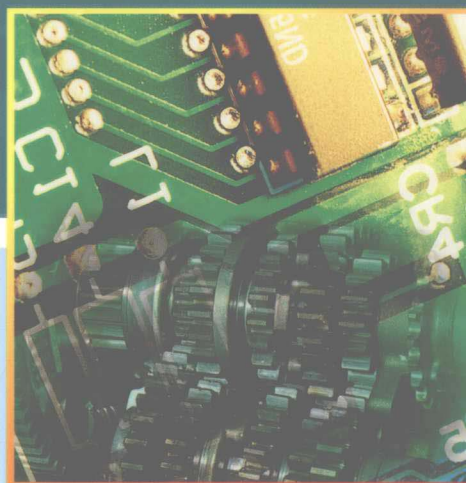


普通高等学校计算机科学与技术专业规划教材

模拟电子技术基础

THE SCIENCE OF ANALOG ELECTRONICS DEVICES

金玉善 曹应晖 申 春 编著



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

普通高等学校计算机科学与技术专业规划教材

模拟电子技术基础

金玉善 曹应晖 申 春 编著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书的主要内容包括：半导体二极管及其基本电路基础、晶体三极管及其放大电路基础、场效应管放大电路、功率放大电路、模拟集成电路基础、负反馈放大电路、模拟信号的运算与处理、信号产生电路及直流稳压电源。

本书具有基础性、先进性、实用性等特点。本书在编写的过程中，力求内容精练、深入浅出，每章都配有一定量的例题和习题。在介绍常用的半导体器件基础上，对电子线路的基本概念、基本原理、基本分析方法进行了详细的讲解，着重培养学生分析问题、解决问题的能力。

本书适于作为电气、信息类相关专业的本科模拟电子技术课程教材，对工程技术人员也有参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

模拟电子技术基础/金玉善，曹应晖，申春编著

—北京：中国铁道出版社，2010

普通高等学校计算机科学与技术专业规划教材

ISBN 978-7-113-11136-6

I. ①模… II. ①金… ②曹… ③申… III. ①模拟电
路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 034090 号

书 名：模拟电子技术基础

作 者：金玉善 曹应晖 申春 编著

策划编辑：严晓舟 杨 勇

责任编辑：秦绪好

特邀编辑：韩玉彬

封面设计：付 巍

编辑部电话：（010）63583215

责任校对：鲍 闻 郝霁江

责任印制：李 佳

出版发行：中国铁道出版社（北京市宣武区右安门西街 8 号 邮政编码：100054）

印 刷：北京新魏印刷厂

版 次：2010 年 3 月第 1 版

2010 年 3 月第 1 次印刷

开 本：787mm×1092mm 1/16 印张：16.5 字数：399 千

印 数：3 000 册

书 号：ISBN 978-7-113-11136-6

定 价：28.00 元

版权所有 侵权必究

本书封面贴有中国铁道出版社激光防伪标签，无标签者不得销售

凡购买铁道版图书，如有印制质量问题，请与本社计算机图书批销部联系调换

普通高等学校计算机科学与技术专业规划教材

主 任：蒋宗礼（北京工业大学）

副主任：王志英（国防科技大学）

杨 波（济南大学）

委 员：（按姓氏音序排列）

常会友（中山大学）

陈俊杰（太原理工大学）

陈 明（中国石油大学）

陈笑蓉（贵州大学）

陈志国（河南大学）

顾乃杰（中国科技大学）

胡 亮（吉林大学）

黄国兴（华东师范大学）

姜守旭（哈尔滨工业大学）

李仲麟（华南理工大学）

刘腾红（中南财经政法大学）

罗军舟（东南大学）

王国仁（东北大学）

王命延（南昌大学）

吴 跃（电子科技大学）

袁晓洁（南开大学）

岳丽华（中国科技大学）

张 莉（北京航空航天大学）

本书责任编辑：陈吴蓉（贵州大学）

虽然计算学科是一门年轻的学科,但它已经成为一门基础技术学科,在其他各个学科发展中扮演着重要的角色,并使得社会产生了对计算机科学与技术专业人才的巨大需求。目前,计算机科学与技术专业已成为我国理工专业中规模最大的专业,为高等教育发展做出了巨大贡献。近些年来,随着国家信息化建设的推进,作为核心技术的计算机技术,更是占有重要的地位。信息化建设,不仅需要更先进、更便于使用的先进计算技术,同时还需要大批的建设人才。瞄准社会需求准确定位,培养计算机人才,是计算机科学与技术专业及其相关专业的历史使命,也是实现专业教育从劳动就业供给导向型向劳动就业需求导向型转变的关键,从而也就成为提高高等教育质量的关键。

