



21世纪高职高专规划教材·机电系列

# 模拟电子技术与应用

陈彤 主编  
王媛 副主编



清华大学出版社  
<http://www.tup.com.cn>



北京交通大学出版社  
<http://press.bjtu.edu.cn>

21.世纪高职高专规划教材·机电系列

# 模拟电子技术与应用

陈 彤 主 编  
王 媛 副主编

清华大学出版社  
北京交通大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书共分7章,包括常用半导体器件及其应用、基本放大电路和多级放大电路、放大电路中的反馈、差动放大电路与集成运算放大电路、功率放大电路、信号的产生及波形变换和综合实训等内容。本书结合高职高专学生的特点,以及目前倡导的“基于工作过程导向”理念,书中每一章都尽可能多地穿插与本章内容相关的实验及实用电路介绍,书中第7章还介绍了常用电子仪器的使用、对讲机和收音机的制作和调试,使理论教学与实际应用很好地结合。本书着重培养学生的实际操作能力,力求避免复杂的公式推导和计算。

本书为高职高专电气信息类(含自动化、电子信息工程等)专业的教材,也可供从事电子技术工作的人员参考。

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 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术与应用 / 陈彤主编. — 北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社, 2010.7

(21世纪高职高专规划教材·机电系列)

ISBN 978-7-5121-0202-6

I. ①模… II. ①陈… 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142061号

责任编辑:刘 洵

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969 <http://www.tup.com.cn>  
北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414 <http://press.bjtu.edu.cn>

印刷者:北京瑞达方舟印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:15.75 字数:393千字

版 次:2010年7月第1版 2010年7月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-0202-6/TN·73

印 数:1~4 000册 定价:26.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。  
投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: [press@bjtu.edu.cn](mailto:press@bjtu.edu.cn)。

## 出版说明

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分，它的根本任务是培养生产、建设、管理和服务第一线需要的德、智、体、美全面发展的高等技术应用型专门人才，所培养的学生在掌握必要的基础理论和专业知识的基础上，应重点掌握从事本专业领域实际工作的基本知识和职业技能，因而与其对应的教材也必须有自己的体系和特色。

为了适应我国高职高专教育发展及其对教学改革和教材建设的需要，在教育部的指导下，我们在全中国范围内组织并成立了“21世纪高职高专教育教材研究与编审委员会”（以下简称“教材研究与编审委员会”）。“教材研究与编审委员会”的成员单位皆为教学改革成效较大、办学特色鲜明、办学实力强的高等专科学校、高等职业学校、成人高等学校及高等院校主办的二级职业技术学院，其中一些学校是国家重点建设的示范性职业技术学院。

为了保证规划教材的出版质量，“教材研究与编审委员会”在全国范围内选聘“21世纪高职高专规划教材编审委员会”（以下简称“教材编审委员会”）成员和征集教材，并要求“教材编审委员会”成员和规划教材的编著者必须是从事高职高专教学第一线的优秀教师或生产第一线的专家。“教材编审委员会”组织各专业的专家、教授对所征集的教材进行评选，对所选教材进行审定。

目前，“教材研究与编审委员会”计划用2~3年的时间出版各类高职高专教材200种，范围覆盖计算机应用、电子电气、财会与管理、商务英语等专业的主要课程。此次规划教材全部按教育部制定的“高职高专教育基础课程教学基本要求”编写，其中部分教材是教育部《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》的研究成果。此次规划教材按照突出应用性、实践性和针对性的原则编写并重组系列课程教材结构，力求反映高职高专课程和教学内容体系改革方向；反映当前教学的新内容，突出基础理论知识的应用和实践技能的培养；适应“实践的要求和岗位的需要”，不依照“学科”体系，即贴近岗位，淡化学科；在兼顾理论和实践内容的同时，避免“全”而“深”的面面俱到，基础理论以应用为目的，以必要、够用为度；尽量体现新知识、新技术、新工艺、新方法，以利于学生综合素质的形成和科学思维方式与创新能力的培养。

此外，为了使规划教材更具广泛性、科学性、先进性和代表性，我们希望全国从事高职高专教育的院校能够积极加入到“教材研究与编审委员会”中来，推荐“教材编审委员会”成员和有特色的、有创新的教材。同时，希望将教学实践中的意见与建议，及时反馈给我们，以便对已出版的教材不断修订、完善，不断提高教材质量，完善教材体系，为社会奉献更多更新的与高职高专教育配套的高质量教材。

此次所有规划教材由全国重点大学出版社——清华大学出版社与北京交通大学出版社联合出版，适合于各类高等专科学校、高等职业学校、成人高等学校及高等院校主办的二级职业技术学院使用。

21世纪高职高专教育教材研究与编审委员会

2010年7月



# 前言

本书是在多年教学实践的基础上,以目前倡导的“基于工作过程导向”理念为指导编写的。

随着经济的迅猛发展,传统的教育模式已经不能适应现代企业和社会对人才的需要。在传统的职业教育中,教学内容指向专业理论知识和抽象的专业技能,而高职高专教育培养的是面向企业生产一线的技术性、实用性人才,因此,要求专业基础课的教学应以“必需”、“够用”为原则,以掌握基本知识为核心,注重方法的学习和动手能力的培养,教学中力求避免复杂的公式推导和计算。

