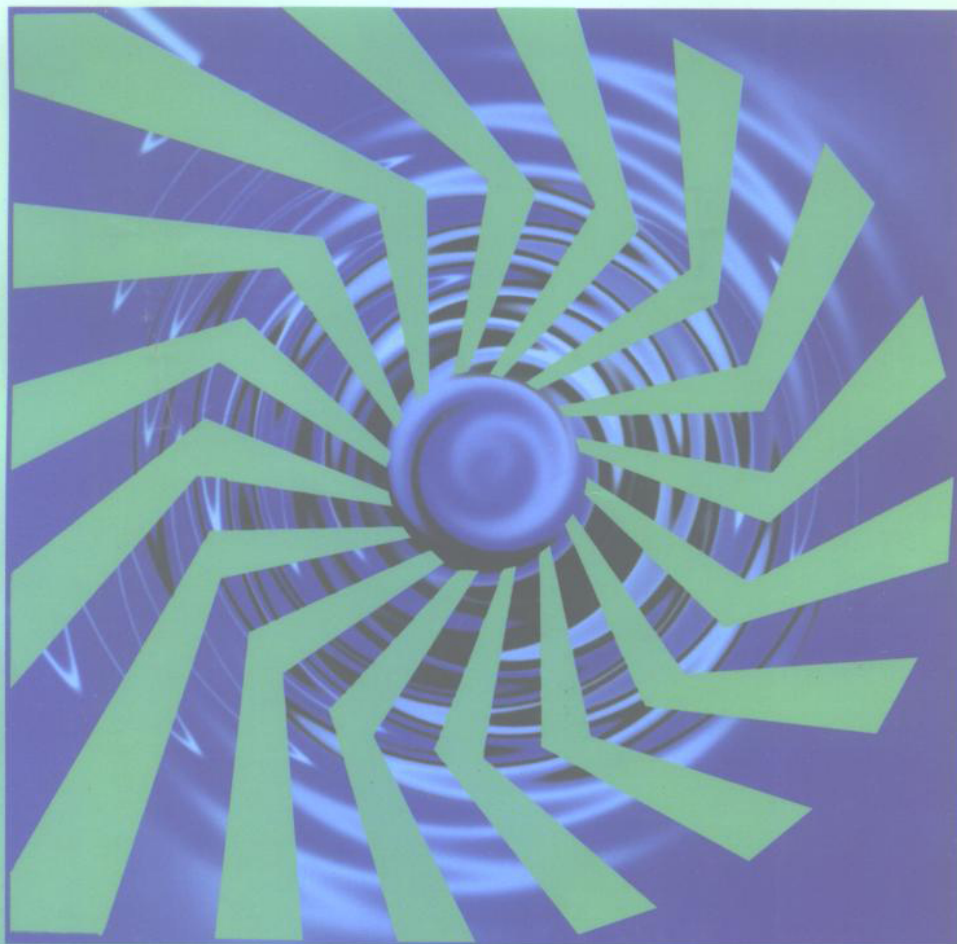




电子信息类规划教材

模拟电子线路 (一)

郑应光



东南大学出版社

电子信息类规划教材

模 拟 电 子 线 路

(一)

郑应光

东南大学出版社

内 容 提 要

本书为原电子工业部“九五”规划教材。内容分8章,分别叙述半导体二极管和三极管、放大电路基础、场效应管及其放大电路、集成运算放大电路、放大电路中的负反馈、集成运放的应用电路、低频功率放大器和直流稳压电源。每章末都有本章小结和习题,书末附有部分习题答案,便于读者自学。

本书可作为高职、中专等职业院校电子类专业的教材,也可供有关电子技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路.(一)/郑应光编. —南京:东南大学出版社,2000.4

ISBN 7-81050-589-0

I. 模… II. 郑… III. 模拟电路—高等学校—教材
IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 15496 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼2号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 扬中市印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:16.50 字数:433 千

2000 年 5 月第 1 版 2000 年 5 月第 1 次印刷

印数:1~6000 册 定价:22.00 元

前 言

本书是“九五”规划教材,根据原电子工业部《〈模拟电子线路〉教学大纲》编写的,并经全国中专电子技术类专业教学指导委员会组织的审稿会审定通过,可作为高职、中专等职业院校电子类专业的教材。

《模拟电子线路》分为两册出版,其中《模拟电子线路》(一)为低频电子线路,《模拟电子线路》(二)为高频电子线路,它们之间既相对地独立,又有机地联系在一起。

当前,电子技术的发展异常迅速,教学改革的风潮汹涌澎湃,如何编写一本符合教改精神、反映电子技术的新进展而又具有职教特色的教材,无疑是一项艰巨的任务。为此,全国中专电子技术类专业教学指导委员会于1998年10月在南京召开了《模拟电子线路》编写大纲讨论会,参加会议的有来自上海、天津、辽宁、常州、淮阴、浙江、安徽、福建、山东、广东、南昌、重庆、贵州和南京等14所电子类职业院校的教师。本书就是作者根据这次会议确定的编写大纲,并总结多年教学实践的经验教训编写的。

