



21世纪高等学校计算机学科系列教材

电路与电子技术

(中册·模拟电子技术)

张纪成 主编

魏永继 张兴会 副主编

李大友 主审

全国高等学校计算机教育研究会
课程与教材建设委员会推荐出版



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪高等学校计算机学科系列教材

电路与电子技术

(中册·模拟电子技术)

张纪成 主 编
魏永继 张兴会 副主编

李大友 主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是在《高等教育面向 21 世纪教学内容与课程体系改革研究》的基础上编写的,是 21 世纪计算机学科的一门技术基础课教材,也是高等学校规划教材。本书根据社会发展对计算机专业人材的知识结构需求,将电路原理和电子技术内容进行认真梳理和研究,突出概念,突出应用,突出新技术和新产品。全书分为上、中、下三册。上册为电路原理部分,中册为模拟电子技术部分,下册为数字电子技术部分。中册包括:半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、正弦波振荡电路、稳压电源,共 5 章。本书内容简明,语言流畅,通俗易懂,保证基础,突出重点,立足应用。每章有丰富的例题和习题,各章前有概述,后有小结,书后有部分习题答案。

本书是为计算机专业本科生编写的教材,也适合于电子、电气、自动化、通信机电一体化等专业本科生、大专生及成人教育多学时教材或参考书,也可供工程技术人员自学使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电路与电子技术(中册·模拟电子技术)/张纪成主编. —北京:
电子工业出版社,2002. 8

21 世纪高等学校计算机学科系列教材
ISBN 7-5053-7825-2

I. 电… II. 张… III. ①电路理论—高等学校—教材②电子技术—高等学校—教材 IV. ① TM13 ② TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 051734 号

责任编辑:宋 漪 特约编辑:王宝祥

印 刷:北京李史山胶印厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:13.5 字数:347.7 千字

版 次:2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 次印刷

印 数:6 000 册 定价:17.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

序 言

这套教材是面向 21 世纪计算机学科系列教材。为什么要组织这套教材？根据什么编写这套教材？这些都是在这篇序言中要回答的问题。

计算机学科是一个飞速发展的学科，尤其是近十年来，计算机向高度集成化、网络化和多媒体化发展的速度一日千里。但是，从另一个方面来看，目前高等学校的计算机教育，特别是教材建设，远远落后于现实的需要。现在的教材主要是根据《教学计划 1993》的要求组织编写的。这个教学计划，在制定过程中主要参照了美国 IEEE 和 ACM 的《教学计划 1991》。

10 年来，计算机学科已有了长足发展，这就要求高等学校计算机教育必须跟上形势发展的需要，在课程建设和教材建设上做出相应调整，以适应面向 21 世纪计算机教育的要求。这是组织这套教材的初衷。

为了组织好这套教材，全国高等学校计算机教育研究会课程与教材建设委员会在天津召开了“全国高等学校计算机学科课程与教材建设研讨会”，在北京召开了“教材编写大纲研讨会”。在这两次会议上，代表们深入地研讨了全国高校计算机专业教学指导委员会和中国计算机学会教育委员会制定的《计算机学科教学计划 2000》以及美国 IEEE 和 ACM 的《计算机学科教学计划 2001》，这是这套教材参照的主要依据。

IEEE 和 ACM 的《计算机学科教学计划 2001》是在总结了从《计算机学科教学计划 1991》到现在，计算机学科十年来发展的主要成果的基础上诞生的。它认为面向 21 世纪计算机学科应包括 14 个主科目：算法与分析 (AL)、体系结构 (AR)、离散结构 (DS)、计算科学 (CN)、图形学、可视化、多媒体 (GR)、网络计算 (NC)、人机交互 (HC)、信息管理 (IM)、智能系统 (IS)、操作系统 (OS)、程序设计基础 (PF)、程序设计语言 (PL)、软件工程 (SE)、社会、道德、法律和专业问题 (SP)。其中除 CN 和 GR 为非核心主科目外，其他 12 项均为核心主科目。

将 2001 教学计划与 1991 教学计划比较可看出：

(1) 在 1991 年计划中，离散结构只作为数学基础提出，而在 2001 计划中，则作为核心主科目提出，显然，提高了它在计算机学科中的地位。

(2) 在 1991 计划中，未提及网络计算，而在 2001 计划中，则作为核心主科目提出，以适应网络技术飞速发展的需求。

(3) 图形学、可视化与多媒体也是为适应发展要求新增加的内容。

除此之外，2001 计划在下述 5 个方面做调整：

将程序设计语言引论调整为程序设计基础，将人-机通信调整为人机交互，将人工智能与机器人学调整为智能系统，将数据库与信息检索调整为信息管理，将数值与符号计算调整为计算科学。

显然，这些变化使 2001 计划更具有科学性，也更好地适应了学科发展的需要。

在组织这套教材的过程中，充分考虑了这些变化和调整，在软件和硬件的课程体系、界面划分方面均做了相应的调整，使整套教材更具有科学性和实用性。

另外，还要说明一点，教材建设既要满足必修课的要求，又要满足限选课和任选课的要求。因此，教材应按系列组织，反映整个计算机学科的要求，采用大拼盘结构，以适应各校不同的具

