



北京市高等教育精品教材立项项目

全国高等职业教育规划教材

模拟电子技术 基础及应用

熊伟林 主编

电子课件下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

北京市高等教育精品教材立项项目
全国高等职业教育规划教材

模拟电子技术基础及应用

主编 熊伟林

参编 林海峰 陈 强 魏玉敏 胡逸凡



机械工业出版社

本书从模拟电子技术的基础理论知识出发,介绍了电子技术的基本概念、元器件特性及其应用电路,书中还给出了典型实验和项目设计等内容。书中配有例题和习题,并附有习题解答,便于读者自学。

本书可作为高等职业院校的计算机、电子、通信、机电等工科专业的教材或教学参考书。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 81922385, 电话: 010-88379739)。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础及应用/熊伟林主编. —北京:机械工业出版社, 2010.6

北京市高等教育精品教材立项项目. 全国高等职业教育规划教材
ISBN 978-7-111-30615-3

I. ①模… II. ①熊… III. ①模拟电路 - 电子技术 - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第084403号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王颖 李宁

责任校对:李秋荣 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2010年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.75印张·287千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-30615-3

定价:22.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

全国高等职业教育规划教材 电子技术专业编委会成员名单

主 任 曹建林

副 主 任 张中洲 张福强 祖 炬 董维佳
俞 宁 蒋蒙安 吕何新 伍湘彬
任德齐 华永平 吴元凯

委 员 (按姓氏笔画排序)

马 彪	邓 红	王树忠	王新新	尹立贤
白直灿	包中婷	冯满顺	华天京	吉雪峰
刘美玲	刘 涛	孙吉云	孙津平	朱晓红
李菊芳	邢树忠	陈子聪	杨元挺	张立群
张锡平	苟爱梅	姚建永	曹 毅	崔金辉
黄永定	章大钧	彭文敏	曾日波	谭克清

秘 书 长 胡毓坚

副秘书长 戴红霞

出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位，促进学生技能的培养，以及教材内容要紧密结合生产实际，并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神，机械工业出版社组织全国近 60 所高等职业院校的骨干教师对在 2001 年出版的“面向 21 世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补，并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师，针对相关专业的课程设置，融合教学中的实践经验，同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的，具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中，本系列教材获得了较高的评价，并有多个品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中，除了保持原有特色外，针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中，核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时，增加实训和习题；实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合；涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时，根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来，本系列教材具有以下特点：

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度，强调专业技术应用能力的训练，适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述容易理解、清晰简洁，多用图表来表达信息；增加相关技术在生产中的应用实例，引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新，及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念，并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合，提高教学服务水平，为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快，加之我们的水平和经验有限，因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息，以利于我们今后不断提高教材的出版质量，为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

电子技术是在物理学发展基础上产生的一个学科，随着生产和科学技术发展需要，电子技术得到高度发展和广泛应用。本书介绍的是现代电子技术中最为重要的基础知识——模拟电子技术基础及应用。

本书是全国高等职业教育规划教材，供高职院校计算机、电子、通信、机电等工科专业“模拟电子技术”课程教学使用。其任务是使学生掌握模拟电子技术基础及应用的有关知识，为提高学生的专业知识水平、职业技能和全面素质，以及继续深入学习专业课程打下一定的基础。

本书从模拟电子技术的基础理论出发，介绍了电子技术的基本概念、元器件特性及其应用电路，给出了典型实验和项目设计等内容。不仅保持了理论知识的系统性和实用性，还注重电子技术基础实验，特别是结合教学改革的实际需要，采用模拟电子技术的应用实例作为项目设计内容，书中配有例题和习题，并附有习题解答，便于读者自学。给出了具体任务和技术指导，适合在模拟电子技术课程教学改革实践中，采用“教学做一体化”教学模式。

对高职学生来说，学习模拟电子技术的重点应在于掌握常见元器件的基本特性与使用方法；典型电路的功能与应用；电子技术的基本调试方法与检测技术等。不宜介绍过多的复杂电路分析与计算，及元器件与集成电路的工作原理，而应介绍如何借助工具书学会使用未曾接触过的元器件与集成电路、新型电子器件。本书的主要特色是：

1) 突出教学重点和实用性。本书根据当前国内高职教学的需要，针对学生的学习特点，结合实际教学经验编写而成。力图体现教学内容适宜和适度，突出模拟电子技术的知识重点，篇幅适中内容精练，并采用实用的典型电路作为例题。将实验恰当地融于相应章节，并采用项目设计将全部知识综合起来运用，实现对学生专业技能的培养。

2) 突出基础性、应用性、先进性。本书与传统的教材相比，在课程内容和结构安排上都做了较大的改革和尝试。适当降低理论起点，强化理论与实践相结合，强调知识与技能的先进性。

