



高等学校教材

电子信息系列

模拟电子技术基础

王公望 主编

*Electronic
Information*



西北工业大学出版社

／ 高等学校教材

模拟电子技术基础

主 编 王公望

编 者 王公望 董晓强 谢松云

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是根据西北工业大学面向 21 世纪课程教材建设的总体规划,并结合现代科学技术发展的形势与当今的应用环境组织编写的。

全书共分为 8 章,内容包括半导体二极管及其基本电路、双极型晶体管与场效应管、基本放大电路、反馈、集成运算放大器应用、集成功率放大器及其应用、集成稳压电源及其应用、现代模拟电子技术。

本书可作为高等院校电类各专业的教材,也可作为相关专业工程技术人员的自学和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/王公望主编. —西安:西北工业大学出版社,2005.8

ISBN 7-5612-1967-9

I. 模… II. 王… III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 082642 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号,邮编:710072 电话:(029)88493844

网 址: www.nwpup.com

印刷者:陕西东江印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:22

字 数:534 千字

版 次:2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

定 价:29.00 元

前 言

本教材是根据西北工业大学面向 21 世纪课程教材建设的总体规划,并结合现代科学技术发展的形势与当今的应用环境组织编写的。

“模拟电子技术基础”课程,是高等院校电类专业重要的技术基础课程之一。目前国内相应的教材很多,并各有特色。本教材的内容是基于以下几个方面的考虑选定的:

1. 微电子产业的发展遵循一种规律,即加工工艺的发展必然引起设计方法的变革。而新的设计理念又促使材料、器件、电路与系统的一体化,使得集成电子学成为当今一门重要的学科。因此本教材在基础理论部分,着重加强了半导体器件的知识。将半导体二极管及其基本电路作为一章,又将双极型晶体管和场效应管作为一章,较深入、细致地介绍了器件内部的电学特性、器件的工作原理及电路模型。以使学生在打下良好的基础,面向新器件层出不穷的现实,掌握、应用新器件。

2. 当今电子技术的发展呈现出电路与系统集成化的趋势,大量专用集成电路的涌现,促使了教学内容的更新。因此本教材大幅度压缩了分立元件电路的内容,将过去占有较大篇幅的电压放大电路归为一章,即“基本放大电路”。内容包括 BJT 放大电路, EFT 放大电路, 电流源与有源负载电路, 以及差分式放大电路, 集成运算放大电路等。并着重于介绍放大电路的基本分析与综合方法。由于负反馈在模拟电子技术中的重要应用, 本教材将其单独设置为一章, 侧重介绍负反馈的作用及应用中实际问题的处理。

3. 针对当今电子技术的应用环境, 为了体现教材的实用性, 使理论教学与工程应用密切结合, 本教材将集成运算放大器应用, 集成功率放大器及其应用, 集成稳压电源及其应用作为重点, 分为三章。在集成运算放大器应用一章中, 增加了有源滤波器的内容, 并将信号产生电路分为正弦波信号产生电路与非正弦波产生电路两部分, 以满足不同专业的需要。在集成功率放大器及其应用一章中, 着力于反映当今集成电路功率化、功率器件集成化的特点, 介绍了目前新兴发展起来的功率器件与功率模块, 较详细地介绍了 D 类功率放大器及其应用。在集成稳压电源及其应用一章中, 系统地介绍了三端固定输出、三端可调输出与多端线性集成稳压器, 以及开关型集成稳压器和相应的稳压电源。这三章内容均是立足于基础, 着眼于实用, 以使理论教学与应用环境相适应。

4. 为适应电子技术发展的需要, 本教材专设了一章“现代模拟电子技术”, 主要介绍电流模电路中的电流传输器, 跨导线性电路和运算跨导放大器 OTA 等。以使学生在传统的电压模电路的理论与应用的思路中, 增进一些电流模电路的概念, 扩大知识面, 掌握新技术。

