



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

analog electronics
technique

模拟电子技术

◎ 翟丽芳 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化（应用型）“十二五”规划教材

模 拟 电 子 技 术

主 编	翟丽芳						
副主编	胡胜辉	钱志文					
参 编	高 倩	黄 成	薛 波	朱 雷			
主 审	陈 娟						



机 械 工 业 出 版 社

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员:刘国荣

副主任委员:

张德江	梁景凯	张元	袁德成	焦斌
吕进	胡国文	刘启中	汤天浩	黄家善
钱平	王保家			

委员(按姓氏笔画排序):

丁元明	马修水	王再英	王军	叶树江
孙晓云	朱一纶	张立臣	李先允	李秀娟
李海富	杨宁	陈志新	周渊深	尚丽萍
罗文广	罗印升	罗兵	范立南	娄国焕
赵巧娥	项新建	徐建英	郭伟	高亮
韩成浩	蔡子亮	樊立萍	穆向阳	

前言

为了适应高等教育改革的形势，特别是应用型本科教育教学改革的需要，以注重学生的工程实践能力与自主创新能力的培养为宗旨，编者针对模拟电子技术课程学习的特点，总结多年教学实践经验，编写了这本教材。在保证系统性、科学性的前提下，力求在内容选择上注重实用性，在语言描述上注重简练与可读性。

“模拟电子技术”作为一门工科大学电气信息类专业的重要技术基础课，涉及许多电路理论知识、常用的基本器件和实际电路，入门较难。编者通过多年的针对应用型大学的教学实践，深深体会到要教好这门课程，一定要针对课程特点，针对学生特点，遵循从特殊到一般的认知规律，理论密切联系实际。本书在第1~3章通过经典的分立元件电路，介绍电子电路的基本分析方法，阐明模拟电子技术中带有普遍性的思想方法和重要结论；第4~9章分别介绍以集成电路为主要器件的模拟信号的产生、处理和放大电路。在此基础上第10章介绍了模拟系统的设计。因此，本教材内容以集成电路为主，既重视电子器件、集成电路的外部特性以及各种基本电路的理论、设计计算，又适当引进新理论、新器件、新技术的应用。本书重视理论分析，注重讲清物理概念，分析计算详尽，且具有启发性，便于自学，又重视实践性，书中许多实践案例都来自工程实际应用。

本书在整体的安排上保留了模拟电子技术课程的基本内容、基本体系，同时又有创新，各章增加了应用背景、实践案例以及最后自成一章的模拟电子系统的设计。

本书共包括10章，书后附有部分习题参考答案。书中打星号部分为选学内容，教师可根据具体情况灵活处理；删去这些内容不影响理论体系的完整性。

参加本书编写工作的有翟丽芳（绪论、第2章）、高倩（第1、3章）、胡胜辉（第4、6章）、黄成（第5、9章）、薛波（第7章）、钱志文（第8章）、朱雷（第10章）。翟丽芳为主编，负责组织和统稿工作，钱志文、胡胜辉为副主编。

本书由长春工业大学的陈娟教授担任主审。陈教授认真审阅了本书的全稿，并提出了许多宝贵的修改意见。编写过程中，江苏技术师范学院沈琳、孟继德等老师提出了许多宝贵意见。对此，编者谨向他们致以衷心的感谢！

