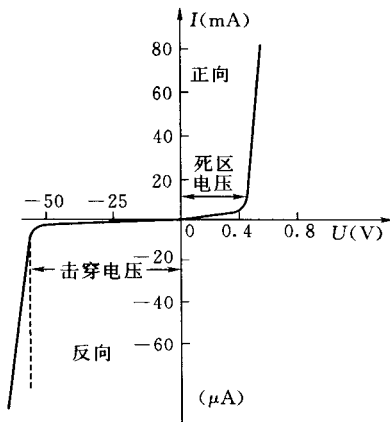


图 1.6 二极管的伏安特性曲线

二极管导通，正向电流由零迅速增长。处于正向导通区的普通二极管，正向电流在一定范围内变化时，其管压降基本不变，硅管约为 $0.6\sim 0.8\text{V}$ ，锗管约为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。即正向电流的大小通常仅取决于半导体材料的电阻。

再观察二极管的反向伏安特性。在外加反向电压低于反向击穿电压 U_{BR} 的一段范围内，二极管的工作区域称为反向截止区。在反向截止区内，通过二极管的反向电流是由半导体内部的少数载流子的漂移运动产生的，只要二极管工作环境的温度不变，少数载流子的数量就保持恒定，因此又被称为反向饱和电流。反向饱和电流的数值很小，在工程实际中通常近似视为零值。

注意：半导体少子构成的反向电流对温度十分敏感，温度上升时，反向电流会大大增加。

当反向电压继续增大，超过反向击穿电压 U_{BR} 时，反向电流会突然骤增，特性曲线向下骤降，二极管失去单向导电性，进入反向击穿区。

3. 二极管的击穿问题

二极管进入反向击穿区将发生电击穿现象。对于硅材料的二极管来说，击穿电压大于 7V 时为雪崩击穿，小于 4V 时为齐纳击穿。在 $4\sim 7\text{V}$ 之间，两种击穿都有。

(1) 雪崩击穿。当二极管的反向电压增加时，空间电荷区中的内电场随着增强。在强电场作用下，少数载流子的运动速度加快，动能增大，致使它们在快速运动过程中与晶体结构的中性原子相碰撞。碰撞造成更多的价电子脱离束缚形成新的载流子，这种现象称碰撞电离。新产生的载流子在强电场作用下，再去碰撞其他中性原子，又产生新的载流子。如此连锁反应，使得二极管的 PN 结中载流子数量剧增，流过 PN 结的反向电流急剧增大，这种现象称为雪崩击穿。

雪崩击穿发生在掺杂浓度较低、外加反向电压较高的情况下。掺杂浓度低使二极管 PN 结较厚，少子在 PN 结内运动过程中与中性原子碰撞的机会比较多，发生碰撞电离的次数也比较多；由于掺杂浓度较低，PN 结较宽，产生雪崩击穿的电场相对较强，一般出现雪崩击穿的电压大约在 7V 以上。

2. 半导体二极管的伏安特性

自由是被认识了必然，只有在认识了半导体二极管特性的基础上，才能正确掌握和使用它。

二极管的伏安特性指加到二极管两端的电压 U 与流过二极管的电流 I 之间的关系，如图 1.6 所示。

观察二极管的伏安特性曲线，当二极管两端的正向电压较小时，通过二极管的电流基本为零。这说明：较小正向电压的电场还不足以克服 PN 结内电场对扩散运动的阻挡作用，二极管仍呈现高阻态，基本上仍处于截止状态，这段区域称为死区。对硅管来讲，死区电压约为 0.5V ，而锗管的死区电压约为 0.1V 。

继续观察特性曲线，当外加正向电压超过死区电压后，PN 结的内电场作用将被在大大削弱或抵消，

(2) 齐纳击穿。如果二极管的 PN 结两边掺杂浓度很高, PN 结很薄时, 很薄的 PN 结内部载流子与中性原子碰撞的机会将大为减少, 一般不会发生雪崩击穿。但是, 正因为 PN 结很薄, 即使所加反向电压不大, 在 PN 结两端也会产生强大的电场, 这个电场足以把 PN 结内中性原子的价电子从束缚中拉出来, 产生出大量的载流子, 致使二极管的反向电流剧增, 这种现象称为齐纳击穿。齐纳击穿发生在高掺杂的二极管中, 相应的击穿电压较低, 一般小于 5V。

综上所述, 雪崩击穿属于碰撞的电击穿, 齐纳击穿则是一种场效应的电击穿。电击穿的过程通常可逆, 只要降低加在二极管两端的反向电压, 二极管一般都可恢复到原来的状态而不会造成永久损坏。