5. 本教材引用了较多的集成电路应用实例, 为的是把课堂教学与工程应用结合起来, 让学生熟悉应用环境, 了解所学知识的实践价值, 改变过去对工程应用无所适从的状态。为便于

教师组织教学内容,这些实用电路可让学生自学,或通过实训掌握。

6. 本教材每章均以“提要”方式作为一章内容的引导,并在一章结束时,以“本章重要概念”方式进行小结,纲目较为清晰。各章所设置的习题,可使学生巩固所学的知识,检验应用知识的能力。

本教材由西北工业大学王公望教授,董晓强、谢松云副教授三人合作编写,并由梁荣萱、邵世兰两位老师整理全部图稿。王公望教授任主编,负责全书的组稿和定稿。

我们衷心地感谢关心和帮助本教材出版的所有同志,并对本教材选用参考文献的著作者致以诚挚的谢意。

编 者

2005年4月15日

目 录

致学生(代绪论).....	1
第 1 章 半导体二极管及其基本电路.....	6
1.1 半导体物理基础知识	6
1.1.1 本征半导体及半导体中的载流子	6
1.1.2 杂质半导体	8
1.2 PN 结的形成及其特性	10
1.2.1 PN 结的形成	10
1.2.2 PN 结的单向导电性	10
1.2.3 PN 结的反向击穿	13
1.3 半导体二极管.....	14
1.3.1 二极管的 $V-I$ 特性	14
1.3.2 二极管的参数.....	15
1.4 二极管基本电路.....	19
1.4.1 二极管等效模型.....	19
1.4.2 二极管基本电路分析.....	20
本章重要概念	30
习题	30
第 2 章 双极型晶体管(BJT)与场效应管(FET).....	34
2.1 双极型晶体管的基本工作原理及特性.....	34
2.1.1 双极型晶体管放大偏置工作状态下内部载流子的传输过程.....	35
2.1.2 双极型晶体管的伏安特性曲线.....	36
2.1.3 双极型晶体管的偏置方式及工作模式.....	39
2.1.4 双极型晶体管的等效模型.....	41
2.1.5 双极型晶体管的最大额定值.....	48
2.1.6 范例.....	49
2.2 场效应管的基本工作原理及特性.....	51
2.2.1 结型场效应管(JFET)	52

2.2.2 砷化镓金属-半导体场效应管(MESFET)	56
2.2.3 金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)	57
2.2.4 场效应管的等效模型及参数	60
2.2.5 各种场效应管的特性比较及范例	62
本章重要概念	66
习题	67

第3章 基本放大电路 70

3.1 双极型晶体管(BJT)基本放大电路	70
3.1.1 直流偏置技术与直流分析方法	70
3.1.2 晶体管放大电路交流小信号状态下电路性能表征及图解法分析	74
3.1.3 晶体管放大电路交流小信号等效模型分析法	78
3.1.4 范例	84
3.2 场效应管(FET)基本放大电路	87
3.2.1 直流偏置电路与直流分析方法	87
3.2.2 场效应管放大电路交流小信号等效模型分析法	89
3.2.3 范例	94
3.3 放大电路的频率响应	97
3.3.1 放大电路频率特性的基本关系	99
3.3.2 单级放大电路的高频响应	100
3.3.3 单级放大电路的低频响应	108
3.3.4 多级放大器的频率响应	110
3.3.5 范例	112
3.4 电流源及有源负载	114
3.4.1 电流源电路	114
3.4.2 有源负载电路	119
3.4.3 范例	120
3.5 差分式放大电路	122
3.5.1 基本差分式放大电路	123
3.5.2 差分式放大电路的性能分析	125
3.5.3 范例	129
3.6 集成运算放大器电路	132
3.6.1 集成运算放大器电路组成	132
3.6.2 集成运算放大器的主要参数	136
3.6.3 集成运算放大器的类型	137
3.6.4 范例	138
本章重要概念	143
习题	145