本书在保证基本概念、基本电路和基本分析方法的前提下,精选内容,着重于讲清物理意义,避免繁琐的公式推导,并适当介绍新器件和新电路,力求做到科学性、先进性与通俗性的有机结合。编者希望本书具有“通俗易懂、好教好学、内容精炼、有所创新”的特色,能得到读者的肯定和喜爱。

为了使读者更好地掌握基本理论和基本分析方法,培养分析问题和解决问题的能力,本书选取了适量的习题,并在书末附有参考答案。

本书打星号(*)的内容可不讲授。

东南大学谢嘉奎教授在讨论编写大纲和书稿的形成过程中提出了许多中肯的建议,并给予了热情的指导,编者在此表示深切的谢意。

本书由辽宁电子工业学校金文华老师主审,他认真审阅了教材的原稿,指出了书稿中的不妥之处,并提出了许多宝贵的意见。上海电子技术学校吴汉森、陈国培老师,北京信息职业技术学院黄一萍老师,广东省电子技术学校钟治邦老师,福建电子工业学校潘平仲、杨元挺、陈颖、李天恩、朱丽华等老师参加了审稿会,他们都提出了宝贵的意见。其中吴汉森老师为本书的责任编委,在本书的编写和审稿过程中做了大量的工作。编者在此对以上同志表示衷心的感谢。此外,南京无线电工业学校的领导对本书的编写工作给予大力的支持,为本书的出版创造了良好的条件。

由于编者水平有限,书中一定存在不当之处,期望得到广大读者的批评指正。

编 者

1999年10月于南京

目 录

绪论	(1)
1 半导体二极管和三极管	(3)
1.1 半导体的基本知识	(3)
1.1.1 本征半导体	(3)
1.1.2 杂质半导体	(4)
1.1.3 PN 结	(6)
1.2 半导体二极管	(9)
1.2.1 二极管的结构和类型	(9)
1.2.2 二极管的伏安特性曲线	(10)
1.2.3 二极管的等效电路	(11)
1.2.4 二极管的主要参数及其选择	(14)
1.3 特殊二极管简介	(15)
1.3.1 稳压二极管	(15)
1.3.2 变容二极管	(17)
1.3.3 光电二极管	(18)
1.3.4 发光二极管	(18)
1.4 双极型三极管	(19)
1.4.1 三极管的结构与分类	(19)
1.4.2 三极管的放大原理	(20)
1.4.3 三极管的共射特性曲线	(25)
1.4.4 三极管的主要参数	(27)
1.4.5 三极管的微变等效电路	(29)
小结	(32)
附录	(33)
习题一	(34)
2 放大电路基础	(37)
2.1 放大电路的基本概念	(37)
2.1.1 放大电路的基本框图	(37)
2.1.2 放大电路的主要性能指标	(38)
2.2 共射基本放大电路	(40)
2.2.1 电路的组成和元器件的作用	(41)
2.2.2 工作原理	(42)
2.3 放大电路的分析方法	(44)
2.3.1 直流通路和交流通路	(44)

2.3.2	图解法	(45)
2.3.3	近似法	(49)
2.3.4	微变等效电路法	(49)
2.3.5	三种分析方法的比较	(50)
2.4	三种组态的基本放大电路	(53)
2.4.1	共射电路	(53)
2.4.2	共集电路	(57)
2.4.3	共基电路	(60)
2.4.4	放大电路三种基本组态的比较	(62)
2.5	多级放大电路	(62)
2.5.1	多级放大电路的耦合方式	(63)
2.5.2	多级放大电路的动态分析	(66)
2.6	放大电路的频率响应	(68)
2.6.1	频率响应的基本概念	(68)
2.6.2	三极管的高频等效电路和频率参数	(71)
2.6.3	单级共射放大电路的频率响应	(73)
2.6.4	多级放大电路的频率响应	(77)
2.7	放大电路的噪声	(78)
2.7.1	放大电路噪声的来源	(79)
2.7.2	噪声系数	(79)
	小结	(80)
	习题二	(81)
3	场效应管及其放大电路	(88)
3.1	结型场效应管	(88)
3.1.1	类型、结构和符号	(88)
3.1.2	工作原理	(89)
3.1.3	特性曲线	(90)
3.1.4	主要参数	(92)
3.2	绝缘栅型场效应管	(93)
3.2.1	N 沟道增强型 MOS 管	(93)
3.2.2	N 沟道耗尽型 MOS 管	(96)
3.2.3	各类场效应管的比较和使用注意事项	(97)
3.3	场效应管放大电路	(98)
3.3.1	场效应管的微变等效电路	(98)
3.3.2	场效应管的偏置电路及静态分析	(98)
3.3.3	场效应管放大电路的动态分析	(101)
	小结	(103)
	习题三	(103)
4	集成运算放大电路	(106)

