

高等学校应用型特色规划教材

电子技术基础

(第2版)

喻 嵘 赵 安 虞文鹏 主 编
王艳庆 副主编



- 面向应用型人才培养
理论知识与实训内容紧密结合
- 案例导向型的内容设置
典型案例+实际工作过程+课后习题
- 立体化的教材体系
免费提供电子教案、习题答案和相关资料

清华大学出版社



高等学校应用型特色规划教材

电子技术基础

(第2版)

虞文鹏 主 编
喻 嵘 赵 安 王艳庆 副主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

根据教育部向高等职业教育提出的为制造业和现代服务业培养高技能型紧缺人才的任务,我们组织编写了供数控、模具等专业使用的系列教材。本书是依据这套教材中对“电子技术课程”的要求而编写的。

本书包括模拟电子技术和数字电子技术两大部分,共 11 章。主要内容有:半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器的应用、信号产生电路、直流稳压电源、数字电路基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、半导体存储器、脉冲单元电路、电子设计自动化软件 EWB 的应用。每章配有思考题与习题,帮助学生消化和掌握基本概念与基本知识。EWB 部分为学生提供了虚拟实验平台,使学生可以边学边练,培养学生利用现代化手段分析和设计电子电路的能力。本书具有内容精练、实用性强、通俗易懂、注重新技术和新器件的应用等特点。

本书可作为普通高等院校,高等职业技术学院,高等专科学校及成人和民办高校数控、机电、模具、计算机及自动控制等专业电子技术课程的教材,也可作为机电一体化专业电子技术课程的自学考试教材,还可供有关工程技术人员学习参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础/虞文鹏主编. —2 版. —北京:清华大学出版社,2018

(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 978-7-302-49289-4

I. ①电… II. ①虞… III. ①电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 001414 号

责任编辑:陈冬梅 李玉萍

装帧设计:王红强

责任校对:吴春华

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62791865

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.25 字 数:559 千字

版 次:2006 年 1 月第 1 版 2018 年 4 月第 2 版 印 次:2018 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:58.00 元

产品编号:075826-01

第2版前言

本书第1版出版以后，受到广大读者的肯定。

第2版保留了第1版的基本结构，仍具有实用性强、通俗易懂、方便自学的特点。电子技术课程的教学与实验教学是相互配合的。良好的配合会带来良好的学习效果。考虑到很多读者不具备需要的实验条件，但基本上都有计算机。第2版，考虑了这方面的问题，大部分实验均可在计算机上仿真完成，给读者带来了实验的方便。另外，第2版对第1版做了全面仔细的勘校，对那些由于书写、输入、排版、打印以及校对疏忽而引起的错误，进行了全面的订正，还对第1版个别阐述不清、不妥，导致二义性的地方做了修正。

本书由虞文鹏任主编，并负责审稿和统稿；喻嵘、赵安、王艳庆任副主编。具体编写分工如下：江西经济管理干部学院虞文鹏编写第3、4、5、8、9、11章，南昌大学喻嵘编写第6、7、10章，南昌大学赵安编写第1章，王艳庆编写第2章。

由于编者水平和时间有限，难免有错误和不妥之处，恳请同行和读者批评指正。

编 者

前 言

本书是高等职业技术教育组编写的供机电、数控、模具等专业使用的系列教材之一。它是根据“电子技术课程”教学要求编写,可作为高等职业技术学院,高等专科学校,成人 and 民办高校数控、机电、模具、计算机及自动控制等专业电子技术课程的教材,也可供有关工程技术人员参考。

根据高等职业技术教育的特点,以培养工程应用型人才为主要目标,作者在继承原有高职高专和成人高等院校教材建设成果的基础上,充分汲取近年来各类学校在探索培养技术应用型人才方面取得的成功经验,并结合当前电子技术的最新发展编写了此书。在此书编写过程中始终遵循“精选内容、培养能力、突出应用和理论联系实际”的原则,力求内容深入浅出、文字简明通俗,方便自学。对于常用的基本电路,如反馈放大电路、集成运放、信号运算及处理电路、信号产生电路、直流电源等进行了适当的理论分析和定性分析,且避免了烦琐的公式推导,使概念清楚、实用性强。对于集成触发器、半导体存储器等中大规模的集成电路不讲内部结构的组成,着重于外部特性的分析和应用。最后一章 EWB 部分利用现代化手段为学生提供了虚拟的实验平台。在教师指导下,学生可以在学习理论课程的同时自学 EWB 使用 and 操作方法。应用 EWB,可使电子技术课程教学方便地实现边学边练的教学模式,从而使学生更快更好地掌握理论知识,并熟悉常用电子仪器的使用方法和电子电路的测量方法。每章配有思考题与习题,以帮助学生消化和掌握基本概念和基本知识。

本书在编写过程中也兼顾了全国高等教育自学考试指导委员会颁布的机电一体化专业“电子技术基础自学考试大纲”的要求,因此也可作为机电一体化专业“电子技术课程”的自学考试教材,供个人自学和社会助学使用。

