

可下载教学资料

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



高等学校教材
电子信息

模拟电子技术基础

王晓华 朱代先 主编

清华大学出版社

高等学校教材
电子信息

模拟电子技术基础

王晓华 朱代先 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书共分9章,主要包括二极管及其基本电路、双极结型三极管及放大电路基础、场效应管及其放大电路、模拟集成电路、反馈、信号的运算与处理、信号产生电路、功率放大电路、直流稳压电源,每章后有相关习题,并提供了以 Multisim 为平台的仿真练习。

本书可作为高等工科院校计算机及其应用、应用物理、测控工程、信息科学与技术、微电子信息等有关专业本科及专科“模拟电子技术基础”课程的教材和教学参考书,也可作为广大工程技术人员的参考书。

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

模拟电子技术基础/王晓华,朱代先主编. —北京:清华大学出版社,2011.3

(高等学校教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-24912-2

I. ①模… II. ①王… ②朱… 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(2011)第 022676 号

责任编辑:郑寅堃 徐跃进

责任校对:时翠兰

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:16.75 字 数:410 千字

版 次:2011 年 3 月第 1 版 印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00 元

产品编号:037711-01

编审委员会成员

东南大学	王志功	教授
南京大学	王新龙	教授
南京航空航天大学	王成华	教授
解放军理工大学	邓元庆	教授
	刘景夏	副教授
上海大学	方 勇	教授
上海交通大学	朱 杰	教授
	何 晨	教授
华中科技大学	严国萍	教授
	朱定华	教授
华中师范大学	吴彦文	教授
武汉理工大学	刘复华	教授
	李中年	教授
宁波大学	蒋刚毅	教授
天津大学	王成山	教授
	郭维廉	教授
中国科学技术大学	王煦法	教授
	郭从良	教授
	徐佩霞	教授
苏州大学	赵鹤鸣	教授
山东大学	刘志军	教授
山东科技大学	郑永果	教授
东北师范大学	朱守正	教授
沈阳工业学院	张秉权	教授
长春大学	张丽英	教授
吉林大学	林 君	教授
湖南大学	何怡刚	教授
长沙理工大学	曾喆昭	教授
华南理工大学	冯久超	教授

西南交通大学

冯全源 教授

金炜东 教授

重庆工学院

余成波 教授

重庆通信学院

曾凡鑫 教授

重庆大学

曾孝平 教授

重庆邮电学院

谢显中 教授

张德民 教授

西安电子科技大学

彭启琮 教授

樊昌信 教授

西北工业大学

何明一 教授

集美大学

迟岩 教授

云南大学

刘惟一 教授

东华大学

方建安 教授

出版说明

改革开放以来,特别是党的十五大以来,我国教育事业取得了举世瞩目的辉煌成就,高等教育实现了历史性的跨越,已由精英教育阶段进入国际公认的大众化教育阶段。在质量不断提高的基础上,高等教育规模取得如此快速的发展,创造了世界教育发展史上的奇迹。当前,教育工作既面临着千载难逢的良好机遇,同时也面临着前所未有的严峻挑战。社会不断增长的高等教育需求同教育供给特别是优质教育供给不足的矛盾,是现阶段教育发展面临的基本矛盾。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2001年8月,教育部下发了《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》,提出了十二条加强本科教学工作提高教学质量的措施和意见。2003年6月和2004年2月,教育部分别下发了《关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》和《教育部实施精品课程建设提高高校教学质量和人才培养质量》文件,指出“高等学校教学质量和教学改革工程”是教育部正在制定的《2003—2007年教育振兴行动计划》的重要组成部分,精品课程建设是“质量工程”的重要内容之一。教育部计划用五年时间(2003—2007年)建设1500门国家级精品课程,利用现代化的教育信息技术手段将精品课程的相关内容上网并免费开放,以实现优质教学资源共享,提高高等学校教学质量和人才培养质量。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合新世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。首批推出的特色

精品教材包括：

(1) 高等学校教材·计算机应用——高等学校各类专业，特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 高等学校教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 高等学校教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 高等学校教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 高等学校教材·信息管理与信息系统。

