



免费提供电子教案 

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

模拟电子线路

杨凌 编著



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

模拟电子线路

杨凌 编著

机械工业出版社

本书系统全面地介绍了模拟电子线路的基本内容, 主要包括: 绪论、半导体二极管及其基本电路、半导体三极管及其基本放大电路、场效应管及其基本放大电路、放大电路的频率响应、低频功率放大电路、集成运算放大器、放大电路中的负反馈、信号的运算和处理电路、信号产生电路、直流稳压电源、在系统可编程模拟器件。

本书可作为高等院校电子信息、通信类专业本科生学习“模拟电子线路”课程的教材, 也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子线路/杨凌编著. —北京: 机械工业出版社, 2007.9
ISBN 978-7-111-22105-0

I. 模… II. 杨… III. 模拟电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 121293 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 时 静 责任编辑: 李馨馨 版式设计: 张世琴
责任校对: 程俊巧 姚培新
责任印制: 洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2007 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·25 印张·616 千字
0 001—5 000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-22105-0
定价: 34.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379739

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切，要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业材料。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

“模拟电子线路”课程是电子类、电气类、自动化类等专业的基础平台课程，该课程的学习对后续课程和专业课程起着至关重要的作用。它既有自身的理论体系，又有很强的实践性，课程内容庞杂、概念性强、分析方法多、难点集中，教与学都有困难。编写一本比较符合人们认知规律、适合于教学、体系较为合理、内容取舍较为恰当的教材是作者多年来的追求。

作者在编写本书时遵循以下原则：基础更扎实一些，体系更合理一些，思路更开阔一些，分析方法更简洁一些，设计性和综合性更加强一些，启发性和创新性更突出一些。基于上述原则，该书有如下特点：

(1) 在内容选取上，注重基础，注重理论的系统性和完整性。虽然电子技术的发展很快，但其核心的基本理论和方法还是不变的，具有相对的经典性。在强调基础的同时，也兼顾技术发展的先进性，如第 12 章简要介绍了模拟可编程器件及开发软件平台，使读者能领略现代模拟集成电路技术的发展态势，以进一步拓宽读者的视野。

(2) 知识顺序合理，内容过渡平滑，利于自学。教材的主线条是以半导体器件为基石，从分立走向集成，从经典跃向现代。在知识的迁移过程中，注意促进正迁移，防止负迁移。

(3) 器件与电路的结合更为紧密，分立和集成的关系更为密切，工程应用性更为突出。

(4) 语言精炼、叙述深入浅出，具有启发性。书中在介绍与基本电路有关的概念、原理和方法的同时，注重突出电路结构的构思方法，以期使读者能从中获得启迪，有利于培养创新意识。

(5) 将“放大电路的频率响应”单独设章，不仅分散了基本放大电路的分析难点，更为重要的是强调了频率失真和频率响应的概念，扩展了改善频率响应的思路和方法。

(6) 电路的“反馈”理论完整。即突出了“负反馈”（第 8 章），又强调了“正反馈”（第 10 章）。

(7) 每章最后都有小结，用来归纳本章的全部结论，并复习本章涉及的基本概念。

(8) 附录中介绍了 PSpice 电路仿真软件，各章习题中均配有 PSpice 仿真习题，仿真习题的选取尽量涵盖模拟电子线路的基本测试方法和仿真方法，使得复杂电路的分析方法更为简洁。