3) 强调工具性和实用性。模拟电子技术是一门实践性很强的课程，因此，本书加强各种形式的实践教学环节和电子工程方面的技能训练，对于培养学生的专业素质和能力具有十分重要的作用。

本书内容大约需要 60 学时。第 1 章半导体器件（8 学时），学习半导体的导电特性，二极管、晶体管和场效应晶体管的基本特性，以及一个实验，为学习应用电路奠定基础。第 2 章二极管应用电路（8 学时），学习二极管整流电路、限幅电路和稳压电路，以及一个实验。第 3 章晶体管应用电路（14 学时），学习晶体管共射、共基和共集三种基本放大器、低频功率放大器、多级放大器的电路，以及两个实验。第 4 章集成运算放大器及其应用（12 学时），学习集成运算放大器的基本特性及其应用电路和反馈的概念，以及一个实验。第 5 章项目设计（18 学时），运用前 4 章所学知识学习分析一般模拟电子电路的方法。通过 3 个典型的项目设计，掌握几种实际应用电路的功能、结构和工作原理，同时获得分析、设计和制

作一般模拟电子电路的能力。

本书由北京信息职业技术学院副教授熊伟林主编，林海峰、陈强、魏玉敏、胡逸凡参编。其中第1章由胡逸凡编写，第2章由魏玉敏编写，第3章由林海峰编写，第4章由陈强编写，第5章及附录由熊伟林编写。

书中如有错漏和不妥之处，欢迎广大读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第1章 半导体器件	1	3.1 放大电路的基础知识	47
1.1 半导体的导电特性	1	3.1.1 放大电路模型与主要参数	47
1.1.1 半导体的基本特性	1	3.1.2 输入/输出耦合方式与电路组成	49
1.1.2 PN结的导电特性	3	3.2 晶体管共发射极放大电路	50
1.2 二极管的基本特性	5	3.2.1 放大电路的等效电路	50
1.2.1 二极管的结构与特性	5	3.2.2 静态分析方法	52
1.2.2 二极管的主要参数	8	3.2.3 动态分析方法	53
1.2.3 二极管电路分析方法	9	3.2.4 放大器主要性能参数的测试	58
1.2.4 其他二极管简介	10	3.3 实验三 共射放大器的制作与调试	59
1.3 晶体管的基本特性	11	3.4 晶体管共集电极与共基极放大电路	61
1.3.1 晶体管的结构类型与特性	11	3.4.1 共集放大器的结构与特性	61
1.3.2 晶体管的主要参数	14	3.4.2 共基放大器的结构与特性	63
1.3.3 晶体管的工作状态	15	3.5 场效应晶体管放大电路	65
1.4 场效应晶体管的基本特性	17	3.5.1 共源极放大器	65
1.4.1 场效应晶体管的分类与结构 特性	17	3.5.2 共漏极放大器	67
1.4.2 大功率场效应晶体管简介	22	3.6 晶体管低功率放大器	68
1.5 实验一 常用电子元件的识别与 检测	23	3.6.1 功率放大器的分类	68
1.6 本章小结	26	3.6.2 双电源功放电路	69
1.7 习题	27	3.6.3 单电源功放电路	70
第2章 二极管应用电路	30	3.7 实验四 功率放大器的制作与调试	72
2.1 二极管整流电路	30	3.8 多级放大电路	74
2.1.1 半波整流电路	30	3.8.1 多级放大电路的基本特性	74
2.1.2 全波整流电路	31	3.8.2 阻容耦合放大器及其特性	75
2.2 二极管限幅电路	34	3.9 本章小结	79
2.2.1 二极管单向限幅电路	34	3.10 习题	80
2.2.2 二极管双向限幅电路	36	第4章 集成运算放大器及其应用	87
2.3 稳压二极管电路	38	4.1 集成运算放大器基础	87
2.3.1 稳压二极管的基本特性	38	4.1.1 恒流源电路	87
2.3.2 二极管稳压电路	40	4.1.2 差分放大电路	88
2.4 实验二 简单直流电压源的测试	42	4.2 集成运算放大器的基本特性	91
2.5 本章小结	43	4.2.1 集成运算放大器的结构与主要 参数	91
2.6 习题	44	4.2.2 集成运算放大器的理想模型	94
第3章 晶体管应用电路	47	4.3 电路中的反馈	95
		4.3.1 反馈的基本概念	95
		4.3.2 反馈类型及应用	96
		4.3.3 负反馈对放大器性能的影响	99