本书具有内容精练、实用性强、通俗易懂、注重新技术和新器件的应用等特点。

本书共 11 章,参加本书编写的有南昌大学沈志勤副教授(第 3、4、5 章)、南昌大学虞礼真教授(第 8、9 章)、南昌大学喻嵘讲师(第 6、7、10 章)、南昌大学赵安副教授和王艳庆讲师(第 2 章)、南昌大学张福阳副教授(第 1 章)和江西省经济管理干部学院虞文鹏(第 11 章),本书由沈志勤任主编,虞礼真、喻嵘任副主编,沈志勤负责全书的审稿和统稿。

由于编者水平和时间有限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请读者和同行批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 半导体器件..... 1	2.4 多级放大电路..... 55
1.1 半导体基础知识..... 1	2.4.1 阻容耦合放大电路 56
1.1.1 本征半导体 1	2.4.2 直接耦合放大电路 58
1.1.2 杂质半导体 3	2.5 差分放大电路..... 60
1.1.3 PN 结及其单向导电性 4	2.6 功率放大电路..... 67
1.2 二极管..... 6	2.6.1 功率放大电路的一般问题 67
1.2.1 二极管结构 6	2.6.2 互补对称功率放大电路 69
1.2.2 伏安特性及主要参数 7	2.7 放大电路的频率特性..... 74
1.2.3 二极管电路的分析方法及 应用..... 9	2.7.1 阻容耦合放大电路的 频率特性..... 74
1.3 稳压二极管..... 11	2.7.2 多级放大电路的频率特性 76
1.4 半导体三极管..... 12	2.8 思考题与习题..... 77
1.4.1 基本结构和类型 12	第 3 章 集成运算放大器的应用 84
1.4.2 电流分配与放大 13	3.1 集成运算放大器..... 84
1.4.3 晶体管的特性曲线及 主要参数..... 14	3.1.1 集成电路的特点 84
1.5 场效应管..... 19	3.1.2 集成运算放大器的 组成和电路符号..... 85
1.5.1 结型场效应管 19	3.2 放大电路中的反馈..... 86
1.5.2 绝缘栅型场效应管 21	3.2.1 反馈的基本概念 86
1.5.3 主要参数及使用注意事项 24	3.2.2 负反馈放大电路的组态 89
1.6 思考题与习题..... 25	3.2.3 负反馈放大电路闭环 增益的一般表达式..... 91
第 2 章 基本放大电路..... 28	3.2.4 深度反馈条件下闭环电压 增益的近似计算..... 92
2.1 放大电路的概念..... 28	3.2.5 负反馈对放大电路性能的 影响..... 96
2.2 三极管放大电路..... 31	3.2.6 放大电路中引入负反馈的 一般原则..... 100
2.2.1 放大电路的组成以及 直流通路与交流通路..... 31	3.2.7 负反馈放大电路的稳定性 101
2.2.2 放大电路的分析方法 33	3.3 集成运算放大器的主要参数及 分析方法..... 102
2.2.3 分压式共发射极放大电路 40	3.3.1 集成运算放大器的 主要参数..... 102
2.2.4 共集电极放大电路 44	3.3.2 理想集成运算放大器及其 分析方法..... 105
2.2.5 共基极放大电路 47	
2.3 场效应管放大电路..... 50	
2.3.1 场效应管放大电路的 偏置电路..... 50	
2.3.2 场效应管放大电路的 动态分析..... 51	

3.4 基本运算电路.....	106	5.4.1 稳压管稳压电路.....	156
3.4.1 比例运算电路.....	106	5.4.2 串联型稳压电路.....	158
3.4.2 加减运算电路.....	108	5.4.3 集成稳压器.....	162
3.4.3 积分和微分电路.....	111	5.5 思考题与习题.....	166
3.4.4 对数和指数运算电路.....	113	第6章 数字电路基础.....	169
3.4.5 乘法和除法运算电路.....	115	6.1 数字电路概述.....	169
3.4.6 基本运算电路应用举例.....	117	6.1.1 数字信号.....	169
3.5 有源滤波电路.....	119	6.1.2 数字电路的优点.....	170
3.5.1 滤波电路的功能与分类.....	119	6.1.3 数字电路的分类.....	170
3.5.2 有源滤波器—— 一阶低通滤波器.....	121	6.1.4 脉冲波形的主要参数.....	171
3.6 思考题与习题.....	122	6.1.5 数制和码制.....	172
第4章 信号产生电路.....	127	6.2 逻辑代数.....	177
4.1 正弦波振荡电路.....	127	6.2.1 基本逻辑运算.....	177
4.1.1 振荡产生的基本原理.....	127	6.2.2 逻辑代数的基本定理与 运算规则.....	181
4.1.2 振荡的平衡条件和 起振条件.....	128	6.3 逻辑函数的建立及其表示方法.....	183
4.1.3 RC 振荡电路.....	129	6.4 逻辑函数的简化.....	185
4.2 非正弦波信号产生电路.....	134	6.4.1 公式化简法.....	185
4.2.1 电压比较器.....	134	6.4.2 卡诺图化简法.....	187
4.2.2 方波发生器.....	138	6.5 思考题与习题.....	195
4.2.3 三角波发生器.....	139	第7章 组合逻辑电路.....	198
4.3 8038 集成函数发生器.....	140	7.1 逻辑门.....	198
4.3.1 ICL 8038 的电路结构及 工作原理.....	140	7.1.1 半导体器件的开关特性.....	199
4.3.2 ICL8038 的性能及其应用.....	141	7.1.2 分立元件门电路.....	203
4.4 思考题与习题.....	143	7.1.3 TTL 集成逻辑门.....	206
第5章 直流稳压电源.....	146	7.1.4 CMOS 集成逻辑门.....	216
5.1 概述.....	146	7.2 小规模组合逻辑电路.....	220
5.2 单相小功率整流电路.....	147	7.2.1 小规模组合逻辑电路的 分析.....	221
5.2.1 单相半波整流电路.....	147	7.2.2 小规模组合逻辑电路的 设计.....	223
5.2.2 单相桥式整流电路.....	149	7.3 常用组合逻辑部件的功能分析.....	226
5.3 滤波电路.....	153	7.3.1 全加器.....	226
5.3.1 电容滤波电路.....	153	7.3.2 编码器.....	227
5.3.2 电感滤波电路与复式 滤波电路.....	154	7.3.3 译码器.....	231
5.3.3 各种滤波电路的比较.....	156	7.3.4 数据选择器.....	237
5.4 稳压电路.....	156	7.3.5 数据比较器.....	240