本书内容若有疏漏和错误，欢迎专家、学者、教师、学生和工程技术人员提出意见和建议，以便今后不断改进。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第1章 半导体二极管及其基本应用	
电路	5
应用背景	5
1.1 半导体基础知识	5
1.1.1 本征半导体	5
1.1.2 杂质半导体	6
1.2 PN结	7
1.2.1 PN结的形成	7
1.2.2 PN结的单向导电性	8
1.2.3 PN结的伏安特性	8
1.2.4 PN结的电容效应	9
1.2.5 PN结的温度特性	9
1.3 半导体二极管	10
1.3.1 半导体二极管的结构和类型	10
1.3.2 半导体二极管的伏安特性	10
1.3.3 半导体二极管的主要电参数	12
1.4 半导体二极管的基本应用电路	15
1.4.1 半波整流电路	15
1.4.2 开关电路	15
1.4.3 限幅电路	16
1.5 特殊二极管	16
1.5.1 稳压二极管	16
1.5.2 发光二极管、光敏二极管和光耦合器	20
1.5.3 变容二极管	21
本章小结	21
实践案例	22
思考题与习题	23
第2章 双极型晶体管及其放大电路	
基础	26
应用背景	26
2.1 晶体管	26
2.1.1 晶体管的结构与符号	26
2.1.2 晶体管的工作原理	26
2.1.3 晶体管的特性曲线	29
2.1.4 晶体管的主要电参数	31
2.1.5 温度对晶体管参数的影响	33
2.1.6 晶体管实际使用应注意的问题	33
2.2 放大电路模型及其技术指标	34
2.2.1 放大电路概述	34
2.2.2 共射极放大电路及放大电路模型	34
2.2.3 放大电路的主要技术指标	36
2.3 放大电路的静态分析方法	38
2.3.1 静态、静态工作点和直流通路	38
2.3.2 图解法	39
2.3.3 估算法	40
2.4 放大电路的动态分析	41
2.4.1 图解分析法	42
2.4.2 微变等效电路分析法	45
2.5 三种基本放大电路	49
2.5.1 共射极放大电路	49
2.5.2 共集电极放大电路	54
2.5.3 共基极放大电路	57
2.5.4 三种基本放大电路的比较	58
2.6 放大电路的频率响应	59
2.6.1 频率响应的基本概念	59
2.6.2 晶体管的高频模型及频率参数	62
2.6.3 共射极电路的频率响应	65
本章小结	70
实践案例	71
思考题与习题	71
第3章 场效应晶体管及其放大电路	76
应用背景	76
3.1 场效应晶体管	76
3.1.1 结型场效应晶体管	76
3.1.2 绝缘栅型场效应晶体管	80
3.1.3 场效应晶体管的主要电参数及特点	83
3.2 场效应晶体管放大电路	85
3.2.1 直流偏置电路及其静态分析	85
3.2.2 场效应晶体管的微变等效电路	87
3.2.3 场效应晶体管的三种基本放大电路	87
3.3 多级放大电路	91
3.3.1 多级放大电路的组成及耦合方式	91
3.3.2 多级放大器技术指标的计算	93

本章小结	94	5.3.2 减小非线性失真	133
实践案例	94	5.3.3 抑制反馈环内的噪声和干扰	133
思考题与习题	96	5.3.4 扩展通频带	134
第4章 集成运算放大电路	99	5.3.5 对输入电阻的影响	135
应用背景	99	5.3.6 对输出电阻的影响	136
4.1 集成运算放大电路概述	99	5.3.7 放大电路中引入负反馈的一般原则	137
4.1.1 集成电路中元器件的特点	99	5.4 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法	137
4.1.2 集成运放的典型结构	99	5.4.1 产生自激振荡的原因及条件	137
4.1.3 集成运放的种类及特点	100	5.4.2 负反馈放大电路稳定性的判定	138
4.2 集成运放中的偏置电路	101	5.4.3 负反馈放大电路中自激振荡的消除方法	139
4.2.1 镜像电流源电路	101	本章小结	141
4.2.2 比例电流源电路	102	实践案例	141
4.2.3 微电流源电路	102	思考题与习题	142
4.2.4 电流源电路的作用	103	第6章 集成运放的线性应用	145
4.3 集成运放中的输入级单元电路——差分放大电路	104	应用背景	145
4.3.1 基本差分放大电路	104	6.1 集成运放的一般应用问题	145
4.3.2 带恒流源的差分放大电路	107	6.1.1 应用分类	145
4.4 集成运放中的中间级单元电路	110	6.1.2 线性应用分析方法	146
4.4.1 复合管的组成	110	6.1.3 集成运放应用的实际问题	146
4.4.2 复合管放大电路	111	6.2 基本运算电路	148
4.5 集成运放中的输出级单元电路	113	6.2.1 比例运算电路	149
4.6 通用集成运放介绍	113	6.2.2 加法和减法运算电路	150
4.6.1 双极型通用运放	113	6.2.3 积分运算电路和微分运算电路	153
4.6.2 CMOS 运放	114	6.2.4 对数运算电路和反对数运算电路	155
4.7 集成运放的主要参数	115	6.3 模拟乘法器	156
4.7.1 交流参数	115	6.3.1 模拟乘法器的工作原理	156
4.7.2 直流参数	116	6.3.2 乘法器应用电路	158
本章小结	117	6.4 有源滤波电路	160
实践案例	118	6.4.1 滤波器的基础知识	160
思考题与习题	118	6.4.2 低通有源滤波器 (LPF)	161
第5章 负反馈放大电路	121	6.4.3 高通滤波器 (HPF)	163
应用背景	121	6.4.4 带通滤波器 (BPF) 和带阻滤波器 (BEF)	164
5.1 反馈放大电路的基本原理及类型	121	本章小结	168
5.1.1 反馈放大电路的基本原理	121	实践案例	168
5.1.2 反馈的分类	122	思考题与习题	168
5.1.3 反馈类型的判断方法	123	第7章 功率放大电路	172
5.2 典型负反馈放大电路的分析及放大倍数的估算	126	应用背景	172
5.2.1 典型负反馈放大电路的分析	126	7.1 概述	172
5.2.2 在深度负反馈条件下放大电路的估算	130	7.1.1 功率放大电路的主要指标	172
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	132	7.1.2 功率放大电路的分类	173
5.3.1 提高增益的稳定性	132		