4.4 基本运算电路	101	5.2 直流稳压电源的设计与制作	130
4.4.1 比例运算电路	101	5.2.1 项目设计任务	130
4.4.2 加法与减法运算电路	102	5.2.2 项目设计指导	131
4.4.3 积分与微分运算电路	104	5.3 正弦波振荡器的设计与制作	140
4.4.4 对数与指数运算电路	105	5.3.1 项目设计任务	140
4.5 集成运算放大器的应用电路	107	5.3.2 项目设计指导	141
4.5.1 电压比较器	107	5.4 函数信号发生器的设计与制作	149
4.5.2 有源滤波器	108	5.4.1 项目设计任务	150
4.5.3 采样保持电路	113	5.4.2 项目设计指导	150
4.6* 其他模拟电路简介	114	5.5 本章小结	158
4.6.1 模拟乘法器的特性与应用	114	5.6 习题	159
4.6.2 模拟电路在测量技术中的应用	117	附录	161
4.7 实验五 集成运算放大器电路的 测试	121	附录 A 本书常用符号说明	161
4.8 本章小结	123	附录 B 常用模拟集成器件引脚的功能	163
4.9 习题	124	附录 C 综合试卷	165
第 5 章 项目设计	129	附录 D 部分习题参考答案	170
5.1 概述	129		

第 1 章 半导体器件

学习目标

- 了解半导体的基本概念和本征半导体、N 型半导体、P 型半导体的特点。
- 了解 PN 结的形成，掌握 PN 结的单向导电性。
- 了解二极管的结构和主要参数，掌握其伏安特性、分析方法和正负极的判别方法。
- 了解晶体管的结构和主要参数，掌握晶体管的输入和输出伏安特性曲线。
- 掌握晶体管 3 个电极的判别方法。
- 了解各种场效应晶体管的结构、符号和主要参数，掌握它们的转移特性和输出特性。

1.1 半导体的导电特性

1.1.1 半导体的基本特性

物体按照其导电能力可分为导体、半导体和绝缘体 3 类。常见的金、银、铜等金属，是良好的导体。另一些物质，如橡胶、干木材、陶瓷等，则几乎不导电，称为绝缘体。导电能力介于导体和半导体之间的物质，称为半导体。用于制造半导体元器件的半导体有锗、硅和砷化钾等。

1. 半导体的特点

半导体之所以被用来制造电子元器件，是因为它的导电能力在外界某种因素作用下会发生显著的变化。主要体现在以下 3 个方面：

1) 半导体的电导率会因加入杂质而发生显著的变化。例如，在室温下，纯锗中掺入一亿分之一的杂质，其电导率会增加几百倍。各种不同元器件的制作，正是利用了掺杂以改变和控制半导体的电导率。

2) 温度的变化也会使半导体的电导率发生显著的变化，利用这种热敏效应人们制作出了热敏元件。但是，热敏效应会使半导体元器件的热稳定性下降，所以应采取有效措施以克服因半导体元器件热敏特性造成的电路不稳定。

3) 光照不仅可以改变半导体的电导率，还可以产生电动势，这种现象统称为半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光敏晶体管、光耦合器和光电池等。

2. 本征半导体

完全纯净的、结构完整的半导体晶体称为本征半导体，其原子核外层的价电子彼此共用，形成共价键结构。在 $T=0\text{K}$ 和没有外界激发时，由于共价键中的价电子被束缚着，所以在本征半导体中，没有可以自由运动的带电粒子——载流子，这时它相当于绝缘体。

但是，半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中的电子被束缚得那样紧。如图 1-1 所

示，在室温（300K）下，由于热激发，会使一些价电子获得足够的能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子，这种现象称为本征激发。在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子之后，共价键中就留下一个空位，这个空位叫做空穴（如图 1-1 所示的 A 处）。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。由于共价键中出现了空穴，邻近的价电子就可以填补到这个空位上（如图 1-1 所示的 B 到 A）。而在这个电子原来的位置上留下新的空位，以后其他电子又可以转移到这个新的空位（如图 1-1 所示的 C 到 B）。这样，就使共价键中出现一定的电荷迁移。

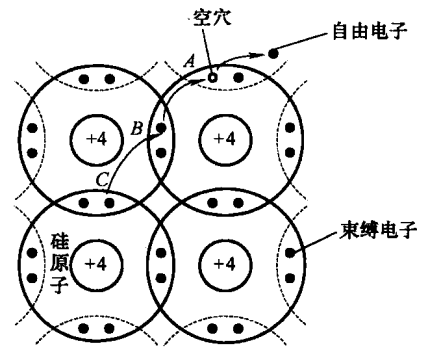


图 1-1 电子和空穴的移动

在本征半导体内，自由电子和空穴总是成对出现的。在没有外加电场时，本征半导体中空穴和自由电子移动的方向都是杂乱无章的，对外部不显现电流。理论和实践证明：随着温度的升高，电子-空穴对急剧增加，其增加速度遵循指数率。