教材在人才培养中占有重要地位,承担着“重要的责任”,这就确定了“教材必须高质量”这一基本要求。社会对计算机专业人才需求的多样性和特色,决定了教材建设的针对性,从而也造就了百花齐放、百家争鸣的局面。

关于建设高质量的教材,教育部在提高本科教育质量的文件都提出了明确要求。教高〔2005〕1号(2005年1月7日)文件指出,“加强教材建设,确保高质量教材进课堂。要大力锤炼精品教材,并把精品教材作为教材选用的主要目标。”“要健全、完善教材评审、评价和选用机制,严把教材质量关。”为了更好地落实教育部的这些要求,我们按照教育部高等学校计算机科学与技术教学指导委员会发布的《高等学校计算机科学与技术专业发展战略研究报告暨专业规范(试行)》所构建的计算机科学与技术专业本科教育的要求,组织编写了这套教材。

作为优秀教材的基础,我们首先坚持高标准,以对教育负责的精神去鼓励、发现、动员、选拔优秀作者,并且有意识地培养优秀作者。优秀作者保证了“理论准确到位,既有所然,更有所以然;实践要求到位、指导到位”等要求的实现。

其次是按照人才培养的需要适当强调学科形态内容。粗略地讲:计算机科学的根本问题是“什么能被有效地自动计算”,科学型人才强调学科抽象和理论形态的内容;计算机系统工程的根本问题应该是“如何低成本、高效地实现自动计算”,工程型人才强调学科抽象和设计形态的内容;计算机应用的根本问题是“如何方便、有效地利用计算机系统进行计算”,应用型人才的培养偏重于技术层面的内容,强调学科设计形态的内容,在进一步开发基本计算机系统应用的层面上体现学科技术为主的特征。教材针对不同类型人才的培养,在满足基本知识要求的前提下,强调不同形态的内容。

第三是重视知识的载体作用,促进能力培养。在教材内容的组织上,体现大学教育的学科性和专业性特征,参考《高等学校计算机科学与技术专业发展战略研究报告暨专业规范(试行)》示例性课程大纲,覆盖其要求的基本知识单元。叙述上力争引导读者进行深入分析,努力使读

者在知其然的基础上，探究其所以然。通过加强对练习和实践的引导，进一步培养学生的实际应用能力，促使相应课程在专业教育总目标的实现中发挥作用。

第四是瞄准教学需要，提供更多支持。近些年来，随着计算机技术、网络技术等在教学上的应用，教学手段、教学方式不断丰富，教材的立体化建设对丰富教学资源发挥了重要作用。通常，除主教材外，还要配套教学参考书、实验指导书、电子讲稿，有的还提供网络教学服务，等等。

第五是面向主要读者，强调教材的写作特征，努力做到叙述清晰易懂，语言流畅，深入浅出，有吸引力且不晦涩；追求描述的准确性，强调用词和描述的一致性，语言表达的清晰性和叙述的完整性；分散难点，循序渐进，防止多难点、多新概念的局部堆积。

我们相信，这套教材一定能够在培养社会需要的计算机专业人才上发挥重要作用，希望大家广为选用，并在使用中提出宝贵建议，使其内容不断丰富。

普通高等学校计算机科学与技术专业规划教材编审委员会

2008 年 1 月

模拟电子技术是电气信息类专业的基础课程,主要研究模拟电子线路的分析与设计方法。

本书是中国铁道出版社“普通高等学校计算机科学与技术专业规划教材”丛书之一,在编写过程中以提高教材质量为宗旨,力求做到基础扎实、概念清晰、内容精练、联系实际。

本教材是多年教学经验的总结。在教学过程中由于课时有限,原有的教材显得篇幅过大,使学生的负担过重,为了适应本科教学的要求,按照授课时间为64课时编写了这本《模拟电子技术基础》。