4.1	概述	(106)
4.1.1	集成电路的分类	(106)
4.1.2	集成电路中的元器件及特点	(106)
4.1.3	集成运放的特点	(107)
4.1.4	集成运放的组成	(107)
4.2	电流源电路	(108)
4.2.1	三极管电流源电路	(108)
4.2.2	镜像电流源电路	(110)
4.2.3	比例式电流源电路	(111)
4.2.4	微电流源电路	(112)
4.2.5	多路电流源电路	(112)
4.3	有源负载放大电路	(113)
4.3.1	有源负载的概念	(113)
4.3.2	三极管有源负载放大电路	(114)
4.3.3	MOS管有源负载放大电路	(115)
4.4	差动放大电路	(116)
4.4.1	典型差动放大电路	(116)
4.4.2	电流源差动放大电路	(122)
4.4.3	失调与调零	(123)
4.4.4	有源负载差动放大电路	(125)
4.5	集成运算放大电路	(125)
4.5.1	F007 集成运放	(126)
4.5.2	集成运放的主要参数	(127)
4.5.3	集成运放的使用注意事项	(128)
*4.6	电流模集成运放简介	(129)
4.6.1	电流模电路的概念	(129)
4.6.2	跨导线性回路原理及应用	(129)
4.6.3	电流模集成运放典型电路简介	(131)
	小结	(132)
	习题四	(133)
5	放大电路中的负反馈	(137)
5.1	反馈的基本概念	(137)
5.1.1	反馈	(137)
5.1.2	反馈形式及其判别	(138)
5.2	负反馈放大电路的组态和方框图表示法	(142)
5.2.1	负反馈放大电路的组态	(142)
5.2.2	负反馈放大电路的方框图	(145)
5.2.3	负反馈放大电路的一般表达式	(146)
5.3	负反馈对放大电路性能的影响	(147)

5.3.1	提高放大倍数(增益)的稳定性	(147)
5.3.2	减小非线性失真	(148)
5.3.3	扩展频带	(148)
5.3.4	改变输入电阻和输出电阻	(149)
5.3.5	引入负反馈的一般原则	(150)
5.4	深度负反馈放大电路的计算	(151)
5.4.1	深度负反馈的特点	(152)
5.4.2	深度负反馈放大电路的计算	(152)
5.5	负反馈放大电路的自激振荡及消除	(154)
5.5.1	负反馈放大电路的自激振荡	(154)
5.5.2	消除自激振荡的方法	(155)
小结		(156)
习题五		(156)
6	集成运放的应用电路	(162)
6.1	集成运放的理想化及基本电路	(162)
6.1.1	理想运放	(162)
6.1.2	集成运放的三种基本电路	(163)
6.2	运算电路	(167)
6.2.1	比例运算电路	(167)
6.2.2	求和运算电路	(168)
6.2.3	积分和微分电路	(170)
6.2.4	对数和指数运算电路	(173)
6.2.5	乘除运算电路	(174)
6.3	放大电路	(175)
6.3.1	精密放大电路	(175)
6.3.2	阻容耦合放大电路	(176)
6.4	有源滤波器	(179)
6.4.1	滤波器的基本概念	(179)
6.4.2	低通滤波器	(180)
6.4.3	高通滤波器	(183)
* 6.4.4	开关电容滤波器	(185)
6.5	电压比较器	(187)
6.5.1	简单电压比较器	(187)
6.5.2	滞回比较器	(190)
* 6.5.3	窗口比较器	(191)
6.6	非正弦波形发生器	(192)
6.6.1	矩形波发生器	(192)
* 6.6.2	三角波发生器	(193)
* 6.6.3	锯齿波发生器	(195)

小结·····	(196)
习题六·····	(196)
7 低频功率放大器 ·····	(203)
7.1 概述 ·····	(203)
7.1.1 功率放大器的特点·····	(203)
7.1.2 功率放大器的主要性能指标 ·····	(204)
7.1.3 功率放大器的分类·····	(205)
7.2 互补对称功率放大器 ·····	(207)
7.2.1 乙类互补对称功率放大器 ·····	(207)
7.2.2 甲乙类互补对称功率放大器 ·····	(210)
7.2.3 单电源互补对称功率放大器 ·····	(212)
7.3 BTL 功率放大器和集成功率放大器 ·····	(214)
7.3.1 BTL 功率放大器 ·····	(214)
7.3.2 集成功率放大器 ·····	(214)
* 7.4 功率器件简介 ·····	(216)
7.4.1 功率 MOS 管 ·····	(216)
7.4.2 功率模块 ·····	(217)
小结·····	(218)
习题七·····	(218)
8 直流稳压电源 ·····	(221)
8.1 整流电路 ·····	(221)
8.1.1 半波整流电路 ·····	(221)
8.1.2 全波整流电路 ·····	(223)
8.1.3 桥式整流电路 ·····	(224)
* 8.1.4 倍压整流电路 ·····	(224)
8.2 滤波电路 ·····	(225)
8.2.1 电容滤波器 ·····	(226)
8.2.2 电感滤波器 ·····	(227)
8.2.3 其他形式的滤波器·····	(228)
* 8.2.4 线滤波器 ·····	(229)
8.3 直流稳压电路 ·····	(230)
8.3.1 稳压电路的主要指标 ·····	(230)
8.3.2 稳压管稳压电路 ·····	(231)
8.3.3 串联型稳压电路 ·····	(232)
8.4 三端集成稳压器 ·····	(237)
8.4.1 三端固定式集成稳压器 ·····	(237)
8.4.2 三端可调式集成稳压器 ·····	(239)
8.4.3 三端集成稳压器的应用 ·····	(239)
小结·····	(240)