书中标记为“※”的内容可供使用本教材的师生灵活选用。

本书的编写得到了兰州大学信息科学与工程学院吕振肃教授的关心和支持，在此致以深深的谢意！

限于作者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评和指正。

作者

目 录

出版说明	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 电子科学技术发展概述	1
1.2 模拟电路与数字电路	2
1.3 模拟电路课程的特点和学习方法	2
第 2 章 半导体二极管及其基本电路	4
2.1 半导体物理基础知识	4
2.1.1 半导体的共价键结构	4
2.1.2 本征半导体	5
2.1.3 杂质半导体	6
2.1.4 半导体的导电机理	9
2.2 PN 结	10
2.2.1 PN 结的形成	10
2.2.2 PN 结的伏安特性	12
2.2.3 PN 结的击穿特性	13
2.2.4 PN 结的温度特性	14
2.2.5 PN 结的电容特性	14
2.3 半导体二极管	15
2.3.1 二极管的结构、符号	16
2.3.2 二极管的伏安特性	17
2.3.3 二极管的主要参数	17
2.3.4 几种特殊的二极管	19
2.3.5 二极管的模型	22
2.4 二极管的基本应用电路	23
2.4.1 整流电路	23
2.4.2 稳压电路	25
2.4.3 限幅电路	26
2.4.4 开关电路	27
小结	28
习题	28
第 3 章 半导体三极管及其基本放大电路	33
3.1 半导体三极管	33
3.1.1 三极管的分类、结构及符号	33
3.1.2 三极管的电流分配与放大作用	34
3.1.3 三极管的伏安特性曲线	37
3.1.4 三极管的主要参数	39
3.1.5 三极管的模型	41
3.2 放大电路概述	47
3.2.1 放大电路的基本概念	47
3.2.2 放大电路的主要性能指标	48
3.3 基本放大电路的工作原理	51
3.3.1 基本共发射极放大电路的组成	52
3.3.2 放大电路的直流通路和交流通路	53
3.3.3 基本共发射极放大电路的工作原理	54
※3.3.4 基本共发射极放大电路的功率分析	55
3.4 放大电路的图解分析方法	55
3.4.1 静态图解分析方法	55
3.4.2 动态图解分析方法	56
3.4.3 静态工作点与放大电路非线性失真的关系	58
3.5 放大电路的等效电路分析方法	59
3.5.1 静态分析方法	59
3.5.2 动态分析方法	60
3.6 放大电路静态工作点的稳定问题	62
3.6.1 温度对静态工作点的影响	62
3.6.2 分压式偏置 Q 点稳定电路	63
3.7 放大电路的三种基本组态	67
3.7.1 共集电极放大电路——射极输出器	67
3.7.2 共基极放大电路	70
3.7.3 三种基本放大电路的比较	71
3.8 多级放大电路	72

3.8.1 多级放大电路的级间耦合方式·····	72	5.5.2 多级放大电路的下限频率 f_L ·····	138
3.8.2 多级放大电路的交流分析·····	75	5.6 宽带放大电路的实现思想·····	140
3.8.3 组合放大电路·····	77	※5.7 放大电路的瞬态响应·····	140
小结·····	79	5.7.1 上升时间 t_r ·····	141
习题·····	79	5.7.2 平顶降落 δ ·····	142
第4章 场效应管及其基本放大电路 ·····	89	小结·····	143
4.1 场效应管·····	89	习题·····	144
4.1.1 结型场效应管·····	89	第6章 功率放大电路 ·····	147
4.1.2 金属-氧化物-半导体场效应管·····	93	6.1 功率放大电路概述·····	147
4.1.3 场效应管的主要参数·····	97	6.1.1 功率放大电路的特点和主要研究对象·····	147
4.1.4 各种类型场效应管的符号及特性比较·····	99	6.1.2 功率放大电路的分类·····	148
4.1.5 放大状态下场效应管的模型·····	100	6.2 甲类功率放大电路·····	148
4.1.6 场效应管与三极管的比较·····	101	6.3 乙类功率放大电路·····	150
4.2 场效应管放大电路·····	101	6.3.1 电路组成及工作原理·····	151
4.2.1 场效应管的偏置电路·····	102	6.3.2 电路性能分析·····	152
4.2.2 三种基本组态的场效应管放大电路·····	103	6.3.3 功率三极管的选择·····	153
4.2.3 场效应管放大电路与三极管放大电路的比较·····	107	6.4 甲乙类功率放大电路·····	154
小结·····	109	6.4.1 甲乙类双电源功率放大电路·····	154
习题·····	109	6.4.2 甲乙类单电源功率放大电路·····	156
第5章 放大电路的频率响应 ·····	117	6.5 桥式功率放大电路·····	157
5.1 频率响应概述·····	117	※6.6 集成功率放大电路·····	157
5.1.1 频率响应的基本概念·····	117	6.7 功率器件·····	159
5.1.2 频率响应的分析·····	119	6.7.1 功率三极管·····	159
5.2 三极管放大电路的高频响应·····	126	※6.7.2 功率 MOS 场效应管·····	161
5.2.1 三极管的频率参数·····	126	※6.7.3 功率模块·····	162
5.2.2 共发射极放大电路的高频响应·····	128	小结·····	163
5.2.3 共集电极放大电路的高频响应·····	131	习题·····	163
5.2.4 共基极放大电路的高频响应·····	132	第7章 集成运算放大器 ·····	170
5.3 三极管放大电路的低频响应·····	133	7.1 集成运放概述·····	170
5.4 场效应管放大电路的频率响应·····	135	7.2 电流源电路·····	171
5.4.1 场效应管的高频小信号等效电路·····	136	7.2.1 三极管电流源电路·····	171
5.4.2 场效应管放大电路的高频响应·····	136	7.2.2 场效应管电流源电路·····	174
5.5 多级放大电路的频率响应·····	137	7.2.3 电流源电路用作有源负载·····	175
5.5.1 多级放大电路的上限频率 f_H ·····	138	7.3 差分放大电路·····	176
		7.3.1 差分放大电路的组成·····	176
		7.3.2 差分放大电路的工作原理·····	177
		7.3.3 有源负载差分放大电路·····	185
		7.3.4 差分放大电路的传输特性·····	186