在实际的半导体中，除了产生电子-空穴对以外，还存在一个逆过程。这就是自由电子也会释放能量而进入有空位的共价键，同时消失一个自由电子和空穴，这种现象称之为复合。当温度一定时，激发和复合数相等，维持动态平衡。

3. N 型半导体

在本征半导体中，人为地掺入少量三价元素（如硼、铝等）或五价元素（如磷、砷等），可以使半导体的导电性能发生显著的变化，掺入的元素称为杂质，本征半导体掺入杂质后称为杂质半导体。根据掺入杂质性质的不同，杂质半导体可分为 N 型半导体（电子型半导体）和 P 型半导体（空穴型半导体）两大类。

本征半导体中掺入少量的五价元素，使每一个五价元素取代一个四价元素在晶体中的位置，可以形成 N 型半导体。常用掺杂的五价元素有磷、砷和铋。图 1-2 所示为一个磷原子取代一个硅原子后晶体的共价键结构示意图。因为磷原子有 5 个价电子，它以 4 个价电子与相邻的硅原子组成共价键后，必定还多余一个价电子。这个多余的价电子只要较小的能量就能挣脱磷原子的吸引而成为自由电子。

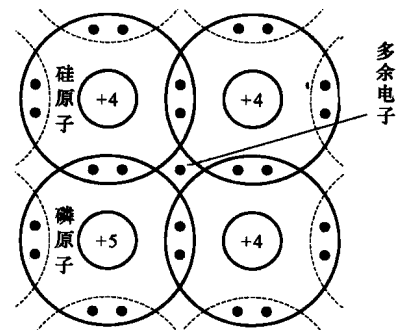


图 1-2 N 型硅半导体的共价键结构

磷原子因失去电子而成为正离子，但在产生自由电子的同时并不产生新的空穴，这是不同于本征半导体的。除了杂质给出的自由电子外，原晶体本身也会产生少量的电子-空穴对，但自由电子数远大于空穴数。在 N 型半导体中以自由电子导电为主，自由电子称为多数载流子（简称多子），而空穴称为少数载流子（简称少子）。

4. P 型半导体

本征半导体中掺入少量的三价元素，使每一个三价元素取代一个四价元素在晶体中的位置，可以形成 P 型半导体。常用掺杂的三价元素有硼、铝和镓。图 1-3 所示为一个硼原子取代一个硅原子后晶体的共价键结构示意图。因硼原子只有 3 个价电子，它与周围硅原子组成

共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生了一个空位。当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时，就有可能填补这个空位，使硼原子成为不能移动的负离子，而原来硅原子的共价键则因缺少一个电子，形成了空穴。

产生空穴的同时并不产生新的自由电子，这一点也是不同于本征半导体的。原来的硅晶体本身仍会产生少量的电子-空穴对。在 P 型半导体中，空穴数远大于自由电子数，以空穴导电为主，空穴称为多数载流子，而自由电子称为少数载流子。

由此可见，在掺入杂质后，载流子的数目都有相当程度的增加。掺入百万分之一的杂质，载流子浓度将增加一百万倍。因此，在半导体内掺入微量的杂质，是提高半导体导电能力最有效的方法。

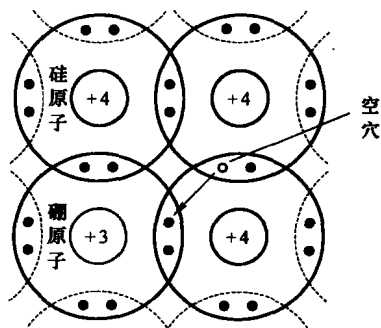


图 1-3 P 型硅半导体的共价键结构

1.1.2 PN 结的导电特性

在一块本征半导体上，通过掺杂使一侧形成 N 型半导体，另一侧形成 P 型半导体，则在两种半导体交界面上形成一个很薄的空间电荷区，叫做 PN 结。PN 结是构成各种半导体元器件的基础，了解 PN 结的性质对掌握半导体元器件的工作原理是非常重要的。

1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体结合后，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差。由于电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散，所以有一些电子要从 N 型区向 P 型区扩散，同时也有一些空穴要从 P 型区向 N 型区扩散，如图 1-4 所示。

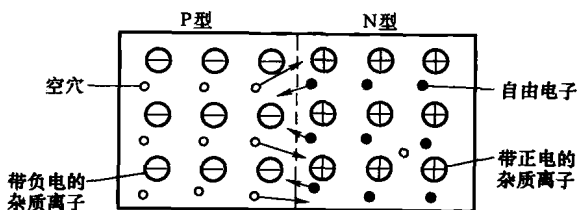


图 1-4 载流子的扩散

扩散到 P 型区的电子与空穴复合，扩散到 N 型区的空穴与电子复合，随着扩散的进行，在交界面附近的 P 型区中空穴数大量减少，出现了带负电的离子区；而在 N 型区一侧因缺少电子，显露出带正电的离子区。半导体中的离子虽然也带电，但由于物质结构的关系，它们不能任意移动，所以并不参与导电。这些不能移动的带电粒子通常称为空间电荷，它们在交界面上形成一个很薄的空间电荷区，称为 PN 结。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了，因此该电荷区又叫做耗尽层，如图 1-5 所示。