模拟电子技术是一门实验性很强的课程,离不开实验,因此,本书在传统内容的基础上,在每一章中都配有与本章内容相适应的实验内容,使理论和实验有机地结合起来,使学生通过实验加深对本章内容的理解,增强学生的感性认识,使学习更具有目的性和实践性。本书在每一章中还根据内容的不同,穿插了一些实用电路介绍,这些实用电路贴近生活,简便易学,使学生感受到模拟电子技术在实际生活中的应用,从而引起学生学习模拟电子技术的兴趣。本书教学既可以按照传统的教学模式循序进行,也可以按照“基于工作过程导向”的理念,从实用电路开始介绍,建立任务导向。

本书可作为高等职业院校电气信息类(含自动化、电子信息工程等)专业的模拟电子技术基础教材,也可供从事电子技术工作的人员参考。为方便学生自习和复习,书中每章都附有小结和习题,并有习题解答和电子课件,仅供教师和学生参考。本书习题解答和电子课件可在北京交通大学出版社网站 <http://press.bjtu.edu.cn> 下载。

本书由大连职业技术学院陈彤担任主编,大连职业技术学院王媛担任副主编,大连职业技术学院王晓芳参编。其中陈彤编写了第2章、第3章、第4章和前言,王媛编写了第1章、第7章、附录,王晓芳编写了第5章、第6章。王媛对部分实用电路作了分析,王晓芳提供了全书的习题及习题解答。本书的课件由陈彤、王媛、王晓芳共同完成。全书由陈彤统稿。本书在编写过程中得到了大连职业技术学院马玉国老师的大力支持和帮助,特在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中的错误或不当之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2010年7月

# 目 录

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 第1章 常用半导体器件及其应用 ..... | (1)  |
| 1.1 半导体的基础知识 .....    | (1)  |
| 1.1.1 半导体的特性 .....    | (1)  |
| 1.1.2 半导体的结构 .....    | (2)  |
| 1.1.3 本征半导体 .....     | (3)  |
| 1.1.4 杂质半导体 .....     | (3)  |
| 1.1.5 PN结 .....       | (5)  |
| 1.2 半导体二极管 .....      | (7)  |
| 1.2.1 二极管的结构和类型 ..... | (7)  |
| 1.2.2 二极管的伏安特性 .....  | (8)  |
| 1.2.3 二极管的主要参数 .....  | (9)  |
| 1.2.4 二极管的应用 .....    | (10) |
| 1.2.5 特殊二极管 .....     | (11) |
| 实验 半导体二极管的检测实验 .....  | (15) |
| 1.3 单相整流滤波电路 .....    | (17) |
| 1.3.1 单相半波整流电路 .....  | (17) |
| 1.3.2 单相全波整流电路 .....  | (18) |
| 1.3.3 单相桥式整流电路 .....  | (19) |
| 1.3.4 倍压整流电路 .....    | (20) |
| 1.3.5 滤波电路 .....      | (20) |
| 实验 桥式整流滤波电路实验 .....   | (23) |
| 1.4 晶体管 .....         | (25) |
| 1.4.1 三极管的结构和类型 ..... | (26) |
| 1.4.2 三极管的特性曲线 .....  | (29) |
| 1.4.3 三极管的主要参数 .....  | (31) |
| 1.4.4 三极管的温度特性 .....  | (33) |
| 实验 半导体三极管的检测实验 .....  | (33) |
| 1.5 场效应管 .....        | (35) |
| 1.5.1 结型场效应管 .....    | (36) |
| 1.5.2 绝缘栅场效应管 .....   | (40) |
| 1.5.3 场效应管的特点 .....   | (43) |
| 1.6 直流稳压电源电路 .....    | (44) |
| 1.6.1 硅稳压管稳压电路 .....  | (45) |
| 1.6.2 串联型稳压电路 .....   | (47) |