(6) 高等学校教材·财经管理与计算机应用。

清华大学出版社经过二十多年的努力，在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌，为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格，这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前言

本书是作者参照“高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求”编写的,可作为高等工科院校电类专业模拟电子技术课程的教材。

“模拟电子技术基础”是一门重要的电类专业技术基础平台课,适合各类专业的“模拟电子技术基础”教材层出不穷,但适合学时较少的教学使用,尤其是内容丰富、通俗易懂的教材却较少。本书适用于较少学时的模拟电子技术基础课程的教学。

本书应用“材料—器件—电路—技术”的思路系统地介绍了半导体材料及其器件的基本概念、基本理论及基本分析方法,着重于打好基础,开阔思路。重点内容是集成电路及其应用,详细介绍了:电子器件的外特性以及各种集成电路的输入输出特性;压缩集成电路内部的工作原理分析。本书注重电路的组成和结构分析,突出应用。应用计算机仿真软件 Multisim 对各章的主要内容进行了仿真分析,力图使学生掌握先进的分析方法。

本书由王晓华和朱代先主编,并负责统稿及定稿。本书第1章与第9章由张博编写,第2章由贺小慧编写,第3章和第4章由康涛编写,第5章由王晓华编写,第6、7章由朱代先编写,第8章的编写以及每一章的 Multisim 仿真由张卫国完成,张庆君和崔丽也为本书的编写做了不少工作。

电子技术的发展日新月异,本书内容难免存在缺点和不足,希望专家、学者及使用本书的教师、学生和工程技术人员提出批评和建议,以便今后不断完善。

编者

2011年1月

目 录

第 1 章 二极管及其基本电路	1
1.1 半导体基础理论知识	1
1.1.1 导体、半导体和绝缘体	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	3
1.2 PN 结	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	8
1.3 二极管及其应用电路	8
1.3.1 二极管的结构和类型	8
1.3.2 二极管的特性	9
1.3.3 半导体二极管的等效电路	10
1.3.4 半导体二极管的应用	11
1.4 特殊二极管	13
1.4.1 发光二极管	14
1.4.2 稳压二极管	14
1.4.3 其他特殊二极管	16
1.5 Multisim 仿真	16
习题	18
第 2 章 双极结型晶体管及放大电路基础	21
2.1 双极结型晶体管	21
2.1.1 BJT 的结构及分类	21
2.1.2 BJT 的放大作用和载流子的运动	21
2.1.3 BJT 的 $U-I$ 特性曲线	27
2.1.4 BJT 的主要参数	31
2.1.5 温度对 BJT 特性及参数的影响	35
2.2 基本共射极放大电路	36
2.2.1 放大的概念和性能指标	36
2.2.2 基本共射极放大电路的组成及工作原理	40
2.3 放大电路的分析方法	44

2.3.1	静态分析	44
2.3.2	动态分析	47
2.4	放大电路静态工作点的选择和稳定问题	56
2.4.1	静态工作点的选择	56
2.4.2	静态工作点的稳定	57
2.4.3	基极分压式射极偏置电路	58
2.5	共集电极放大电路和共基极放大电路	63
2.5.1	共集电极放大电路	63
2.5.2	共基极放大电路	66
2.5.3	BJT 放大电路三种组态的比较	67
2.6	多级放大电路	69
2.6.1	多级放大电路的组成	69
2.6.2	多级放大电路的耦合方式	69
2.6.3	多级放大电路性能指标的计算	72
2.6.4	组合放大电路与复合管放大电路	74
2.7	放大电路的频率响应	78
2.7.1	单时间常数 RC 电路的频率响应	78
2.7.2	BJT 的高频小信号模型	81
2.7.3	单级共射极放大电路的频率响应	82
2.8	Multisim 仿真	87
	习题	91
第 3 章	场效应管及其放大电路	97
3.1	结型场效应管	97
3.1.1	结型场效应管的结构与工作原理	97
3.1.2	结型场效应管的特性曲线	100
3.1.3	结型场效应管的主要电参数	101
3.2	绝缘栅型场效应管	102
3.2.1	N 沟道增强型 MOS 管	102
3.2.2	N 沟道耗尽型 MOS 管	105
3.2.3	MOSFET 的主要参数	106
3.3	场效应管放大电路	107
3.3.1	场效应管的偏置及其电路的静态分析	107
3.3.2	场效应管的微变等效电路	109
3.3.3	场效应管组成的三种基本放大电路	111
3.4	Multisim 仿真	113
	习题	115