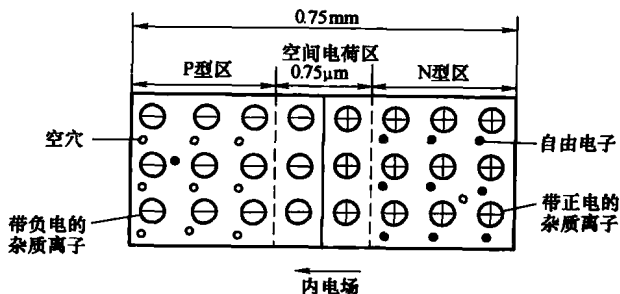


图 1-5 PN 结的形成

在出现了空间电荷区后，由于正负电荷之间的相互作用，在空间

电荷区中形成了一个电场，其方向是从带正电的 N 型区指向带负电的 P 型区。由于这个电场是由载流子扩散运动即由内部形成的，故称为内电场。

PN 结的内电场是阻止扩散的，因为这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反，所以空间电荷区又可看做是一个阻挡层，它对多数载流子的扩散有阻挡作用。另外，根据电场的方向和电子、空穴的带电极性还可以看出，这个电场将使 N 型区的少数载流子空穴向 P 型区漂移，使 P 型区的少数载流子电子向 N 型区漂移，漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。当多数载流子扩散和少数载流子漂移达到动态平衡时，它们的作用大小相等、方向相反，相互抵消，外部（宏观）不显现电流现象。

2. PN 结的单向导电性

1) 外加正向电压。如图 1-6 所示，在 PN 结上外加正向电压 U_F ，即 U_F 的正端接 P 型区，负端接 N 型区，外加电场与 PN 结的内电场方向相反。在外加电场的作用下，P 型区中的多数载流子空穴和 N 型区中的多数载流子电子都要向 PN 结移动。当 P 型区空穴进入 PN 结后，就要和原来的一部分负离子中和，使 P 型区的空间电荷量减少。同样，N 型区的电子进入 PN 结后中和了部分正离子，使 N 型区的空间电荷量减少，结果使 PN 结变窄，即阻挡层的厚度变薄，电阻减小。因此，在这个方向的外加电压称为正向电压或正向偏置电压，简称正偏。这时多子的扩散运动将大于漂移运动，PN 结内的电流便由起支配地位的扩散电流所决定，在外电路上形成一个流入 P 型区的电流，称为正向电流 I_F 。当外加电压 U_F 升高，PN 结电场便进一步减弱，扩散电流随之增加。在正常工作范围内，PN 结上外加电压只要稍有变化，便能引起电流的显著变化。这样，正向的 PN 结表现为一个很小的电阻。

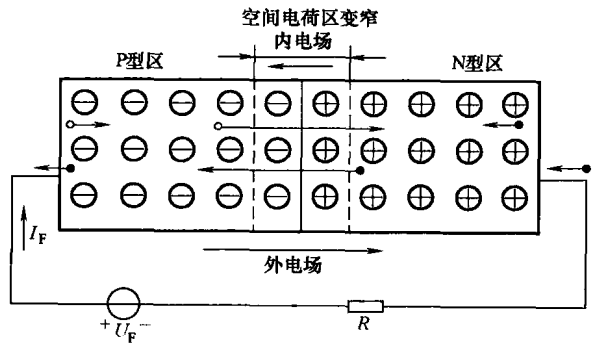


图 1-6 外加正向电压的 PN 结

正向电压或正向偏置电压，简称正偏。这时多子的扩散运动将大于漂移运动，PN 结内的电流便由起支配地位的扩散电流所决定，在外电路上形成一个流入 P 型区的电流，称为正向电流 I_F 。当外加电压 U_F 升高，PN 结电场便进一步减弱，扩散电流随之增加。在正常工作范围内，PN 结上外加电压只要稍有变化，便能引起电流的显著变化。这样，正向的 PN 结表现为一个很小的电阻。

在外加正向偏置电压下，有少数载流子形成的漂移电流，其方向与扩散电流相反，和正向电流比较，其数值很小，可忽略不计。

2) 外加反向电压。如图 1-7 所示，在 PN 结上外加反向电压 U_R ，即 U_R 的正端接 N 型区，负端接 P 型区，外加电场与 PN 结的内电场方向相同。在这种外电场的作用下，P 型区中的空穴和 N 型区中的电子都将离开 PN 结，使阻挡层厚度加宽，这时 PN 结处于反向偏置。这样 P 型区和 N 型区中的多数载流子就很难越过阻挡层，因此扩散电流趋近于零。但由于结电场的增加，使 N 型区和 P 型区中的少数载流子更容易产生漂移运动，PN 结的电流就由起支配地位的漂移电流所决定。在外电路上就形成了一个流入 N 型区的反向电流。