如果反向电压在电击穿区继续增加, 反向电流将进一步骤增, 致使消耗在二极管 PN 结上的功率超过 PN 结所能承受的限度时, 二极管将因过热而烧毁, 这种破坏现象称二极管发生热击穿。热击穿的过程不可逆。普通二极管工作在反向击穿区时, 反向电流都很大, 极易造成“热击穿”而永久损坏。

4. 二极管的主要技术参数

二极管的参数很多, 有些参数仅仅表示管子性能的优劣, 而另一些参数则属于至关重要的极限参数。熟悉和理解二极管的主要技术参数, 可以帮助我们正确使用二极管。

(1) 最大耗散功率 P_{\max} 。二极管的最大允许耗散功率用它的极限参数 P_{\max} 表示, 数值上等于通过管子的电流与加在管子两端电压的乘积。过热是电子器件的大敌, 二极管能耐受住的最高温度决定它的极限参数 P_{\max} , 使用二极管时一定要注意, 不能超过此值, 如果超过则二极管将烧损。

(2) 最大整流电流 I_{DM} 。在实际应用中, 二极管工作在正向范围时的压降近似为一个常数, 所以它的最大耗散功率通常用最大整流电流 I_{DM} 表示。最大整流电流是指二极管长时间使用时, 允许流过二极管的最大正向平均电流值, 也是二极管的重要参数。

点接触型二极管的最大整流电流通常在几十个毫安以下; 面接触型二极管的最大整流电流可达 100mA; 对大功率二极管而言可达几个安培。二极管使用过程中电流若超出此值, 可能引起 PN 结过热而使管子烧坏。因此, 大功率二极管为了降低结温, 增加管子的负载能力, 通常都要把管子安装在规定散热面积的散热器上使用。

(3) 最高反向工作电压 U_{RM} 。最高反向工作电压 U_{RM} 是指二极管反向偏置时允许加的最大电压瞬时值。若二极管工作时的反向电压超过了 U_{RM} 值, 二极管有可能被反向击穿而失去单向导电性。为确保安全, 手册上给出的最高反向工作电压 U_{RM} 通常为反向击穿电压的 50%~70%, 即留有余量。

(4) 反向电流 I_R 。二极管未击穿时的反向电流值称为反向电流 I_R 。 I_R 值越小, 二极管的单向导电性越好。反向电流 I_R 随温度的变化而变化较大, 这一点要特别加以注意。

(5) 最高工作频率 f_M 。最高工作频率 f_M 的值由 PN 结的结电容大小决定。二极管的工作频率若超过该值, 则二极管的单向导电性能变差。

除上述参数外, 二极管的参数还有最高使用温度、结电容等。实际应用中, 应认真查阅半导体器件手册。

5. 二极管的应用

几乎在所有的电子电路中，都要用到半导体二极管，二极管是诞生最早的半导体器件之一，在许多电路中都起着重要的作用，应用范围十分广泛。

(1) 二极管整流电路。利用二极管的单向导电性，可以把交变的正弦波变换成单一方向的脉动直流电。

图 1.7 (a) 所示电路是一个单相半波整流电路。图中变压器 T 的输入电压为单相正弦交流电压，波形如图 1.7 (b) 所示。变压器的输出和二极管 VD 相串联后与负载电阻 R_L 相接。由于二极管的单向导电性，变压器 T 的输出电压正半周大于死区的部分才能使二极管 VD 导通，其余输出均被二极管阻断，因此，负载 R_L 上获得的电压波形如图 1.7 (c) 所示，它为单向半波整流波形，电路实现了对输入的半波整流。

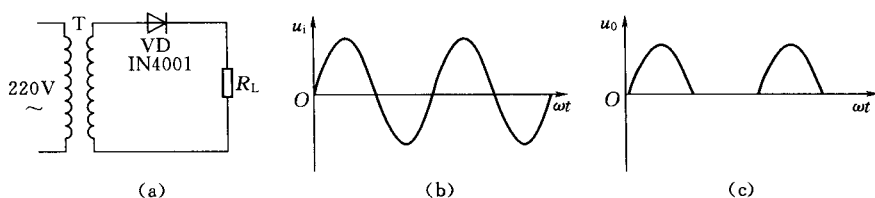


图 1.7 二极管半波整流电路及输入、输出电压波形

(a) 半波整流电路；(b) 变压器输入电压波形；(c) 负载端电压波形

图 1.8 (a) 所示电路是单相全波整流电路。图 1.8 (b) 是电路输入的正弦交流电压波形。当变压器 T 输出正半周时，二极管 VD_1 导通、 VD_2 截止，电流由变压器次级上引出端 $\rightarrow VD_1 \rightarrow$ 负载 $R_L \rightarrow$ 回到变压器次级中间引出端， R_L 上得到了第一个输出电压正向半波；变压器 T 输出负半周时，二极管 VD_2 导通、 VD_1 截止，电流由变压器次级下引出端 $\rightarrow VD_2 \rightarrow$ 负载 $R_L \rightarrow$ 回到变压器次级中间引出端， R_L 上得到了第二个输出电压正向半波。如此循环往复，负载 R_L 两端就得到一个如图 1.8 (c) 所示的单向整流电压，实现了对输入的全波整流。

