



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材

电子线路 (I)

董尚斌 主编

董尚斌 苏 利 代永红 编著

清华大学出版社





普通高等教育“十一五”国家级规划教材



新坐标大学本科电子信息类专业系列教材

电子线路 (I)

董尚斌 主编

董尚斌 苏 利 代永红 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书的主要内容覆盖了“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会”2004年版电子线路(Ⅰ)基本要求的全部内容。本书系模拟电子线路的基础,内容为半导体器件与模型、放大器基础、集成电路运算放大器、负反馈放大器、放大器的频率响应、集成电路运算放大器的应用、直流稳压电源。书中编有较多的例题和习题,部分习题附有答案。

本书可作为高等学校电子信息、电气信息类和其他相关专业的“线性电子线路”或“低频电子线路”课程的教材,也可供从事电子技术工作的科技人员参考。

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

电子线路(Ⅰ)/董尚斌主编. —北京:清华大学出版社,2006.10

(新坐标大学本科电子信息类专业系列教材)

ISBN 7-302-13794-3

I. 电… II. 董… III. 电子电路—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 109136 号

责任编辑:陈国新

责任校对:李建庄

责任印制:孟凡玉

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

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社 总 机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:24.5 字 数:588 千字

版 次:2006 年 10 月第 1 版 印 次:2006 年 10 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:32.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:018689-01



编委会名单

顾问(按姓氏音节顺序):

- | | |
|-----|---------------|
| 李衍达 | 清华大学信息科学技术学院 |
| 邬贺铨 | 中国工程院 |
| 姚建铨 | 天津大学激光与光电子研究所 |

主任:

- | | |
|-----|-----------|
| 董在望 | 清华大学电子工程系 |
|-----|-----------|

编委会委员(按姓氏音节顺序):

- | | |
|-----|-------------------|
| 鲍长春 | 北京工业大学电子信息与控制工程学院 |
| 陈 怡 | 东南大学高教所 |
| 戴瑜兴 | 湖南大学电气与信息工程学院 |
| 方达伟 | 中国计量学院信息工程学院 |
| 甘良才 | 武汉大学电子信息学院通信工程系 |
| 郭树旭 | 吉林大学电子科学与工程学院 |
| 胡学钢 | 合肥工业大学计算机与信息学院 |
| 金伟其 | 北京理工大学信息科技学院光电工程系 |
| 孔 力 | 华中科技大学控制系 |
| 刘振安 | 中国科学技术大学自动化系 |
| 陆大绘 | 清华大学电子工程系 |
| 马建国 | 西南科技大学信息与控制工程学院 |
| 彭启琮 | 成都电子科技大学通信与信息工程学院 |
| 仇佩亮 | 浙江大学信电系 |
| 沈伯弘 | 北京大学电子学系 |

童家榕	复旦大学信息科学与技术学院微电子研究院
汪一鸣(女)	苏州大学电子信息学院
王福源	郑州大学信息工程学院
王华奎	太原理工大学信息与通信工程系
王 瑶(女)	美国纽约 Polytechnic 大学
王毓银	北京联合大学
王子华	上海大学通信学院
吴建华	南昌大学电子信息工程学院
徐金平	东南大学无线电系
阎鸿森	西安交通大学电子与信息工程学院
袁占亭	甘肃工业大学
乐光新	北京邮电大学电信工程学院
翟建设	解放军理工大学气象学院 4 系
赵圣之	山东大学信息科学与工程学院
张邦宁	解放军理工大学通信工程学院无线通信系
张宏科	北京交通大学电子信息工程学院
张 泽	内蒙古大学自动化系
郑宝玉	南京邮电学院
郑继禹	桂林电子工业学院二系
周 杰	清华大学自动化系
朱茂镒	北京信息工程学院



序言

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”是清华大学出版社“新坐标高等理工教材与教学资源体系创新与服务计划”的一个重要项目。进入 21 世纪以来,信息技术和产业迅速发展,加速了技术进步和市场的拓展,对人才的需求出现了层次化和多样化的变化,这个变化必然反映到高等学校的定位和教学要求中,也必然反映到对适用教材的需求。本项目是针对这种需求,为培养层次化和多样化的电子信息类人才提供系列教材。