7.3.5	场效应管差分放大电路	187
7.3.6	差分放大电路的失调及其温漂	188
7.4	集成运算放大器	192
7.4.1	三极管运算放大器—— $\mu A741$	192
7.4.2	场效应管运算放大器——C14573	195
7.4.3	集成运放的主要参数	196
	小结	199
	习题	199
第8章	放大电路中的负反馈	211
8.1	反馈的基本概念及反馈放大电路的一般框图	211
8.1.1	反馈的基本概念	211
8.1.2	反馈放大电路的一般框图	212
8.2	反馈的分类及判别方法	212
8.3	负反馈放大电路的一般表达式及4种基本组态	218
8.3.1	负反馈放大电路的一般表达式	219
8.3.2	负反馈放大电路的4种组态	219
8.4	负反馈对放大电路性能的影响	221
8.4.1	负反馈对放大电路增益稳定性的影响	221
8.4.2	负反馈对放大电路非线性失真的改善	222
8.4.3	负反馈对放大电路内部噪声与干扰的抑制	222
8.4.4	负反馈对放大电路通频带的影响	223
8.4.5	负反馈对放大电路输入、输出电阻的影响	225
8.5	深度负反馈放大电路的近似估算	228
8.6	负反馈放大电路的稳定性	232
8.6.1	负反馈放大电路稳定工作的条件	233
8.6.2	稳定裕量	234
8.6.3	负反馈放大电路的稳定性分析	234
8.6.4	相位补偿技术	235
	小结	238
	习题	239

第9章	信号的运算和处理电路	252
9.1	集成运放应用电路的分析方法	252
9.1.1	集成运放的电压传输特性及理想运放的性能指标	252
9.1.2	集成运放应用电路的一般分析方法	253
9.2	基本运算电路	254
9.2.1	比例运算电路	254
9.2.2	加、减运算电路	256
9.2.3	积分和微分运算电路	259
9.2.4	对数和指数运算电路	262
9.2.5	乘法和除法运算电路	264
※9.2.6	模拟乘法器	265
9.3	实际运算放大器运算电路的误差分析	268
9.3.1	A_{od} 和 R_{id} 为有限值对反相比例运算电路运算误差的影响	268
9.3.2	A_{od} 和 K_{CMR} 为有限值对同相比例运算电路运算误差的影响	269
9.3.3	失调参数及其温漂对比例运算电路运算误差的影响	270
9.4	精密整流电路	271
9.4.1	精密半波整流电路	271
9.4.2	精密全波整流电路——绝对值电路	272
9.5	有源滤波电路	272
9.5.1	一阶有源滤波电路	273
9.5.2	二阶有源滤波电路	274
9.5.3	带通滤波电路	277
9.5.4	带阻滤波电路	278
9.5.5	全通滤波电路	280
※9.5.6	开关电容滤波电路	281
9.6	电压比较器	283
9.6.1	单限电压比较器	283
9.6.2	滞回电压比较器	284
9.6.3	窗口电压比较器	286
	小结	287
	习题	288
第10章	信号的产生电路	302