习题八.....	(241)
附录 1:部分习题参考答案	(245)
附录 2:本书常用符号表	(250)
参考文献.....	(253)

绪 论

自 19 世纪麦克斯韦和赫兹分别从理论和实践两个方面揭示出电磁波的存在后,一门新兴的学科——无线电电子学(简称电子学)就诞生了。在短短的一个多世纪内,电子学得到飞速的发展。与此同时,作为研究和应用电子学的电子技术,也取得惊人的进步。

现在,由于电子技术的影响面广、渗透力强、发展速度快和富于生命力,使得它的应用日益广泛。在现代的科学研究中,科学家使用的先进的科学仪器离不开电子技术;在国民经济的各个部门,电子技术不仅广泛地应用于工农业生产,而且渗透到各个领域。无论是通信、广播、电视、计算机、自动化设备、电子医疗器械、新型武器、人造卫星和宇宙飞船等,还是人们日常生活中已须臾不可缺少的家用电器,都离不开采用电子技术制造出来的各种电子设备。

各种电子设备主要由电子线路构成的。电子线路是指由电子器件(如电子管、半导体管、集成电路等)和电路元件(如电阻、电容、电感和互感等)组成的具有一定功能的电路。因此,电子线路的核心是电子器件。电子器件的每一次重大的改进和发明,都扩大了电子线路的功能,促进了电子技术水平的提高;反之,人们在科学实践和生产实践中对新的电子技术的需求,将转化为对电子线路新的功能和更高的性能指标的需求,这就促进了电子器件的改进和新的电子器件的诞生。

1904 年开始出现的电真空器件(电子管),使电子技术进入兴旺发达的第一个时代——电子管时代。从此,无线电通信、广播、电视、雷达、导航和计算机等开始出现,并得到了迅速发展。

但是,由于电子管组成的电子设备的体积大、重量重、耗电多、寿命短和抗振性差等缺点,迫使人们去寻找新的电子器件。1948 年开始出现的半导体器件,使电子技术进入了晶体管时代。由于和电子管相比,晶体管具有体积小、重量轻、耗电省、抗振性好和直流电源电压低等优点,因此在许多应用领域中,晶体管迅速取代了电子管。但是,在大功率的领域中,电子管仍然具有晶体管无法完全替代的优势地位。

晶体管的出现和广泛使用,开始了电子设备小型化和微型化的进程。无论是电子管还是晶体管,由于它们组成的电路都是由一个个独立的电子器件和电路元件构成的(称为分立元件电路),因此电子设备的小型化和微型化受到了限制。为此,人们经过大量的探索和实践,终于在 60 年代初制造出集成电路,电子技术也进入了集成电路时代。集成电路把半导体管和电阻、电容以及它们之间的连线制作在一小块硅基片上,构成特定功能的电子电路。由于集成电路的体积更小、重量更轻、耗电更省、可靠性更高,并且还具有成本低、电性能优良和便于安装调试等一系列突出优点,因此它的发展十分迅速。从小规模历经中规模、大规模而发展到超大规模,使电子技术进入超大规模集成电路时代。集成电路的发展,打破了器件和电路的界限,使电子设备的小型化和微型化成为现实,因此在许多场合迅速取代了分立元件电路,应用范围日益扩大。尤其在计算机、卫星通信、宇宙航行和新型武器等领域中,集成电路对它们的发展起着非常重要的作用。

电子线路可分为分布参数电路和集中参数电路两大类,前者将在有关课程中介绍,后者按

照处理的信号形式不同,又分为模拟电子线路和数字电路。时间上和数值上都是不连续(离散)的信号称为数字信号,数字电路则是产生和处理数字信号的电路,它将在《脉冲与数字电路》中介绍。时间上和数值上都是连续的信号称为模拟信号,它是指模拟真实世界物理量(如声音、温度、压力等)的电压或电流,其变化是连续和平滑的,而模拟电子线路则是产生和处理模拟信号的电路。