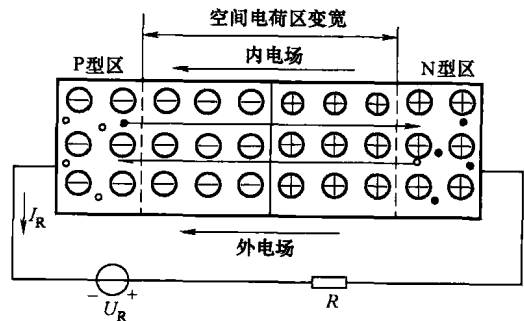


图 1-7 外加反向电压的 PN 结

但由于少数载流子的浓度很小，所以反向漂流电流很小，而且少数载流子是由本征激发产生的，当材料制成后，其数值取决于温度。在一定温度下，电压再高，其值也几乎不变，所以PN结在反向偏置时，可认为基本上是不导电的，表现为一个很大的电阻。

由此可见，PN结正向偏置时，正向电阻很小，形成较大的正向电流；PN结反向偏置时，呈现较大的反向电阻，反向电流很小，这就是PN结的单向导电性。PN结具有单向导电性的关键是它的阻挡层的存在及其随外加电压而变化。

3. PN结的击穿

当加于PN结的反向电压增大到一定数值时，反向电流突然急剧增大，这种现象称为PN结的反向击穿。对应于电流开始剧增时的电压称为反向击穿电压。PN结击穿分为雪崩击穿和齐纳击穿。

雪崩击穿是由于PN结内的少数载流子受强电场的加速作用而获得很大的能量，当它与结内原子碰撞时，把其中的价电子碰撞出来，产生新的电子-空穴对。新的电子-空穴对在强电场的作用下，再去碰撞其他的原子，产生更多的电子-空穴对，如同雪崩一样。雪崩击穿的本质是碰撞电离，发生在掺杂浓度较低、外加电压较大的情况下。

齐纳击穿发生在高浓度掺杂的PN结内。由于杂质浓度高，故形成的PN结很窄，即使外加反向电压不高（5V以下），结内电场也非常强，它可以把结内的束缚电子从共价键中拉出来引起反向电流的剧增。

在发生以上两种电击穿时，如果反向电压下降到击穿电压以下，PN结的性能仍能恢复到原来的状态。但前提条件是：反向电流和反向电压的乘积不超过PN结允许的耗散功率，超过了就会因为热量散不出去而使PN结温度上升，直到过热而烧毁，这种现象就是热击穿。热击穿是不可恢复的，在应用中应尽量避免。电击穿则往往被人们所利用（如用于制成稳压管等）。

思考与练习

1. 什么叫半导体？半导体的特点是什么？什么叫本征半导体？
2. 什么叫杂质半导体？杂质半导体有哪几种？为什么要向纯净的半导体中掺入杂质？
3. 什么叫N型半导体？什么叫P型半导体？
4. 什么叫PN结？PN结有什么特性？什么叫PN结正偏？什么叫PN结反偏？
5. 什么叫击穿？有哪几种类型？

1.2 二极管的基本特性

1.2.1 二极管的结构与特性

1. 二极管的结构及分类

把一个PN结的两端接上电极引线，外面用金属（或玻璃、塑料等）管壳封闭起来，便构成了二极管。P端引出的电极为阳极（正极），N端引出的电极为阴极（负极）。普通二极管的结构示意图和图形符号如图1-8所示。

二极管按照制造材料可分为硅二极管、锗二极管；按用途可分为整流二极管、稳压二极管、开关二极管、检波二极管等。根据构造上的特点和加工工艺的不同，二极管又可分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管。

2. 二极管的伏安特性

二极管的导电特性实际上就是PN结的单向导电性，加在二极管两端的电压和流过二极管电流之间的关系称为二极管的伏安特性。它可通过测试电路（如图1-9所示）测试出来，即分别在二极管两端加上正向电压和反向电压，改变电压数值的大小，同时再分别测量流过二极管的电流值，就可得到二极管的伏安特性曲线。图1-10所示分别为硅二极管和锗二极管的伏安特性曲线。

由图1-10可见，二极管两端的电压和流过二极管的电流成非线性关系，所以二极管的伏安特性曲线是一条非线性曲线。如图1-10b所示，以锗二极管为例，曲线可分为以下三部分：