7.4 采用中规模集成器件实现	
组合逻辑函数.....	242
7.4.1 利用译码器来实现组合	
逻辑函数.....	243
7.4.2 利用数据选择器来实现	
组合逻辑函数.....	244
7.4.3 采用全加器来实现组合	
逻辑函数.....	248
7.5 组合逻辑电路中的冒险现象.....	248
7.5.1 冒险现象及其产生的原因	248
7.5.2 冒险现象的判别与消除	249
7.6 思考题与习题.....	250
第 8 章 时序逻辑电路	257
8.1 触发器.....	257
8.1.1 基本 RS 触发器	257
8.1.2 同步触发器	258
8.1.3 主从触发器	266
8.1.4 边沿触发器	268
8.2 时序逻辑电路.....	271
8.2.1 概述	271
8.2.2 时序逻辑电路的分析方法	272
8.3 寄存器和移位寄存器.....	275
8.4 计数器.....	279
8.4.1 异步计数器	280
8.4.2 同步计数器	285
8.4.3 用中规模器件实现任意模值	
计数器.....	289
8.5 思考题与习题.....	294
第 9 章 半导体存储器	299
9.1 只读存储器.....	299
9.1.1 固定 ROM 的结构和	
工作原理.....	300
9.1.2 可编程只读存储器	301
9.1.3 可擦除可编程只读存储器	
(EPROM 和 E2PROM)	302
9.1.4 用 ROM 实现组合逻辑函数 ...	304

9.2 随机存取存储器.....	306
9.2.1 RAM 的存储单元	307
9.2.2 RAM 的典型产品介绍	308
9.2.3 RAM 的扩展	310
9.3 思考题与习题.....	312

第 10 章 脉冲单元电路

10.1 集成逻辑门构成的脉冲单元电路....	313
10.1.1 集成逻辑门构成的施密特	
触发器.....	314
10.1.2 集成逻辑门构成的单稳态	
触发器.....	317
10.1.3 集成逻辑门构成的自激	
多谐振荡器.....	323
10.2 555 定时器及其应用.....	325
10.2.1 555 定时器的电路结构与	
功能.....	325
10.2.2 由 555 定时器构成的	
施密特触发器.....	326
10.2.3 由 555 定时器构成的单	
稳态触发器.....	328
10.2.4 由 555 定时器构成的自激	
多谐振荡器.....	329
10.3 思考题与习题.....	330

第 11 章 电子设计自动化软件

EWB 的应用

11.1 EWB 的基本使用方法.....	333
11.1.1 EWB 的主窗口	333
11.1.2 EWB 的电路创建	338
11.1.3 虚拟仪器仪表的使用	341
11.1.4 电路的仿真分析	350
11.2 《电子技术基础》仿真实验与	
分析举例.....	351
11.2.1 模拟电路仿真实验与分析 ...	351
11.2.2 数字电路仿真实验与分析 ...	356

参考文献

第 1 章 半导体器件

本章学习目标

本章在简单介绍了半导体的基础知识后,重点介绍三种半导体器件的特性曲线及主要参数。通过对本章的学习,读者应掌握和了解以下知识。

- 了解本征半导体的导电性能,理解 N 型、P 型半导体及 PN 结的形成。
- 了解二极管、稳压管、晶体三极管和场效应管内部结构及电路符号。
- 熟练掌握二极管单向导电性,并理解二极管的电流方程。
- 理解二极管、稳压管、晶体三极管和场效应管的特性曲线及主要参数,并了解选管原则。
- 熟练掌握三极管在放大状态下电流分配关系及放大条件。理解三极管的三种工作状态(放大、饱和、截止)。
- 理解场效应管工作特点,了解一般注意事项。