第 4 章 反馈	157
4.1 反馈的基本概念	157
4.1.1 反馈放大电路的基本框图及增益的一般表达式	157
4.1.2 负反馈放大电路的分类	158
4.2 负反馈放大电路及其分析方法	160
4.2.1 电压串联负反馈电路	160
4.2.2 电流并联负反馈电路	163
4.2.3 电压并联负反馈电路	164
4.2.4 电流串联负反馈电路	166
4.3 负反馈对放大电路输入电阻和输出电阻的影响	168
4.3.1 负反馈对放大电路输入电阻的影响	168
4.3.2 负反馈对放大电路输出电阻的影响	169
4.3.3 关于负反馈放大电路输入、输出电阻的讨论.....	170
4.4 负反馈对放大电路性能的改善	171
4.4.1 提高增益的稳定性	171
4.4.2 减小非线性失真,扩大电路输入信号的动态范围.....	171
4.4.3 抑制反馈环内的噪声,提高信噪比.....	172
4.4.4 扩展通频带,减小频率失真.....	172
4.5 负反馈放大电路的小信号模型分析法	173
4.5.1 等效框图的形成	174
4.5.2 电路技术指标计算	175
4.6 负反馈放大电路的稳定问题	177
4.6.1 负反馈放大电路的稳定工作条件	177
4.6.2 负反馈放大电路稳定性分析	178
4.6.3 频率补偿技术	180
4.7 范例	183
本章重要概念.....	185
习题.....	187
第 5 章 集成运算放大器应用	194
5.1 集成运算放大器的选用及应用中的实际问题	194
5.1.1 选用集成运放的一般原则	194
5.1.2 集成运放使用中的实际问题	195
5.2 集成运算放大器组成的基本运算电路	196
5.2.1 基本运算电路的分析方法	196
5.2.2 集成运放组成的基本运算电路	197
5.2.3 集成运放非理想参数对运算电路性能的影响	200
5.2.4 集成运放运算电路应用实例	202

5.3 集成运算放大器组成的有源滤波电路	206
5.3.1 集成运放组成的二阶有源 RC 滤波器的两种典型结构	208
5.3.2 集成运放二阶有源 RC 滤波器应用实例	213
5.4 集成运算放大器组成的正弦波信号产生电路——正弦波振荡电路	216
5.4.1 正弦波振荡电路的振荡条件	216
5.4.2 集成运放 RC 正弦波振荡器	217
5.4.3 集成运放 LC 正弦波振荡器	222
5.4.4 集成运放石英晶体正弦波振荡器	224
5.5 集成运算放大器组成的非正弦波信号产生电路——弛张振荡器	226
5.5.1 电压比较器	226
5.5.2 集成运放非正弦波信号产生电路	229
5.6 集成运算放大器组成的信号线性变换电路及特征值运算电路	234
5.6.1 信号线性变换电路	234
5.6.2 特征值运算电路	235
本章重要概念	237
习题	238
第 6 章 集成功率放大器及其应用	248
6.1 功率放大电路概述	248
6.1.1 功率放大电路的特点	248
6.1.2 功率放大电路的类型	249
6.1.3 功率器件与功率模块	251
6.1.4 功率器件的散热问题	255
6.2 常用功率放大电路分析	257
6.2.1 AB 类互补对称功率放大电路	257
6.2.2 D 类功率放大电路	263
6.3 集成功率放大器及其应用电路	265
本章重要概念	273
习题	274
第 7 章 集成稳压电源及其应用	278
7.1 直流稳压电源的组成及工作原理	278
7.1.1 整流与滤波电路	278
7.1.2 串联反馈型直流稳压电路	282
7.1.3 开关型直流稳压电路	283
7.1.4 直流稳压电源的性能参数	287
7.2 线性集成稳压器及其应用	288
7.2.1 三端固定输出集成稳压器	288
7.2.2 三端可调输出集成稳压器	292