体教学计划,使学校可根据自己的需求进行选择。

这套教材包括:《微机应用基础》、《离散数学》、《电路与电子技术》、《电路与电子技术习题与实验指南》、《数字逻辑与数字系统》、《计算机组成原理》、《微型计算机接口技术》、《计算机体系结构》、《计算机网络》、《计算机网络实验教程》、《通信原理》、《计算机网络管理及系统开发》、《网络信息系统集成》、《多媒体技术》、《计算机图形学》、《计算机维护技术》、《数据结构》、《计算机算法设计与分析》、《计算机数值分析》、《汇编语言程序设计》、《Pascal 语言程序设计》、《VB 程序设计》、《C 语言程序设计》、《C++ 语言程序设计》、《Java 语言程序设计》、《操作系统原理》、《UNIX 操作系统原理与应用》、《Linux 操作系统》、《软件工程》、《数据库系统原理》、《编译原理》、《编译方法》、《人工智能》、《计算机信息安全》、《计算机图像处理》、《人机交互》、《计算机伦理学》。对于 IEEE 和 ACM 的《计算机学科教学计划 2001》中提出的 14 个主科目,这套系列教材均涵盖,能够满足不同层次院校、不同教学计划的要求。

这套系列教材由全国高等学校计算机教育研究会课程与教材建设委员会主任李大友教授精心策划和组织。编者均为具有丰富教学实践经验的专家和教授。所编教材体系结构严谨、层次清晰、概念准确、论理充分、理论联系实际、深入浅出、通俗易懂。

教材组织过程中,得到了哈尔滨工业大学蒋宗礼教授,西安交通大学董渭清副教授,武汉大学张焕国教授,吉林大学张长海教授,福州大学王晓东教授,太原理工大学余雪丽教授等的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

李大友
2000 年 6 月

前 言

本书是根据2000年3月ACM和IEEE/SC联合专题组发表的《Computing Curricula 2000》报告,并结合我国高等院校计算机本科教学的实际情况编写的。它是21世纪计算机学科的一门技术基础课教材,也是高等学校规划教材。其内容是在《高等教育面向21世纪教学内容与课程体系改革研究》的基础上确定的。

本书除具有计算机专业所设《电路与电子技术》课程全部基本内容外,还充分考虑到培养21世纪人才所必须具备的基础扎实、知识面宽、能力强和素质高的特点。为此,我们注意了以下几点。

(1)重点突出基本理论、基本知识和基本技能的内容,了解电子技术发展概况,为学习计算机学科后续课程及从事有关工程技术、科学研究打好理论和实践基础。

(2)为了适应教学内容和课程体系改革研究,本教材分成上、中、下三册。其中,上册为电路原理部分,中册为模拟电子技术部分,下册为数字电子技术部分。计算机及相关专业可根据教学计划选用。

(3)为了反映现代电子技术的新成果、新技术和新发展,本教材加强了模拟集成电路、大规模集成电路、数字逻辑与数字系统的内容介绍,并且有由现场片PROM,PLA,PAL,GAL到门阵列片FPGA以及在系统编程ISP的用户片。随着集成电路和教学内容的更新换代和发展,即使数字系统的设计发生重大变化,上述内容也会为有关课程的教学体系、教学内容和人才培养奠定必要的基础。

(4)突出电子技术应用知识,重点介绍常用集成电路芯片的功能和使用方法,为计算机后续有关课程打下应用基础,如谐振、有源滤波、数/模、模/数转换器等。

(5)为便于教与学,每章配有多种类型的例题和习题。例题是为巩固基本概念、基础知识、扩充基本内容所用,多数不用讲述,学生可以自学理解。各章习题有为加强理解基本内容的基本习题,也有为加深理解基本理论、基本概念,起到举一反三之功效的较难习题。除此之外,还有接近实际的应用习题,以便开拓视野,掌握实际应用知识。同时,部分习题配有答案。每章前面有概述,后面有小结,以便于学生加深理解、掌握本章主要内容及主要概念。

本书由天津师范大学张纪成担任主编,魏永继、张兴会担任副主编。张纪成编写上册第1,2,5,6章,中册第1,2章(部分),下册第7,8章(部分)及全书统稿工作;李冰编写上册第3,4章,中册第2章(部分),4章;张兴会编写中册第3章,下册第7章(部分)及部分统稿工作;李燕荣编写下册第1,2,3,4,5,6章;魏永继编写中册第2章(部分),5章,下册第9章及部分统稿工作;许景春编写上册第2章(部分),第5章(部分)。

北京工业大学李大友教授担任主审并对编写大纲及编写内容给予指导和关心。在编写过程中,得到天津师范大学计算机系马希荣副教授、天津职业技术师范学院计算机系刘光然副教授、赵洁副教授等的支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平和知识的局限性,加上时间仓促,谬误之处在所难免,希望广大读者提出宝贵意见,以便修改和提高。