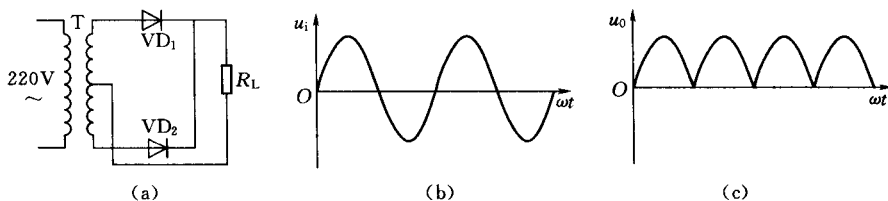


图 1.8 二极管全波整流电路及输入、输出电压波形

(a) 全波整流电路；(b) 变压器输入电压波形；(c) 负载端电压波形

图 1.9 (a) 所示电路是桥式全波整流电路，图 1.9 (b) 是电路输入的正弦交流电压波形。

当变压器 T 输出正半周时，二极管 VD_1 、 VD_3 导通， VD_4 、 VD_2 截止，电流由变压器次级上引出端 $\rightarrow VD_1 \rightarrow$ 负载 $R_L \rightarrow VD_3 \rightarrow$ 回到变压器次级下引出端， R_L 上得到了第一个

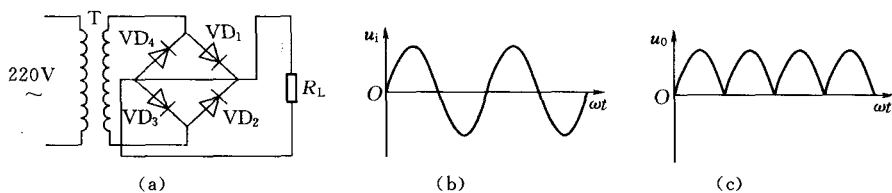


图 1.9 二极管桥式全波整流电路及输入、输出电压波形
(a) 桥式整流电路；(b) 变压器输入电压波形；(c) 负载端电压波形

输出电压正向半波；变压器 T 输出负半周时，二极管 VD_2 、 VD_4 导通， VD_3 、 VD_1 截止，电流由变压器次级下引出端 $\rightarrow VD_2 \rightarrow$ 负载 $R_L \rightarrow VD_4 \rightarrow$ 回到变压器次级上引出端， R_L 上得到了第二个输出电压正向半波。如此循环往复，负载 R_L 两端就得到一个如图 1.9 (c) 所示的单方向的输出电压，从而实现了输入的全波整流。

(2) 二极管钳位电路。图 1.10 所示为二极管钳位电路，此电路利用了二极管正向导通时压降很小的特性。限流电阻 R 的一端与直流电源 $U(+)$ 相连，另一端与二极管阳极相连，二极管阴极连接端子为电路输入端 A ，阳极向外引出的 F 点为电路输出端。

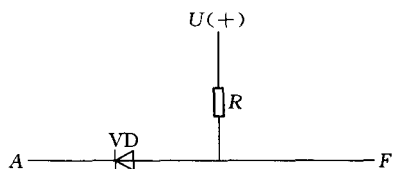


图 1.10 二极管钳位电路

当图中 A 点电位为零时，二极管 VD 正向导通，按理想二极管来分析，即二极管正向导通时压降为零，则输出 F 的电位被钳制在零伏， $V_F \approx 0$ 。若 A 点电位较高，不能使二极管导通时，电阻上无电流通过，输出 F 的电位就被钳制在 $U(+)$ 。

(3) 二极管双向限幅电路。二极管正向导通后，它的正向压降基本保持不变（硅管为 $0.7V$ ，锗管为 $0.3V$ ）。利用这一特性，二极管在电路中可作为限幅元件，把信号幅度限制在一定范围内。利用二极管正向导通时压降很小且基本不变的特点，还可以组成各种限幅电路。

【例 1.1】 图 1.11 (a) 为二极管双向限幅电路。已知 $u_i = 1.41\sin\omega t (V)$ ，图中 VD_1 、 VD_2 均为硅管，导通时管压降 $U_D = +0.7V$ 。试画出输出电压 u_o 的波形。