第4章 模拟集成电路	117
4.1 集成运算放大器概述	117
4.1.1 集成电路中元器件的特点	117
4.1.2 集成运放的典型结构	118
4.1.3 电压传输特性	119
4.2 电流源电路	120
4.2.1 镜像电流源	120
4.2.2 比例电流源	120
4.2.3 微电流源	121
4.2.4 有源负载放大电路	121
4.3 差动放大电路	122
4.3.1 直接耦合放大电路中的主要问题	122
4.3.2 差动放大电路的工作原理	122
4.3.3 电流源代替有源负载的差分放大电路	126
4.3.4 差动放大电路的输入输出方式	127
4.4 集成电路的输出级电路	128
4.5 集成电路运算放大器	129
4.6 实际集成运算放大器的主要参数	132
4.7 Multisim 仿真	134
习题	136
第5章 反馈	139
5.1 反馈简介	139
5.1.1 反馈的概念	139
5.1.2 反馈的基本框图	139
5.2 反馈的分类	140
5.2.1 放大电路中是否存在反馈	140
5.2.2 直流反馈与交流反馈	141
5.2.3 正反馈与负反馈	141
5.2.4 串联反馈与并联反馈	143
5.2.5 电压反馈与电流反馈	143
5.3 负反馈放大电路的四种组态	144
5.3.1 电压串联负反馈放大电路	144
5.3.2 电压并联负反馈放大电路	145
5.3.3 电流串联负反馈放大电路	145
5.3.4 电流并联负反馈放大电路	146
5.4 负反馈放大电路增益的一般表达式	147
5.5 负反馈放大电路的分析和近似计算	147

5.5.1	负反馈放大电路的分析	147
5.5.2	深度负反馈的特点	149
5.5.3	深度负反馈放大电路的近似计算	149
5.6	负反馈对放大电路性能的影响	151
5.6.1	提高增益的稳定性	151
5.6.2	减小非线性失真	151
5.6.3	扩展通频带	152
5.6.4	对输入电阻和输出电阻的影响	153
5.7	负反馈放大电路的稳定性	157
5.7.1	负反馈放大电路的自激振荡的原因及条件	157
5.7.2	负反馈放大电路稳定工作的条件及稳定性分析	158
5.8	Multisim 仿真	159
	习题	160
第 6 章	信号的运算与处理	163
6.1	基本运算电路	163
6.1.1	理想运算放大器	163
6.1.2	比例运算电路	164
6.2	放大电路的其他应用	166
6.2.1	积分和微分运算电路	166
6.2.2	仪用放大器	167
6.3	滤波电路的基本概念与分类	169
6.3.1	基本概念	169
6.3.2	有源滤波电路的分类	169
6.4	一阶有源滤波电路	170
6.4.1	一阶有源低通滤波电路	170
6.4.2	一阶有源高通滤波电路	171
6.5	高阶有源滤波电路	172
6.5.1	有源低通滤波电路	172
6.5.2	有源高通滤波电路	174
6.5.3	有源带通滤波电路	176
6.5.4	二阶有源带阻滤波电路	177
6.6	Multisim 仿真	178
	习题	179
第 7 章	信号产生电路	184
7.1	正弦波振荡电路	184
7.1.1	自激振荡现象	184
7.1.2	自激振荡形成的条件	184