编 者
2002年2月

目 录

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 半导体器件的基本知识	(1)
1.1.1 半导体器件的导电特性.....	(1)
1.1.2 本征半导体.....	(1)
1.1.3 杂质半导体.....	(2)
1.2 PN 结	(3)
1.2.1 PN 结形成	(3)
1.2.2 PN 结的单向导电性	(4)
1.3 半导体二极管	(5)
1.3.1 半导体二极管基本结构.....	(5)
1.3.2 半导体二极管伏安特性.....	(6)
1.3.3 半导体二极管主要参数.....	(7)
1.4 特殊二极管	(9)
1.4.1 稳压管.....	(9)
1.4.2 光电器件	(11)
1.4.3 光电耦合器	(13)
1.5 半导体三极管	(13)
1.5.1 半导体三极管的基本结构	(13)
1.5.2 半导体三极管的电流分配与放大原理	(14)
1.5.3 特性曲线	(16)
1.5.4 半导体三极管的主要参数	(18)
1.5.5 半导体三极管的选择	(20)
1.6 场效应管	(20)
1.6.1 N 沟道增强型绝缘栅型场效应管	(20)
1.6.2 N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管	(23)
1.6.3 P 沟道绝缘栅场效应管	(24)
1.6.4 场效应管主要参数	(24)
本章小结	(25)
习题 1	(25)
第 2 章 基本放大电路	(28)
2.1 基本放大电路的组成	(28)
2.1.1 共发射极基本放大电路	(28)
2.1.2 共发射极基本放大电路的化简	(28)
2.2 基本放大电路的静态分析	(29)
2.2.1 估算法	(29)
2.2.2 图解法	(29)
2.2.3 静态工作点的调整.....	(30)

2.3	基本放大电路的动态分析	(30)
2.3.1	微变等效电路	(31)
2.3.2	电压放大倍数	(32)
2.3.3	动态电阻	(33)
2.3.4	基本放大电路图解分析	(35)
2.4	静态工作点的稳定	(37)
2.4.1	温度对静态工作点的影响	(38)
2.4.2	分压式偏置电路	(38)
2.4.3	静态分析	(39)
2.4.4	稳定静态工作点的原理	(41)
2.4.5	动态分析	(41)
2.5	共集电极放大电路	(43)
2.5.1	静态分析	(43)
2.5.2	动态分析	(44)
2.6	放大电路中的负反馈	(47)
2.6.1	放大电路负反馈的基本概念	(47)
2.6.2	负反馈放大电路的组态	(50)
2.6.3	负反馈对放大电路工作性能的影响	(52)
2.7	多级放大电路	(54)
2.7.1	阻容耦合放大电路	(54)
2.7.2	直流放大电路	(60)
2.8	差分放大电路	(68)
2.8.1	差分放大电路分析	(68)
2.8.2	典型的差分放大电路	(71)
2.9	功率放大电路	(76)
2.9.1	最简单的功率放大电路——射极输出器	(76)
2.9.2	互补对称功率放大电路	(77)
* 2.9.3	大功率功率放大电路	(79)
* 2.9.4	功率放大电路(OCL)介绍	(80)
2.10	集成功率放大电路	(81)
	本章小结	(82)
	习题 2	(82)

第 3 章	集成运算放大器	(87)
3.1	集成运算放大器的简单介绍	(87)
3.1.1	概述	(87)
3.1.2	集成运算放大器的特点	(88)
3.1.3	集成运算放大器的电路说明	(89)
3.1.4	集成运算放大器的主要参数及其简要测试方法	(90)
3.1.5	理想集成运算放大器及其基本组态	(94)
3.2	运算放大器在信号运算方面的应用	(99)
3.2.1	加法运算	(100)
3.2.2	减法运算	(100)
3.2.3	积分运算	(101)

3.2.4	微分运算	(103)
3.2.5	对数与反对数运算	(104)
3.2.6	模拟乘法器	(106)
3.3	运算放大器在信号处理方面的应用	(116)
3.3.1	有源滤波器	(116)
3.3.2	采样保持电路	(121)
3.3.3	电压比较器	(123)
3.4	运算放大器的应用	(128)
3.4.1	矩形波发生器	(129)
3.4.2	三角形波发生器	(129)
3.4.3	锯齿波发生器	(130)
3.4.4	正弦波发生器	(130)
3.5	运算放大器信号变换电路	(132)
3.5.1	电压—时间模数变换器	(133)
3.5.2	电压—频率变换电路	(134)
3.6	运算放大器应用中应该注意的问题	(137)
3.6.1	运算放大器的选择	(138)
3.6.2	运算放大器参数特性的老化和筛选	(139)
3.6.3	运算放大器自激的消除	(140)
3.6.4	运算放大器输出调零	(141)
3.6.5	运算放大器的保护	(143)
3.6.6	扩大输出电路	(144)
3.6.7	数字电位器在运算放大器中的应用	(145)
	本章小结	(146)
	习题3	(146)
第4章	正弦波振荡电路	(152)
4.1	正弦振荡电路的基础知识	(152)
4.1.1	振荡条件	(152)
4.1.2	起振条件	(153)
4.1.3	基本组成	(153)
4.1.4	分析方法	(153)
4.2	RC正弦波振荡电路	(153)
4.2.1	RC串、并联网络的频率特性	(153)
4.2.2	RC正弦波振荡电路的构成	(154)
4.3	LC正弦振荡电路	(155)
4.3.1	LC并联回路的基本特性	(155)
4.3.2	变压器反馈式LC正弦波振荡电路	(156)
4.3.3	电感三点式正弦振荡电路	(157)
4.3.4	电容三点式正弦振荡电路	(158)
4.4	石英晶体振荡器	(158)
4.4.1	石英晶体的基础知识	(159)
4.4.2	石英晶体正弦振荡电路	(160)
	本章小结	(161)