1) 正向特性。图1-10b的第①段为正向特性，当二极管两端加正向电压且小于某一数值时，二极管的正向电流几乎为零。当正向电压达到某一程度时，正向电流迅速增大，而且电压少许增大正向电流就增加许多，表现为一较小电阻。使二极管刚刚出现正向电流时所对应的正向电压称为死区电压或开启电压，用 U_{th} 表示，其大小和材料有关。硅二极管的 U_{th} 约为0.5V，锗二极管的 U_{th} 约为0.1V。

二极管导通后，其管压降基本不变，当二极管的正向电流发生很大变化时，正向压降只有微小变化。硅二极管的正向压降为0.7V左右，锗二极管正向压降为0.2V左右。但当温度升高时，其管压降会略有下降。

2) 反向特性。图1-10b的第②段为反向特性，当二极管两端加反向电压，并且反向电压小于一定数值时，反向电流很小，表现为一个很大的电阻。反向电流有以下特点：

其一，当反向电压在一定范围内变化时，反向电流基本不变，呈饱和性，所以称之为反向饱和电流。一般硅管的反向饱和电流比锗管的小很多。其二，反向电流受温度影响很大，

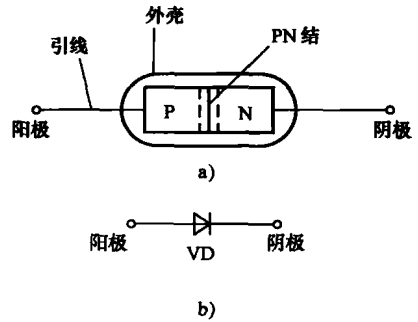


图1-8 二极管的结构示意图和图形符号

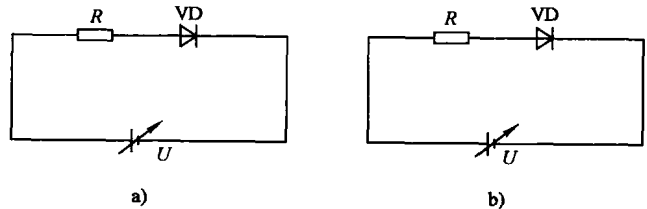


图1-9 二极管的伏安特性测试电路

a) 二极管两端加正向电压的电路 b) 二极管两端加反向电压的电路

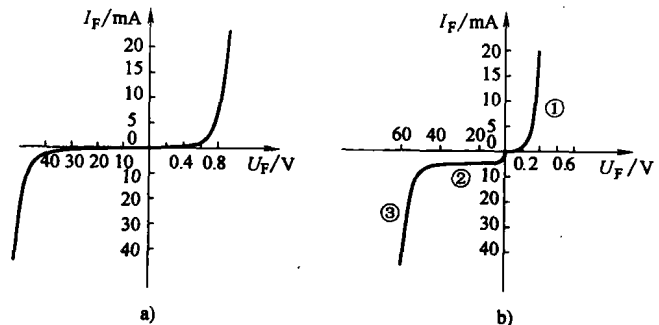


图1-10 二极管伏安特性曲线

a) 硅二极管的伏安特性曲线 b) 锗二极管的伏安特性曲线

当温度升高时，其值随温度的升高而加大，而反向饱和电流加大将影响二极管的单向导电性。

3) 反向击穿特性。图 1-10b 的第③段为反向击穿特性，当反向电压增加到某一数值时，二极管反向电流迅速增大，此时的二极管处于反向击穿状态。使二极管反向击穿时所对应的反向电压称为反向击穿电压，用 U_{BR} 表示。处于反向击穿状态下的二极管将失去单向导电性。

二极管的击穿同 PN 结的击穿一样有两种，电击穿和热击穿。电击穿不是永久性击穿，当反向电压去掉后，二极管能恢复正常特性。而热击穿为永久性击穿，当去掉反向电压后二极管也不能恢复正常特性，在实际应用中应尽量避免这种情况的发生。

3. 二极管的温度特性

热振动的强度随温度的升高而增大，因而温度升高对二极管特性的影响是不容忽视的。图 1-11 所示为温度对二极管伏安特性的影响。

由图 1-11 可以看出：正向特性随温度升高而左移，反向饱和电流随温度升高而剧增。

当温度升高，本征半导体的电导率提高，即二极管正向电压一定时，正向电流随温度的升高而加大，所以二极管的伏安特性曲线将左移。这是造成以 PN 结为基础的半导体元器件温度稳定性不好的原因之一。但利用这一特性在电路中可以做温度补偿元件。