7.1.3	自激振荡的形成过程	185
7.1.4	自激振荡电路的组成	186
7.1.5	自激振荡电路的分析方法	186
7.2	RC 正弦波振荡电路	186
7.2.1	RC 串并联选频网络的选频特性	187
7.2.2	振荡的建立与稳定	188
7.2.3	振荡频率与振荡波形	188
7.2.4	稳幅措施	188
7.2.5	RC 移相式振荡电路	188
7.3	LC 正弦波振荡电路	189
7.3.1	LC 选频放大电路	189
7.3.2	变压器反馈式 LC 振荡电路	192
7.3.3	电感三点式 LC 振荡电路	192
7.3.4	电容三点式 LC 振荡电路	193
7.3.5	石英晶体振荡电路	194
7.4	电压比较器	196
7.4.1	单门限电压比较器	196
7.4.2	迟滞比较器	197
7.4.3	集成电压比较器	198
7.5	非正弦信号产生电路	199
7.5.1	方波产生电路	199
7.5.2	锯齿波产生电路	200
7.6	Multisim 仿真	202
	习题	207
第 8 章	功率放大电路	211
8.1	功率放大电路的一般问题	211
8.1.1	功率放大电路的特点及主要研究对象	211
8.1.2	功率放大电路提高效率的主要途径	212
8.2	甲类功率放大电路	213
8.3	乙类双电源互补对称功率放大电路	214
8.3.1	电路组成	214
8.3.2	工作原理分析	214
8.3.3	乙类互补对称电路的计算	215
8.4	甲乙类互补对称功率放大电路	217
8.4.1	甲乙类双电源互补对称电路	218
8.4.2	甲乙类单电源互补对称电路	218
8.5	功率器件	219
8.5.1	双极型功率晶体管 BJT	219

8.5.2 功率 MOSFET	220
8.5.3 以 MOS 功率管作输出级的甲乙类功率放大器	221
8.5.4 BJT 集成功率放大器举例	222
8.6 Multisim 仿真	224
习题	226
第 9 章 直流稳压电源	229
9.1 整流电路	229
9.1.1 单相半波整流电路	230
9.1.2 单相全波整流电路	231
9.1.3 单相桥式整流电路	231
9.2 滤波电路	233
9.2.1 电容滤波电路	233
9.2.2 电感滤波电路	234
9.2.3 其他滤波电路	234
9.3 稳压电路	235
9.3.1 稳压管稳压电路	235
9.3.2 串联型直流稳压电路性能指标	236
9.3.3 串联反馈式稳压电路	237
9.4 集成三端稳压器	239
9.4.1 输出电压固定的三端集成稳压器	240
9.4.2 可调式三端集成稳压器	242
9.4.3 三端稳压器的应用	243
9.5 Multisim 仿真	244
习题	245
附录 A 半导体分立器件型号命名方法	248
附录 B 常用半导体分立器件的参数	249
附录 C 半导体集成器件型号命名方法	252
附录 D 常用半导体集成电路的参数	253
参考文献	254

第1章

二极管及其基本电路

1.1 半导体基础理论知识

1.1.1 导体、半导体和绝缘体

物质按导电能力的不同,可分为导体、半导体和绝缘体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,在常态下更接近于绝缘体,但它在掺入杂质或受热、受光照后,其导电能力明显增强而接近于导体。利用半导体材料的这些性质,可制造出功能多样的半导体器件。元素半导体有锗、硅、硒、硼、碲、铋等。硅(Si)和锗(Ge)是主要的半导体材料,其中硅(Si)是占据了90%以上的半导体材料份额。硅材料和锗材料在电子、冶金、化工、军事、航天等领域有广泛的用途。例如:金属硅被应用于钢铁、铝、有机硅,多晶硅被应用于太阳能光伏电池,单晶硅被应用于半导体集成电路,二氧化锗被用于塑料石油工业催化剂,单晶锗被应用于卫星用太阳能光伏电池和武器装备上的夜视仪镜头。