习题 4	(161)
第 5 章 稳压电源	(164)
5.1 电源概述	(164)
5.1.1 电源装置的种类	(164)
5.1.2 稳定电源的发展概况	(164)
5.1.3 稳定电源的主要指标	(165)
5.2 直流稳压电源	(166)
5.2.1 直流稳压原理	(166)
5.2.2 直流稳压电路组成	(167)
5.2.3 性能较好的稳压电源	(177)
5.3 集成稳压电源	(178)
5.3.1 多端输出电压可调集成稳压器	(178)
5.3.2 三端固定输出集成稳压器	(179)
5.4 开关型稳压电源	(184)
5.4.1 开关电源的基本原理	(185)
5.4.2 脉冲变压器耦合开关稳压电路	(185)
5.4.3 开关稳压电源的基本组成	(186)
5.4.4 开关稳压电源的优越性	(188)
5.4.5 集成开关稳压电源设计实例	(188)
5.5 UPS 电源	(189)
5.5.1 不停电电源的种类	(189)
5.5.2 UPS 电源的基本工作原理	(189)
5.5.3 后备式 UPS 电源和在线式 UPS 电源的区别	(190)
本章小结	(192)
习题 5	(192)
部分习题答案	(194)
附 录	(196)
附录 A	(196)
附录 B	(197)
附录 C	(200)
附录 D	(201)
附录 E	(203)

第1章 半导体器件

半导体器件是用半导体材料制成的电子器件,它是现代电子技术的主要组成部分。半导体器件具有体积小、重量轻、耗电少、寿命长、工作可靠等突出优点,因而在现代科学技术各个领域中得到广泛应用。随着电子技术的飞速发展,各种新型半导体器件不断产生,尤其是大规模和超大规模集成电路不断更新换代,致使电子仪器或设备趋于微型化,各种性能指标有了较大提高,因此电子技术处于当代高新技术不可取代的先导地位。

本章首先简要介绍半导体的基本知识,然后重点讨论半导体器件的PN结、物理特性、工作原理、特性曲线和工作参数,最后介绍几种不同类型的半导体器件。

1.1 半导体器件的基本知识

1.1.1 半导体器件的导电特性

半导体的命名,是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间。金、银、铜、铝、银等金属材料都是良导体,电阻率在 $10^{-6} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 之间;而云母、塑料、陶瓷、橡胶等物质的电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,很难导电,所以称为绝缘体。另一类材料如半导体硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体如砷化镓(GaAs)等;其他掺杂或制成其他化合物半导体材料如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。其中,目前最常用的半导体材料是硅。半导体导电率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 之间。

除此之外,半导体材料还具有如下特性:

(1)在纯净半导体中掺入微量的某种杂质,如在纯净硅中掺入百万分之一的硼后,电阻率约从 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 降到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 左右,而它的导电能力可增加百万倍。

(2)环境温度升高时,半导体材料的导电率会明显增加,可以利用这种热敏效应制成各种热敏元件。

(3)光照不仅可以改变半导体的导电率,还可以产生电动势。利用半导体的光电效应可制成光敏电阻、光电池,光敏二极管、光敏三极管等,为人类利用太阳能展现出广阔前景。

(4)一些半导体材料还具有压敏、气敏等特性。

半导体材料具有上述特性的原因在于半导体特殊的导电机理。

1.1.2 本征半导体

1. 半导体的晶体结构

构成半导体器件的材料中,最多的是硅,其次是锗,其原子结构中各有四个价电子,都是四价元素。其原子呈中性,如图1.1所示。外层价电子受原子核束缚最小,半导体的导电性质与价电子有关。原子排列既整齐又紧密,原子间的外层轨道产生交叠。原来属于每个原子的价电子可以转移到相邻的原子;这些电子为整个晶体的所有原子共有,这一特征称为电子的共有化运动。如图1.2所示,两相邻原子各有一个价电子为两个原子直接共有,形成晶格中原子间的一种组成结构,这种结构称为“共价键”,图中为“共价键”平面结构。

值得注意的是,硅或锗的晶体结构是由三维空间内规则排列的、重复的单元晶格组成的。单元晶格为立体结构,每个顶点有一原子。

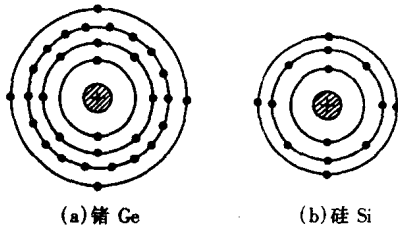


图 1.1 硅和锗的原子结构简化模型

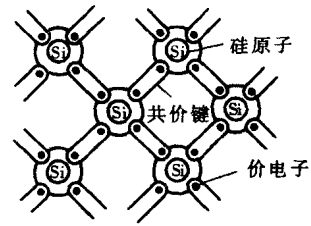


图 1.2 硅和锗的二维晶体结构

2. 本征半导体

本征半导体是完全纯净的,是具有完整晶体结构的半导体。在本征半导体晶体结构中,原子最外层共有 8 个价电子,处于较为稳定的状态。但是共价键中的电子不像在绝缘体中的价电子被束缚得那样紧。在热力学温度 $T=0\text{ K}$ (K 为开尔文)和没有外界影响的条件下,它的价电子均束缚在共价键中,不存在自由运动的电子。但当温度升高,如温度升到室温或者受到光线照射时,某些共价键中的价电子从外界获得了足够的能量,从而挣脱共价键的束缚,离开原子而成为自由电子,同时在共价键中留下相同数量的空位,这种现象称为本征激发,如图 1.3 所示。