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”面向全国教学研究型和教学主导型普通高等学校电子信息类专业的本科教学,覆盖专业基础课和专业课,体现培养知识面宽、知识结构新、适应性强、动手能力强的人才的需要。编写的基本指导思想可概括为:

1. 教材的类型、选题和大纲的确定尽可能符合教学需要,以提高适用性。教材类型初步确定为专业基础课和专业课,专业基础课拟按电子信息大类编写,以体现宽口径;专业课包括本专业和非本专业两种,以利于兼顾专业能力的培养与扩展知识面的需要。选题首先从目前没有或虽有但不符合教学要求的教材开始,逐步扩大。

2. 重视基础知识和基础知识的提炼与更新,反映技术发展的现状和趋势,让学生既有扎实的基础,又了解科学技术发展的现状。

3. 重视工程性内容的引入,理论和实际相结合,培养学生的工程概念和能力。工程教育是多方面的,从教材的角度,要充分利用计算机的普及和多媒体手段的发展,为学生建立工程概念、进行工程实验和设计训练提供条件。

4. 将分析和设计工具与教材内容有机结合,培养学生使用工具的能力。

5. 教材的结构上要符合学生的认识规律,由浅入深,由特殊到一般。叙述上要易读易懂,适合自学。配合教材出版多种形式的教学辅助资料,包括教师手册、学生手册、习题集和习题解答、电子课件等。

本系列教材已经陆续出版了,希望能被更多的教师和学生使用,并热忱地期望将使用过程中发现的问题和改进的建议告诉我们,通过作者和读者之间的互动,必然会形成一批精品教材,为我国的高等教育作出贡献。欢迎对编委会的工作提出宝贵意见。

“新坐标大学本科电子信息类专业系列教材”编委会



前言

本书是为高等学校电子信息科学与电气信息类专业而编写的模拟电子线路基础教材。本教材的主要内容覆盖了“教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会”2004年版电子线路(I)基本要求的全部内容。考虑到教学改革的不深入及我校电工电子教学基地建设的需要,本教材在内容的取舍和编排方面做了调整,其教学内容与目前电子、电气信息类专业的教学体系相适应,并且为后续课程,特别是为“非线性电子线路”或“高频电子线路”的学习打下了扎实的基础。

本书是在原有讲义的基础上修改而成,原有讲义曾于2000年获得我校本科教学优秀备课笔记奖,它是作者多年的教学实践体会和科研经历的总结。从“打好基础,精选内容,逐步更新,利于教学”的原则出发,对教学内容进行了重新编排和整合。全书共分7章。在第1章中将半导体器件的特性及器件在电路中的模型合为一章,加强了器件特性的描述,突出了器件模型在电路分析中的重要作用。第2章集中阐述了三种基本组态电路的组成、工作原理及性能指标的分析和计算。第3章将集成运算放大器提前到负反馈放大器之前讲授,主要是为了加强集成电路的应用,有利于负反馈放大器和其他章节引用集成运放构成的电路;从集成运放内部电路的先后次序考虑,差分放大器作为运放的输入级,非谐振功率放大器作为运放的输出级和集成运放其他的内部电路融为一体,有利于章节的衔接,便于教学的实施。第4章是采用分立的、集成的实际电路与A、B网络统一表示的方框图相结合的方法讲述四种负反馈放大器。第5章是采用复频域的分析方法,根据系统的传输函数确定系统的零点、极点,画出电路的波特图,分析放大电路的频率特性。第6章强调的是集成运放的应用,集成运放大致可分为反相输入、同相输入、差动输入和开环比较四种基本类型的运用;讲述的电路有线性运算及非线性运算电路。第7章主要讲述了整流,滤波,串联型直流稳压电源的组成、工作原理,三端集成稳压器,开关型直流稳压电源。

为了体现教材的前瞻性,本书增加了新器件、电流模电路及开关电容滤波器等内容;在内容的编排上,尽量做到思路清晰,叙述详尽,便于自学,体现出编排的科学性;从器件到模型,从电压模电路到电流