7.2 互补推挽功率放大电路	174	9.2.1 整流电路的主要性能指标	205
7.2.1 乙类互补推挽功率放大电路	174	9.2.2 单相桥式整流电路	206
7.2.2 甲乙类互补推挽功率放大电路	177	9.3 滤波电路	209
7.2.3 单电源功率放大电路	178	9.3.1 电容滤波电路	209
7.3 功率放大器的保护电路	179	9.3.2 电感滤波电路	211
7.3.1 功率管的管耗与散热	179	9.4 串联型稳压电路	212
7.3.2 保护电路	180	9.4.1 稳压电路的性能指标	212
本章小结	181	9.4.2 稳压二极管构成的直流稳压电路	213
实践案例	181	9.4.3 可调直流电压源	214
思考题与习题	183	9.4.4 串联型稳压电路	214
第8章 信号发生器	185	9.4.5 集成三端稳压器	218
应用背景	185	9.5 开关型稳压电路*	221
8.1 概述	185	9.5.1 开关型稳压电路基本原理	222
8.2 正弦波信号发生器	185	9.5.2 降压型开关稳压电路	222
8.2.1 正弦波自激振荡的基本原理	185	本章小结	223
8.2.2 RC 桥式正弦波信号发生器	187	实践案例	224
8.2.3 LC 正弦波信号发生器	188	思考题与习题	225
8.2.4 晶体振荡器	191	*第10章 模拟电子系统的设计	228
8.3 电压比较器	192	应用背景	228
8.3.1 单门限电压比较器	193	10.1 电子系统概述	228
8.3.2 多门限电压比较器	194	10.2 模拟电子系统中的常用集成电路	229
8.4 非正弦波信号发生器	197	10.2.1 预处理放大器	229
8.4.1 方波发生器	197	10.2.2 信号转换器	230
8.4.2 三角波和锯齿波发生器	198	10.2.3 模拟乘法器	231
本章小结	200	10.3 模拟电子系统的设计方法及流程	233
实践案例	200	10.4 模拟系统设计实例	233
思考题与习题	201	本章小结	240
第9章 直流稳压电源	204	思考题与习题	241
应用背景	204	部分思考题和习题参考答案	242
9.1 概述	204	附录 密勒定理	246
9.2 单相整流电路	204	参考文献	247

绪 论

什么是电子技术

简单地说，电子技术就是研究电子器件、电子电路和电子系统及其应用的科学技术。电子技术作为信息时代的基础科学之一，已经被广泛地应用于工业、农业、科技、国防等领域以及人们的日常生活中。下面通过对电子器件、电子电路及其应用的简要介绍，使读者对电子技术有一个概貌性的了解，

1. 电子器件

第一代电子器件是 20 世纪初发明的电真空管，包括电子管（Electron Tube）和离子管（Ion Tube）。电子管也称真空管，是最早出现的电子器件，因要把密闭的管壳内抽成高真空而得名。工作时，电子管的阴极灯丝受热发射电子，这些电子受外加电场和磁场的影响，在真空中运动就形成了电子流。离子管和电子管类似，也要把密闭的管壳内抽成高真空，然后再充以适当的气体。这类管子中的电流，除了电子外，还有正离子，所以称为离子管。电真空器件输出功率大，但功耗也很大。目前电真空器件还在某些特殊场合发挥着它的优势，例如电视机中的显像管，电子示波器中的示波管等。

第二代电子器件是 20 世纪中叶发明的晶体管（Transistor）、场效应管（Field Effect Transistor）等，也称为半导体器件或者固体器件。半导体器件是现代电子技术产生的基础。这类器件具有体积小、重量轻、寿命长、功耗小等优点，在许多电子设备中已经取代了电子管。其缺点是受温度变化的影响大、外加电压不能太高、过载能力较差等。

第三代电子器件是集成电路（Integrated Circuit，IC）。集成电路是把许多晶体管、场效应管与电阻等元件制作在同一块晶片上互相连接而成的电路。集成电路自 1959 年发明以来发展迅速，从刚开始的在一个芯片上集成 4 个晶体管到现在的集成几亿个元件，经历了从小规模（SSI）、中规模（MSI）、大规模（LSI）到超大规模（VLSI）的发展过程，现在已经发展到了系统级芯片（SOC）。集成电路的出现，大大缩短了电子产品的研发周期，提高了产品的可靠性和性价比，从而推动了电子技术的快速迅猛发展。