|                                |              |
|--------------------------------|--------------|
| 1.6.3 集成稳压电源 .....             | (48)         |
| 1.6.4 开关型稳压电源 .....            | (51)         |
| 实验 场效应管的检测实验 .....             | (53)         |
| 本章小结 .....                     | (55)         |
| <b>第2章 基本放大电路和多级放大电路 .....</b> | <b>(61)</b>  |
| 2.1 晶体管基本放大电路 .....            | (61)         |
| 2.1.1 晶体管在放大电路中的三种连接方式 .....   | (61)         |
| 2.1.2 晶体管基本放大电路的组成和工作原理 .....  | (62)         |
| 2.1.3 晶体管共射极放大电路的分析方法 .....    | (66)         |
| 2.2 分压偏置式放大器 .....             | (74)         |
| 2.2.1 分压偏置式放大器的电路结构 .....      | (74)         |
| 2.2.2 分压偏置式放大电路稳定工作点的原理 .....  | (75)         |
| 实验 晶体管共射极单管放大器实验 .....         | (78)         |
| 2.3 其他组态放大器 .....              | (81)         |
| 2.3.1 共集电极放大电路——射极跟随器 .....    | (81)         |
| 2.3.2 共基极放大电路 .....            | (83)         |
| 2.3.3 三种组态放大电路的性能比较 .....      | (84)         |
| 实验 射极跟随器的参数测试 .....            | (85)         |
| 2.4 场效应晶体管的基本放大电路 .....        | (88)         |
| 2.4.1 场效应管放大电路的组成 .....        | (88)         |
| 2.4.2 场效应管放大电路的分析 .....        | (89)         |
| 2.5 多级放大电路及复合管 .....           | (90)         |
| 2.5.1 电子电路的一般组成方式 .....        | (90)         |
| 2.5.2 多级放大电路的耦合方式 .....        | (91)         |
| 2.5.3 多级放大电路的分析 .....          | (92)         |
| 2.5.4 复合晶体管 .....              | (94)         |
| 2.6 放大电路的频率响应 .....            | (95)         |
| 2.6.1 放大电路的频率特性 .....          | (95)         |
| 2.6.2 影响放大电路频率特性的因素 .....      | (96)         |
| 2.6.3 多级放大电路的频率特性 .....        | (96)         |
| 本章小结 .....                     | (97)         |
| <b>第3章 放大电路中的反馈 .....</b>      | <b>(103)</b> |
| 3.1 反馈的基本概念 .....              | (103)        |
| 3.1.1 反馈的定义和分类 .....           | (103)        |
| 3.1.2 基本负反馈电路分析 .....          | (105)        |
| 3.1.3 多级放大电路负反馈类型的判别 .....     | (106)        |
| 3.1.4 反馈放大电路的一般表达式 .....       | (109)        |
| 3.2 负反馈对放大电路性能的影响 .....        | (110)        |
| 3.2.1 提高电路增益的稳定性 .....         | (110)        |

|       |                        |       |
|-------|------------------------|-------|
| 3.2.2 | 减小非线性失真 .....          | (111) |
| 3.2.3 | 抑制环路内的噪声和干扰 .....      | (112) |
| 3.2.4 | 扩展通频带 .....            | (112) |
| 3.2.5 | 改变输入和输出电阻 .....        | (112) |
| 3.3   | 深度负反馈电路的分析计算 .....     | (114) |
| 3.3.1 | 引入负反馈的一般原则 .....       | (114) |
| 3.3.2 | 深度负反馈放大电路的特点 .....     | (115) |
| 3.3.3 | 深度负反馈放大电路的估算 .....     | (115) |
| 3.3.4 | 负反馈放大电路的稳定性问题 .....    | (117) |
|       | 实验 负反馈放大电路实验 .....     | (119) |
|       | 本章小结 .....             | (122) |
| 第4章   | 差动放大电路与集成运算放大电路 .....  | (127) |
| 4.1   | 差动放大电路 .....           | (127) |
| 4.1.1 | 零点漂移 .....             | (127) |
| 4.1.2 | 差动放大电路的构成及信号分析 .....   | (128) |
| 4.2   | 差动放大电路的输入、输出方式 .....   | (130) |
| 4.2.1 | 双端输入、双端输出 .....        | (130) |
| 4.2.2 | 单端输入、单端输出 .....        | (131) |
| 4.3   | 差动放大电路的改进电路 .....      | (133) |
| 4.3.1 | 恒流源式差动放大电路 .....       | (133) |
| 4.3.2 | 恒流源式差动放大电路的工作原理 .....  | (134) |
|       | 实验 差动放大器实验 .....       | (135) |
| 4.4   | 集成运算放大器 .....          | (138) |
| 4.4.1 | 集成运算放大器的基本组成 .....     | (138) |
| 4.4.2 | 集成运算放大器的主要性能指标 .....   | (139) |
| 4.4.3 | 集成运算放大器工作的两个重要特点 ..... | (140) |
| 4.5   | 集成运算放大器的应用 .....       | (141) |
| 4.5.1 | 比例运算电路 .....           | (141) |
| 4.5.2 | 求和运算电路 .....           | (143) |
| 4.5.3 | 积分和微分运算电路 .....        | (145) |
| 4.5.4 | 电压比较器 .....            | (146) |
| 4.5.5 | 有源滤波器 .....            | (148) |
|       | 实验 集成运算放大器基本电路实验 ..... | (150) |
|       | 实验 电压比较器实验 .....       | (155) |
|       | 本章小结 .....             | (158) |
| 第5章   | 功率放大电路 .....           | (163) |
| 5.1   | 功率放大器的特点及分类 .....      | (163) |
| 5.1.1 | 功率放大器的特点 .....         | (163) |
| 5.1.2 | 功率放大器的分类 .....         | (164) |