7.2.3 多端集成稳压器	296
7.3 开关型集成稳压器及其应用	303
本章重要概念	308
习题	309
第 8 章 现代模拟电子技术	313
8.1 电流模电路	313
8.1.1 电流传输器	314
8.1.2 电流传输器的应用	316
8.1.3 电压模电路与电流模电路的互易	320
8.2 跨导线性电路	325
8.2.1 跨导线性原理	325
8.2.2 跨导线性电路	327
8.3 运算跨导放大器(OTA)	329
8.3.1 双极型晶体管 OTA	330
8.3.2 CMOS OTA	333
8.3.3 OTA 电路的应用	333
本章重要概念	338
习题	339
参考文献	342

致学生(代绪论)

本书的目的是向电气和计算机工程的学生介绍电子电路的广泛范围——既有分立电路也有集成电路。我们的意图是开发学生系统地分析和设计各种电子电路的能力,具体措施是指导学生分析和设计各种从简单到复杂、从经典到现代的电路实例。

我们的步骤是首先介绍适度地物理概念,以使学生对半导体结的特性有所了解;之后解释半导体器件(如:二极管、双极型晶体管和场效应管)的模型,重点是从实际电路的角度研究器件模型的特性,其目的是使学生了解用于各种器件的模型精度及其有效应用范围。

你必须已学过线性电路分析入门课程,已掌握基尔霍夫电流与电压定律,并具有简单微积分等数学基础;我们希望能培养你解决问题的能力。教育研究人员懂得,解决问题的能力不一定仅从常规地求解大量问题而获得,而使用被证实了的解决问题的对策和方法可以大大地加速这种能力的培养。在本文的后面部分我们将讨论学习技术资料和解决问题的有效办法。

你将会看到,当这种有效办法可以成立时,我们会喜欢做简化假设和快捷近似计算。这样做可以培养对电路性能的“感觉”。

构筑你的研究和 Learning 框架

你可能认为工科学学习很难。实话讲确实难!可是,困难的某些方面可能是由于不恰当的或不够有效的学习方法造成的。为了培养良好的学习习惯,你可能需要在学习增加学习构架和纪律概念。你可能会从使用正规的学习方法受益,因为这种方法能极大地增加你的学习效率。为改善你的研究和 Learning,你可以试试以下的方法:阅读、笔记、解题和评定你自己学到的东西。可是最终你必须确定哪种方法对你有效。如果你解决了培养很有力的学习方法这一问题,那么你在成为工程师——问题解决者的路上已迈出了第一步。

下面概述的学习方法不全都是我们自己的,而是对众多作者和教育家对学生学习经验的总结,在此我们感谢他们所做的贡献。在由 Stice^① 编写的书中我们可以发现有关有效的教与学的新见识。

阅读:SQ3R 方法

阅读课本以求理解的过程与阅读小说以求娱乐的过程是不同的。一般人在阅读小说时通常不会先浏览一下小说以获得关键要点,并跳至书末找出结局如何,之后再回过头来补读空白

^① Stice J. E. Developing Critical Thinking and Problem-Solving Abilities, New Directions for Teaching and Learning, No30, San Francisco: Jossey-Bass, June 1987

点。这种方法会使阅读小说的目的变得毫无意义。可是,当你阅读的是教科书时,这正是你应该采用的方法,这样可以使你的理解和记忆的潜能最大程度地发挥出来。一种已被证实的能极其有效地改善对教科书的阅读理解(因此也可以提高学习成绩)的正规步骤是 SQ3R 方法,此方法是由 Francis Robinson^① 发明的。符号 S-Q-R-R-R 代表 Survey(浏览)Question(问题)/Read(阅读)Recite(详述)和 Review(复习)。下面讨论这五个步骤。

浏览 在开始详细阅读之前先浏览一下阅读任务。此时仅阅读文章标题、插图说明和章节的总结。另外应注意有强调标记的内容和其他表示主题思想的重点。你应该对阅读任务有个总的展望,这样在开始阅读前你会知道你的目的是什么。