模电路,从分立到集成,以集成电路为主线,将基本理论、基本电路以及基本的分析方法贯穿始终,体现了教材的系统性。

书中各章中加*号的部分为选读或自学内容,书末有习题答案供参考使用。

本书由董尚斌担任主编,负责全书体系的确定和编写组织工作。第1、4、7章由董尚斌编写,第2、5章由苏利编写,第3、6章由代永红编写。最后由董尚斌负责全书的统稿。

本书在编写的过程中,始终得到我院院长柯亨玉教授、副院长田茂教授的热情关怀和大力支持;甘良才教授审阅了全书,提出了许多具体的、建设性的修改意见;黄根春、李梦筱、王晓艳等老师在试用本教材的过程中,提出了许多中肯的修改意见;同时2004级同学在学习本教材的过程中,提出了许多有益的建议。值此,在本书付梓之际,编者对他们曾给予的关心、支持和帮助表示最诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有挂一漏万之处,恳请广大同仁和读者不吝赐教。

编者

2006年8月于武汉大学电子信息学院



目 录

第 1 章 半导体器件与模型	1
1.1 半导体的导电特性	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 半导体中的漂移电流和扩散电流	6
1.2 PN 结	8
1.2.1 动态平衡时的 PN 结	9
1.2.2 PN 结的导电特性	11
1.2.3 PN 结的击穿特性	14
1.2.4 PN 结的电容特性	16
1.2.5 二极管的结构及其主要参数	18
1.3 半导体二极管电路的等效模型及分析方法	20
1.3.1 半导体二极管在电路中的等效模型	20
1.3.2 半导体二极管电路的分析方法	25
1.3.3 特殊二极管	30
1.4 半导体三极管	32
1.4.1 半导体三极管的结构及符号	32
1.4.2 半导体三极管在放大区的工作原理	34
1.4.3 半导体三极管的伏安特性曲线	38
1.4.4 半导体三极管的主要参数	44
1.4.5 半导体三极管的埃伯尔斯-莫尔方程和 电路模型	47
1.4.6 半导体三极管的小信号电路模型	50
1.5 场效应管	60
1.5.1 MOS 场效应管	60
1.5.2 结型场效应管	67
* 1.5.3 其他类型的场效应管	69
1.5.4 场效应管的转移特性与电路模型	72
1.5.5 场效应管的主要参数及 FET 与三极管的 比较	75

习题	78
第2章 放大器基础	85
2.1 放大器的基本概念	85
2.1.1 放大器的基本组成	85
2.1.2 共发射极放大电路	86
2.1.3 放大器的性能指标	91
2.1.4 偏置电路与静态工作点	95
2.2 放大器的基本分析方法和基本放大电路	102
2.2.1 放大器的图解分析法	103
2.2.2 放大器的微变等效电路分析法	106
2.2.3 三种基本组态放大器中频段放大特性的比较	115
2.2.4 场效应管放大电路	115
2.3 多级小信号放大器	118
2.3.1 多级放大器的基本概念	119
2.3.2 多级放大器的阻抗和增益	121
2.3.3 改进型放大器	123
2.3.4 多级放大器供电电源的去耦问题	128
习题	130
第3章 集成电路与运算放大器	137
3.1 集成电路与运算放大器基础	137
3.1.1 集成工艺与集成元器件	138
3.1.2 集成运算放大器的组成、框图以及符号	143
3.2 集成运算放大器的输入级	145
3.2.1 差分放大电路的工作原理	145
3.2.2 差分放大电路的基本性能分析	147
3.2.3 差分放大电路的传输特性	153
3.2.4 差分放大电路的失调与温度漂移特性	155
3.3 集成运算放大器的偏置与负载	157
3.3.1 基本电流源	157
3.3.2 带有缓冲级的镜像电流源	158
3.3.3 比例电流源	158
3.3.4 微电流源	159
3.3.5 有源负载	160
3.4 集成运算放大器的中间放大级电路	161
3.4.1 双端变单端输出电路	161
3.4.2 电平移动电路	162