《模拟电子线路》是电子类专业重要的专业基础课之一,它在专业的课程设置有承上启下的作用。本书主要介绍各种半导体器件和电子线路的基本概念,分析一些基本单元电路。通过本课程的学习,应达到下述要求:了解各种电子器件的工作原理,熟悉它们的主要参数和外特性;掌握各种基本单元电路的组成、工作原理和基本分析方法;了解模拟集成电路的工作原理和性能特点,熟练掌握它的各种应用电路;学会根据需要选择合适的电路,培养分析和解决电子技术问题的能力,并能阅读和分析电子设备中简单的电原理图。此外,由于电子线路是一门实践性很强的课程,为了加深对书本知识的理解,加强动手能力、创新能力的培养,一定要重视实验和其他实践性环节。

面对电子技术的飞速发展,新的器件和新的电路将层出不穷,作为一本教材,不可能囊括模拟电子线路的全部内容和完全反映出电子技术的最新进展。因此,学习本课程时一定要抓住基本概念和基本理论,并注意正确的学习方法,尤其要掌握本课程的一些与数学、物理、电工基础等课程不同的独特分析方法。这些分析方法有:

(1)估算 在数学等课程中,要求计算的结果完全准确。但是,在对电子线路进行分析和计算时,常常根据实际情况作合理的近似,即忽略次要因素,突出主要矛盾,这就是工程估算。它不但可以使计算简单,而且使物理概念更加清楚。否则,如果一味追求“严密”与“精确”,则必然使问题复杂化。更何况由于电子元器件参数的分散性和实际电路中各种寄生因素的影响,任何“严格”的计算都不可能得到与实际完全一致的结果,因此“严格”的计算也就没有实际意义了。

(2)等效 电子线路中的电子器件,其电流与电压关系(称为伏安特性)是非线性的。但是,在一定的条件下,电子器件的非线性特性退居次要的地位,这时就可把它近似看成一个线性器件,于是整个电子线路就可用一个线性电路来等效,从而用线性电路的求解方法进行分析和计算,这就是等效的方法。

本书的授课约需 100 学时,各章的学时分配建议如下(不包括实验):绪论 1 学时;第 1 章 半导体二极管和三极管 15 学时;第 2 章 放大电路基础 22 学时;第 3 章 场效应管及其放大电路 7 学时;第 4 章 集成运算放大电路 13 学时;第 5 章 放大电路中的负反馈 10 学时;第 6 章 集成运放的应用电路 16 学时;第 7 章 低频功率放大器 8 学时;第 8 章 直流稳压电源 8 学时。

1 半导体二极管和三极管

各种电子线路最重要的组成部分是半导体器件,如半导体二极管、双极型三极管、场效应管和集成电路。本章先讨论构成各种半导体器件基础的 PN 结,然后分别介绍半导体二极管和双极型三极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数和等效电路。

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 本征半导体(Intrinsic Semiconductor)

导体如铜、铝、银等,其内部存在大量的摆脱原子核束缚的自由电子(Free Electron),在外电场作用下,这些自由电子将逆着电场方向作定向运动而形成较大的电流,因此导体的导电能力强。我们把在电场作用下,能运载电荷形成电流的带电粒子称为载流子。显然,自由电子是一种载流子,称为电子载流子。而绝缘体如云母、塑料、橡皮等,常温下内部的自由电子很少,因此导电能力很差。半导体则是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,如硅、锗、砷化镓等,最常用的是硅和锗。制造半导体器件的材料都要制成单晶体,单晶硅或单晶锗是由硅或锗原子按一定的规则整齐地排列(称为空间点阵)而成的。这种非常纯净(几乎不含杂质)和结构完整的半导体称为本征半导体。

1) 本征激发

硅和锗都是 4 价元素,它们原子的最外层电子都是 4 个,称为价电子,它受原子核的束缚力最小。内层电子与原子核构成稳定的惯性核,若用 $\oplus$ 代表惯性核所具有的电荷量,则可用图 1.1 来表示硅或锗的简化原子结构模型。

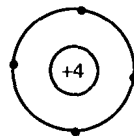


图 1.1 硅或锗的简化原子结构模型

硅或锗制成单晶体后,晶体中原子的价电子不仅受到原来所属原子核的作用,而且还受到相邻原子核的吸引,即 1 个价电子为相邻的两个原子核所共有,形成“共价键”结构。共价键指的是两个相邻原子各拿出 1 个价电子作为共有价电子所形成的束缚作用。因此,每个硅或锗的原子都以对称的形式和其邻近的 4 个原子通过共价键紧密地联系起来,如图 1.2 所示,图中两条虚线表示原子间的共价键。

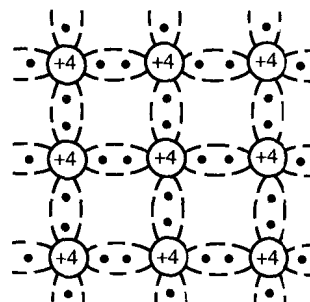


图 1.2 硅或锗晶体中共价键结构示意图

晶体原子间的共价键具有很强的结合力,在绝对温度为零度(0 K,相当于 -273.15°C)时,价电子不能挣脱共价键的束缚,也就不能自由移动,所以共价键内的价电子又称为束缚电子(Bonded Electron)。这样,本征半导体中虽有大量的价电子,但没有自由电子,此时半导体是不导电的。当温度升高或受光照射时,价电子不断