问题 通过你对每一章节阐述想要提问和回答的问题将阅读任务(作业)分解成易处理的小部分,使用各章节的标题、插图说明等等作为指向来就阅读内容提出问题。问题须尽可能具体和明确。可以提纲形式草草地记下问题并为以后要书写答案留出空间。这个步骤的意图是开创一个构架以便将你在阅读时学到的详细东西保存起来(记下来)。

阅读 通过浏览和提问题已为你汲取新知识做好了准备。下一步是详细阅读。每次阅读一小段内容。如果所读的内容在第一次阅读后感觉困难或者混淆,不要继续往下读了,而要回头重新阅读这部分内容,每次可能只读一段或两段。

详述 在你读完一节,后,停一下并详述你已读过的内容,设法回答你自己提出的问题,并在你的提纲上记笔记。如果你起初的问题不完整,可提出(和回答)更多的问题。只有在你能以自己的语言归纳出中心思想之后才能继续阅读下一节内容。

对每一节都要重复问题、阅读和详述,直到你已经完成了阅读任务。

复习 在你已读完全部阅读任务后,再将其浏览一下,复习一下笔记,并再次提出和回答问题。设计以教科书中没有讨论过的方式来应用阅读内容。如果可能,与同伴一起学习并互相就阅读内容提问。

在电子电路课程中,有时就某一特殊题目或章节要花几课时才能讲完全部内容,这样你也不必在一次自学时间内读完整个内容。事实上,用几个较短的自学时间来完成一章或一节的阅读对你来讲可能是最佳方案,这会给你更频繁地考虑和复习阅读内容的机会。

本书编排得益于使用 SQ3R 方法。在每一章的开头,引语提供了该章的概述和全面展望,分别在章末列出每章的重要概念和检查问题以指导你的阅读;可是,我们鼓励你实施你自己的浏览以及提出你自己的问题。本书列举了许多示意图、电路图、曲线图和图表,它们均与本书密不可分。方程式和图表均系统地编号,故一旦推导出来,可以在全书的任何地方很容易地注明位置。在每章的结尾,有该章的总结和习题供你浏览和做复习练习。

笔记

你在课堂上做笔记的任务与法庭速记员做记录的任务有极大的区别。速记员必须记录下法庭上所说的每一句话。你的目标是捕捉课堂上教师所讲的主题思想,所做的笔记要足够准确和编排合理,以便今后它可以成为学习的助手。有效做笔记的一些简单提示为:

课前做好准备 课前要完成教师分派的阅读任务并将你的 SQ3R 笔记带在身上。当教师讨论使你感到迷惑的话题时,应向教师提问,并将教师给出的答案记在提纲处。

^① Robinson F. P. *Effective Behavior*, New York: Harper & Row, 1941

设想你在为你最好的朋友做笔记,因为你的朋友无法来上课 你的目的是为你朋友提供一份编排合理的笔记,它记录下课堂上的重点。你的课堂笔记可以成为你的 SQ3R 笔记的补充。

注意听重点词 因为它预兆中心思想(三个主要原因为……),一种另外的解释(换句话说……),一个总结性语句(最后我们可以说……),或者语句方向改变(反之……)。

不要假设教师会在黑板上写出所有你希望知道的东西 阅读书上所写的每个字并注意听教师所说的每一句话,但你在做笔记时要有所选择。

课后(但应在下节课之前)将你的 SQ3R 笔记和课堂笔记重写成一个单一的、编排合理的单元 这是另一次复习所学内容并巩固你对所学内容理解的机会。

培养解决问题能力

在我们讨论如何成为更好的解决问题者之前,我们应该先确定什么叫解决问题。以下定义由 D. R. Woods^① 提出并适合我们在此使用:“解决问题是对一个新问题获得满意解决的过程,或至少这一问题的解决者以前没有见到过”。该定义的含义是解决问题绝不是仅仅照着书本上的例子做作业,真正的解决问题是要求我们使用已有的知识对论据与原理的理解,以及应用这些论据与原理的能力和领悟新情况的理解力。有了这些我们就能解决新问题,尽管这些问题我们不能一下子就看出解决办法。