在学习本课程之前,要求先掌握“电路原理”知识。

模拟电子技术是学习“数字逻辑电路”、“微型计算机原理”、“计算机组成原理”等课程的基础,对后续课程的学习和理解有着重要的作用。

本书注重基本概念、基本理论和分析方法的讲解,并备有相应的例题帮助读者对所学的知识进行理解。

为帮助读者对每一章的内容有一个初步的了解,在每章的开始都有内容提要 and 基本概念。

本书分为9章,主要内容有半导体二极管及其基本电路基础、晶体三极管及其放大电路基础、场效应管及其放大电路、功率放大电路、模拟集成电路基础、负反馈放大电路、模拟信号的运算与处理、信号产生电路、直流稳压电源。

第1~3章主要介绍半导体二极管,晶体三极管,场效应管的物理结构、工作原理、特性曲线、电路的组成、分析方法;第4章在了解功率放大电路的工作原理的基础上,掌握其输出功率、效率、管耗的分析和计算方法,以及功率管的选择方法;第5章介绍模拟集成电路的基本构造、工作原理;第6章在介绍负反馈放大电路的四种组态后,着重讲述负反馈放大电路对电路性能的改善;第7章介绍运算放大器对模拟信号的运算处理方法;第8章介绍在电子线路中信号产生的方法;第9章介绍直流稳压电源的工作原理。

为使读者巩固所学知识,在每一章的后面都有小结。

每一章根据教材的教学内容配备了大量的习题,难易适当,供读者选用。

本教材在每一章后面都有仿真例题、仿真习题。在众多的仿真软件中,我们挑选了当前比较常用的PSpice和EWB供读者练习,以提高读者的感性知识,为电子线路的自动化设计、计算机仿真打下良好的基础。

书中的第1~3章由金玉善执笔,第4~6章由申春执笔,第7~9章由曹应晖执笔。在编写过程中付庆兴等老师参加了绘图、录入等工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足与疏漏之处,恳请读者批评、指正。

编者

2009年10月

第 1 章 半导体二极管及其基本电路	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 半导体材料	1
1.1.2 半导体的共价键结构	1
1.1.3 本征半导体	2
1.1.4 杂质半导体	3
1.2 PN 结的形成及其特性	4
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的单向导电性	5
1.2.3 PN 结的电容效应	7
1.3 半导体二极管	8
1.3.1 二极管的结构及类型	8
1.3.2 二极管的伏安特性	9
1.3.3 二极管的主要参数	10
1.4 二极管基本电路及其分析方法	10
1.4.1 二极管的等效电路	10
1.4.2 二极管应用的典型电路	12
1.5 特殊二极管	13
1.5.1 稳压二极管	14
1.5.2 发光二极管	16
1.5.3 光电二极管	16
1.5.4 变容二极管	16
1.5.5 特殊二极管的应用	16
1.6 仿真例题	17
小结	18
习题	18
第 2 章 晶体三极管及其放大电路基础	22
2.1 晶体三极管	22
2.1.1 三极管的结构及类型	22
2.1.2 三极管的放大原理	23
2.1.3 三极管共发射极的伏安特性曲线	25
2.1.4 三极管的主要参数	27
2.2 三极管放大电路的各项指标	28
2.3 放大电路的分析方法	30
2.3.1 单管共发射极基本放大电路的组成	30

2.3.2	估算分析法	32
2.3.3	图解分析法	33
2.3.4	小信号模型分析法	36
2.4	放大电路静态工作点 Q 的设置	46
2.4.1	温度对静态工作点的影响	46
2.4.2	固定偏置电路	46
2.4.3	射极偏置电路	46
2.5	三极管组合放大电路	48
2.5.1	共集-共射放大电路	48
2.5.2	共集-共集放大电路	50
2.6	放大电路的频率响应	52
2.6.1	研究放大电路频率响应的重要性及一些基本概念	52
2.6.2	三极管的高频等效模型	54
2.6.3	阻容耦合单管共发射极放大电路的频率响应	55
2.7	仿真例题	60
小结		61
习题		62
第 3 章	场效应管及其放大电路	68
3.1	结型场效应管	68
3.1.1	结型场效应管 (JFET) 的类型和结构	68
3.1.2	结型场效应管的工作原理	69
3.1.3	结型场效应管的特性曲线	71
3.1.4	结型场效应管的主要参数	74
3.2	绝缘栅型场效应管	75
3.2.1	绝缘栅型场效应管 (MOSFET) 的类型和结构	75
3.2.2	绝缘栅型场效应管的工作原理、特性曲线、参数	76
3.3	各种场效应管特性比较及使用时的注意事项	79
3.3.1	各种场效应管的特性比较	79
3.3.2	使用场效应管的注意事项	80
3.4	场效应管放大电路	80
3.4.1	场效应管放大电路的静态分析	80
3.4.2	场效应管的微变模型	82
3.4.3	场效应管放大电路的动态分析	83
3.4.4	场效应管多级放大电路	87
3.5	仿真例题	89
小结		89
习题		90
第 4 章	功率放大电路	95
4.1	概述	95
4.1.1	功率放大电路的作用	95