10.1 正弦波振荡电路概述·····	302	11.3.1 串联反馈式稳压电路·····	341
10.1.1 产生正弦波振荡的条件·····	302	11.3.2 三端集成稳压电路·····	343
10.1.2 正弦波振荡电路的组成及 分类·····	303	※11.4 开关稳压电路·····	348
10.1.3 正弦波振荡电路的分析方法·····	304	11.4.1 开关稳压电路的基本 工作原理·····	348
10.2 RC 正弦波振荡电路·····	304	11.4.2 串联型开关稳压电路·····	349
10.2.1 RC 文氏桥振荡电路·····	304	11.4.3 并联型开关稳压电路·····	350
10.2.2 RC 移相式振荡电路·····	308	小结·····	352
10.3 LC 正弦波振荡电路·····	308	习题·····	352
10.3.1 LC 并联谐振回路的频率特性·····	308	※第 12 章 在系统可编程模拟 器件·····	359
10.3.2 选频放大电路·····	310	12.1 引言·····	359
10.3.3 变压器反馈式 LC 振荡电路·····	310	12.2 主要器件的特性及应用·····	359
10.3.4 电感三点式振荡电路·····	311	12.2.1 ispPAC10·····	360
10.3.5 电容三点式振荡电路·····	312	12.2.2 ispPAC20·····	361
10.4 石英晶体正弦波振荡电路·····	314	12.2.3 ispPAC30·····	362
10.4.1 石英晶体的特点和等效电路·····	314	12.2.4 ispPAC80/81·····	363
10.4.2 石英晶体正弦波振荡电路·····	316	12.3 PAC-Designer 软件及开发实例·····	363
10.5 非正弦波信号产生电路·····	316	12.3.1 PAC-Designer 的基本用法·····	363
10.5.1 方波产生电路·····	317	12.3.2 设计实例·····	366
10.5.2 三角波产生电路·····	319	小结·····	370
10.5.3 锯齿波产生电路·····	321	习题·····	371
※10.6 函数发生器·····	323	附录·····	372
10.6.1 电路结构·····	323	附录 A Pspice 软件简介·····	372
10.6.2 工作原理·····	324	A.1 PSpice A/D 仿真功能简介·····	372
10.6.3 引脚排列及性能特点·····	324	A.2 Capture 中的电路描述·····	374
10.6.4 常用接法·····	325	A.3 Capture/PSpice A/D 集成环境·····	377
小结·····	326	A.4 PSpice A/D 中的有关规定·····	380
习题·····	327	附录 B 本书常用符号说明·····	383
第 11 章 直流稳压电源 ·····	336	B.1 几点原则·····	383
11.1 概述·····	336	B.2 基本符号·····	384
11.2 滤波电路·····	336	B.3 半导体器件的参数符号·····	385
11.2.1 电容滤波电路·····	337	B.4 其他符号·····	387
11.2.2 其他形式的滤波电路·····	340	参考文献 ·····	388
11.3 线性稳压电路·····	340		

第1章 绪 论

1.1 电子科学技术发展概述

电子科学技术是19世纪末、20世纪初发展起来的新兴技术，经过了一个多世纪的发展，它已成为近代科学技术发展的一个重要标志。

现代电子科学技术的诞生最早可追溯到1883年美国发明家爱迪生所发现的热电子效应，1904年弗莱明利用这个效应制成了电子二极管，并证实了电子管具有“阀门”作用，它首先被用于无线电检波。1906年美国的德弗雷斯在弗莱明的二极管中放进了第三个电极——栅极，从而发明了电子三极管，建树了早期电子技术上最重要的里程碑。电子管在电子技术的发展史上曾立下过汗马功劳，1946年，世界上第一台电子计算机ENIAC(Electronic Numerical Integrator and Calculator)的成功研制是电子管应用的一个经典范例。然而电子管有着它自身无法克服的诸多缺陷，如成本高，制造繁，体积大，耗电多等。例如，ENIAC使用了18800个电子管，占地170m²，重达30T，耗电140kW，价格40多万美元，是一个昂贵耗电的“庞然大物”。

电子科学技术真正突飞猛进的进步，应该是从晶体管发明以后开始的。尤其是PN结型晶体管的出现，开辟了电子器件的新纪元，引起了一场电子科学技术的革命。

晶体管同电子管相比具有诸多优越性：①晶体管的构件是没有消耗的。无论多么优良的电子管，都将因阴极原子的变化和慢性漏气而逐渐劣化。由于技术上的原因，晶体管制作之初也存在同样的问题。随着材料制作上的进步以及多方面的改善，晶体管的寿命一般比电子管长100~1000倍，可称得上是永久性器件。②晶体管消耗电子极少，仅为电子管的十分之一或几十分之一。它不像电子管那样需要加热灯丝以产生自由电子。一台晶体管收音机只要几节干电池就可以长达半年甚至一年地使用下去，这对电子管收音机来说是难以做到的。③晶体管不需预热，一开机就工作。例如，晶体管收音机一开就响，晶体管电视机一开就很快出现画面。电子管设备就做不到这一点。④晶体管的可靠性好，它比电子管可靠100倍，耐冲击、耐振动，这都是电子管所无法比拟的。另外，晶体管的体积只有电子管的十分之一到百分之一，放热很少，可用于设计小型、复杂、可靠的电路。晶体管的制造工艺虽然精密，但工序简便，有利于提高元器件的安装密度。正因为晶体的性能如此优越，自它诞生之后，在大多数领域中已逐渐用晶体管取代了电子管。