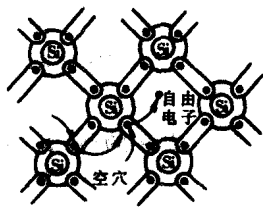


图 1.3 空穴和自由电子形成

当电子挣脱共价键束缚成为自由电子后,共价键中就留下一个空位,这个空位称为空穴。一般情况下,原子呈中性。但当电子挣脱共价键束缚而成为自由电子后,原子的中性便被破坏,呈现带正电。

在外加电场或其他能源的作用下,有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子填补这个空穴,而这个电子原来的位置即共价键中出现另一个空穴,它也可以由相邻原子中的价电子递补,在该原子中又出现一个空穴,如此继续下去,使共价键中出现一定的电荷迁移。空穴与电子的运动方向相反。

空穴运动相当于正电荷运动。

这样,当半导体两端外加电压时,半导体中将出现两部分电流:一部分是自由电子定向运动形成的电子电流,另一部分是共价键中价电子递补空穴形成的空穴电流。这里空穴可以看成带正电的电荷,其电量与电子相等,符号相反。在外电场作用下,可以在半导体中自由地运动,并形成导电电流。因此,自由电子和空穴都称为载流子。

但是,在本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现,同时又不断复合。因此在任何时候,本征半导体中自由电子和空穴的总数相等,只不过总数是非常小的。随着温度升高,由热激发产生的电子与空穴对数目增加,导电性能提高,所以温度对半导体器件的性能影响很大。

1.1.3 杂质半导体

本征半导体中电子、空穴对非常少,导电性能很差。若在本征半导体中掺入微量杂质,即其他元素,就会使半导体的导电性能发生显著变化。

由于掺入杂质不同,杂质半导体可分为 P 型半导体和 N 型半导体两大类型。

1. P 型半导体

在硅或锗的本征半导体中掺入微量的三价元素硼(或铝、镓等),如图 1.4(a)所示,其杂质

硼原子只有三个价电子,与周围的硅原子形成共价键结构。由于硼原子数目比硅原子少得多,因此整个晶体结构基本不变,只是某些位置上的硅原子被硼原子取代了。但是形成的共价键结构中,其中一个键上缺少一个电子,而产生一个空穴,如图 1.4(b)所示。硼杂质的每个原子都可能提供一个空穴,因而使掺入杂质的硅中的空穴大为增加。这种杂质半导体主要靠空穴导电,空穴为多数载流子,电子是少数载流子。所以这种半导体称为空穴型半导体或 P 型半导体。在共价键结构中,相邻共价键结构中的价电子受到热激发或在其他激发条件下获得能量时,可能填补这个空位,使硼原子成为不能移动的负离子,原来的硅原子形成空穴,半导体呈现中性。

从图 1.4 中可见,硼原子因接受电子称为受主杂质或 P 型杂质。

注意:(1) P 型半导体中空穴移动时,并不产生新的自由电子,只是原来晶体本身产生少量电子一空穴对。(2) P 型半导体中的空穴数量多少取决于掺入杂质多少。

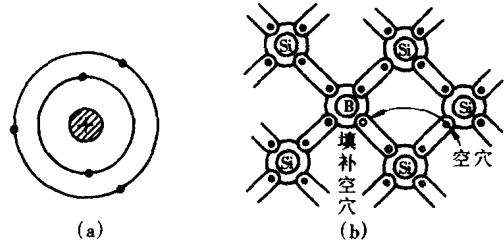


图 1.4 硅晶体中掺硼形成空穴

2. N 型半导体

在硅或锗的晶体中掺入五价元素磷(或砷、锑等),如图 1.5(a)所示。杂质原子取代晶格中某些硅原子的位置,它的五个价电子有四个与周围的硅原子结成共价键。有一个价电子处于共价键之外,杂质原子对这个多余价电子束缚力较弱。在室温下,它可能被激发成自由电子,因此杂质原子变成带正电荷的离子。因为杂质原子可以提供电子,故称为施主原子或施主杂质,即 N 型杂质。含有 N 型杂质的半导体称为 N 型半导体,如图 1.5(b)所示。这种杂质半导体中,电子浓度比同一温度下的本征半导体的电子浓度大许多倍,从而大大加强了半导体的导电能力。因此 N 型半导体中电子为多数载流子,空穴为少数载流子。