解决问题的一个重要环节是遵循一个有机的对策。我们在此概述由 Polya^② 发明而由 Woods 改良的对策。开始时重要的是密切注意每一个步骤,之后当你变得更有经验和成功时,你将能培养自己对对策的改变。但是就目前而言,当你在解决问题时应设法遵循以下步骤:

定义 对实际问题进行定义。经常出现的情况是给出的或收集到的信息是不需要的、不正确的或是引入歧途的,这样就可能会分散你对真实问题的注意。

想一下 在没有“熟悉”问题的情况下,不要急于得出结论。要认清问题的特征,对已知情况进行汇总和组织,画出示意图。想想涉及了什么知识领域,你有足够的信息来解决问题吗?你以前解决过类似问题吗?

计划 流程图表示解决问题的过程。明确从哪儿开始,什么样的一些步骤可以得出解?问题能分解成易处理的一些小问题以便每次解决一个小问题吗?碰到困难时考虑其他可能的解题方案。

实施计划 遵循你的计划来解决问题。

回顾 你解决的是被提问的问题呢?还是解决了其他问题?你的解合理吗?你犯有任何数学方面的差错吗?检查答案的符号、小数点位置、移位位数等等是否正确。你是将解和答案以符合逻辑和可读的方式表达的吗?

本书中我们在大量的例子中始终包括逐步解决问题的步骤。

① Woods O. R. et al. "Teaching Problem-Solving Skills," Engineering Education, 66(3): 238-243, December 1975

② Polya G. How to Solve It 2nd Ed., Princeton: Princeton University Press, 1971

评价方法

评价是我们弄清楚在学习什么和学得如何这一过程。当我们想到评价时,通常想的是考试。可是,有几种其他评价方法我们能够(和应该)不断地采用以检测我们的学习。我们改编了一段 Angelo^① 的评价方法作为检测作业习题的手段。下面概述这种方法。记住使用评价方法本身有助于加强学习。

有文字说明的问题解答 当你在解决问题时,得出正确答案是不够的!你还必须理解问题是如何解决的,以及这种解决方法如何能适应其他情况。有文字说明的问题解答能帮助你对此加以理解。其方法是在答案中加入详细的文字说明,对你所得答案的过程加以解释。重要的是你要清楚地说明你所采取的每一步骤以及为什么你作出某些决策。当然,在你做作业习题时参看例题是有好处的。可是,简单地将你的习题语句与例题语句加以比较,然后盲目地遵循例题中采用的解题步骤是不好的。

定向解释 一个工程师所面对的最困难的任务之一,是将高度技术性问题和特殊信息以日常语言加以表述,使非技术人员(买主、顾客、朋友、父母等)能够理解。定向解释是一种你用自己的语言对某一特殊听众的特殊需要解释某种概念性东西的技巧。定向解释有助于培养你语言交流能力。此外,用你自己的语言来解释某种概念会有助于你获得对该概念更完整的理解。

学生出的测试问题 求解每章结尾的作业习题的过程基本上是一种被动响应。这就是说,你一般只是回答习题中提出的问题,而不会将结论扩展至超出要求的范围。理想地讲,你的学习应包括更主动地提出有关问题和回答问题。提出你自己的测试问题的过程是一种有价值的手段,它使你收集到的许多论据编排得有条理并将其综合成为你自己创造的东西。之后你可以着手求解自己出的考题作为对教材内容的练习。这也是一个检查自己对教材内容中哪些方面尚未理解的机会。当你为自己出测试题时,实际上是为即将来临的考试做准备。你必须识别什么概念是最重要的,有关这些概念的知识是如何通过试题展现出来的,以及怎样能构成一个完整的问题解答。出好的测试问题是一项很困难的任务。如果你严肃地对待这些练习,你会对所学内容有更深刻的理解并在实际考试时取得优异成绩。