二极管的反向饱和电流与温度密切相关，温度升高时，少数载流子增加，所以反向电流将急剧增加。通常温度每升高 10°C ，反向饱和电流约增加一倍。

半导体二极管温度的稳定性不好，所以在使用时要注意温度的影响

4. 二极管的伏安特性表达式

理论和实验均可证明，二极管的伏安特性可近似由式 (1-1) 表示：

$$i_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中， i_D 为流过二极管的电流； I_S 为反向饱和电流； u_D 为外加电压； U_T 为温度的电压当量，当 $T=300\text{K}$ 时， $U_T=26\text{mV}$ ； e 为自然对数的底， $e \approx 2.71828$ 。

式 (1-1) 可以从两方面加以分析：

1) 当二极管两端加正向电压时，电压 u_D 为正值。当 u_D 比 U_T 大几倍时，式 (1-1) 成为

$$i_D = I_S e^{u_D/U_T} \quad (1-2)$$

这样，流过二极管的电流随加在二极管两端的电压成指数关系增加，如图 1-10b 的第①段所示。

2) 当二极管两端加上反向电压时，电压 u_D 为负值。当 $|u_D|$ 比 U_T 大几倍时，式 (1-1) 中的指数项 e^{u_D/U_T} 很快趋近于零，于是 $i_D \approx -I_S$ ，如图 1-10b 的第②段所示。由此可知，反向饱和电流是个常数，不依外加反向电压而变动。

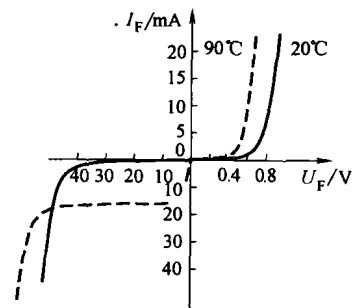


图 1-11 温度对二极管伏安特性的影响

1.2.2 二极管的主要参数

器件参数是对器件性能的定量描述，是选择器件的依据。二极管的主要参数包括：

1) 最大整流电流 I_{FM} 。它是二极管长期工作允许通过的最大正向平均电流。其大小取决于 PN 结的面积、材料和散热条件。一般二极管的 I_{FM} 值可达几毫安，大功率二极管的 I_{FM} 可达几安培。工作电流不要超过 I_{FM} 值，否则二极管将因热击穿而烧毁。

2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。它是保证二极管不被反向击穿而规定的最大反向电压。一般手册中给出的最高反向工作电压约为击穿电压的一半，以确保二极管安全运行。例如，2AP1 最高反向工作电压规定为 20V，而反向击穿电压实际上大于 40V。

3) 反向饱和电流 I_S 。它是二极管未击穿时的反向电流值。 I_S 越小，二极管的单向导电性越好。实际应用时应注意温度对 I_S 的影响。

4) 最大功耗 P_M 。它是保证二极管安全工作所允许的最大功率损耗。通常大功率二极管要加散热片。

5) 直流电阻 R_D 。它是二极管伏安特性曲线上工作点所对应的直流电压与直流电流之比，即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-3)$$

显然，工作点不同，其直流电阻值就不同。器件的参数随工作电压和电流的变化而变化，这种现象是非线性器件特有的性质。 R_D 在工程计算中用处不大，但可用来说明二极管单向导电性的好坏。平时用万用表欧姆档测量出的二极管电阻就是直流电阻 R_D 。一般二极管的正向直流电阻为几十至几百欧姆，反向直流电阻为几千至几百千欧姆。

6) 交流电阻 r_d 。二极管在小信号工作情况下，需要用到交流电阻这一参数。如图 1-12 所示，交流电阻 r_d 的定义是：二极管伏安特性曲线工作点 Q 附近电压的变化量与相应的电流变化量之比，即

$$r_d = \left. \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} \right|_{I_D=I_Q} \quad (1-4)$$

r_d 的数值是随工作点电流的增大而减小的，通常正向交流电阻 r_d 为几欧姆到几十欧姆之间。

r_d 的数值还可从二极管的伏安特性表达式 (1-1) 导出，即

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{U_T}{I_Q} \quad (\text{当 } T=300\text{K 时, } U_T=26\text{mV}) \quad (1-5)$$

例如，当 Q 点 $I_Q=2\text{mA}$ 时， $r_d=13\Omega$ 。

7) 最高工作频率 f_M 。PN 结具有电容效应，它的存在限制了二极管工作频率。如果通过二极管的信号频率超过管子的最高工作频率，则结电容的容抗变小，高频电流将直接从结电容通过，二极管的单向导电性变差。

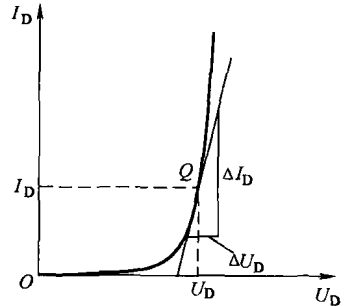


图 1-12 交流电阻 r_d 的几何意义