1.1 半导体基础知识

自然界中存在着各种物质,按导电能力强弱可分为导体(如铜、铝、银等金属)、绝缘体(如橡皮、陶瓷、塑料等),还有一种物质,它的导电能力介于导体和绝缘体之间,这就是半导体。硅(Si)和锗(Ge)是目前制作半导体器件的主要材料。半导体之所以被人们重视,主要原因是它的导电能力在不同条件下有着显著的差异。例如,当有些半导体受到热或光的激发时,导电率明显增长;又如,在纯净的半导体中掺以微量“杂质”元素,此“杂质半导体”导电能力将猛增几千、几万乃至上百万倍。人们就是利用半导体的热敏、光敏特性制作成半导体热敏元件和光敏元件,并利用半导体的掺杂性制造了种类繁多的具有不同用途的半导体器件,如二极管、三极管、场效应管及晶闸管等。

为了解半导体的特殊导电性质,下面将对半导体元素的内部结构、导电原理做一简单介绍。

1.1.1 本征半导体

硅和锗的原子结构模型如图 1.1(a)、(b)所示。两者外层都有四个价电子,都是四价元素。价电子直接影响半导体的导电性能。现将硅和锗的原子结构简化为图 1.1(c)所示的结构。把原子分为惯性核和外围价电子两部分。原子呈电中性,图中的惯性核是将原子核和内层电子看成一个整体,而将外层价电子单独画出,因此惯性核的正电荷量与电子的电荷量相等。

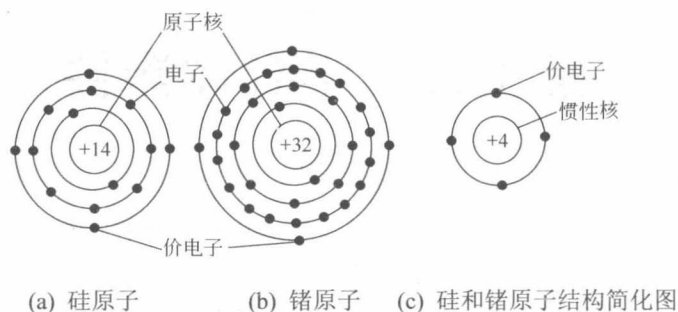


图 1.1 硅和锆的原子结构

天然的硅和锆材料提炼成纯净的单晶体后能制作成各种半导体器件。在单晶半导体中所有原子排列都非常整齐，原子按四角系统组成晶体点阵，每个原子间距相等，每一个原子与相邻的四个原子结合，每一原子的价电子与另一原子的一个价电子组成共用电子对，这对价电子由两个相邻的原子所共有，组成了相邻原子间的共价键结构。共价键对价电子是有束缚作用的。晶体共价键结构的平面示意图如图 1.2 所示。本征半导体就是完全纯净的、具有晶体结构的半导体。

在共价键结构中，原子中最外层的 8 个价电子虽被束缚在共价键中，但不像绝缘体中束缚得那样牢固，当本征半导体受到热或光激发获得一定能量后，价电子即可摆脱原子核的束缚成为自由电子，温度越高，光照越强，晶体中产生自由电子数便越多，导电能力就越强。

在价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子的同时，在共价键上留下了一个空位，称其为空穴，如图 1.3 中 A 处的价电子跑到 B 处，而在 A 处出现了空穴。可见，本征半导体中的自由电子和空穴是成对出现的。因空穴能吸引电子而具有正电性，可认为空穴带正电荷。在外电场的作用下，邻近的价电子极易挣脱原子核的束缚来填补这个空穴，这时，原有的空穴消失而出现了新的空穴，如此进行下去，在半导体中就形成了与价电子的填补运动方向相反的空穴运动，而空穴的移动则可看作是正电荷的运动。

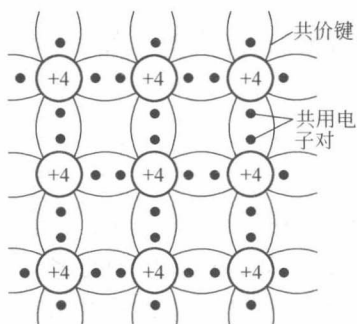


图 1.2 本征半导体的结构示意图

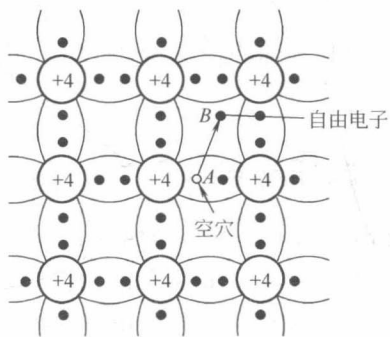


图 1.3 本征半导体自由电子、空穴的形成

当半导体两端加上外加电压后，半导体中有两类做相反运动的导电粒子形成的电流：一类是自由电子做定向运动形成的电流；另一类是被原子核束缚的价电子填补空穴而形成

的空穴电流。自由电子和空穴在半导体中都是导电粒子，称它们为载流子。

半导体中同时存在着自由电子和空穴的导电，这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体与金属导体在导电机理上的本质差别。