2. 电子电路

电子器件与常用的电阻器、电感器、电容器、变压器等元器件适当地连接起来所组成的电路就称为电子电路。电子电路与普通电路的区别在于电子电路包含电子器件，而普通电路只用电阻器、电感器、电容器、变压器等元器件构成，不包含电子器件。

3. 电子技术的应用

现代电子技术的应用已经渗入到现代工业、农业、军事、文化生活等诸多领域，大家耳熟能详的行业有计算机、通信、自动控制、智能家居等。

电子技术最初应用于通信系统。它与无线电技术相结合，使通信科学技术在 20 世纪获得了惊人的发展。后来进一步发展的有线载波通信、激光通信、光纤通信等也都应用了电子技术的成就。

测量和控制是电子技术的另一个广泛应用的领域。电子测量和控制凭借其快速、灵敏、精确等特点，不但在工业自动化技术中成为主力军，而且在电力系统、航空航天等领域也都成为了不可替代的部分。例如，在电力系统中，可以通过电子技术远距离测量各发电厂的参数，及时进行

自动调整和调度, 保证设备运行的可靠性, 提高劳动生产率。再如, 航天器的控制部分本身就是一个电子系统, 当它发射后更要通过遥感遥测, 获知其运行状态, 并且进行姿态控制和调整, 以达到预期的效果和目的。

计算机是电子技术又一个应用领域。20 世纪 40 年代, 用 18000 个电子管构造的世界上第一台数字电子计算机, 占地约 150m^2 , 重量达 30t, 运算速度仅约 5000 次/s。随着半导体器件的问世, 计算机也逐步向小型化的方向发展。现代微型计算机采用超大规模集成电路, 具有功耗低、体积小、重量轻、运算速度快、功能强等特点。计算机的发展也反过来推动了电子技术的进一步发展, 现代电子设计都采用计算机辅助设计, 使得设计过程更为方便、快捷、高效。

另外, 电子技术也已经深入人们日常生活的方方面面。人们每天接触的全自动洗衣机、智能电饭煲、电冰箱、电视机等, 每一样都与电子技术有关。现在正迅速发展的智能家居、互联网等行业也是电子技术发展的产物。总之, 电子技术已经和社会进步和发展密不可分。

什么是模拟电子技术

1. 模拟信号

信号的形式是多种多样的, 从不同的角度进行分类有不同的称谓。在电子电路中, 将信号分为模拟信号和数字信号。

模拟信号是指在时间和幅值上都连续变化的信号, 数字信号是指在时间和幅值上均具有离散性的信号。事实上, 大多数物理量通过传感器转换为模拟信号, 在信号处理时, 模拟信号和数字信号可以相互转换。

2. 模拟电子技术

采集、处理、加工或者产生模拟信号的电路均称为模拟电子电路。图 1 所示为模拟电子系统的示意图。系统首先进行信号的采集, 即信号提取。通常这些信号来源于测试各种物理量的传感器、接收器, 或者来源于用于测试的信号发生器。对于实际系统, 传感器或者接收器所提供的信号的幅度很小, 噪声很大。因此, 在加工信号之前, 需要进行预处理, 即根据实际情况利用隔离、滤波、阻抗变换等手段将有用信号分离并进行放大。当信号足够大时, 再进行信号的运算、转换、比较等不同的加工。最后, 一般还要经过功率放大以驱动执行机构, 或者经过模拟信号到数字信号的转换变为计算机可以接收的信号。

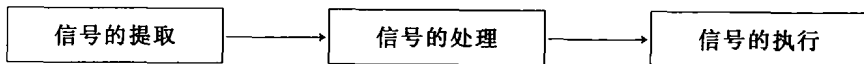


图 1 模拟电子系统示意图

模拟电子技术课程的任务、特点和主要内容

1. 课程的任务

模拟电子技术课程是高等工业学校电类专业在电子技术方面具有入门性质的专业基础课。课程的任务是在介绍常用半导体器件的基础上, 重点介绍常用功能电路的基本概念、基本原理和基本分析方法, 并着力培养查阅器件手册、阅读和分析电路图的能力, 为以后深入学习电子技术打好基础。

2. 课程的特点

(1) 实践性强

模拟电子技术是一门应用很广、实践性很强的工程技术科学。与先修的基础理论课程（如大学物理、电路原理）相比, 更接近工程实际, 强调理论与实践相结合, 在教学中, 采用工程

近似估算和定性分析相结合的方法，分析电路的特点和功能指标。

(2) 非线性分析方法

电路原理课程中基本只讨论线性元件和电路，采用的是线性电路的分析方法；而模拟电子技术中的半导体器件都属于非线性器件，经常采用图解法、框图等分析方法。但是非线性电路的分析方法很繁琐，难以得到简单明确的结论，所以在模拟电路分析时会在一定的条件下将非线性电路近似转换成线性电路进行分析。学习时，特别要注意特定分析方法的适用条件。