1.1.2 本征半导体

常用于制作半导体器件的材料是硅(Si)和锗(Ge)。它们都是四价元素,其原子的最外层轨道上有四个电子,称为价电子。为了制作半导体器件,它们都被提纯而制成单晶体。

完全纯净的、结构完整的半导体晶体称为本征半导体。

在本征硅或锗的单晶体中,其原子都按一定间隔排列成有规律的空间点阵(称为晶格)。由于原子间相距很近,价电子不仅受到自身原子核的约束,还要受到相邻原子核的吸引,使得每个价电子为相邻原子所共有,从而形成共价键。这样四个价电子与相邻的四个原子中的价电子分别组成四对共价键,依靠共价键使晶体中的原子紧密地结合在一起。图1.1是单晶硅或锗的共价键结构平面示意图。

本征半导体的价电子虽受共价键的束缚而使每个原子的最外层电子数为八个,处于较为稳定的状态,然而和绝缘体相比,这种束缚却是比较弱的。当温度为绝对零度时,晶体不呈现导电性。当由于光照等原因使温度升高时,本征半导体的共价键结构中的价电子获得一定的能量就可挣脱共价键的束缚,成为自由电子,这些自由电子很容易在晶体内运动,如图1.2所示,这种现象称为本征激发。因本征激发在半导体内产生了能移动的自由电子,而在这些自由电子原有的位置上留下一个空位置,称为空穴。空穴因失去电子而带正电荷。

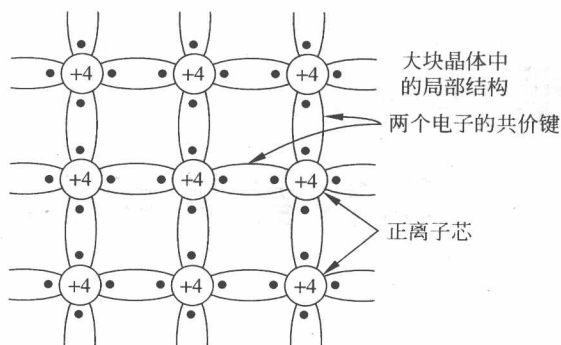


图 1.1 单晶硅或锗的共价键结构平面示意图

空穴是不能移动的,但由于正负电荷的相互吸引,在外加电场或其他能源的作用下,邻近价电子就可填补到这个空位上,而在这个价电子原来的位置上就留下了新的空位,以后其他电子又可转移到这个新空位上。如此继续下去,共价键中出现一定的电荷迁移,相当于空穴在运动。图 1.3 描述了在外电场 E 的作用下,空穴和电子在共价键结构图上的移动过程。图中用圆圈表示空穴。由图可见,如果在 x_1 处存在一个电子的空位, x_2 处的电子便可以填补到这个空位,从而使空位由 x_1 转移到 x_2 。如果接着 x_3 处的电子又填补到 x_2 处的空位,这样空位又由 x_2 转移到了 x_3 。在这个过程中,电子由 $x_3 \rightarrow x_2 \rightarrow x_1$,但仍处于束缚状态,而空位(即空穴)由 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$,就是说空穴移动的方向和电子移动的方向是相反的,因而可用空穴移动产生的电流来代表束缚电子移动产生的电流。图中箭头方向表示电子的移动方向。因此空穴运动相当于正电荷的运动。空穴做定向运动,也能使半导体导电。