从外界获得一定的能量,少数价电子因获得的能量较大而挣脱共价键的束缚,成为自由电子,同时原来的共价键的相应位置留下一个空位,这个空位称为“空穴”(Hole),如图 1.3 所示,其中 A 处为空穴,B 处为自由电子。显然,自由电子和空穴是成对出现的,所以称它们为电子空穴对。我们把在热或光的作用下,本征半导体中产生电子空穴对的现象,称为本征激发。

2)两种载流子(Carrier)

本征激发产生自由电子和空穴。当共价键中失去一个价电子出现一个空穴时,如图 1.3 中 A 处,与其相邻处于热运动状态的价电子很容易填补到这个空穴中来,使该价电子原来所在的共价键中出现一个空穴,如图 1.3 中 C 处,这样空穴便从 A 处移至 C 处;同样,邻近的价电子(图中 D 处)又可填补 C 处的空穴,空穴又从 C 处移到 D 处。因此,空穴可以在半导体中自由移动,实质上是价电子填补空穴的运动(二者运动方向相反)。在电场作用下,大量的价电子依次填补空穴的定向运动也形成电流。为了区别于自由电子的运动,我们把这种价电子的填补运动称为空穴运动,认为空穴是一种带正电荷的载流子,它所带电量与电子相等,符号相反。

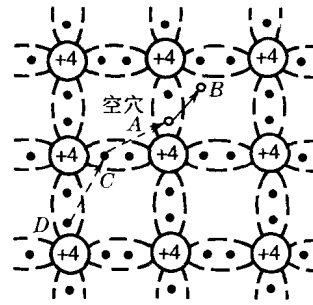


图 1.3 本征激发产生电子和空穴及空穴的移动
·自由电子 ○空穴

可见,在本征半导体中存在两种载流子:带负电荷的电子载流子和带正电荷的空穴载流子。我们注意到,金属导体中只有一种载流子——电子载流子。

在本征激发产生电子空穴对的同时,自由电子在运动中有可能和空穴相遇,重新被共价键束缚起来,电子空穴对消失,这种现象称为“复合”。显然,激发和复合是矛盾着的双方。在一定的温度下,激发和复合虽然都在不停地进行,但最终将处于动态平衡状态,这时半导体中的载流子浓度(即 1 cm^3 晶体中的载流子数目)保持在某一定值。由于本征激发产生的电子空穴对的数目很少,则本征半导体中载流子浓度很低,其导电能力很弱。

3)本征半导体的主要特性

(1) 热敏和光敏特性

当温度升高或光照增强时,本征半导体内被束缚在共价键内的价电子将获得更多的动能,因此本征激发产生电子空穴对数目显著增加,其导电能力大大增强。可见,本征半导体的导电性能对温度和光照很敏感,这就是它的热敏和光敏特性。利用半导体的热敏和光敏特性可制成热敏元件(例如热敏电阻)和光敏元件(例如光敏电阻、光电管)。

(2) 掺杂特性

在本征半导体中掺入微量的其他元素,称为掺杂,这些微量元素称为杂质,掺入杂质的半导体称为杂质半导体。虽然本征半导体的导电能力很弱,但掺杂后半导体的导电能力将大大增强,掺入的杂质越多,半导体的导电能力就越强,这就是它的掺杂特性。利用半导体的掺杂特性,可制造出各种类型的半导体器件。当然,掺入杂质的种类和数量是要严格控制的,否则得到的杂质半导体将不是我们所需要的。

1.1.2 杂质半导体(Doped Semiconductor)

根据掺入杂质的化合价的不同,杂质半导体分为 N 型和 P 型两大类。

1) N 型半导体

在 4 价元素的硅(或锗)晶体中,掺入微量的 5 价元素磷(或砷等)后,磷原子将散布于硅原子中,且替代了晶体点阵中某些位置上的硅原子。磷原子有 5 个价电子,它以 4 个价电子与周围的硅原子组成共价键,多余的 1 个价电子处于共价键之外,受到的束缚力较弱,在室温下就可挣脱束缚而成为自由电子,同时杂质磷的原子变成带正电荷的离子,如图 1.4(a)所示。由于这种杂质原子可以提供电子,故称为施主杂质。施主原子的数目虽然不多,但在室温下每掺入 1 个原子,都能产生 1 个自由电子和 1 个正离子,自由电子将为杂质半导体的导电做出贡献,但是正离子被束缚在晶体点阵中,不能自由移动,对半导体的导电毫无作用。显然,掺入的杂质越多,杂质半导体的导电性能越好。