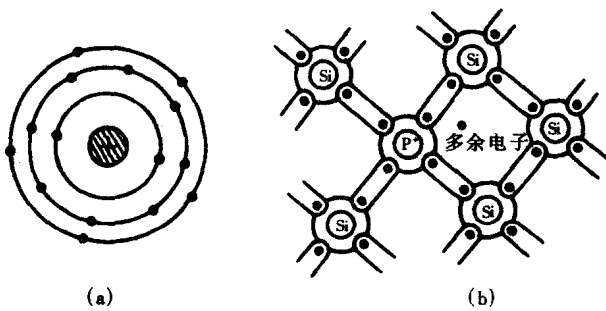


图 1.5 硅晶体中掺磷出现自由电子

1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的形成

本征半导体掺杂后,形成了 P 型或 N 型半导体。在室温下,受主杂质电离为带正电的空穴和带负电的受主负离子。施主杂质电离为带负电的自由电子和带正电的施主离子。除此之外,P 型和 N 型半导体中还有受本征激发产生的电子和

空穴对,但是其数目较 P 型半导体中的空穴或者 N 型半导体中的电子少得多。

应该注意,半导体中正负电荷数目是相等的,它们的作用互相抵消,因而保持电中性。所以不论是 P 型还是 N 型硅都不能直接用于制造半导体器。通常是在一块晶体上,采用掺杂工艺形成 P 型和 N 型半导体,在其交接处形成 PN 结。PN 结是制成各种半导体器件的基础。

在一块晶片上,可以同时制成 P 型和 N 型半导体。P 型半导体含有受主杂质,多数载流子是空穴,少数载流子是电子。N 型半导体含有施主杂质,则多数载流子是电子,而少数载流子是空穴。这里少数载流子是指本征激发产生的。

在 P 型半导体和 N 型半导体结合后,交界面两侧就出现多数载流子电子和空穴浓度的差

别, N型区内电子多, 空穴少; P型的空穴多, 电子少。这种浓度差导致 N型的电子向 P型区运动, P型的空穴向 N型区移动, 如图 1.6 所示。扩散到 P型区的电子与空穴复合而消失, 同时 P型区空穴扩散到 N型区后与电子复合。因此交界面附近区域, 不论是 N型区还是 P型区, 原先的电中性被破坏了。P型区失去空穴, 留下了带负电的杂质离子, 用 \ominus 表示; N型区失去了电子, 留下了带正电的杂质离子, 用 \oplus 符号表示。半导体中的离子虽然带有正电或负电, 但是它们是不可任意移动的, 因此并不参与导电。这些不可移动的带电粒子称为空间电荷, 它们集中在 N型区和 P型区交界面附近, 并形成很薄的空间电荷区, 这个区域称为 PN 结。在这个区域内, 多数载流子已扩散到对方并被复合而消失, 或者说消耗尽了, 所以空间电荷区也称耗尽区。这个区域载流子极少, 电阻率很高。

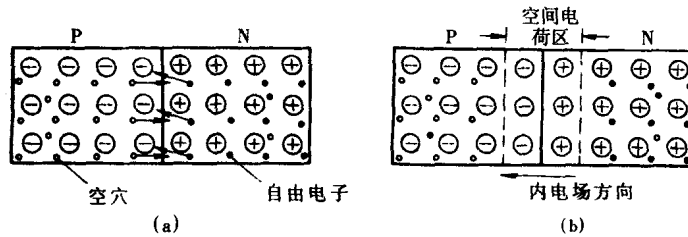


图 1.6 PN 结的形成

出现空间电荷区以后, 自然形成电场, 由 N型区指向 P型区称之为内电场。内电场方向与多数载流子的扩散方向相反, 使得交界区附近空间电荷区加宽, 电场增强, 扩散阻力增大, 阻挡扩散运动。所以有时也称空间电荷区为阻挡层。另一方面, 内电场对 P型区内的少数载流子自由电子和 N型区内的少数载流子空穴可以推动越过空间电荷区向对方运动。这种在内电场作用下, 少数载流子有规则的运动称为漂移运动。漂移运动方向与扩散运动方向相反。从 N型区漂移到 P型区的空穴补充了原来交界区上失去的空穴, 而从 P区漂移到 N区的电子补充了交界区失去的电子, 从而使空间电荷减少, 致使空间电荷区变窄, 其作用正好与扩散运动相反。

由此可见, 扩散运动与漂移运动互相联系, 又相互矛盾。扩散运动使空间电荷区加宽, 内电场增强, 对扩散运动阻力加大; 漂移运动使空间电荷区变窄, 电场减弱, 易于扩散。最后扩散运动和漂移运动达到动态平衡, 使得 P型区的多数载流子空穴向 N型区扩散的数量与 N型区的少数载流子空穴向 P型区漂移的数量相等(自由电子也如此)。达到动态平衡后, 空间电荷区的宽度基本上稳定, 即 PN 结也处于稳定状态。

1.2.2 PN 结单向导电特性

当 PN 结在无外加电压时, 半导体的扩散和漂移运动处于动态平衡。下面讨论外加电压情况。

1. 外加正向电压

在图 1.7 中 P型区接电源的正极, N型区接电源的负极。形成的外加电场与 PN 结内部电场方向相反, 打破了 PN 结的平衡状态。在外电场作用下, P型区的多数载流子空穴进入空间电荷区, 抵消部分 N型区的负空间电荷。同时 N型区的自由电子进入空间电荷区, 抵消部分 P型区的正空间电荷, 致使空间电荷区变窄, 内电场被削弱, 耗尽层载流子增加, 电阻减小。多数载流子的扩散运动增强, 形成较大的扩散电流, 即正向电流, 所以这个方向的外加电压称