|                                   |       |
|-----------------------------------|-------|
| 5.2 常见的几种功率放大电路 .....             | (165) |
| 5.2.1 乙类双电源互补对称功率放大器 (OCL) .....  | (165) |
| 5.2.2 甲乙类互补对称功率放大器 .....          | (167) |
| 5.3 集成功率放大器及其应用 .....             | (170) |
| 5.3.1 TDA2030A 音频集成功率放大器的简介 ..... | (170) |
| 5.3.2 TDA2030A 集成功放的典型应用 .....    | (170) |
| 实验 低频功率放大器 (I) ——OTL 功率放大器 .....  | (171) |
| 实验 低频功率放大器 (II) ——集成功率放大器 .....   | (175) |
| 本章小结 .....                        | (179) |
| <b>第6章 信号的产生及波形变换</b> .....       | (182) |
| 6.1 正弦波振荡的基础知识 .....              | (182) |
| 6.1.1 正弦波振荡的振荡条件 .....            | (182) |
| 6.1.2 起振和稳幅 .....                 | (183) |
| 6.1.3 振荡电路的组成和分类 .....            | (183) |
| 6.1.4 振荡电路的分析方法 .....             | (184) |
| 6.2 RC 正弦波振荡电路 .....              | (184) |
| 6.2.1 RC 正弦波振荡电路 .....            | (184) |
| 6.2.2 RC 串并联式正弦波振荡电路 .....        | (186) |
| 6.3 LC 正弦波振荡电路 .....              | (187) |
| 6.3.1 LC 并联回路的频率特性 .....          | (187) |
| 6.3.2 变压器反馈式 LC 振荡电路 .....        | (189) |
| 6.3.3 电感三点式 LC 正弦波振荡电路 .....      | (190) |
| 6.3.4 电容三点式 LC 正弦波振荡电路 .....      | (191) |
| 6.4 石英晶体振荡器 .....                 | (192) |
| 6.5 用集成时基电路 555 构成的矩形波发生器 .....   | (195) |
| 6.5.1 电路组成 .....                  | (195) |
| 6.5.2 工作原理 .....                  | (195) |
| 6.6 8038 多种函数信号发生集成电路 .....       | (196) |
| 6.6.1 8038 的工作原理 .....            | (196) |
| 6.6.2 8038 的典型应用 .....            | (197) |
| 实验 LC 正弦波振荡器实验 .....              | (197) |
| 实验 函数信号发生器的组装与调试 .....            | (200) |
| 实验 频率可调的方波——三角波发生器 .....          | (202) |
| 本章小结 .....                        | (205) |
| <b>第7章 综合实训</b> .....             | (208) |
| 7.1 常用电子仪器的认识及使用 .....            | (208) |
| 7.1.1 示波器 .....                   | (209) |
| 7.1.2 交流毫伏表 .....                 | (215) |
| 7.1.3 XD-2 型低频信号发生器 .....         | (216) |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 7.1.4 直流稳压电源 .....         | (217) |
| 7.1.5 万用表 .....            | (218) |
| 7.2 对讲机的制作与调试 .....        | (223) |
| 7.2.1 对讲机的工作原理 .....       | (223) |
| 7.2.2 对讲机的制作 .....         | (223) |
| 7.2.3 对讲机的调试 .....         | (227) |
| 7.3 半导体收音机的装配与调试 .....     | (227) |
| 7.3.1 半导体收音机的简介 .....      | (227) |
| 7.3.2 半导体收音机的装配 .....      | (228) |
| 7.3.3 收音机的调试 .....         | (232) |
| 7.3.4 收音机的验收 .....         | (233) |
| 本章小结 .....                 | (233) |
| 附录 A 半导体器件型号命名方法 .....     | (235) |
| 附录 B 常用半导体二极管型号和主要参数 ..... | (236) |
| 附录 C 常用三极管型号和主要参数 .....    | (237) |
| 参考文献 .....                 | (239) |

# 第1章 《》《》

## 常用半导体器件及其应用



### 本章要点

- (1) 二极管的结构和主要特性及几种特殊二极管的应用。
- (2) 晶体三极管的类型、结构和工作原理；场效应管的结构和工作原理。
- (3) 直流稳压电源的原理及相关计算。

本章首先讨论 PN 结的形成及特点；然后讨论了普通二极管的结构和主要特性，以及几种特殊二极管的应用；接着讨论晶体三极管的类型、结构、工作原理、特性曲线及对三极管电路的基本分析方法的研究；最后讨论场效应管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数等。

### 1.1 半导体的基础知识

在自然界中，所有物质按其导电能力的强弱，可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。导电能力特别强的物质，被称为导体，如金、银、铜、铝等；导电能力非常差或者几乎不导电的物质，被称为绝缘体，如塑料、橡胶、陶瓷等，这些材料在电力系统中得到了广泛的应用。还有一些物质它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，被称为半导体。常用的半导体材料有硅、锗、硒、砷化镓及金属氧化物和硫化物等。在电子技术的发展史上，由于半导体不是良好的导电材料，也不是可靠的绝缘材料，所以长期受到冷遇。直到 1947 年，科学家在实验中发现半导体材料具有一些特殊的性能，同时制成了第一只晶体三极管，并逐渐取代了耗电大、体积笨重的真空电子管，这才使电子技术得到飞跃发展，引发了电子学领域的第二次革命。在这个基础上进一步发展起来的集成电路技术，更是把电子产品的小型化和高可靠性大大向前推进，并在国民经济各个领域获得了广泛的应用。