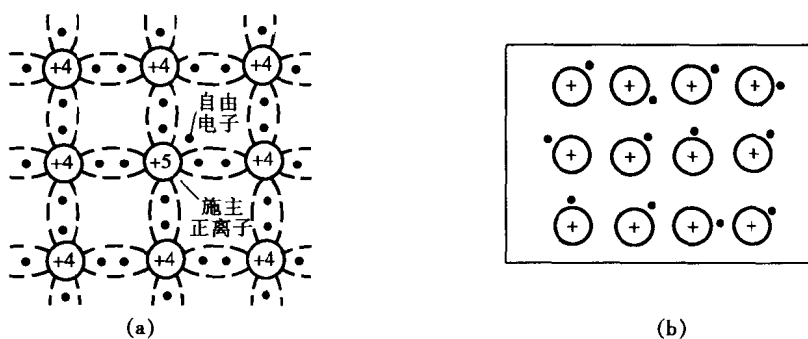


图 1.4 N 型半导体

(a)结构示意图 (b)载流子和离子(不计本征激发)

⊕表示施主杂质的正离子

通常,掺杂所产生的自由电子浓度远大于本征激发所产生的自由电子和空穴的浓度,所以杂质半导体的导电性能远超过本征半导体。显然,这种半导体中自由电子浓度远大于空穴浓度,所以称电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。因为这种半导体的导电主要依靠电子,所以称为 N 型半导体或电子型半导体。

不难理解,N 型半导体总体上仍为电中性,其多子(电子)的浓度取决于所掺杂质的浓度,少子(空穴)是由本征激发产生的,故它的浓度与温度或光照密切相关。为了突出 N 型半导体的主要特征,我们把 N 型半导体画成图 1.4(b)所示形式,它的自由电子和正离子成对地出现,仅在某些需要考虑少子的场合,我们还要画出它的少子(空穴)。

2) P 型半导体

在硅(或锗)的晶体中掺入微量的 3 价元素硼(或铝等)后,杂质原子也散布于硅原子中,且替代了晶体点阵中某些位置上的硅原子。由于硼原子只有 3 个价电子,它与周围的硅原子组成共价键时,因缺少 1 个电子而产生 1 个空位,在室温下它很容易吸引邻近硅原子的价电子来填充,于是杂质原子变为带负电荷的离子,而邻近硅原子的共价键因缺少 1 个电子,出现了 1 个空穴,如图 1.5(a)所示。由于这种杂质原子能吸收电子,故称为受主杂质。受主负离子也不能移动,不参与导电,只有空穴才对杂质半导体的导电做出贡献。同样,掺入的杂质越多,这种杂质半导体的导电性能越好。

在室温下,每掺入 1 个受主原子,都能产生 1 个空穴和 1 个负离子。在这种半导体中,空

穴是多子,自由电子是少子,它的导电主要依靠空穴,故称为P型半导体或空穴型半导体。与N型半导体相似,P型半导体总体上也是电中性的,其多子(空穴)的浓度取决于所掺杂质的浓度,少子(电子)的浓度与温度或光照密切相关。为了突出P型半导体的主要特征,我们把P型半导体画成图1.5(b)所示形式。

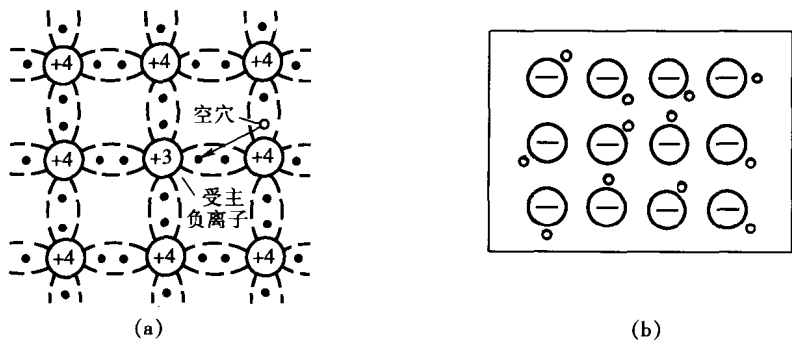


图 1.5 P 型半导体
(a)结构示意图 (b)载流子和离子(不计本征激发)

⊖表示受主杂质的负离子

3) 半导体中载流子的两种运动——漂移和扩散(Drift and Diffusion)

在电场作用下,半导体中的载流子作定向运动,这种运动称为漂移运动。载流子的漂移运动所形成的电流,称为漂移电流。显然,空穴的漂移方向与电场方向一致,电子的漂移方向与电场方向相反,但它们形成电流的方向相同,都是沿着电场的方向,总的漂移电流则为空穴漂移电流和电子漂移电流之和。像这种由两种载流子参与的导电,称为“双极性导电”。对于杂质半导体来说,漂移电流主要由多子形成的。

自然界里,由于原子的热运动,物质将从浓度较高向浓度较低的地方散开,这种运动称为扩散运动。同样地,当半导体中载流子浓度不均匀时,载流子也会从浓度高的地方向浓度低的地方运动,这种因浓度差引起载流子的运动就是扩散运动。扩散运动所形成的电流称为扩散电流。扩散电流的大小取决于载流子的浓度差,而与载流子浓度本身无关。值得注意的是,尽管扩散运动与电场无关,但为了维持半导体中的扩散电流,就必须由电源不断地从外部注入载流子,以保持半导体载流子的浓度差。