3.5 集成运算放大器的输出级	164
3.5.1 功率放大器及集成运放输出级	165
3.5.2 互补推挽输出级	169
3.5.3 准互补推挽输出级	172
3.6 集成运算放大器的整体电路	174
3.6.1 集成运算放大器的整体电路的举例	175
3.6.2 集成运算放大器的性能参数	177
3.7 集成运算放大器的基本应用	180
3.7.1 理想化集成运放的基本特性	180
3.7.2 集成运算放大器组成的基本电路	181
3.7.3 非理想集成运算放大器的误差分析	182
3.8 电流模电路基础	184
3.8.1 电流模电路的一般概念	184
3.8.2 跨导线性(TL)的基本概念	185
3.8.3 跨导线性(TL)回路原理	186
3.8.4 由 TL 回路构成的基本电流模电路	189
3.8.5 电流模电路的特点	193
习题	195
第 4 章 负反馈放大器	203
4.1 反馈的基本概念与分类	203
4.1.1 放大电路中的负反馈	203
4.1.2 负反馈放大器的基本组成	204
4.1.3 负反馈放大器的四种类型	207
4.1.4 反馈方程式、反馈放大器的分类及判别方法	210
4.2 负反馈对放大器性能的影响	215
4.2.1 负反馈提高了放大器增益的稳定性	215
4.2.2 负反馈可展宽放大器的频带宽度	216
4.2.3 负反馈可减小放大器的非线性失真	217
4.2.4 负反馈对放大器输入、输出电阻的影响	218
4.3 负反馈放大电路的分析方法	222
4.3.1 深度负反馈条件下的近似计算	222
4.3.2 采用方框图法分析负反馈放大器	225
4.3.3 四种负反馈放大器的性能分析	228
习题	234
第 5 章 放大器的频率响应	241
5.1 频率响应的分析方法	241

5.1.1	频率响应的表示方法	241
5.1.2	线性系统频率特性分析方法	243
5.1.3	几种简单线性系统的频率特性	244
5.2	放大器的频率特性	254
5.2.1	放大器的低频响应	254
5.2.2	放大器的高频响应	255
5.2.3	多级放大器的频率响应	264
5.3	宽频带放大电路	266
5.3.1	补偿法	266
5.3.2	组合电路	268
5.4	负反馈放大器的频率响应和稳定性	269
5.4.1	负反馈对放大电路频率特性的影响	269
5.4.2	负反馈放大电路的稳定性	270
5.5	放大器的相位补偿技术	273
5.5.1	简单电容补偿技术	273
5.5.2	阻容串联补偿	275
5.5.3	密勒电容补偿	277
5.5.4	超前补偿	279
习题		280

第6章 集成运算放大器的应用 284

6.1	集成运算放大器构成的放大电路	284
6.1.1	反相放大器	284
6.1.2	同相放大器	286
6.1.3	电流与电压转换器	287
6.1.4	差动放大器	289
6.1.5	仪器放大器	291
6.2	集成运算放大器组成的基本运算电路	292
6.2.1	加法运算电路	292
6.2.2	积分运算电路	294
6.2.3	微分运算电路	295
6.2.4	对数与反对数运算电路	296
6.2.5	乘法与除法运算电路	297
6.3	集成电压比较器	298
6.3.1	具有不同比较特性的电压比较器	299
6.3.2	集成电压比较器	303
6.4	有源滤波器	305
6.4.1	有源滤波电路的基本概念	306
6.4.2	一阶有源滤波器	306

6.4.3 二阶有源滤波器	309
*6.5 开关电容滤波器	314
6.5.1 开关电容电路的基本概念	314
6.5.2 基本的开关电容电路	317
6.5.3 开关电容滤波器	320
6.5.4 状态变量型有源滤波器	321
习题	325
第7章 直流稳压电源	332
7.1 直流稳压电源的基本组成	332
7.2 整流电路	333
7.2.1 单相整流电路的工作原理	333
7.2.2 整流电路的主要参数	335
7.2.3 倍压整流电路的工作原理	336
7.3 滤波电路	338
7.3.1 电容滤波电路	339
7.3.2 电感滤波电路	340
7.4 串联型直流稳压电路	341
7.4.1 稳压电路的质量指标	341
7.4.2 串联型稳压电路的工作原理	342
7.4.3 串联型集成稳压器的基本原理	345
7.4.4 三端集成稳压器的应用	347
7.5 开关型稳压电源	349
7.5.1 直流-直流变换器	349
7.5.2 开关稳压电源的工作原理	351
7.5.3 集成 PWM 控制器	352
习题	355
部分习题参考答案	360
符号表	365
参考文献	375