3. 课程的主要内容

本课程的教学，不是面面俱到地介绍电子技术的各个方面，而是重点讨论电子技术中的最初步、最基本、最共性的东西，即重点抓住三个方面的内容：一是模拟电路的基本分析方法；二是基本电子器件和电子电路的性能以及主要应用；三是电子测试技术、电子电路的分析和识图能力。

具体来说课程的主要内容有：

(1) 器件

电子器件（包括集成电路）是模拟电子技术课程中的基本内容，学习的重点在于了解它们的外特性和用于电路中的工作条件，不深入讨论器件内部微观的物理过程和生产工艺。

(2) 电路

任何电子系统，无论其复杂程度如何，都是由各种基本电子电路按一定原则所组成的。因此，学习的重点应放在基本单元电路的电路构成、工作原理、分析方法、性能指标及特点、典型应用等方面。

在学习中，对待器件、电路、应用三者的关系是：管、路、用结合，管为路用，以路为主。对待分立元件电路和集成电路的关系是：分立是基础，集成是重点，分立为集成服务。

(3) 分析方法

模拟电路是非线性电路，所以常采用图解法进行电路分析；在信号较小时通常采用微变等效电路法把非线性电路转换成线性电路进行分析。另外，模拟电路是实践性很强的工程性质的课程，所以分析电路时经常采用近似估算法。学习时要注意分析方法的选择，不同的电路要视具体情况选择适当的分析方法。

(4) 基本技能

学习模拟电子技术课程，要注重以下基本技能的培养：一是查阅电子器件和集成电路手册的能力；二是阅读和分析电路图的能力；三是常用半导体器件的正确使用、识别能力；四是常用基本电路的参数测量、电路调试、故障判断能力。

模拟电子技术课程的学习方法

1. 抛弃精确分析，接受工程估算观点

模拟电路的分析和设计往往和工程背景有直接关系，应用时会遇到很多实际问题，难以做出精确地分析计算。例如，电子器件的离散性导致参数的不一致，元件的实际参数与标称值的偏差，温度变化引起的元器件参数变化，电源电压的波动引起的电路参数的变化等。由于这些因素，进行精确地计算既困难也没有意义，所以在分析计算时，往往有条件地忽略一些次要因素进行估算。这样既能使复杂的问题得以简化，又能满足实际工程的计算要求，这就是工程估算法。

在采用工程估算法时，不能简单地因为某个量很大或者很小而忽略不计，而是要根据简化处理后所造成的相对误差的大小来决定。工程上一般认为合理的估算结果所产生的误差应小于10%。工程估算法虽然简单，但要正确使用却也有难度，往往要借助前人的经验。实际上，工程估算法的目的不是为了获得精确的结果，而是通过简单的计算获得清晰的、定性的概念和结论。

利用这些概念和结论进一步指导电路的设计，在实验中迅速判断电路故障的原因或者电路应该做什么调整以达到设计要求。所以本课程的学习切忌把时间浪费在繁琐的数学推导和精确的数值计算上。

2. 重视理论和实验的结合

电子技术实验是本课程必不可少的重要环节，仅有理论知识，而不动手实践，是不能真正掌握电子技术的。因为影响电路工作的因素很多，难以用简单的模型进行全面的分析。因此，一般的电子设备，设计、安装只是初步的工作，为了达到设计指标要求，更重要的是现场调试，需要结合实际情况修改设计参数。对于初学者来说，也只有通过实验，通过对电路的调试，才能更好地理解基本概念，掌握理论课中很难理解的内容。所以，电子技术的教与学都应重视实践教学。

3. 学习 EDA 技术

EDA (Electronic Design Automation) 是指电子设计自动化。随着计算机辅助设计的发展，模拟电子技术也有多种 EDA 软件可以对电路进行仿真设计，这也是一种新的电路设计和实验方法。EDA 软件可以模拟实验环境，通过对电路的仿真分析，得到与实验室类似的实验结果。现在，利用 EDA 技术设计电子系统已经是一种趋势。所以，合理利用 EDA 软件，把它作为电子技术教学和实验的辅助工具，不但可以起到事半功倍的效果，而且可以为今后从事电子产品设计打下一定的基础。