4.1.2	功率放大电路的特点	96
4.2	功率放大电路提高效率的方法	97
4.2.1	最简单的功率放大电路——射极输出器	97
4.2.2	功率放大电路提高效率的主要途径	99
4.3	乙类双电源互补对称功率放大电路	100
4.3.1	电路组成和工作原理	100
4.3.2	输出功率及效率	101
4.3.3	功率管的选择	103
4.3.4	交越失真	105
4.4	甲乙类互补对称功率放大电路	106
4.4.1	甲乙类双电源互补对称电路	106
4.4.2	甲乙类单电源互补对称电路	107
4.5	集成功率放大器	108
4.6	仿真例题	110
	小结	112
	习题	112
第 5 章	模拟集成电路基础	116
5.1	概述	116
5.1.1	模拟集成电路的特点	116
5.1.2	集成运放的基本电路组成	117
5.2	电流源电路	118
5.2.1	镜像电流源	118
5.2.2	微电流源	119
5.2.3	多路电流源	120
5.2.4	电流源的主要作用	120
5.3	差分放大电路	121
5.3.1	直接耦合放大电路的零点漂移问题	121
5.3.2	发射极耦合差分放大电路的分析	121
5.3.3	带恒流源偏置的差分放大电路	128
5.3.4	差分放大电路的几种接法	129
5.4	通用型集成运算放大器	132
5.5	集成运放的主要参数和电压传输特性	135
5.5.1	集成运放的主要参数	135
5.5.2	集成运放的电压传输特性	136
5.6	专用集成运算放大器	138
5.7	仿真例题	139
	小结	141
	习题	142
第 6 章	负反馈放大电路	147
6.1	反馈的基本概念与分类	147

6.1.1	反馈的概念	147
6.1.2	反馈的组成框图	148
6.1.3	反馈的分类及判断	149
6.2	负反馈放大电路的四种组态	156
6.2.1	电压串联负反馈放大电路	156
6.2.2	电流串联负反馈放大电路	157
6.2.3	电压并联负反馈放大电路	158
6.2.4	电流并联负反馈放大电路	160
6.3	反馈的一般表达式	161
6.4	负反馈对放大电路性能的影响	162
6.4.1	提高闭环增益的稳定性	162
6.4.2	减小非线性失真	163
6.4.3	抑制反馈环内干扰和噪声	164
6.4.4	对输入电阻和输出电阻的影响	164
6.4.5	放大电路引入负反馈的一般原则	166
6.5	深度负反馈条件下的近似计算	166
6.5.1	深度负反馈下的“虚短”和“虚断”	166
6.5.2	深度负反馈下的近似计算	167
6.6	仿真例题	170
小结		172
习题		172
第 7 章	模拟信号的运算与处理	177
7.1	运算放大器特性	177
7.2	基本运算电路	178
7.2.1	比例运算电路	179
7.2.2	加法电路和加法-减法电路	181
7.2.3	积分运算电路和微分运算电路	183
7.2.4	对数运算电路和反对数运算电路	185
7.2.5	模拟乘法运算电路	186
7.3	有源滤波器	189
7.3.1	低通滤波电路	189
7.3.2	高通滤波电路	191
7.3.3	带通滤波电路和带阻滤波电路	191
7.4	PSpice 仿真	192
小结		194
习题		195
第 8 章	信号产生电路	199
8.1	正弦波产生振荡的条件	199
8.2	正弦波振荡器的基本组成	201
8.3	RC 桥式正弦波振荡电路	201