在一定温度下，本征半导体中一方面存在着自由电子-空穴对的产生过程，同时还存在着自由电子-空穴对的复合过程。这两个相反作用过程不断地进行，最后达到动态平衡。在本征半导体中，两种载流子数相等。

随着温度的升高，载流子因受热激发而增多，导电能力增强。所以，温度对半导体器件的特性有较大影响。在室温下，本征半导体材料硅中，约在 10^{12} 个原子中才有一个共价键产生一个自由电子-空穴对，而本征半导体材料锗中，约在 10^9 个原子中就有一个共价键产生一个自由电子-空穴对。虽然，锗半导体较硅半导体受温度的影响大，但在室温下，本征半导体中的载流子数仍极少，这对半导体技术无实用价值。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量有用的杂质，使杂质半导体的导电特性得到极大的改善，并能加以控制，从而使半导体材料得到广泛的应用。由于掺入的杂质不同，杂质半导体可分为N型半导体和P型半导体。

1. N型半导体

在本征半导体硅和锗中，掺入微量五价元素磷后，并不改变半导体材料总的晶格结构，只是晶体中某些原子被磷原子所取代，如图1.4(a)所示。五价元素中的四个价电子与硅原子组成共价键后，多余一个价电子。这个价电子很容易受激发，变成自由电子。在杂质半导体中，除了杂质元素释放出自由电子外，半导体本身还存在着本征激发，产生自由电子-空穴对。由于增加了杂质元素所释放出来的电子数，导致这类杂质半导体中的自由电子数远大于空穴数。自由电子导电成为这类杂质半导体的主要导电方式，所以称为电子型半导体，而电子带负电(Negative)，又称为N型半导体。在N型半导体中，自由电子为多数载流子(简称多子)，空穴为少数载流子(简称少子)。

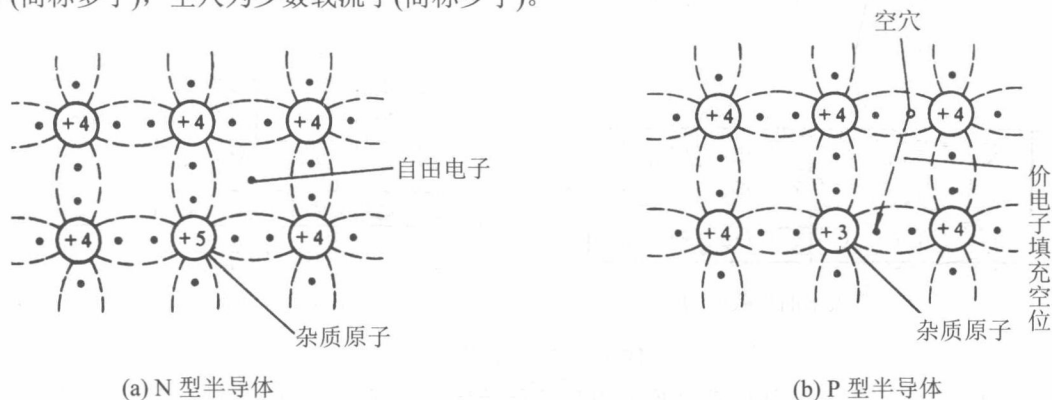


图 1.4 杂质半导体结构示意图

2. P 型半导体

在本征半导体硅和锗中，掺入微量三价元素如硼，杂质原子取代晶体中某些晶格中的硅或锗原子，如图 1.4 (b)所示。三价元素的三个价电子与周围四个原子组成共价键时缺少一个电子而产生了空位。在室温下，价电子几乎能填满杂质元素上的全部空位，由此半导体中产生了与杂质元素原子数相同的空穴，另外，半导体中同时还有少量的本征激发产生的自由电子-空穴对。显然，在这类半导体中，空穴数就远大于自由电子数。导电时以空穴为主，故称空穴型半导体，而空穴带正电(Positive)，又称 P 型半导体。在 P 型半导体中，空穴为多数载流子(简称多子)，自由电子为少数载流子(简称少子)。

无论是 N 型半导体，还是 P 型半导体，都是一种载流子占多数，另一种载流子数量较少，因此，杂质半导体又称为双极型(两种极性)半导体。

1.1.3 PN 结及其单向导电性

杂质半导体增强了半导体的导电能力。利用半导体制作工艺，使一块半导体的一边是 N 型，另一边是 P 型，在它们的交界面，就形成了 PN 结。PN 结具有单一型(N 型或 P 型)半导体所不具有的新特性，利用这种新特性可以制造出各种半导体器件，如二极管、三极管和场效应管等。