第 1 章

半导体器件与模型

半导体二极管、半导体三极管和场效应管都是常用的半导体器件,它们是电子线路的重要组成部分。为了能合理选择和正确使用这些器件,本章将详细讨论这些器件的工作原理、端口特性以及它们在电路中的基本模型。在后面的讨论中可以了解到:半导体器件均属于非线性器件,但如果给这些器件加上合适的静态工作点,并在输入为小信号条件下,它们在电路中又可视为线性器件。可见,器件在电路中的特性除了器件固有的特性之外,还与它所处的外部条件有关。因此,本章首先介绍半导体和 PN 结的特性,然后逐一介绍这些常用器件的基本特性,给出在不同外部条件下,器件在电路中所经常用到的电路模型。

1.1 半导体的导电特性

电阻率的大小决定了物质的导电性能。因此根据不同的电阻率,物质可分为导体、半导体和绝缘体三类。电阻率在 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 以下的物质称为导体,金属一般都是导体,如金、银、铜、铝等,它们具有良好的导电性能;电阻率在 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上的物质称为绝缘体,如陶瓷、云母、橡胶和塑料等,它们几乎不传导电流;电阻率在 $(10^{-3} \sim 10^9) \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内的物质称为半导体,如目前制造半导体器件最常用的材料硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等,它们的导电性能介于导体和绝缘体之间。

1.1.1 本征半导体

1. 原子结构及简化模型

半导体的导电性能与它的原子结构有关。原子是由带正电的原子核与带负电的分层绕核运动的电子组成。原子最外层的电子称为价电子,元

素的许多物理和化学性质都是由这些价电子来决定的。物质不同,原子的序数也不同,如硅原子的序数为 14,锗原子的序数为 32,它们的平面结构示意图分别如图 1-1-1(a)、(b) 所示。从图中可见,它们的核外电子数分别是 14 和 32,但它们最外层都只有 4 个价电子,属于四价元素,因而硅原子和锗原子结构的简化模型是相同的,如图 1-1-1(c) 所示。从图中可见,原子核及内层电子看成一个惯性核,它带有 4 个正电荷,外层有 4 个价电子,整个原子仍然呈现电中性状态。

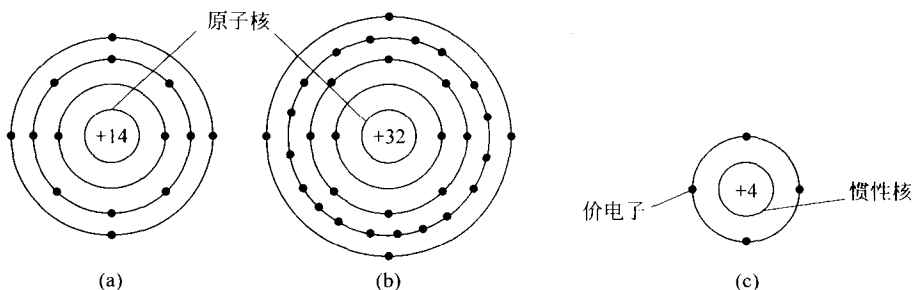


图 1-1-1 硅和锗原子结构模型

(a) 硅; (b) 锗; (c) 简化模型

2. 本征半导体和本征激发

硅和锗都是晶体,它们的原子都是有规则地排列着,并通过价电子组成的共价键把相邻原子牢固地联系在一起。所谓共价键,就是相邻两个原子通过共用电子对形成的结合形式。硅和锗晶体中,每个原子有 4 个价电子,它与相邻的 4 个原子组成 4 个共价键。图 1-1-2(a) 是硅和锗晶体共价键结构平面示意图。