集成电路(Integrated Circuit, IC)的第一个样品是在1958年见诸于世的。集成电路的出现和应用，标志着电子技术发展到了一个新的阶段——微电子技术时代。它实现了材料、元件、电路三者之间的统一，同传统的电子元件的设计与生产方式、电路的结构形式有着本质的不同。集成电路芯片的发展基本上遵循了Gordon E. Moore(Intel公司创始人之一)在1965年预言的摩尔定律，即集成电路的集成度每3年增长4倍，特征尺寸每3年缩小1/2倍。微电子技术和应用使全球发生了第三次工业革命，它大大推动了航空技术、遥测传感

技术、通信技术、计算机技术、网络技术及家用电器产业的迅速发展。



随着电子系统向高速度、低功耗、低电压和多媒体、网络化、移动化的发展需求，对电路的要求越来越高，同时，IC 的设计与工艺水平日趋提高，目前已经可以在一个芯片上集成 $10^8 \sim 10^9$ 个晶体管。在这种需求牵引和技术推动的双重作用下，诞生了将整个系统集成在一个微电子芯片上的系统芯片（System on Chip, SOC）概念。SOC 从整个系统的角度出发，把处理机制、模型算法、芯片结构、各层次电路，直至器件的设计紧密结合起来，在单个（或少数几个）芯片上完成整个系统的功能。与 IC 组成的系统相比，SOC 可以在同样的工艺技术条件下，实现更高性能的技术指标。SOC 技术的出现，大大促进了软硬件协同设计及计算机系统自动化设计的发展。微电子技术从 IC 向 SOC 转变不仅是一种概念上的突破，同时也是新技术发展的里程碑。

现代电子技术的发展，极大地改变了人们的生产和生活方式，数码摄像机、家庭影院、空调、电子计算机等，都是典型的电子技术应用实例，可谓琳琅满目，异彩纷呈。至于电子技术在科技领域的应用，更是起着龙头作用，例如通信工程、测控技术、空间技术等。电子技术在过去以及将来，都是促进社会进步的动力和源泉，在今天，微电子技术已经成为整个信息社会发展的基石。

1.2 模拟电路与数字电路

电子技术课程的基本内容包括两大部分，模拟电路和数字电路。这两大部分之间既有联系、又有区别。例如，组成模拟电路和数字电路的最基本器件都是半导体二极管、三极管（包括双极型三极管 BJT 和场效应管 FET）等，这是两种电子电路的共同之处。但是，二者之间又有明显的区别和各自的特点。表 1-1 概括了模拟电路与数字电路之间的主要区别。

表 1-1 模拟电路与数字电路的主要区别

	模拟电路	数字电路
工作信号	模拟量 	数字量 
电路功能	实现模拟信号的放大、变换、产生等	在输入、输出的数字量之间实现一定的逻辑关系
对电路参数、电源电压等的要求	要求比较严格，与精度有关	允许有较大的误差
三极管的作用	放大元件	开关元件
三极管的工作区	主要在放大区	主要在截止区和饱和区
主要分析方法	图解法、等效电路法等	逻辑代数、真值表、卡诺图、状态转换图等

1.3 模拟电路课程的特点和学习方法

“模拟电子线路”（简称“模电”）是一门理论性、工程性、实践性都很强的课程，与数学、物理课程有着明显的区别，甚至与同为专业基础课的电路课程也有着显著的区别，它与

电路课程的主要区别在于：

1) 采用的数学模型和分析方法不同

电路课程采用理想模型和严格计算的方法，而模电课程则普遍采用近似模型和工程估算的方法。有人说：“近似估算是电子线路的灵魂”，从工程角度来看，此话并不为过。

2) 所涉及的元器件不同

电路课程所涉及到的元器件大都为线性的，而模电课程所面对的却是非线性器件。

3) 研究侧重点不同

电路课程偏重于为人们提供研究电路的理论和方法，而模电课程更偏重于构造实际应用电路的理论及技术。

基于上述特点，在学习模电时应注意以下问题：

1) 在掌握电路基本理论的同时，注意学会从工程的角度思考和处理问题，学会使用合适的器件模型对电路进行合理的近似分析。

2) 勤于思考，注重课后习题训练。“模拟电子线路”课程概念多、电路多、分析方法多，初学者往往感到无所适从。但任何学科都有其内在的规律，学习时，一定要做到举一反三，因为虽然电路基本概念的含义是不变的，但其应用是灵活的；虽然基本电路的组成原则是不变的，但电路是千变万化的；而不同类型的电路需要不同的方法去描述。因此，只有多思考并通过大量的习题训练，才能熟练掌握课程的“基本概念、基本电路、基本分析方法”。