解 由图 1.11 (a) 可知， $u_i > U_D$ 时，二极管 VD_1 导通、 VD_2 截止，输出 $u_o = U_D =$

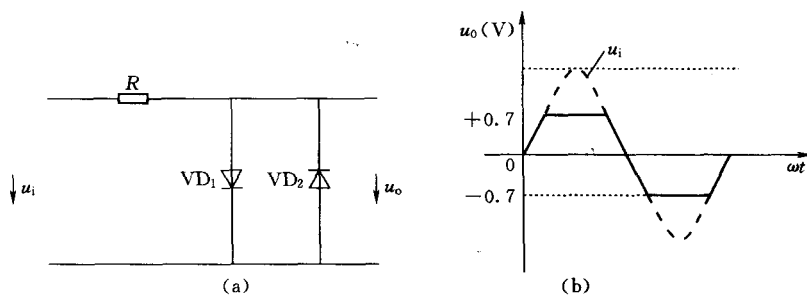


图 1.11 二极管限幅电路
(a) 电路图；(b) 波形图

+0.7V；当 $u_i < -U_D$ 时，二极管 VD_2 导通、 VD_1 截止，输出 $u_o = -U_D = -0.7V$ ；若输入电压在 $-0.7 \sim +0.7V$ 之间时，两个二极管都不能导通，因此，电阻 R 上无电流通过， $u_o = u_i$ 。

由上述分析结果可画出输出电压波形为如图 1.11 (b) 所示的波形图。显然，图 1.11 (a) 所示电路中的两个二极管起到了对输出限幅在 $\pm 0.7V$ 的作用。

除此之外，二极管还应用于检波、元件保护以及在脉冲与数字电路中用作开关元件等。总之，电子工程实用中，二极管的应用很广，在此不再一一赘述。

1.3.2 特殊二极管

1. 稳压管

稳压二极管是电子电路特别是电源电路中常见的元器件之一，与普通二极管不同的是，稳压管的正常工作区域是反向齐纳击穿区，故而也称为齐纳二极管，实物及图符号如图 1.12 所示。

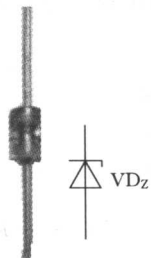


图 1.12 稳压二极管实物图及电路图符号

稳压二极管是由硅材料制成的特殊面接触型晶体二极管，其伏安特性与普通二极管相似，如图 1.13 所示。由于稳压二极管的反向击穿可逆，因此工作时不会发生“热击穿”，图 1.13 所示稳压管的反向击穿特性比较陡直，说明其反向电压基本不随反向电流变化而变化，这就是稳压二极管的稳压特性。

由稳压管的伏安特性曲线可看出：稳压二极管反向电压小于其稳压值 U_Z 时，反向电流很小，可认为在这一区域内反向电流基本为零。当反向电压增大至其稳压值 U_Z 时，稳压管进入反向击穿工作区。在反向击穿工作区，通过管子的电流虽然变化较大（常用的小功率稳压管，反向工作区电流一般为几毫安至几十毫安），但管子两端的电压却基本保持不变。利用这一特点，把稳压二极管接入如图 1.14 所示的稳压管稳压电路，其中 R 为限流电阻， R_L 为负载电阻，只要输入反向电压在超过 U_Z 的范围内变化，负载电压则一直稳定在 U_Z 。即当电源电压波动或其他原因造成电路各点电压变动时，稳压管可保证负载两端的电压基本不变。

稳压二极管与其他普通二极管的最大不同之处就是它的反向击穿可逆，当去掉反向电压时稳压管也随即恢复正常。但任何事物都不是绝对的，如果反向电流超过稳压二极管的允许范围，稳压二极管同样会发生热击穿而损坏。因此，实际电路中，为确保稳压管工作于可逆的齐纳击穿状态而不会发生热击穿，稳压二极管使用时一般需串联限流电阻，以确保工作电流不超过最大稳定电流 I_{Zmax} 。

稳压管常用在小功率电源设备中的整流滤波电路之后，起到稳定直流输出电压的作用。除此之外，稳压管还常用于浪涌保护电路、电视机过压保护电路、电弧控制电路、手机电路等。例如，在手机电路中，手机电路中所用的受话器、振动器都带有线圈，当这些电路工作时，由于线圈的电磁感应常会导致一个个很高的反向峰值电压，如果不加以限制就会引起电路损坏，而用稳压

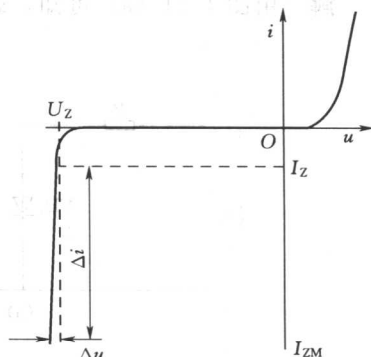


图 1.13 稳压管的伏安特性