为正向偏置,如图 1.7(a)所示。这时扩散运动大于漂移运动,N 型区电子不断扩散到 P 型区,P 型区空穴不断扩散到 N 型区,PN 结内的电流由扩散电流决定。在外电路上形成流入 P 区的电流,称为正向电流 I 。当外加电压升高,PN 结内电场进一步减弱,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,即外加电压增加,则正向电流显著增加。

当外加正向电压时,少数载流子形成的漂移电流方向与扩散电流方向相反,漂移电流数值很小,忽略不计。

2. 外加反向电压

若将外加电压正极加在 N 区,负极加在 P 区,如图 1.7(b)所示。在 PN 结上形成的外加电场的方向与 PN 结内电场方向一致,破坏了扩散与漂移运动的平衡。在这种外加电场的作用下,P 型区内的空穴和 N 型区内电子离开 PN 结,使空间电荷增加,空间电荷区变宽,内电场增强。此时 PN 结处于反向偏置,使得多数载流子扩散运动难于进行。另一方面,内电场增强也加强了少数载流子的漂移运动。在外电场的作用下,N 型区中的少数载流子空穴越过 PN 结进入 P 型区,P 型区中的少数载流子越过 PN 结进入 N 型区,在电路中形成反向电流。但是少数载流子数量很少,因此反向电流很微弱,一般为微安数量级。少数载流子是由价电子获得热能,挣脱共价键的束缚而产生的。环境温度愈高,少数载流子数量增多,所以温度对反向电流影响很大。

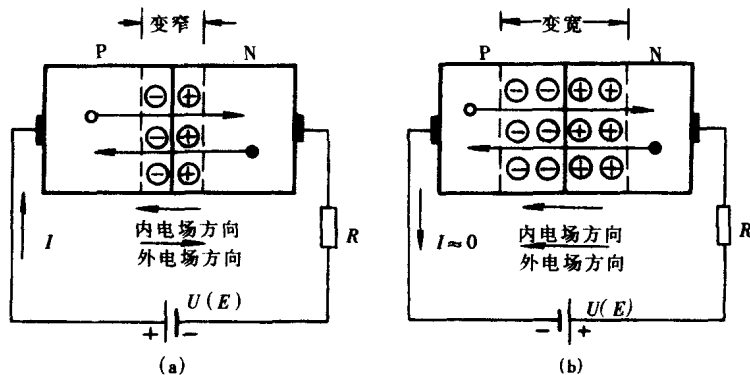


图 1.7 PN 结外加电压

因此,PN 结在反向偏置时,呈现很大的电阻,此时基本不导电。PN 结正向偏置时,PN 结电阻很小,正向电流很大。所以 PN 结具有单向导电性。

1.3 半导体二极管

1.3.1、半导体二极管基本结构

半导体二极管是由 PN 结加上相应的电极引线,并外加管壳密封而成的。目前制成的半导体二极管就其结构而言,可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管如图 1.8(a)所示。由图可见,它是由一根很细的金属触丝(如三价元素铝)和一块半导体(如锗)表面接触,然后在正方向瞬时通过大电流,使金属触丝和半导体熔接在一起,并且形成了 PN 结。这种 PN 结面积很小,极间电容小,并且不能承受高的反向电压和大电

流。但它的高频性能好,可以用于高频检波和数字电路中的开关器件,也可以用于小功率整流等。

面接触型或面结型二极管的 PN 结是采用金属扩散法或合金法制成,其结构示于图 1.8(b)中。将铝球置于 N 型硅片上,加热使之熔化,与铝球接触的硅片有部分熔入液体铝球中,成为铝合金熔液。温度降低时,熔解在铝球里的硅原子沿着 N 型硅的边缘重新结晶,结晶成的固体硅含有大量铝原子,相当于在硅中掺入大量三价杂质。这部分结晶硅成为 P 型硅,称为 P 型再结晶层,它与 N 型硅形成 PN 结。这种二极管 PN 结面积大,可承受较大的电流,极间电容也大,因此适用于大功率整流低频电路中。二极管的符号示于图 1.8(c)中。

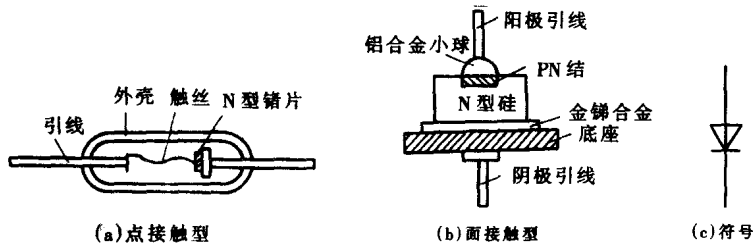


图 1.8 半导体二极管

1.3.2 半导体二极管伏安特性

二极管两端的电压与通过的电流之间的关系可用伏安特性曲线加以说明。其伏安特性曲线是用图示仪或采用逐点测量方法测绘出来的,如硅二极管 2CP10 伏安特性曲线示于图 1.9 中。由图可见,其伏安特性曲线可分为正向特性、反向特性、反向击穿特性,下面分别加以讨论。