3) 注重实践训练。实用的模拟电子线路几乎都要通过调试才能达到预期的指标。掌握常用电子仪器的使用方法、电路的测试方法、故障的判断和排除方法、仿真方法，是教学的基本要求。需要强调的是，课程的有些内容，只有通过实验才能更好地去理解和掌握，例如振荡的建立和稳定过程等。

4) 培养全面、辩证地分析问题的能力。应该明白，对于实际需求，从实用的角度出发，没有最好的电路，只有最适合的电路。因为电子电路是一个整体，各方面性能是相互关联的，常常会“顾此失彼”。例如，当采用负反馈手段扩展通频带时，势必会牺牲增益。在考虑电路时，应该树立这样一种观念：在某一应用场合最适合的电路就是最好的电路。

5) 培养对专业的浓厚兴趣，克服学习上的“畏难”情绪。

第 2 章 半导体二极管及其基本电路

半导体器件是现代电子技术的重要组成部分。二极管是由 PN 结构成的一种最简单的半导体器件，在电子线路中有着广泛的应用。本章将从半导体材料的基本性质出发，学习 PN 结的形成机理及其特性，接着讨论二极管的特性、参数及其电路模型，最后，介绍几种常用的二极管应用电路。

2.1 半导体物理基础知识

半导体是电阻率介于导体和绝缘体之间的物质，金属的电阻率低于 $10^{-5}\Omega \cdot \text{cm}$ ，绝缘体的电阻率为 $10^{14} \sim 10^{22}\Omega \cdot \text{cm}$ ，半导体的电阻率在 $10^{-2} \sim 10^9\Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。目前用来制造电子器件的半导体材料主要是硅 (Si)、锗 (Ge) 和砷化镓 (GaAs) 等，它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，并且更为吸引人的是，其导电性能会随温度、光照或掺入的杂质不同而发生显著变化。这些特点说明，半导体的导电机理必然不同于其他物质。为了理解这些特点，必须从半导体的原子结构谈起。

2.1.1 半导体的共价键结构

原子物理告诉我们，原子是由带正电荷的原子核和分层围绕原子核运动的电子组成的。其中，处于最外层轨道上运动的电子称为价电子 (Valence Electron)。元素的许多物理和化学性质都是由价电子决定的，如导电性能等。原子序数不同的元素可以具有相同的价电子数，例如硅的原子序数是 14，锗的原子序数是 32，但它们的价电子都是 4 个，因此都是四价元素。硅和锗的原子结构模型分别如图 2-1a、b 所示。由于两者价电子数相同，所以呈现出非常相似的导电性能。为了突出价电子对半导体导电性能的影响，常把内层电子和原子核共同看成一个惯性核，硅和锗的惯性核都带 4 个正电子电量，周围是 4 个价电子，其简化原子结构模型如图 2-1c 所示。

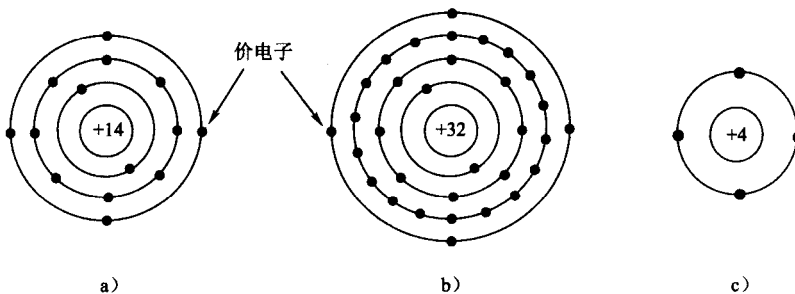


图 2-1 硅和锗的原子结构模型

a) 硅原子结构模型 b) 锗原子结构模型 c) 硅和锗原子的简化模型

半导体与金属和许多绝缘体一样，均具有晶体结构。在硅和锗的单晶中，每个原子均和相邻的 4 个原子通过共用价电子以共价键形式紧密结合在一起，晶体的最终结构是四面体，如图 2-2a 所示。图 2-2b 是图 2-2a 的二维晶格结构示意图。