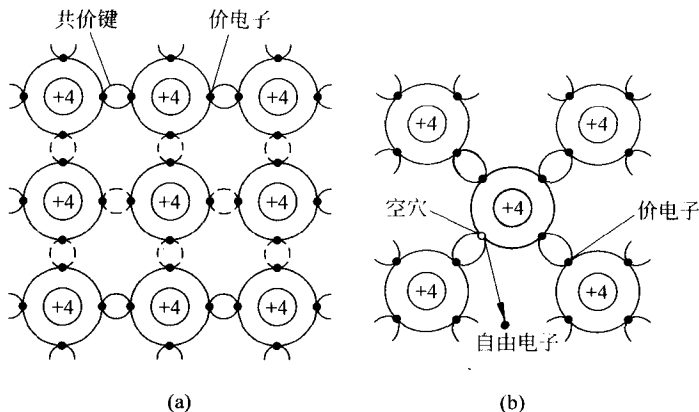


图 1-1-2 硅和锗的共价键结构和本征激发示意图

(a) 共价键结构平面; (b) 本征激发示意图

晶体又分为单晶和多晶两种,整块晶体内部局部晶格排列方向完全一致的称为单晶,各局部晶格排列方向不完全一致的称为多晶。纯净的、结构完整的半导体晶体称为本征半导体,是制造半导体器件的基本材料,所以半导体管又称为晶体管。

本征半导体在热力学温度 $T=0\text{K}$ (K 为开尔文) 和没有外界激发的条件下,它的价电

子都束缚在共价键上,没有载流子,半导体不能导电。当温度上升(或受到光照)时,一部分价电子获得能量挣脱共价键的束缚,成为自由电子,同时在共价键上留下与它数量相等的“空位”,这种现象称为本征激发(或热激发),如图 1-1-2(b)所示。

在共价键中出现空位时,相邻原子的价电子比较容易离开它所在的共价键,填充到这个空位中来,因而在失去价电子的共价键又留下新的空位,这个空位又可以被相邻原子的价电子填充,这样依次填充下去,便形成了空位的移动。由于带负电荷的价电子依次填充空位的作用与带正电荷的粒子作反方向运动的效果相同,因此,可以把空位的移动看作带正电荷的载流子空穴在移动。可见,半导体中能参与导电的载流子有两种,即自由电子和空穴。在热激发作用下,两种载流子总是成对出现,因而在本征半导体中,自由电子和空穴的数量总是相同的。热激发在产生自由电子与空穴对的同时,自由电子也可能跳入空穴,重新为共价键束缚,从而自由电子与空穴同时消失,这种现象称为复合。

3. 本征载流子浓度

当温度一定,由于本征激发而产生载流子,随着载流子浓度的增加,复合作用也在加强,在载流子的产生与复合达到动态平衡时,本征载流子浓度为某一热平衡值。如果温度升高,载流子的产生与复合会在新的、较大浓度值的基础上达到新的平衡。若用 n_0 表示热平衡时的自由电子浓度值, p_0 表示空穴的浓度值,它们统称为本征载流子浓度,用 n_i 表示。由于它们的数量相同,并分别带有负电和正电,半导体仍呈电中性状态,两种载流子浓度值的乘积恒为 $n_0 p_0 = n_i^2$ 。根据理论分析和实验证明,本征载流子的热平衡浓度值

$$n_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_{g0}}{2kT}} \quad (1-1-1)$$

式中, A_0 是与半导体材料有关的常数,硅的 $A_0 = 3.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-\frac{3}{2}}$, 锗的 $A_0 = 1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-\frac{3}{2}}$; E_{g0} 是 $T(\text{温度}) = 0\text{K} (-273^\circ\text{C})$ 时的禁带宽度,单位为电子伏特(eV)(硅为 1.21eV, 锗为 0.785eV); k 是玻耳兹曼常数, $k = 8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$)。