1. PN 结的形成

P 区的多子是空穴，N 区的多子是自由电子，由于 PN 结交界处两侧同类载流子浓度(单位体积内的载流子数)差异极大，形成了高浓度的多子向低浓度的少子一侧的扩散运动，即图 1.5(a)中，P 区的多子空穴向 N 区扩散，而 N 区的多子自由电子则向 P 区扩散。自由电子和空穴都是载流子，扩散的结果，在交界面 P 区一侧因失去了空穴而出现了负离子区，而 N 区一侧因失去自由电子出现了正离子区。正负离子都被束缚在晶格内不能移动。于是在交界面两侧形成了正、负空间电荷区。在空间电荷区内可以认为载流子已被“耗尽”，故又称耗尽区或耗尽层，如图 1.5(b)所示。

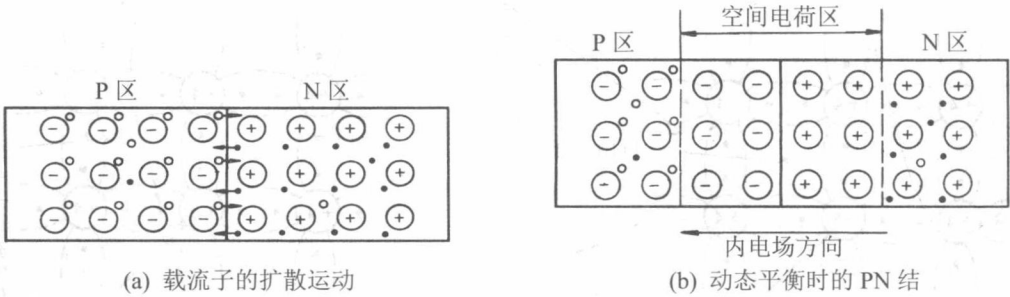


图 1.5 PN 结的形成

由图 1.5(b)可见，空间电荷区形成以后，电荷区产生了一个由 PN 结自身建立的电场，称自建电场(或内电场)。自建电场的方向由 N 区指向 P 区。因自建电场阻碍了多子的继续扩散，所以空间电荷区又称阻挡层。自建电场虽阻挡多子的扩散，却有利于少数载流子的

运动。P区的少子自由电子和N区的少子空穴循着自建电场方向的运动，称为少子的漂移。可见，多子的扩散和少子的漂移是两类方向相反的运动。当扩散和漂移的载流子数相等，PN结两侧的两种运动达到动态平衡时，自建电场的强度及PN结的宽度就处于稳定状态。一般PN结的宽度约为数十微米。

由于空间电荷区内有不能移动的正、负离子，相当于平行板电容器，因此，PN结具有电容效应，称其为结电容。

2. PN结的单向导电性

处于平衡状态下的PN结是没有实用价值的。PN结的基本特性——单向导电性，只有在PN结上外加电压时才能显示出来。

1) 外加正向电压

图1.6表示PN结加上正向电压时的电路图。P区接电源正极，N区接负极，称PN结正向偏置(简称正偏)。由图1.6可见，外加电场与自建电场的方向相反。P区的空穴和N区的自由电子都要向空间电荷区移动，要和原有的一部分正、负离子中和，致使空间电荷量减少，空间电荷区变窄，内电场相应被削弱，这种情况更有利于P区空穴和N区的电子向相邻区的扩散运动，由此形成扩散电流即PN结的正向电流。PN结正向导通时的电阻和压降都很小，理想情况下，可认为正向导通时的电阻等于0，导通压降等于0。

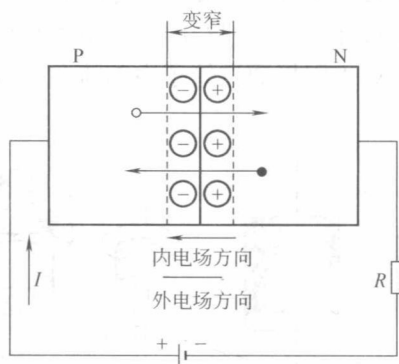


图1.6 PN结加上正向电压时的电路

2) 外加反向电压

图1.7表示PN结加上反向电压时的电路图。P区接电源的负极。N区接正极，称PN结反向偏置(简称反偏)。由图1.7可见，外加电场与自建电场的方向一致。P区的空穴和N区的自由电子由于外电场的作用都将背离空间电荷区，结果使空间电荷量增加，空间电荷区即阻挡层加宽，内电场加强。内电场加强进一步阻碍了扩散，有利于漂移，P区的自由电子和N区的空穴越过PN结形成漂移电流，就是PN结的反向电流。由于少数载流子数很少，因此反向电流极其微小。反向偏置时的PN结呈高电阻值，理想情况下，反向电阻趋于无穷大，此时PN结的反向电流约为0，称为PN结的截止状态。

由于少数载流子在热激发下载流子数增加，因此，PN结的反向电流将随温度上升而增大。由以上分析可知，当PN结在一定的电压范围内外加正向电压时，处于低电阻的导通状态；当外加反向电压时，处于高电阻的截止状态，这种导电特性，就是PN结的单向导