第 1 章 半导体二极管及其基本应用电路

应用背景

半导体二极管是广泛应用于电子设备中的最简单的半导体器件，它在许多电路中起着重要的作用。半导体二极管种类很多，有检波二极管、整流二极管、稳压二极管、开关二极管、隔离二极管、发光二极管、硅功率开关二极管、旋转二极管等，从这些特殊的名词大致可以了解二极管的应用场合非常多。随着全球经济的发展，二极管的制造已逐渐从中低端领域转向高端产品市场，旨在提高产品性能与集成度、降低噪声和能量耗散等方面，以支持 PDA、CRT 和 LCD 显示器、主板、交换式电源、手机充电器、调制解调器和无线通信设备等应用。

本章首先介绍半导体物理知识和 PN 结的特点，然后重点介绍半导体二极管的伏安特性、主要参数及应用，最后介绍稳压二极管、发光二极管、变容二极管等特殊二极管的特点。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 本征半导体

1. 半导体

自然界中的物质按其导电能力可分为导体、半导体和绝缘体。金、银、铜、铝等金属材料是良好的导体，塑料、陶瓷、橡胶等材料是绝缘体，这些材料在电力系统中得到了广泛的应用。还有一些材料如硅、锗等，它们的导电能力介于导体和绝缘体之间，被称为半导体。20 世纪 40 年代，科学家在实验中发现半导体材料具有一些特殊的性能，并制造出性能优良的半导体器件，从而引发了电子技术的飞跃。

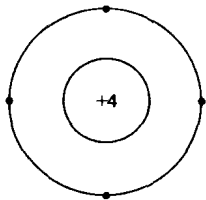


图 1-1 硅和锗原子结构的简化模型

物质的导电性能决定于原子结构。硅（Si）和锗（Ge）是两种常用的半导体材料，同属四价元素，它们每个原子的最外层均有四个价电子。图 1-1 所示的是硅和锗原子结构的简化模型。

2. 本征半导体的晶体结构

纯净的半导体称为本征半导体。制造半导体器件用的是单晶结构的半导体。在单晶结构的本征半导体中，通过电子运动，每一个半导体原子最外层的四个价电子与相邻的四个半导体原子的各一个价电子组成四对共价键，并按一定规律排列。图 1-2 所示的是本征硅（或锗）晶体结构平面示意图。

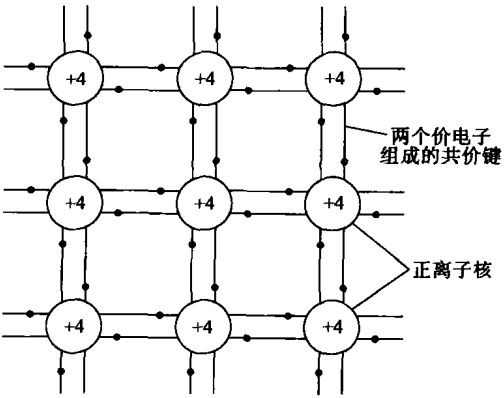


图 1-2 本征硅（或锗）晶体结构平面示意图

3. 本征半导体中的两种载流子

在热力学温度零度（即 0K）时，价电子没有能力脱离共价键的束缚，即没有能够自由移动的带电粒子（又称载流子），这时的本征半导体是良好的绝缘体。但在用不大的激发能量（热、光照、电场等）激发下本征半导体中的价电子可以挣脱共价

键的束缚,成为自由电子,同时,在原来共价键留下的一个空位处产生一个空穴,这一过程称为本征激发。如图 1-3 所示,一个价电子在 a 处挣脱共价键的束缚,成为自由电子,同时在 a 处产生一个空穴。

在外电场作用下,一方面自由电子将产生定向移动,形成电子电流;另一方面由于空穴的存在,价电子将按一定的方向依次填补空穴,也就是说空穴也产生定向移动,形成空穴电流。例如,在 b 处的电子填补了 a 处的空穴,在 b 处留下空穴; c 处的电子再填补 b 处的空穴,在 c 处留下空穴;这样就形成了从 $c \rightarrow b \rightarrow a$ 的电子电流,即形成 $a \rightarrow b \rightarrow c$ 的空穴电流。所以,在半导体中有两种可以自由移动的载流子:带负电的自由电子和带正电的空穴。

在本征半导体中,本征激发(主要是热激发)使自由电子和空穴成对产生;它们相遇复合时,也成对消失。当温度一定时,激发和复合动态平衡,即“自由电子—空穴对”浓度一定。当环境温度升高时,热运动加剧,挣脱共价键束缚的自由电子增多,空穴也随之增多,即载流子的浓度升高,因而必然使得导电性能增强;反之,则导电性能变差。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体的电阻率较大,且对温度变化十分敏感,不宜在半导体器件制造中直接使用。通常进行扩散工艺,在本征半导体中掺入少量其他合适的元素,可以改善半导体材料的导电性能。这类半导体称为杂质半导体,杂质半导体有 N 型半导体和 P 型半导体两类。