#### 1.1.1 半导体的特性

半导体之所以得到广泛的应用，是因为它具有一些独特的性质。

##### 1. 热敏特性

半导体对温度很敏感，其电阻率随着温度的升高而显著减小。例如纯锗，温度每升高  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  它的电阻率就会减少到原来的一半左右。尽管该特性对半导体器件的工作性能有不利

影响,但是由于半导体的电阻率对温度的变化反应灵敏,而且大都具有负的温度系数,所以人们利用这一特性制成了各种自动控制装置中常用的热敏电阻传感器和能迅速测量物体温度变化的半导体点温计等。

## 2. 光敏特性

半导体对光照很敏感,光照射时,其电阻值会显著减小。例如硫化镉半导体薄膜,在没有光照射时,电阻高达几十兆欧;受到光照射时,电阻可降到几十千欧,相差上千倍。人们利用这一特性制成了光敏电阻、光电二极管、光电三极管及太阳能电池等。

## 3. 杂敏特性

半导体对杂质很敏感,在纯净的半导体中掺入微量杂质,可以显著改变它的导电能力。例如,在纯硅中掺入亿分之一的硼元素,其导电能力可以增加两万以上。所以人们利用这一特性制成了不同性能、不同用途的半导体器件,如二极管、三极管、晶闸管、场效应管、各种集成电路,以及可以发出红、绿、黄等光线的形形色色的半导体发光器件。半导体之所以具有上述独特的性质,其根本原因就在于半导体的特殊结构。

### 1.1.2 半导体的结构

自然界的一切物质都是由原子组成的。而原子又是一个带正电的原子核与若干个带负电的电子所组成。电子分层围绕原子核做不停的旋转运动,其中内层的电子受原子核的吸引力较大,外层的电子受原子核的吸引力较小。因此,外层的电子如果获得外来的能量,就容易挣脱原子核的束缚而成为自由电子。人们把最外层的电子叫作价电子,物质的导电性能与价电子数目有关。价电子的数目越接近于8个,物质的化学结构也就越稳固。对于金属材料,其价电子数一般少于4个,因此金属中的价电子很容易变成自由电子,所以金属是良导体;对于单质绝缘体,其价电子数一般多于4个,因此绝缘体中的价电子被原子核牢牢地吸引着,很难形成自由电子,所以不能导电;对于半导体材料,其价电子数为4个,其原子的外层电子既不像金属那样容易挣脱出来,也不像绝缘体那样被原子核紧紧束缚住,因此半导体的导电性能也就比较特殊。

一般半导体都是晶体结构,所以半导体管又叫做晶体管。最常见的半导体材料为硅和锗,它们的结构如图1-1所示。

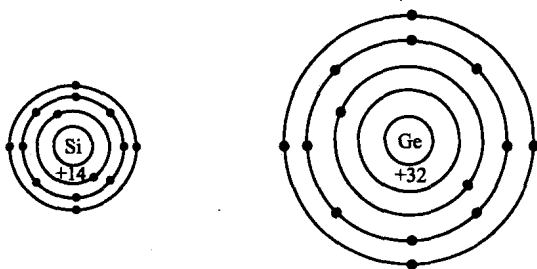


图1-1 硅和锗原子结构平面示意图

由图1-1可见,每个原子的最外层都有4个价电子。各个原子的4个价电子不仅受自身原子核的束缚,而且还与周围相邻的4个原子发生联系,这些价电子,在围绕其自身的原子核运动的同时还常出现在相邻原子所属的轨道上。这样,相邻的原子就靠互相共用的价电

子而连接在一起,如图1-2所示。共用价电子使两个相邻原子间产生一种束缚力,使之不能分开。这种相邻原子共用价电子形成的束缚作用称为共价键。

每个硅(或锗)原子有4个价电子,分别跟4个与其相邻原子的价电子组成了4个共价键。此时,硅(或锗)原子最外层具有8个电子,处于较为稳定的状态,原子的这种组合构成了所谓的晶体的共价键结构。

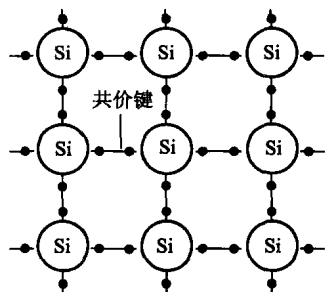


图1-2 硅单晶的共价键平面模型

### 1.1.3 本征半导体

纯净的不含任何杂质的半导体被称为本征半导体。本征半导体需要用复杂的工艺和技术才能制造出来。目前用于制造半导体器件的材料有硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等,其中以硅和锗最为常用。