8.4	LC 正弦波振荡电路	204
8.4.1	LC 并联谐振回路特性	204
8.4.2	变压器反馈式 LC 振荡电路	206
8.4.3	三点式 LC 振荡电路	207
8.4.4	石英晶体振荡电路	209
8.5	非正弦信号产生电路	210
8.5.1	电压比较器	210
8.5.2	方波产生电路	214
8.5.3	三角波产生电路	215
8.5.4	锯齿波产生电路	217
8.5.5	集成函数发生器	218
8.6	PSpice 仿真	219
	小结	220
	习题	221
第 9 章	直流稳压电源	225
9.1	直流电源的组成	225
9.2	整流电路	225
9.2.1	半波整流电路	226
9.2.2	全波整流电路	227
9.2.3	桥式整流电路	229
9.3	滤波电路	229
9.3.1	电容滤波电路	230
9.3.2	电感滤波电路	232
9.3.3	其他形式的滤波电路	232
9.4	稳压电路	233
9.4.1	稳压管稳压电路	233
9.4.2	串联型稳压电路	237
9.5	集成稳压器	239
9.5.1	三端固定输出集成稳压器	239
9.5.2	三端可调输出集成稳压器	241
9.6	PSpice 仿真	242
	小结	243
	习题	243
附录 A	符号表	246
参考文献		250

第1章

半导体二极管及其基本电路

内容提要：本章首先介绍半导体的基础知识，在此基础上讨论半导体器件的核心部分——PN结；着重介绍半导体二极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数；然后，给出二极管电路的分析方法、应用实例；最后简要介绍一些特殊二极管（如齐纳二极管）的特性及其应用。

基本概念：本征半导体、杂质半导体、施主原子、受主原子、本征激发、两种载流子（空穴、电子）、扩散和漂移、扩散电流、漂移电流、内电场、耗尽层、PN结单向导电性、雪崩击穿、齐纳击穿、热击穿、电击穿。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 半导体材料

半导体材料是制成各种半导体器件的基础，而半导体器件又是构成各种电子线路的基础，这些电子线路包括模拟电路、数字电路、分立元器件电路、集成电路等。

那么，什么是半导体呢？

在自然界中的物质按其导电性能可以分为导体、半导体、绝缘体。导电性能强的物质称为**导体**，如铜、铁、铝等；几乎或完全不导电的物质称为**绝缘体**，如橡胶、空气等；导电性能介于两者之间的物质称为**半导体**，如硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）等。

半导体在导电性能方面除了不同于导体和绝缘体外，还具有其他的特性。例如，当半导体受到光照、温度变化、在半导体中掺入杂质时，其导电性能都会产生明显的变化。

1.1.2 半导体的共价键结构

在半导体器件中用得最多的半导体材料是硅和锗，下面以它们为例介绍半导体的结构及导电原理。

硅在元素周期表中的序数是14，每个硅原子中都有14个电子围绕原子核旋转，但是在最外层轨道上只有4个电子在运动；锗在元素周期表中的序数是32，每个锗原子中都有32个电子围绕原子核旋转，在它的最外层轨道也是只有4个电子在运动。因此，硅和锗都是四价元素。通常把外层轨道的电子称为价电子。为了简要的说明问题，用一个四价的离子和4

个价电子来表示一个四价的元素，如图 1-1-1 所示。

半导体具有晶体结构，即原子形成有序的排列，形成三维结构，相邻的原子之间由共价键连接，如图 1-1-2 所示。为简单起见，图 1-1-2 中用二维结构表示硅的晶体结构。