最后的话

古人云:“听到的,我会忘记;看到的,我可能会记住;经历过的,我终生不忘。”工科学生一般为直观的、感性的学习者。鉴于此,本书大量地用电路图、传输特性曲线、同步波形和计算机产生的图形来帮助你观察电子电路中正在发生什么过程。我们鼓励你积极地参与进去以便你能够体验电子学的激动人心之处,并将学到的知识应用到实际生活中并终生不忘。我们已尽了我们的全部可能来使你迈出坚实的第一步,其余的就靠你自己了。现在就伴随着我们对你成功的良好祝愿开始你的电子电路学习吧!

^① Angelo T. A. and Cross K. P. Classroom Assessment Techniques: A Handbook for College Teachers, 2nd Ed., San Francisco: Jossey-Bass, 1993

摘自 Stanley G. Burns Paul R. Bond: PRINCIPLES OF ELECTRONIC CIRCUITS,
Second Edition.

Original edition copyright © 1997.

第 1 章 半导体二极管及其基本电路

【提要】 现代电子电路与集成电路都是基于半导体材料和半导体器件而应用和发展的。本章首先介绍半导体材料的基本知识及其导电机理,PN 结的形成及其特性。然后重点介绍半导体二极管的物理结构、工作原理和特性曲线,以及半导体二极管的电路模型和主要参数。并在此基础上,介绍半导体二极管和几种特殊二极管的应用电路及电路的分析方法。

用于制造半导体器件的材料,常用的,一是元素半导体材料,例如硅(Si)和锗(Ge);二是化合物半导体材料,例如砷化镓(GaAs)等。由于硅加工工艺的不断改进,已成为现代最重要的一类半导体材料,本章重点介绍的即是硅半导体及其电特性。

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,并具有与导体和绝缘体不同的特性。例如,其导电能力会因微量掺杂而显著地增加;会因光、热等外界因素的作用而显著地变化。为了理解这些特性,必须掌握半导体的内部结构及其相关的物理基础知识。

1.1 半导体物理基础知识

1.1.1 本征半导体及半导体中的载流子

硅和锗位于元素周期表的第Ⅳ族,每个原子具有 4 个价电子。单晶硅具有金刚石型的晶体结构,每一个硅原子和相邻的 4 个硅原子依靠共价键结合成正四面体,其三维视图如图 1.1.1 所示。为了更直观地表达这一结构的特点,可画出硅晶体的二维晶格结构图,如图 1.1.2 所示。

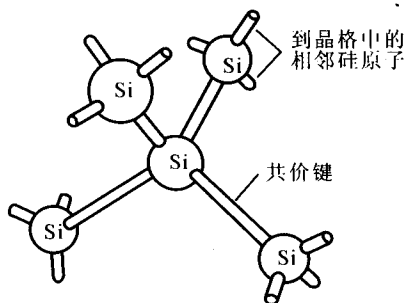


图 1.1.1 硅的金刚石(四面体)型晶体结构的三维视图

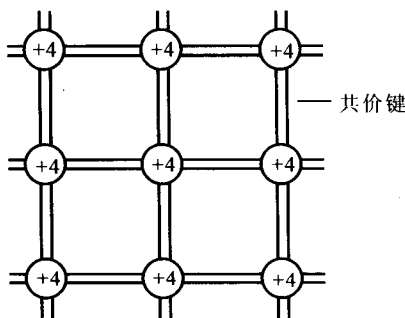


图 1.1.2 硅晶体晶格的二维表示图

通常把完全纯净不掺杂、结构完整无缺陷的半导体称为本征半导体。

在绝对零度,即 $T=0\text{ K}$ 时,本征半导体中所有的价电子都被束缚在共价键内,即全部价电子都处于晶体的价带之中,而在晶体的导带中没有自由电子,因此,本征半导体具有零电导率而不能导电。当温度高于绝对零度,例如 $T=300\text{ K}$ (室温 27°C) 时,温度作为一种激发源,在本征硅内形成了由热效应导致的晶格振动形式的能量,共价键中的电子若是获得了足够的热振动能量,就有可能克服共价键的束缚释放出来(即从价带跃迁到导带),成为自由电子。这一方面使原来的共价键破裂;另一方面自由电子若在外电场作用下作定向运动,就形成了半导体中的电流。因此,自由电子是本征半导体的一种载流子。