1. N 型半导体

在本征半导体中,掺入少量五价杂质元素,如砷(As)、磷(P)后,杂质原子的五个价电子中只能有四个价电子与相邻的四个硅(或锗)原子的价电子组成共价键,多余的那个价电子很容易受激发脱离原子核的束缚成为自由电子,相应的五价元素的原子因失去一个电子而成为不能自由移动的带正电粒子——正离子,如图 1-4 所示。掺入的杂质密度足够大时,有大量的自由电子产生,因此自由电子成为多数载流子,简称多子。自由电子带负电(Negative),所以称这种半导体为 N 型半导体或者电子型半导体。N 型半导体中仍然存在有少量本征激发产生的空穴,称为少数载流子,简称少子。所掺入的杂质称为施主杂质。N 型半导体主要靠自由电子导电,掺入的杂质越多,多子的浓度就越高,从而导电性能越强。

2. P 型半导体

当本征半导体中掺入适量三价元素,如硼(B)、铟(In)时,三价元素原子为形成四对共价键使结构稳定,常吸引附近半导体原子的价电子,从而产生一个空穴和一个负离子,如图 1-5 所示。这种杂质半导体的多子是空穴,因空穴带正电

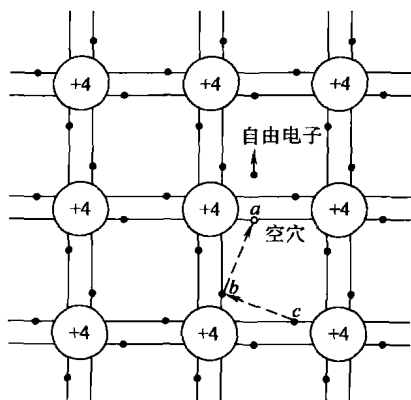


图 1-3 本征半导体中的自由电子和空穴

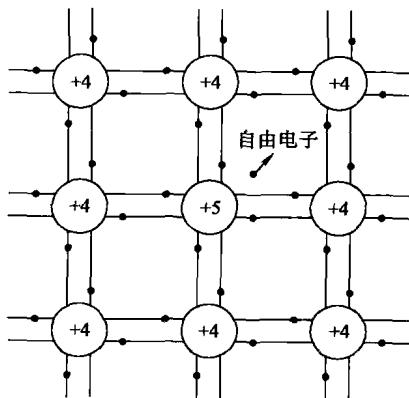


图 1-4 N 型半导体

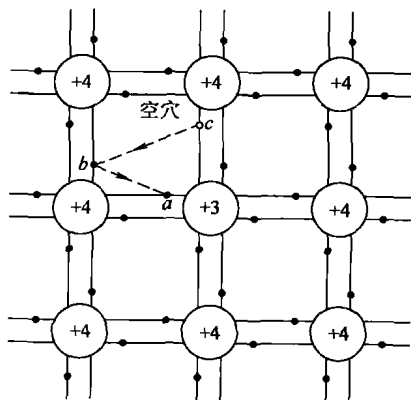


图 1-5 P 型半导体

(Positive), 所以称为 P 型半导体或者空穴型半导体。P 型半导体的少子为电子, 所掺入的杂质称为受主杂质。P 型半导体主要靠空穴导电, 掺入的杂质越多, 空穴浓度就越高, 导电性能也就越强。

N 型半导体和 P 型半导体均属非本征半导体, 其中多子的浓度取决于掺入的杂质元素原子的密度, 少子的浓度主要取决于温度; 而所产生的离子, 不能在外电场作用下作漂移运动, 不参与导电, 不属于载流子。当 N 型半导体中再掺入更高密度的三价杂质元素时, 可转型为 P 型半导体; 反之, P 型半导体也可通过掺入足够的五价元素而转型为 N 型半导体。

1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的形成

通过一定的工艺, 在同一块半导体基片的一边掺杂成 P 型, 另一边掺杂成 N 型, 则 P 区和 N 区的交界面附近电子浓度和空穴浓度相差很大。物质总是从浓度高的地方向浓度低的地方运动, 这种由于浓度差而产生的运动称为扩散运动。由于交界面两侧的 N 型半导体和 P 型半导体存在多子浓度的极大差异, 因而 P 区的空穴必然向 N 区扩散, 与此同时, N 区的自由电子必然向 P 区扩散, 如图 1-6 所示。为了简明, 图中没有画出半导体中的少子。由于扩散到 P 区的自由电子与空穴复合, 而扩散到 N 区的空穴与自由电子复合, 所以在交界面附近多子的浓度下降, P 区出现负离子区, N 区出现正离子区, 它们是不能移动的, 称为空间电荷区, 如图 1-7 所示。由于在空间电荷区载流子被复合或者说被耗尽, 所以又称耗尽层。空间电荷区促使其形成内电场, 方向由 N 区指向 P 区。因此, 在两种半导体之间存在电位壁垒, 称为势垒, 记做 U_0 , 它对多子向另一侧扩散起阻碍作用, 所以空间电荷区又称势垒区。随着扩散运动的进行, 空间电荷区加宽, 内电场增强, 进一步阻止扩散运动的进行。