1.1.3 PN 结(PN Junction)

单纯的P型或N型半导体并不能做成半导体器件。若在一块本征半导体上,两边掺入不同的杂质,并分别成为P型和N型半导体,则在两种半导体的交界面附近形成一层很薄的特殊导电层——PN结。PN结是构成各种半导体器件的基础。

1) PN 结的形成

当P型和N型半导体结合在一起时,由于交界面两侧载流子的浓度差别,N区的电子必然向P区扩散,P区的空穴也要向N区扩散,即发生多子的扩散运动,如图1.6(a)所示。扩散到P区的电子与P区的多子空穴复合而消失,扩散到N区的空穴与N区的多子电子复合而消失。于是在交界面附近的N区和P区,出现不能移动的杂质正离子区和杂质负离子区,这些不能移动的带电离子称为空间电荷,而交界面两侧的正、负离子组成的区域称为空间电荷区,

这就是PN结,如图1.6(b)所示。由于空间电荷区内缺少载流子,或者说载流子几乎消耗尽了,因此空间电荷区又称为耗尽层,它的电阻率很高。

空间电荷区(Space Charge Region)产生的同时,一个由N区指向P区的电场也产生了,这个电场不是外加的,而是空间电荷区内部电荷产生的,故称为内电场。内电场一方面阻止多子的扩散,另一方面却促使少子的漂移。因此,交界面两侧存在两种对立的运动:由于浓度差引起的多子的扩散运动和由于内电场引起的少子的漂移运动。随着扩散的进行,空间电荷区加宽,内电场增强,这反过来削弱了扩散运动,同时漂移运动则不断增强,于是空间电荷区又会变窄,内电场减弱。可以想象,当扩散运动进行到一定程度时,同一时间内扩散到空间电荷区的载流子数量和漂移回去的载流子数量相等,二者处于动态平衡状态,空间电荷区的宽度不再变化(其宽度很薄,仅数微米)。

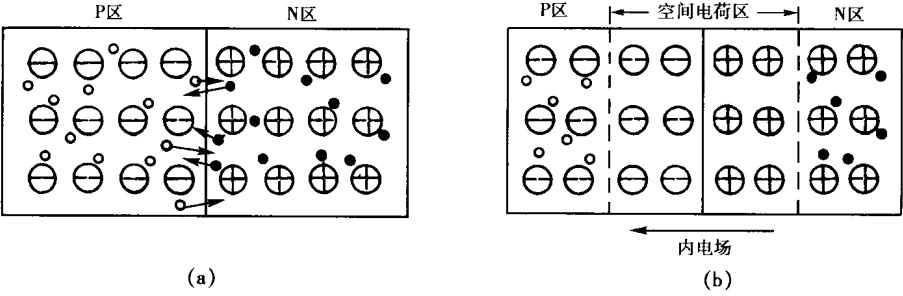


图 1.6 PN 结的形成
(a)载流子的扩散运动 (b)平衡状态下的PN结

由于PN结内存在电场,则它两边就有电位差,称为内建电位差或接触电位差,用 U_{h0} 表示, U_{h0} 一般为零点几伏。PN结的电阻率高,为高阻区,而结外的P区和N区,仍有很多的载流子,电阻率较低,为低阻区。由于PN结的内电场对多子的扩散起着类似堡垒的阻挡作用,故空间电荷区又称为势垒区或阻挡层。

由于耗尽层中正、负离子所带的电量相等,所以它是一个偶电层。当N区和P区的杂质浓度相等时,耗尽层在两区内的宽度也相等,这种PN结称为对称结;否则,杂质浓度较高一侧的耗尽层宽度小于杂质浓度较低的一侧,即耗尽层向低掺杂区延伸,这种PN结称为非对称结。非对称结有两种类型:P区掺杂浓度大于N区(用 P^+N 结表示)和N区掺杂浓度大于P区(用 PN^+ 表示)。非对称结广泛应用于半导体器件的制作中。

2)PN 结的单向导电性

若在PN结两端接上外加电源,则称该PN结被偏置了。外电源有两种接法:一种是PN结的P区接电源正极,N区接电源负极,称为正向接法或正向偏置(Forward Bias),简称正偏;另一种是PN结的P区接电源负极,N区接电源正极,称为反向接法或反向偏置(Reverse Bias),简称反偏,它们分别如图1.7(a)、(b)所示。

(1)正向导通

正偏时,外电场与内电场方向相反,因此削弱了内电场,PN结的原有平衡状态被打破。在外电场作用下,多子(P区的空穴、N区的电子)被推向耗尽层,分别中和了耗尽层中一部分的负、正离子,使空间电荷减少,耗尽层变窄,如图1.7(a)所示,这就有利于多子的扩散而不利