从式(1-1-1)可见,本征半导体中载流子浓度值取决于禁带宽度 E_{g0} 和温度 T 。当半导体材料一定而温度上升时, n_i 将随温度的增加而按指数规律增大。例如,在常温 $T = 300\text{K} (27^\circ\text{C})$ 时,本征硅的 $n_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, 本征锗的 $n_i \approx 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$; 而当温度每升高 11°C , 本征硅的 n_i 增加一倍, 温度每升高 12°C , 本征锗的 n_i 也增加一倍。可见,本征半导体的载流子浓度值对温度非常敏感,因此,半导体器件的工作与温度变化密切相关,而温度变化不仅是外界环境温度变化的结果,还与器件消耗电能的大小有关。

本征载流子在常温时的浓度值看起来似乎很大,但它仅占原子密度很小的百分比。例如,硅的 n_i 只相当于原子密度(硅的原子密度为 $4.96 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$)的三万亿分之一。可见,本征半导体的导电能力是很弱的。为了改善半导体的导电性能,可在本征半导体中掺入杂质,形成能够制造半导体器件的杂质半导体。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中,掺入微量的杂质元素,就成为杂质半导体。根据掺入的杂质性质的

不同,杂质半导体可分为 N 型半导体(或称为电子型半导体)和 P 型半导体(或称为空穴型半导体)两类。

1. N 型半导体

在本征半导体中掺入极微量的五价元素(例如磷)的杂质,可使晶体中的自由电子浓度大大增加,这种杂质半导体称为 N 型半导体。

由于五价元素的原子有 5 个价电子,因此,将它掺入本征硅中,用来顶替晶体中的四价元素原子时,每个五价元素原子的 4 个价电子将与周围的 4 个硅原子以共价键形式相结合,余下一个不受共价键束缚的价电子,如图 1-1-3 所示。这个价电子在室温时所获得的热能足以使它挣脱原子核的吸引而成为自由电子。可见,磷原子在晶体中电离产生一个自由电子,杂质原子便成为带一个电子电荷量的正离子,正离子束缚在晶体中,它不能像空穴那样起导电作用。能施放自由电子的杂质称为施主杂质。杂质原子电离释放的自由电子不是共价键的价电子因而不会产生空穴,这与本征激发是不同的。

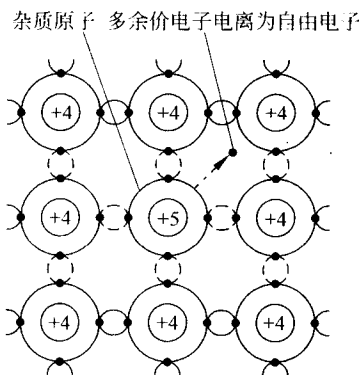


图 1-1-3 N 型半导体结构示意图

在室温条件下, N 型半导体中本征硅由于热激发产生自由电子-空穴时,杂质原子全部电离,自由电子的数目大大增加的同时也增加了自由电子与空穴的复合机会,随着掺杂浓度的增加,由于复合而使得空穴的平衡浓度值降低。因此,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。

当温度一定时,两种载流子的产生和复合达到动态平衡,若分别用 n_{n0} 和 p_{n0} 表示 N 型半导体中自由电子和空穴的浓度,则它们的浓度的乘积恒等于本征载流子浓度的平方,这种关系称为质量作用定律。

$$n_{n0} \cdot p_{n0} = n_i^2 \quad (1-1-2)$$

本征半导体掺杂后,整块杂质半导体内应保持电中性,也就是正、负电荷的数量相等。在 N 型半导体中,自由电子浓度等于正离子浓度和空穴浓度之和。当施主杂质的浓度用 N_d 表示时,则 N 型半导体的电中性方程式可表示为

$$n_{n0} = N_d + p_{n0} \quad (1-1-3)$$

通常 $N_d \gg p_{n0}$, 所以多子浓度 $n_{n0} \approx N_d$, 根据式(1-1-2)可求得 N 型半导体中少子浓度为

$$p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \quad (1-1-4)$$

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入极微量的三价元素(例如硼)的杂质,可使晶体中空穴浓度大大增加,这种杂质半导体称为 P 型半导体。

由于三价元素的原子只有 3 个价电子,因此,它与附近的硅原子形成共价键时,还缺少 1 个价电子,这样,在硼原子处就具有从附近的硅原子夺取 1 个价电子来填充这个空位