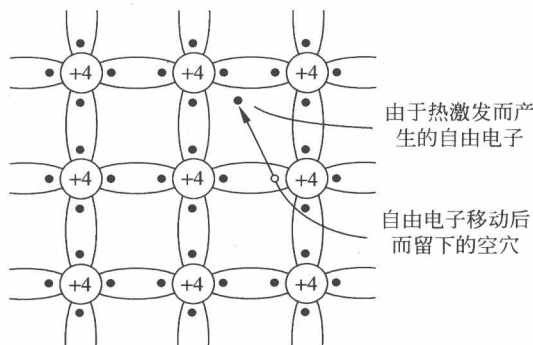


图 1.2 本征激发产生自由电子和空穴

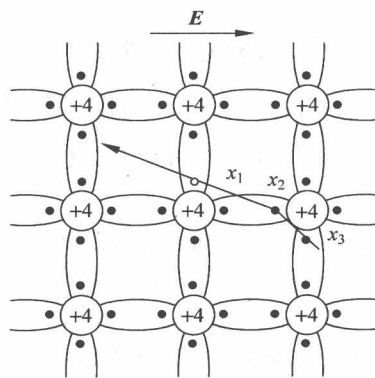


图 1.3 自由电子和空穴的运动

半导体中的空穴和自由电子均能参与导电,是运载电流的粒子,故称为载流子。半导体的重要物理特性是它的电导率,电导率与材料内单位体积中所含的电荷载流子的数目有关。电荷载流子的浓度愈高,其电导率愈高。半导体内载流子的浓度取决于许多因素,包括材料的基本性质、温度值以及杂质的存在。半导体中两种载流子同时参与导电,是半导体导电和导体导电的重要区别之一。

本征半导体中,本征激发所产生的自由电子和空穴总是成对出现。称为电子-空穴对,

本征激发产生的自由电子和空穴的数量是十分有限的。实际上,自由电子和空穴成对产生的同时,还存在复合,即自由电子和空穴相遇而释放能量,电子-空穴对消失。

1.1.3 杂质半导体

常温下,本征激发产生的电子-空穴对数目极少。故本征半导体的导电能力很低。要提高半导体的导电性能,就必须提高载流子的浓度,为此只要在本征半导体中掺入微量三价元素(如硼、铟)或五价元素(如磷、砷),就能使半导体的导电性能发生明显变化。掺入的元素称为杂质,掺杂后的半导体称为杂质半导体。

根据掺入杂质的性质不同,可将杂质半导体分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素(如磷)后,就可形成 N 型半导体,如图 1.4 所示。此时半导体的晶体结构中,磷原子在顶替掉一个硅原子而与周围的四个硅原子以共价键结合起来后,还多余了一个价电子,该价电子因为不在共价键中,而受磷原子核的束缚十分脆弱,极易摆脱原子核束缚而成为自由电子,故五价元素的原子称为施主原子。此时,半导体仍保持中性。自由电子参与导电电流,它移动后,使原来的中性施主磷原子成为不能移动的施主正离子。五价元素提供了多余的价电子,被称为施主杂质。

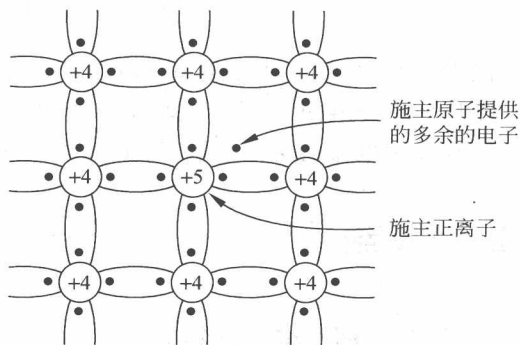


图 1.4 N 型半导体的内部结构平面示意图

施主杂质在提供自由电子的同时不产生新的空穴,这是它与本征激发的区别。在加入施主杂质产生自由电子的同时,并不产生新的空穴,但原来的本征晶体由于本征激发仍会产生少量的电子-空穴对。控制掺入杂质的多少,便可控制自由电子数量。在 N 型半导体中,自由电子数远大于空穴数,在这种半导体中,以自由电子导电为主,因而自由电子称为多数载流子,简称多子,空穴称为少数载流子,简称少子。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入少量的三价元素(如硼),可形成 P 型半导体,如图 1.5 所示。此时半导体的晶体结构中,硼原子最外层的三个价电子在和相邻的四个硅原子组成共价键时,因缺少一个价电子而产生一个空位。当邻近的电子填补该空位时,使硼原子成为不能移动的负离子,称为受主离子。三价元素能够接收电子,称为受主杂质,三价元素的原子称为受主原子。

受主杂质在提供空穴的同时不产生新的自由电子。在 P 型半导体中,正因为掺入受主原子的半导体会有多余的空穴,总的载流子数目大为增强,从而导电能力增强,其空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子。

综上所述,半导体掺入杂质后,载流子的数目都有相当程度的增加。N 型半导体和 P 型半导体中的多子主要由杂质提供,与温度几乎无关,多子浓度由掺杂浓度决定;而少子由