电性。

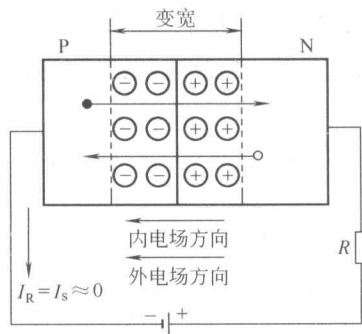


图 1.7 PN 结加上反向电压时的电路

1.2 二极管

1.2.1 二极管结构

半导体二极管是由一个 PN 结加上相应的电极和引线及管壳封装而成。图 1.8 是几种常见的半导体二极管的外形图及其电路符号，文字符号用 D 表示。

由 P 区引出的电极称为阳极(正极)，N 区引出的为阴极(负极)。因为 PN 结的单向导电性，二极管导通时的电流方向是由阳极通过管子内部流向阴极，即图形符号中箭头所示的方向。

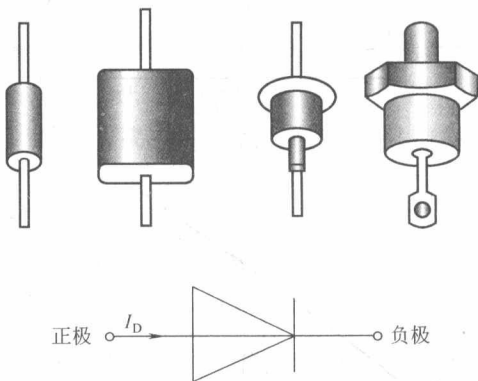


图 1.8 半导体二极管的外形及符号

二极管按结构不同可分面接触型和点接触型两类。按所用晶片材料不同，可分为硅或锗二极管。

面接触型二极管的 PN 结面积大，结电容量大，允许流过的电流也大，适宜于作大功率整流器件；点接触型二极管 PN 结面积小，结电容容量小，能在高频下工作，适用于高频检波和计算机里的开关元件，但它允许流过的电流很小。

1.2.2 伏安特性及主要参数

1. 二极管伏安特性曲线

二极管伏安特性是指流过二极管的电流 I 与二极管两端电压 U 的关系, 可以用特性曲线或电流方程来描述。用实验方法, 在二极管的正极和负极两端加上不同极性和不同数值的电压, 同时测量流过二极管的电流值, 就得到二极管的伏安特性。曲线为非线性, 形状如图 1.9 所示。

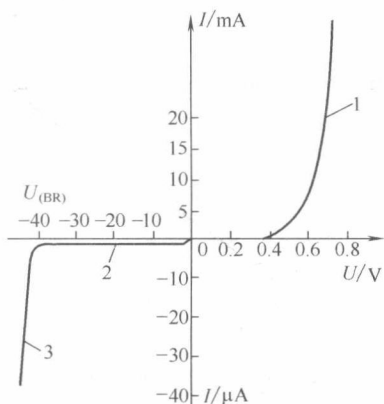


图 1.9 二极管的伏安特性曲线

1) 正向特性

对应于图 1.9 的 1 段, 当正向电压很低时, 正向电流几乎为零, 这是因为外加电压的电场还不能克服 PN 结的自建电场阻挡多数载流子扩散运动的缘故, 二极管呈现高电阻值, 基本上还处于截止状态。当正向电压超过某一值(称此电压为“死区”电压, 记作 U_{th} , 它随管子材料及环境温度而变化), 此时二极管才呈现低电阻值, 处于正向导通状态。硅管的死区电压约为 0.5V, 锗管约为 0.1V。正向导通后的二极管管压降变化较小, 硅管为 0.6~0.7V, 锗管为 0.2~0.3V, 记作 $U_{D(on)}$ 。

温度对二极管的正向特性有显著影响, 温度升高时二极管正向特性曲线向左移, 死区电压及导通压降都有所减小。实验表明, 温度每升高 1℃, 二极管导通压降下降 2~2.5mV。

2) 反向特性

对应于图 1.9 的 2 段, 反向电压在一定范围内增大时, 反向电流极其微小且基本不变(理想情况认为反向电流为零), 所以称反向饱和电流, 记作 I_s 。当温度上升 10℃, 反向饱和电流增加一倍, 这点应注意。

3) 击穿特性

对应于图 1.9 的 3 段, 当反向电压增加到所产生的外电场能把原子外层电子强制拉出, 而使载流子数目急剧增加, 反向电流突然增大, 此时对应的电压称反向击穿电压。结果使二极管失去单向导电性, 管子在正、反向电压下都导通。管子因通过较大电流会过热而损坏, 使用时一定要注意。

2. 二极管的电流方程

根据理论分析, 半导体二极管的伏安特性可用下述方程描述

$$I = I_s \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

式中 I ——通过二极管的电流;

U ——加在二极管两端的电压;

I_s ——二极管的反向饱和电流;

U_T ——温度的电压当量, $U_T = kT/q$ 。 k 是玻尔兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 是热力学温度; q 是电子电荷量, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 当 $T = 300 \text{ K}$ 时, $U_T = 26 \text{ mV}$ 。