#### 1. 本征半导体中的两种载流子

本征半导体硅(或锗)共价键中的价电子不像绝缘体中的价电子被束缚得那样紧,在一定温度或光照下,本征半导体中少数价电子因受热而获得能量,摆脱原子核的束缚,从共价键中挣脱出来,成为自由电子。与此同时,失去价电子的硅(或锗)原子在该共价键上留下了相同数量的空位,这个空位称为空穴,这种现象被称为本征激发。在本征半导体中,每激发出来一个自由电子,就必然在共价键上留下一个空穴,可见自由电子与空穴总是相伴而生、成对出现的,所以称其为“自由电子—空穴对”。自由电子带负电荷,空穴是因为原子失去电子而产生的,故带正电荷。由于它们都是携带电荷的粒子,因此称自由电子为电子载流子,称空穴为空穴载流子。

#### 2. 两种导电方式

在没有外加电场作用时,自由电子和空穴的运动是杂乱无章的,不会形成电流。当半导体两端加上外电场时,半导体中将会出现两部分电流:一部分是自由电子在外电场作用下逆电场方向运动形成的电子电流;另一部分是空穴在外电场作用下顺电场方向运动形成的空穴电流。由于自由电子和空穴所带的电荷极性相反,它们的运动方向也是相反的,所以形成的电流方向是一致的,即流过外电路的电流等于两者之和。温度愈高,本征激发产生的“自由电子—空穴对”愈多,即载流子数目愈多,产生的电流愈大。

在半导体中,同时存在着自由电子导电和空穴导电,这是半导体导电方式的最大特点。

#### 3. 自由电子和空穴的复合

在本征半导体中,由于本征激发而产生的自由电子和空穴会不会不断增多呢?不会的!因为热运动中自由电子和空穴如果相遇,则空穴会被自由电子填补掉,两种载流子就会一起消失,这个过程称为自由电子和空穴的复合过程。产生的两种载流子的浓度愈高,复合过程也进行得愈快,因此,在一定温度下,两种载流子的产生和复合最终要达到平衡。半导体在一定温度下,它的单位体积中存在着一定数值的“自由电子—空穴对”,该数值被称为热平衡值。

### 1.1.4 杂质半导体

在本征半导体中,由于载流子数量极少,导电能力很弱,故其实用价值不大。如果在其

中掺入某些微量元素，就可以大大提高其导电能力。例如，在硅本征半导体中掺入百万分之一的其他微量元素，它的导电能力就会增强一百万倍。掺入的微量元素被称为杂质，掺入杂质后的本征半导体被称为杂质半导体。杂质半导体有 P 型半导体和 N 型半导体两大类。

### 1. P 型（空穴型）半导体

如果在本征硅（或锗）中掺入微量的三价元素硼，则掺入的硼原子取代了某处硅（或锗）原子的位置，硼原子有 3 个价电子，只能与相邻的 3 个硅（或锗）原子的价电子组成共价键，而与其相邻的第 4 个硅（或锗）原子的价电子就没有价电子与其“共有”，这个键因缺少一个自由电子而形成了一个空穴。在室温下，这些空穴容易捕捉附近的价电子来填补它，如图 1-3 所示。这样，掺入硼杂质的硅（或锗）半导体中就具有相当数量的空穴载流子，这种半导体主要靠空穴导电，所以被称为空穴型半导体，简称为 P 型半导体。三价硼原子的空穴位置接受一个价电子后带上一个负电荷，使杂质原子变成了负离子，它们被固定在晶格中不能移动，也不参与导电。另外，在 P 型半导体中由于热运动还产生少量的自由电子—空穴对。总之，在 P 型半导体中，不但有数量很多的空穴，而且还有少量的自由电子存在，空穴是多数载流子，自由电子是少数载流子。

### 2. N 型（电子型）半导体

如果在本征硅（或锗）中掺入微量的五价元素磷，则掺入的磷原子取代了某处硅（或锗）原子的位置，磷原子有 5 个价电子，其中 4 个将分别与相邻硅（或锗）原子的价电子组成共价键，多余一个价电子受磷原子核束缚力较弱，很容易挣脱磷原子而成为自由电子，如图 1-4 所示。这样，掺入磷杂质的硅（或锗）半导体中就具有相当数量的自由电子载流子，这种半导体主要靠自由电子导电，所以被称为电子型半导体，简称为 N 型半导体。五价的磷原子失去一个价电子后带上一个正电荷，因此，杂质原子变成了正离子，它们被固定在晶格中不能移动，也不参与导电。另外，在 N 型半导体中由于热运动还产生少量的自由电子—空穴对。总之，在 N 型半导体中，不但有数量很多的自由电子，而且还有少量的空穴存在，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子。