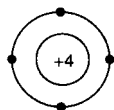


图 1-1-1 硅的简化原子结构模型

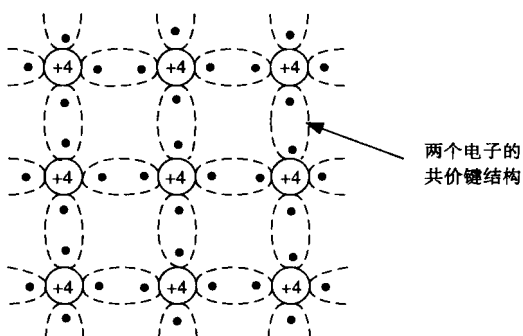


图 1-1-2 硅的二维局部晶体结构图

1.1.3 本征半导体

1. 本征半导体

本征半导体是非常纯净的半导体单晶，而在单晶半导体内，原子按晶体结构排列得非常整齐。

本征半导体在温度 $T=0\text{K}$ (-273.15°C) (假设可以实现这个温度条件) 并且没有外界激发时，其价电子不具有能量，被共价键牢牢束缚，从而导致本征半导体内没有导电粒子，因而没有导电能力，这时的半导体可以看成是绝缘体。但是半导体不同于绝缘体，被共价键束缚的价电子在环境温度升高或光照等外界条件的影响下，获得能量，从而挣脱共价键的束缚成为自由电子，这些自由电子在半导体中可以自由的运动，这种现象称为本征激发。

2. 空穴

共价键中的电子受到热激发后成为自由电子的同时，在原来的位置上会出现一个空位，这个空位就称为空穴。空穴的产生是半导体有别于导体的一个重要特性。在本征半导体中，有一个自由电子就会产生一个空穴，自由电子和空穴是成对出现的，我们称之为电子-空穴对，如图 1-1-3 所示。

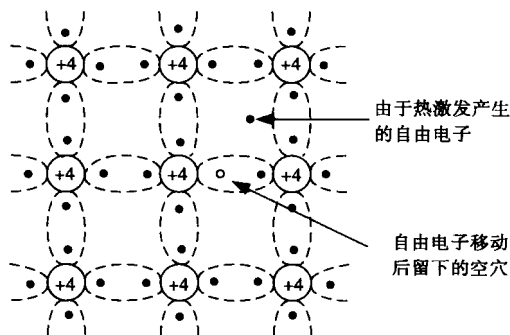


图 1-1-3 电子-空穴对示意图

本征半导体中的自由电子，是带负电的粒子，在晶体中可以自由活动，其运动可以产生电子流，如图 1-1-4 所示。图中，在外电场 E 的作用下，A 处有一个空穴，B 处的电子会填

充它, B 处会产生一个新的空穴, C 处的电子又会填充 B 处的空穴, 这样会产生一个 $C \rightarrow B \rightarrow A$ 方向的电子流。此时, 由于电子移动产生的空位即空穴也会移动 (注意: 空穴不是真正的移动, 而是虚拟出来的), 可以把空穴看成带正电的粒子, 移动的方向为 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 。由此可见, 空穴也参与了导电, 它也是一种载流子。用空穴移动的方向代表半导体中电流的方向更为方便。在半导体中有两种载流子, 电子和空穴。这是不同于导体的重要特性。

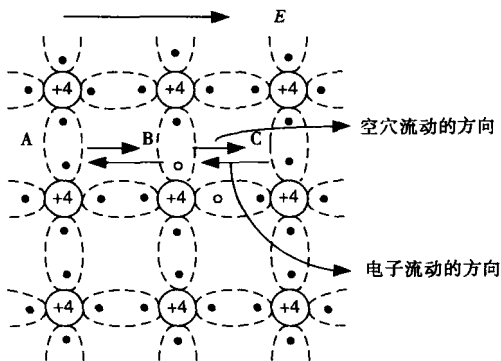


图 1-1-4 电子与空穴移动示意图

在本征半导体中载流子的浓度可用下式计算:

$$n_i = p_i = AT^{\frac{3}{2}} e^{\frac{-E_{g0}}{2kT}} \quad (1.1.1)$$

式中: n_i 表示本征半导体中自由电子的浓度; p_i 表示本征半导体中空穴的浓度; A 是与半导体材料有关的常数; E_{g0} 是 0K 时半导体材料的带隙能量; T 是热力学温度 (K); k 是玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

由式 (1.1.1) 可以看出, 自由电子和空穴的浓度相同, 温度越高, 电子-空穴对的浓度越高。

在本征半导体中, 本征激发会产生电子-空穴对, 同时运动中的电子失去能量, 遇到空穴, 会使电子-空穴对消失, 这种现象称为复合。在一定温度下, 激发和复合会处于一种平衡状态, 因此载流子的浓度是一定的。