式(1-1)称为二极管方程。

当外加正向电压 $U \gg U_T$ 时:

$$e^{\frac{U}{U_T}} \gg 1$$

式(1-1)简化为

$$I \approx I_s e^{\frac{U}{U_T}} \quad (1-2)$$

这时流过二极管的正向电流随外加正向电压按指数规律上升。

当外加反向电压 $|U| \gg U_T$ 时, $e^{\frac{-U}{U_T}} \ll 1$, 则

$$I = -I_s \quad (1-3)$$

可见, 反向电压达到一定值后, 反向电流就是反向饱和电流 I_s , I_s 不随反向电压大小而变化, 但与温度有关。

3. 二极管的主要参数

参数和伏安特性同样反映出二极管的电性能, 它们是正确的选用二极管的依据。

1) 最大整流电流 I_F

它是指管子长期工作时, 允许流过二极管的最大正向平均电流, 这是二极管的重要参数, 如果使用中超出此值, 会引起 PN 结过热而损坏。对于大功率二极管, 为了降低结温, 提高管子的负载能力, 要求管子安装在规定的散热面积的散热器上使用。

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反向工作峰值电压, 一般为反向击穿电压的 $1/3 \sim 1/2$ 。例如 2CP10 硅二极管的击穿电压为 50 V , 那么, 该二极管工作时所能承受的反向峰值电压应小于 16 V , 可保证不被反向击穿。

3) 反向峰值电流 I_R

它是二极管加上反向工作电压时的反向饱和电流。 I_R 值越小, 二极管的单向导电性越好。使用时应注意温度对反向电流的影响。硅管反向电流较小, 一般在几微安以下, 而锗管的反向电流为硅管的几十到几百倍。硅管热稳定性好, 且反向击穿电压也高, 但锗管的死区电压及导通管压降较硅管低, 有些场合就需要选用锗管。

4) 最高工作频率 $f_{\max}$

$f_{\max}$ 主要由 PN 结电容大小来决定。超过此值, 二极管的单向导电性变差, 甚至会失去

单向导电性。

1.2.3 二极管电路的分析方法及应用

二极管的应用范围极广，它可用于整流电路、检波电路及限幅电路，也可用于元件的保护以及在脉冲数字电路中用作开关元件等。

在具体应用时如果二极管的正向压降远小于和它串联的电路的电压，反向电流远小于和它并联的电路的电流，则可忽略二极管的正向压降和反向电流对电路的影响，即认为二极管具有理想伏安特性，常用图 1.10 中的曲线和符号来表示。

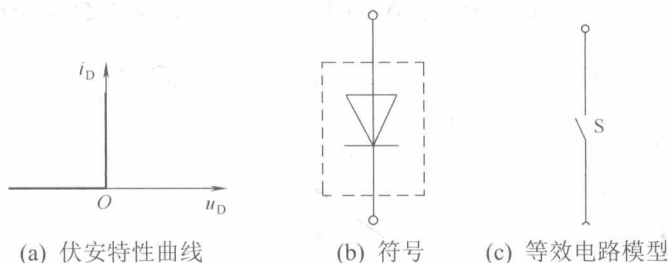


图 1.10 理想二极管模型

在分析电路时，理想二极管可用一个理想开关 S 来等效，如图 1.10(c)所示。正偏时 S 闭合，反偏时 S 断开。

若二极管的工作电流处于伏安特性曲线的近似指数部分，即使电流变化，二极管的端电压也基本不变。因此可用一条与实际伏安特性曲线基本重合的垂直曲线，如图 1.11(a)所示。相应的电路模型叫恒压源模型，如图 1.11(b)所示。电路模型中 $U_{D(on)}$ 是二极管恒定导通电压，对硅管可取 $0.7V$ ，对锗管可取 $0.3V$ 。利用二极管恒压源模型时，只有当二极管两端正向电压大于 $U_{D(on)}$ 时，二极管才有电流通过，小于 $U_{D(on)}$ 时，二极管理想截止。这个模型与二极管实际伏安特性较为接近。

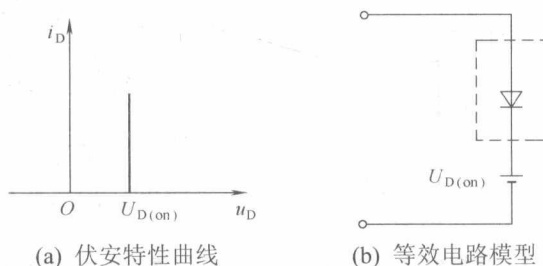


图 1.11 二极管恒压模型

【例 1-1】简单的二极管电路如图 1.12 所示，二极管为硅管， $R=2k\Omega$ ，试用二极管的理想模型和恒压降模型求出 $V_{DD}=2V$ 和 $V_{DD}=10V$ 时回路电流 I_o 和输出电压 U_o 的值。

解 将二极管用图 1.10 所示理想模型和图 1.11 所示恒压降模型代入，可分别作出图 1.12(a)所示电路的等效电路，如图 1.12(b)、(c)所示，由图可分别求出 I_o 和 U_o 。

(1) $V_{DD}=2V$ 。

由图 1.12(b)可得