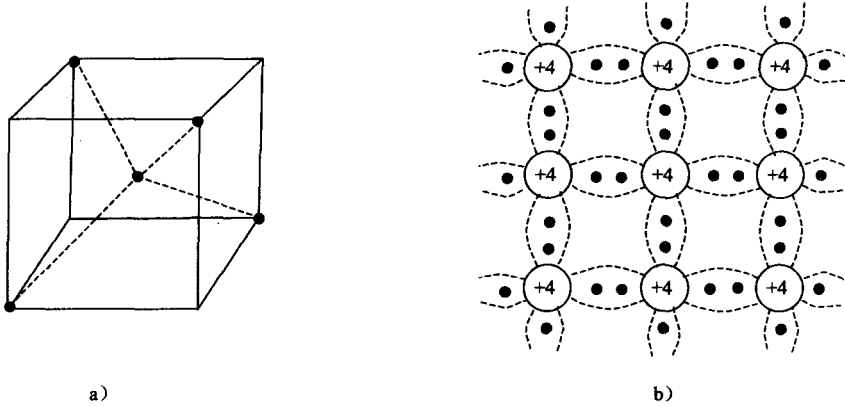


图 2-2 硅和锗的共价键结构

a) 四面体结构 b) 二维晶格结构示意图

2.1.2 本征半导体

纯净而且结构非常完整的单晶半导体称为本征半导体 (Intrinsic Semiconductor)。实际上很难实现理想的本征半导体，在工程上把杂质浓度很低的单晶半导体称为本征半导体。

1. 本征激发

在热力学温度 $T=0\text{K}$ (即 -273°C) 且没有其他外界能量激发时，本征半导体的所有价电子均被束缚在共价键中，不存在自由运动的电子，因此不导电。当温度升高时，部分价电子获得热能而挣脱共价键的束缚，离开原子而成为自由电子 (Free Electron)，与此同时在原共价键位置上留下了与自由电子数目相同的空位，称为空穴 (Hole)，如图 2-3 所示。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。

本征半导体受外界能量 (热能、电能和光能等) 激发，同时产生“电子-空穴对”的过程称为本征激发。

热、光、电磁辐射等均可导致本征激发，但热激发是半导体材料中产生本征激发的主要因素。

为了摆脱共价键的束缚，价电子必须获得的最小能量 E_g 称为禁带宽度。禁带宽度在 3~6 电子伏特 (eV) 之间的物质属于绝缘体，在半导体中，禁带宽度在 1eV 左右。

半导体中的自由电子在外电场作用下定向运动形成电流。空穴由于失去了一个电子而呈现出一个正电荷的电性，相邻共价键内的电子在正电荷的吸引下会填补这个空穴，从而把空穴移到别处去。依次类推，空穴便可在整个晶体内自由移动，如图 2-4 所示。当有外电场作用时，价电子定向地填补空穴，使空穴作相反方向的移动，这与带正电荷的粒子作定向运动的效果完全一致。由此可见，空穴既是一个电子电量的正电荷，又能在电场下作定向运动。因此，在本征半导体中存在两种极性的导电粒子：带负电荷的自由电子 (简称电子) 和带正

电荷的空穴，我们把它们都称作“载流子”。

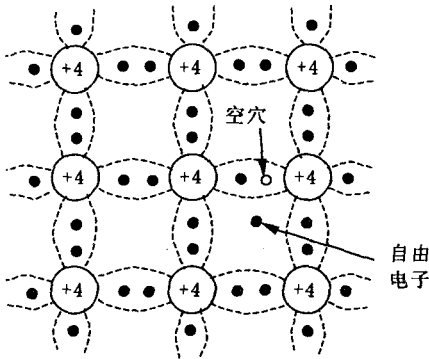


图 2-3 本征激发电子-空穴对

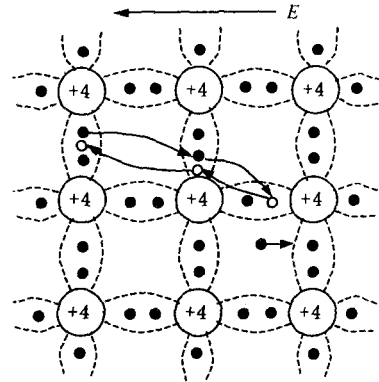


图 2-4 电子与空穴的移动

2. 热平衡载流子浓度

在本征半导体中，由于本征激发，不断地产生电子-空穴对，使载流子浓度增加。与此同时，又会有相反的过程发生。由于正、负电荷相吸引，会使电子和空穴在运动过程中相遇，这时电子填入空位成为价电子，同时释放出相应的能量，从而失去一对电子、空穴，这一过程称为复合。显然，载流子浓度越大，复合的机会就越多。这样当温度一定且没有其他能量存在时，电子、空穴对的产生与复合最终会达到一种热平衡状态，使本征半导体中载流子的浓度一定。理论分析表明，热平衡载流子浓度值 (Intrinsic Concentration) 为

$$n_i = p_i = AT^{3/2} e^{-\frac{E_{g0}}{2kT}} \quad (2-1)$$

$$A = \begin{cases} 3.88 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2} (\text{Si}) \\ 1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2} (\text{Ge}) \end{cases}$$