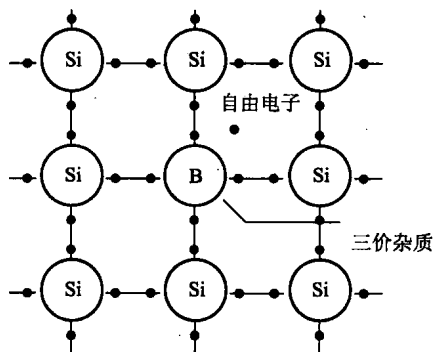


图 1-3 P 型半导体

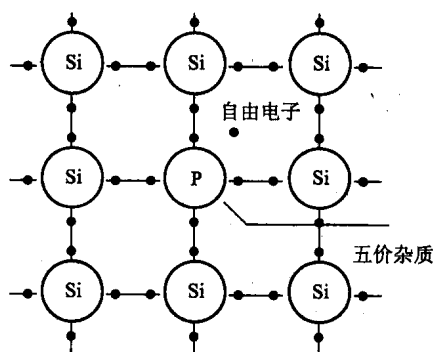


图 1-4 N 型半导体

应该指出的是，在杂质半导体中，本征激发所产生的载流子浓度远小于掺杂所带来的载流子浓度。但是掺杂并没有破坏半导体内正、负电荷的平衡状态，它既没有失去电子，也没有获得电子，仍呈电中性，对外是不带电的。



### 1.1.5 PN 结

单纯的一块P型半导体或N型半导体，只能作为一个电阻元件。但是如果通过一定的生产工艺把一块半导体的P区部分和N区部分结合在一起，则它们的交界处就会形成一个具有特殊性能的薄层，称为PN结。PN结具有单向导电性，它是二极管、三极管、晶闸管及半导体集成电路等半导体器件的核心部分。

#### 1. PN 结的形成过程

##### 1) 内电场的建立

如图1-5所示，一块半导体的左边为P区，右边为N区。由于P区与N区之间存在着载流子浓度的显著差异：P区空穴多、自由电子少；N区自由电子多、空穴少，所以在P型和N型半导体交界面两侧同类型载流子存在浓度差，P型半导体中多数载流子空穴就会向N型半导体内扩散；N型半导体中多数载流子自由电子会向P型半导体内扩散，如图1-5所示。这种由浓度差引起的载流子的运动被称为扩散运动。例如，N区的自由电子浓度大于P区，N区的自由电子就要向P区运动，扩散到P区的自由电子将与空穴复合而消失。同理，P区的空穴也要向N区扩散，并与N区的自由电子复合。交界面两侧两种载流子复合的结果就出现了由不能移动的正负两种杂质离子所组成的空间电荷区，产生一个从N区指向P区的内电场，如图1-6所示。

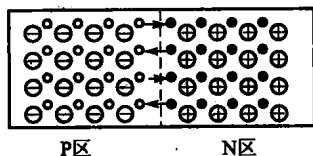


图1-5 PN 结中的扩散运动

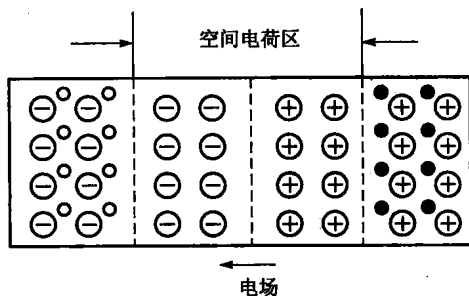


图1-6 空间电荷区的形成

##### 2) 内电场对载流子的作用

内电场形成后，一方面其电场力会阻碍多数载流子的扩散运动，把P区向N区扩散的空穴推回P区，把N区向P区扩散的自由电子推回N区。另一方面，其电场力将推动P区少数载流子自由电子向N区运动，推动N区少数载流子空穴向P区运动，这种少数载流子在电场作用下产生的运动被称为漂移运动。

由上面的分析知道，内电场有两个作用：阻碍多数载流子的扩散运动；有利于少数载流子的漂移运动。

##### 3) PN 结的形成

扩散运动和漂移运动是互相联系，又互相矛盾的。在开始形成空间电荷区时，多数载流子的扩散运动占优势，随着扩散运动的进行，空间电荷区逐渐加宽，内电场逐步加强。多数载流子的扩散运动逐渐减弱，而少数载流子的漂移运动则逐渐增强。当漂移运动和扩散运动处于动态平衡状态时，空间电荷区不再发生变化，形成了具有一定宽度空间电荷区的平衡

PN 结, 平衡 PN 结中的合成电流显然等于零。PN 结具有阻碍载流子扩散的特性, 因此又称为“阻挡层”或“势垒”; PN 结的空间电荷区内的载流子浓度已减小到耗尽程度, 因此又称为“耗尽层”。

## 2. PN 结的特性

由以上分析可以看出, 要使 PN 结通过电流, 就必须给 PN 结外加合适的电压, 以破坏扩散和漂移两者的平衡。

### 1) 外加正向电压 (PN 结正向偏置)

在图 1-7 中, P 区接电源正极, N 区接电源负极, 称为正向偏置。此时在外电场的作用下, 两区的多数载流子被推向空间电荷区, P 区的空穴将抵消部分负离子的空间电荷区; N 区的自由电子将抵消部分正离子的空间电荷区。因此, 空间电荷区的电荷量将减少, 耗尽层变窄, 结果内电场被削弱, 载流子的扩散大于漂移, 多数载流子的扩散电流能顺利地通过 PN 结形成正向电流  $I_F$ , PN 结的正向电阻是很小的, 故能形成较大的正向电流, 这种情况称为 PN 结的正向导通。