1. 正向特性

二极管是用 PN 结制成的,具有单向导电性。由图 1.9 可见,在加以较低的正向电压,如零点几伏时,流过二极管的电流很大,因此其正向电阻很小。

在伏安特性起始部分,当正向电压较小时,加在 PN 结两端外电场还不足以克服 PN 结内电场。因此,这时的正向电流几乎为零,二极管呈现一大的内阻。当正向电压超过一定数值后,其外电场大大加强,使得内部电场被抵消,电流迅速增加。这里的一定数值正向电压称为死区电压或门限电压,其值大小与环境温度及材料有关。锗管死区电压约为 0.2 V,硅管死区电压

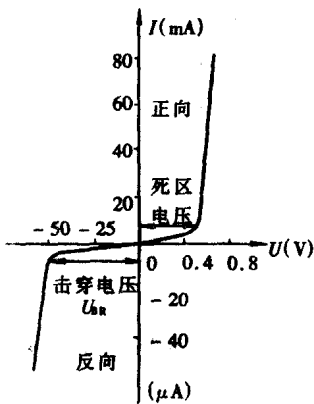


图 1.9 二极管特性曲线

约为 0.5 V。

2. 反向特性

当二极管加以反向电压时,P 型半导体中的少数载流子电子和 N 型半导体中的少数载流子空穴易于漂移运动。通过 PN 结形成很小的反向饱和电流,这种电流随着温度上升而增加。这种现象是由于少数载流子的数目随着温度的增加按指数规律增长所致。并且这种电流基本上不随反向电压增加而增加,与反向电压高低无关,这种电流已达到饱和,所以称为反向饱和电流。

一般硅管的反向饱和电流很小,锗管反向饱和电流较大。如硅管 2CK 系列,常温下,反向饱和电流小于 $1\ \mu\text{A}$;而锗管如 2AP 系列,在常温下,反向饱和电流为 $100\ \mu\text{A}$ 。

3. 反向击穿特性

在温度一定的条件下,当反向电压增加时,少数载流子数目有限,所以开始一段反向电流变化不大,当反向电压增加到一定值时,反向电流剧增,此时二极管被反向电压击穿即电击穿,如图 1.9 所示。产生反向击穿时加在二极管两端的反向电压称为反向击穿电压。击穿时反向电流很大,电压又很高,因此消耗在 PN 结上的功率很大,容易使 PN 结发热,超过它的耗散功率而过渡到热击穿。结温升高使反向电流更加增大,促使结温进一步升高,从而很快使 PN 结烧毁。

产生 PN 结电击穿的原因是在强电压的作用下,大大增加了自由电子和空穴数目,引起反向电流的急剧增加,产生反向击穿。击穿又分为如下两种类型。

(1) 雪崩击穿。当 PN 结反向电压增加时,空间电荷区中的电场随之增强。通过空间电荷区的电子和空穴,在电场作用下,获得的能量增大,它又碰撞其他原子。当电子和空穴能量足够大时,碰撞可使共价键中的电子激发形成新的电子空穴对,这是载流子的倍增效应。在反向电压增加到某一值时,载流子倍增好似陡峻山坡上发生雪崩一样,载流子增加得很多,反向电流急剧增大,于是 PN 结发生雪崩击穿。

(2) 齐纳击穿。当 PN 结两边掺杂密度很大时,在 PN 结加有较高的反向电压情况下,PN 结空间电荷区中存在着强的电场。它能够破坏共价键,将束缚电子分离出来,造成电子空穴对增加,形成较大的反向电流,产生击穿现象。

一般二极管的击穿不属于齐纳击穿,多数是雪崩击穿,只有特殊二极管如稳压管才会产生齐纳击穿。

应该指出,雪崩击穿和齐纳击穿都属于电击穿,电击穿是可逆的。一旦反向电压降低,管子可恢复原来状态。但是反向电流与反向电压之积不能超过 PN 结允许的耗散功率,否则会出现热击穿,使管子烧坏,因此必须避免。

1.3.3 半导体二极管主要参数

1. 主要参数

二极管特性除用伏安特性曲线表示外,还可以用一些数据定量描述,这些数据即为二极管参数。

(1) 最大整流电流 I_{OM} 。最大整流电流是指二极管长时间使用时,允许流过它的最大正向平均电流。电流流过 PN 结要引起管子发热,电流超过允许值时,将使 PN 结过热,管子损坏。例如 2CP10 型硅二极管的最大整流电流为 $100\ \text{mA}$ 。

(2) 反向击穿电压 U_{BR} 。指二极管反向击穿时的电压值。击穿时,反向电流剧增,破坏了二极管单向导电性,并且二极管因过热而烧坏。

一般手册上给出的最高反向工作电压约为反向击穿电压的一半,可确保管子安全工作。如 2AP7 最高反向工作电压规定为 $100\ \text{V}$,反向击穿电压为 $200\ \text{V}$ 。

(3) 反向电流 I_R 。指二极管加上最高反向工作电压不被击穿时的反向电流,其值越小,则二极管的单向导电性越好。由于温度增加,反向电流会急剧增加,使用时要加以注意。硅管的反向电流较小,如几个微安以下;锗管的反向电流较大,为硅管的几十至几百倍。

(4) 极间电容。当二极管两端加以电压时,管内便有堆积电荷,这说明二极管具有电容的