式中， n_i 、 p_i 分别表示电子和空穴的浓度 (cm^{-3})； T 为热力学温度 (K)； A 是与半导体材料有关的常数； E_{g0} 为 $T=0\text{K}$ 时的禁带宽度 (硅为 1.21eV ，锗为 0.785eV)； k 为玻尔兹曼常数 ($8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}$)。

在 $T=300\text{K}$ 的室温下，由式 (2-1) 可求得本征硅 (锗) 的载流子浓度约为 $1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ($2.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$)，该数值虽然看似很大，但与硅 (锗) 的原子密度 $5 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ ($4.4 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$) 相比非常小。对硅半导体而言，在室温下，只有约为三万亿分之一的原子的价电子受激发产生电子-空穴对，因此，本征半导体在室温下的导电能力非常弱。

由式 (2-1) 可知，热平衡载流子浓度与温度成指数关系，所以，本征半导体的导电性能对温度的变化很敏感。

2.1.3 杂质半导体

在本征半导体中，掺入一定量的杂质元素，就成为杂质半导体 (Doped Semi-conductor)。根据所掺入杂质的不同，杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

1. N型半导体（电子型半导体）

在本征硅（或锗）中掺入少量的五价元素，如磷、砷、锑等，便构成了N型半导体。此时，杂质原子替代了晶格中的某些硅原子，它的5个价电子中，除4个与周围相邻的硅原子组成共价键外，还多余一个价电子只能位于共价键外，如图2-5所示。由于这个键外电子受杂质原子的束缚很弱，所以只需很小的能量激发便可挣脱杂质原子的束缚，成为自由电子。室温下，几乎全部的杂质原子都能提供一个自由电子，当杂质浓度远远超过本征半导体热平衡载流子浓度时，电子浓度远大于空穴浓度。大量的自由电子增加了与空穴复合的几率，从而使空穴浓度值远低于它的本征浓度值。

在N型半导体中，由于电子占多数，故称它为多数载流子，简称多子（Majority Carriers）；而空穴占少数，所以称它为少数载流子，简称少子（Minority Carriers）。由于N型半导体主要依靠电子导电，所以又称为电子型半导体。

五价杂质原子能“施舍”出一个电子，所以称为施主杂质（Donor）。施主杂质失去一个电子后，便成为正离子，由于施主离子被束缚在晶格中，不能自由移动，所以不能参与导电。应该明白，虽然N型半导体中电子数目远大于空穴数目，但由于施主离子的存在，使正、负电荷数目相等，所以整个半导体仍然是电中性的。

2. P型半导体（空穴型半导体）

在本征硅（或锗）中掺入少量的三价元素，如硼、铝、镓等，便构成了P型半导体。此时，杂质原子替代了晶格中的某些硅原子，它的3个价电子和相邻的4个硅原子组成共价键时，只有3个价电子是完整的，第4个共价键因缺少一个价电子而出现一个空穴，如图2-6所示。显然，这个空穴不是由于释放价电子形成的，因而它不会同时产生自由电子。可见，在P型半导体中，空穴是多子，电子是少子。由于P型半导体主要依靠空穴导电，所以又称为空穴型半导体。

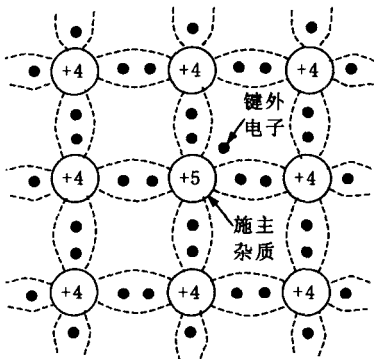


图 2-5 N型半导体

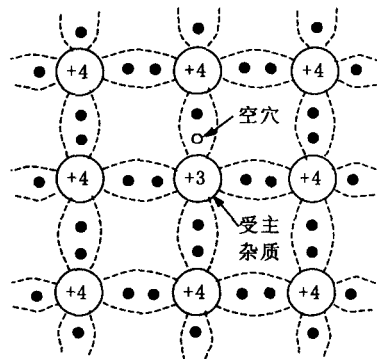


图 2-6 P型半导体

三价杂质原子形成的空穴由相邻共价键中的价电子填补时，能“接受”一个电子，所以称为受主杂质（Acceptor）。受主杂质接受一个电子后成为负离子，负离子不参与导电。在P型半导体中，空穴数等于电子数加受主负离子数，整个半导体也是电中性的。

3. 多子和少子的热平衡浓度

通过上述讨论可见，不论N型还是P型半导体，掺杂越多，多子数目就越多，少子数目