半导体对温度和光照的变化非常敏感, 据此特性, 可以用半导体材料做成光敏或热敏器件。

1.1.4 杂质半导体

在本征半导体中, 载流子的浓度很低。例如, 每立方厘米硅材料的原子约为 5×10^{22} 个, 在常温下, 因本征激发产生的自由电子每立方厘米约为 1.45×10^{10} 个。换句话说, 在常温下, 每 3.45×10^{12} 个原子只有一个电子可以挣脱共价键的束缚, 成为自由电子, 由此可见, 本征半导体的电阻率很高。

本征半导体的电阻率高, 对温度敏感, 实际用途有限。可以在本征半导体中掺入其他的元素 (杂质) 来改善其性能。掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。

根据掺入的杂质性质不同, 杂质半导体可分为: 电子 (N) 型半导体、空穴 (P) 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入五价的元素 (如磷), 用一个五价元素的原子代替一个四价元素的原子在晶体中的位置, 如图 1-1-5 所示。

五价元素原子的 4 个价电子和四价元素原子的 4 个价电子分别形成共价键结构, 多余的一个价电子所受的束缚力比较小, 只需较小的能量即可被激发成自由电子。由于掺入的五价元素的原子很容易贡献出一个自由电子, 所以把它称为“施主原子”。

五价元素的原子提供一个自由电子后, 本身变成正离子, 但在它周围的共价键中没有空位, 所以并不产生新的空穴, 这与本征激发产生的自由电子不同。

在掺入五价元素的半导体中, 除了五价元素的原子提供的大量自由电子外, 还同时存在由本征激发产生的电子 - 空穴对, 此时, 自由电子的浓度远远大于空穴的浓度, 这种杂质半导体的导电主要以自由电子导电为主, 因而称为电子型半导体, 或 **N 型半导体**。在 N 型半导体中, 自由电子是多数载流子, 简称多子; 空穴是少数载流子, 简称少子。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入三价元素 (如硼), 用一个三价元素的原子代替一个四价元素的原子在晶体中的位置, 如图 1-1-6 所示。

三价原子的三个价电子和四价原子中的三个价电子分别形成共价键结构, 因缺少一个电子, 在晶体中会出现一个空位。这个空位会吸引附近原子的价电子; 得到电子的硼原子, 变成不能移动的负离子, 而原来的硅原子因少了一个价电子, 形成了空穴。此时, 空穴的形成, 并没有等量的自由电子产生, 这和本征激发产生的空穴不同。

在掺入三价元素的杂质半导体中, 还同时存在由本征激发产生的电子 - 空穴对。此时, 在半导体中, 空穴的浓度远远大于自由电子的浓度, 而半导体的导电主要以空穴导电为主, 因而称为空穴型半导体, 或 **P 型半导体**。在 P 型半导体中, 空穴是多数载流子, 自由电子是少数载流子。

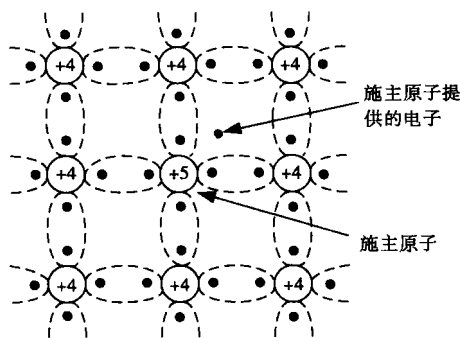


图 1-1-5 N 型半导体的共价键结构

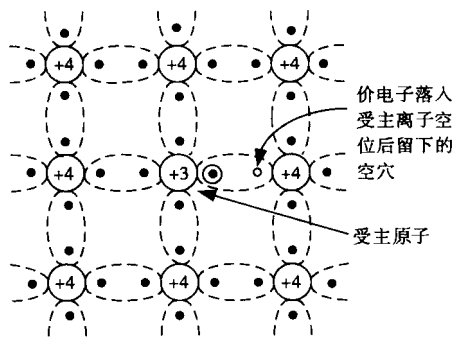


图 1-1-6 P 型半导体的共价键结构

1.2 PN 结的形成及其特性

1.2.1 PN 结的形成

在同一块半导体的两个不同区域分别掺入三价和五价的杂质元素, 一端成为 P 型半导体, 另一端成为 N 型半导体; 这两种半导体紧密地接触在一起, 便形成了 **PN 结**。