随着共价键的破裂和电子的释放,在价键中留下了一个带净正电荷的、未被电子填充的空位,称为空穴,这是半导体材料的一个重要特征。空穴的出现,将引起相邻共价键中的价电子移动过来填充它,此时空穴就会出现在相邻的共价键中。由于空穴带正电荷,空穴的迁移可看做是正电荷粒子的运动,若在外电场作用下作定向运动,也将形成半导体中的电流。因此,空穴是本征半导体的另一种载流子。

综上所述,在本征半导体材料中,存在两种载流子,一是带负电荷的,处于导带中的自由电子;二是带正电荷的,处于价带中的空穴,空穴导电的实质是价带中电子的迁移。这种在外部因素例如温度激发下,共价键破裂产生电子-空穴对的过程,称为本征激发。如图 1.1.3(a), (b) 所示。与本征激发类似的逆过程,即当导带中的电子丧失能量后,又被原子核重新俘获,回到共价键中而使电子-空穴对消失的过程,称为本征复合,如图 1.1.4 所示。

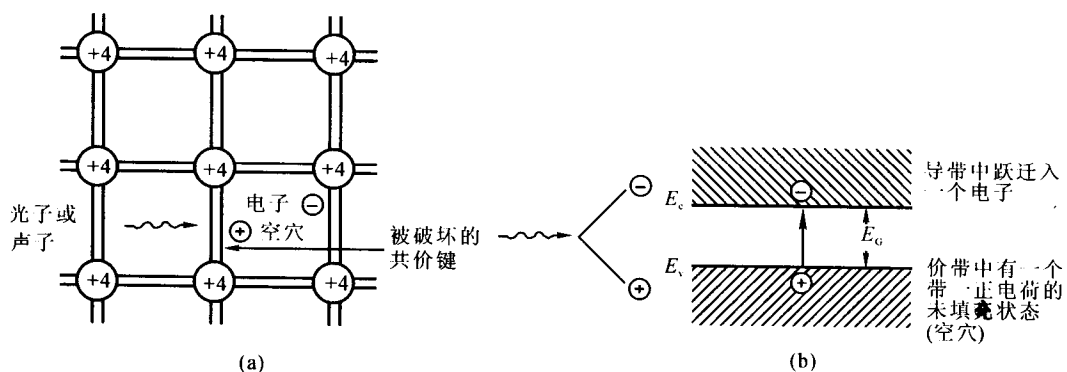


图 1.1.3 本征激发示意图

(a) 电子-空穴对的产生; (b) 电子-空穴对产生时的能带图

由于本征激发自由电子和空穴总是成对地出现,而本征复合自由电子和空穴又是成对地消失。在一定温度下,当本征激发与本征复合达到动态平衡时,本征半导体内形成了稳定的载流子浓度,而且自由电子和空穴的浓度总是相等的。理论分析表明,本征载流子的浓度表达为

$$n_i = p_i = A_0 T^{3/2} e^{-E_{GO}/2kT} \quad (1.1.1)$$

式中, n_i , p_i 分别表示本征半导体中电子和空穴的浓度 (cm^{-3}); T 为热力学温度 (K); E_{GO} 为

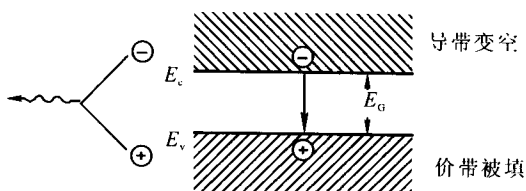


图 1.1.4 电子-空穴对的复合