### 2) 外加反向电压 (PN 结反向偏置)

在图 1-8 中, P 区接电源负极, N 区接电源正极, 称为反向偏置。此时在外电场的作用下, 两区的多数载流子背离空间电荷区并留下更多的杂质离子。因此, 空间电荷区的电荷量将增多, 耗尽层变宽, 结果内电场加强, 载流子的扩散难以进行, 造成漂移大于扩散, 多数载流子受阻, 两区的少数载流子在内电场作用下漂移过 PN 结形成反向电流  $I_R$ 。由于在室温下, 少数载流子的浓度很低, 所以反向电流极小, 并反映出很大的反向电阻, 这种情况称为 PN 结的反向截止。

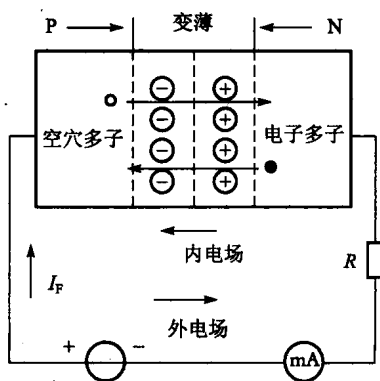


图 1-7 PN 结加正向电压

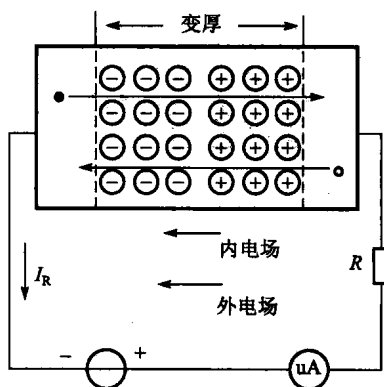


图 1-8 PN 结加反向电压

另外, 由于少数载流子是由激发产生的, 在一定温度下, 反向电流不仅很小, 而且基本上不随外加反向电压而变化, 故被称为反向饱和电流, 并用  $I_S$  表示。

综上所述, 外加正向电压时, PN 结的正向电阻很小, 正向电流  $I_F$  较大, 是多数载流子的扩散运动形成的, 此时 PN 结正向导通; 外加反向电压时, PN 结的反向电阻很大, 反向电流  $I_R$  很小, 是少数载流子的漂移运动形成的, 此时 PN 结反向截止。PN 结的这种特性被称为单向导电性。

## 1.2 半导体二极管

一个 PN 结加上相应的两根外引线，然后用塑料、玻璃或铁皮等材料做外壳封装就成为最简单的二极管。

### 1.2.1 二极管的结构和类型

从二极管 P 区引出的外引线称为二极管的阳极，从二极管 N 区引出的外引线称为二极管的阴极，如图 1-9 (a) 所示。二极管的符号如图 1-9 (b) 所示，其中三角箭头表示正向电流的方向，正向电流从二极管的阳极流入，阴极流出。

二极管有许多种类型。从工艺上分，有点接触型和面接触型；从材料上分，有硅二极管和锗二极管；从用途上分，有整流管、检波二极管、稳压二极管、光电二极管和开关二极管等。

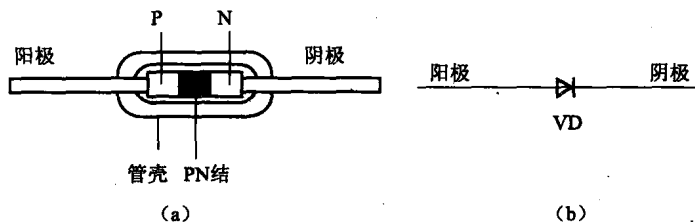


图 1-9 二极管的结构和符号

(a) 二极管结构；(b) 二极管符号

#### 1. 点接触型二极管

点接触型二极管如图 1-10 所示。这是用一根含杂质元素的金属丝压在半导体晶片上，经特殊工艺、方法，使金属丝上的杂质掺入到晶体中，从而形成导电类型与原晶体相反的区域而构成的 PN 结，因而其结面积小，允许通过的电流小，但结电容小，工作频率高，适用于作高频检波器件。

#### 2. 面接触型二极管

面接触型二极管如图 1-11 所示。由于面接触型二极管的 PN 结接触面积较大，PN 结电容较大，一般适用于在较低的频率下工作；由于接触面积大，允许通过较大电流和具有较大功率容量，适用于作整流器件。

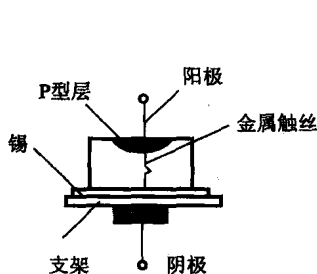


图 1-10 点接触型二极管

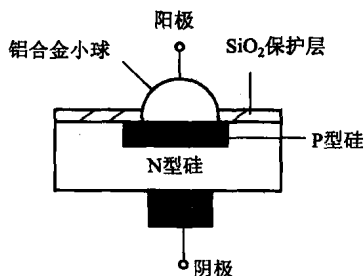


图 1-11 面接触型二极管