PN 结两侧的 P 型半导体、N 型半导体掺入的杂质元素不同, 其载流子浓度也不相同。P 型半导体多数载流子是空穴, 空穴的浓度远远大于 N 型半导体中空穴的浓度; 同理, N 型半导体多数载流子是自由电子, 自由电子的浓度远远大于 P 型半导体中自由电子的浓度。由于

存在载流子浓度的差异,载流子会从浓度高的区域向浓度低的区域运动,通常把这种运动称为扩散运动,把扩散运动产生的电流称为扩散电流。如图 1-2-1 所示,电子从 N 区向 P 区做扩散运动;空穴从 P 区向 N 区做扩散运动(虚拟)。

当载流子通过两种半导体的交界面后,在交界面附近的区域,N 区扩散到 P 区的自由电子会与 P 区的空穴复合,在 P 区留下不能移动的负离子;P 区扩散到 N 区的空穴,会与 N 区的自由电子复合,在 N 区留下不能移动的正离子。扩散的结果是在交界面附近,打破了电中性,形成一个内部势垒,方向是由 N 区到 P 区。失去电中性的区域称为空间电荷区,如图 1-2-2 所示。由于多数载流子扩散到对方区域后被复合,即被消耗掉了,因此,空间电荷区也称为耗尽层。耗尽层的电阻率很高。扩散作用越强,空间电荷区越宽,势垒就越大,因为这个势垒是由内部载流子的扩散形成的,而不是外加电压形成的,所以称为内电场。

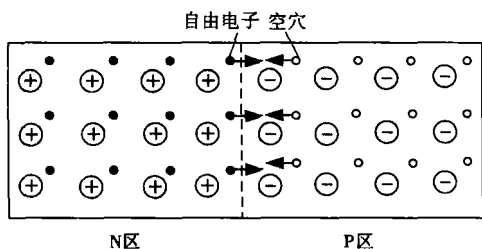


图 1-2-1 多数载流子扩散运动

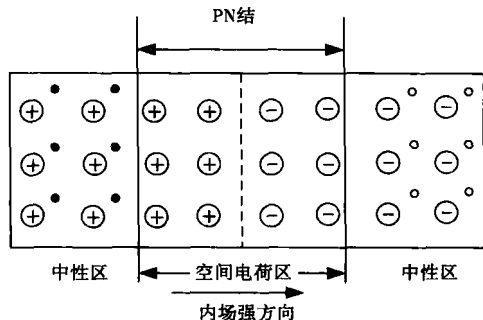


图 1-2-2 PN 结的形成

在内电场的作用下,N 区的少数载流子(空穴)会向 P 区做定向运动,同样 P 区的少数载流子(自由电子)会向 N 区做定向运动,这种运动称为漂移运动,由漂移运动产生的电流称为漂移电流。N 区的空穴向 P 区漂移,补充了 P 区失去的空穴,减少了 P 区的负离子;P 区的自由电子向 N 区漂移,同样补充了 N 区失去的电子,减少了 N 区的正离子,可见,漂移运动的结果会使空间电荷区变窄。

综上所述,在同一块半导体中的 P 区和 N 区之间,存在扩散和漂移两种运动,它们之间既相互联系又彼此对立。扩散运动会使空间电荷区变宽、内电场加大;内电场的产生和加强又阻止了多子的扩散,有助于少子的漂移,结果使空间电荷区变窄,削弱了内电场,如此反复,在 P 区和 N 区之间,多子的扩散和少子的漂移会形成动态平衡,扩散电流等于漂移电流,总电流等于零,空间电荷区宽度一定,内电场强度一定,PN 结呈电中性。

1.2.2 PN 结的单向导电性

PN 结在无外电场作用时,处于平衡状态。在 PN 结两端加上外加电压,由于所加电压的极性不同,PN 结会产生不同的特性。

1. 外加正向电压

如图 1-2-3 所示,外加直流电源 V_0 的正极接 PN 结的 P 区,负极接 PN 结的 N 区,这种接法称为 PN 结两端加入正向电压。

此时,外场强的方向和内场强的方向相反。在外场强的作用下,P 区的空穴向空间电荷区移动,与空间电荷区的负离子复合;N 区的电子也向空间电荷区移动,与空间电荷区的正