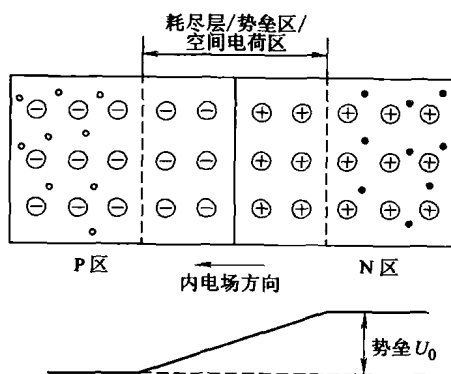
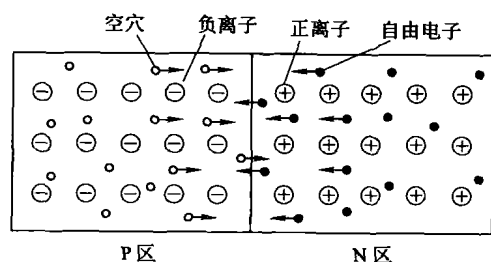


图 1-6 PN 结形成中载流子的扩散运动

图 1-7 PN 结开路时, 在平衡状态下的电荷及电位分布

在电场力作用下载流子的运动称为漂移运动。在图 1-7 中, 当空间电荷区形成后, 在内电场作用下, 少子产生漂移运动, 空穴从 N 区向 P 区运动, 而自由电子从 P 区向 N 区运动。在 PN 结两端开路的条件下, 经过交界面的由多子扩散形成的扩散电流与少子漂移形成的漂移电流大小相等、方向相反, 从而达到动态平衡, 形成 PN 结。此时, 空间电荷区具有一定的宽度, 正、负电荷电量相等, 电流为零。

当材料、掺杂浓度、工作温度一定时, 势垒 U_0 也就一定, 约为零点几伏。由于势垒 U_0 一定, 所以 PN 结的宽度与两侧空间电荷区的离子密度有关, 当 P 区和 N 区掺杂浓度相等时, 两侧

空间电荷区的宽度相等；当 P 区和 N 区掺杂浓度不相等时，掺杂浓度高的一侧离子电荷密度大，空间电荷区宽度较窄；掺杂浓度低的一侧离子电荷密度小，空间电荷区宽度较宽，交界面两侧的 PN 结宽度不相等，PN 结出现不对称，如图 1-8 所示。

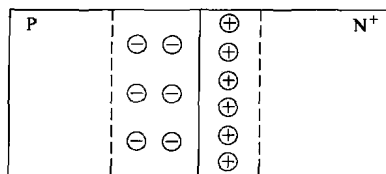


图 1-8 不对称的 PN 结

1.2.2 PN 结的单向导电性

1. PN 结正向偏置

当 PN 结外部所加的直流电压 V 使 P 型半导体一端的电位高于 N 型半导体一端的电位时，PN 结处于正向偏置状态，简称正偏状态，如图 1-9 所示。此时，外电场与内电场方向相反，外电场将多数载流子推向空间电荷区，一部分多子在扩散过程中与空间电荷区的离子中和，使 PN 结变窄，PN 结的动态平衡被打破，扩散运动大于漂移运动，从而形成大的多子的正向扩散电流，PN 结呈现低电阻，处于导通状态。

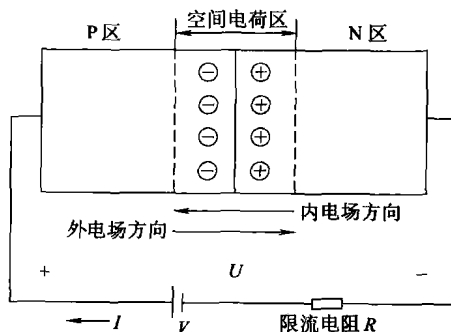


图 1-9 PN 结正向偏置

2. PN 结反向偏置

当 PN 结外部所加的直流电压 V 使 P 型半导体一端的电位低于 N 型半导体一端的电位时，PN 结处于反向偏置状态，简称反偏状态，如图 1-10 所示。此时，外电场与内电场方向一致，外电场使空间电荷区变宽，阻止多子扩散运动的进行，加剧少子的漂移运动，打破了 PN 结的动态平衡，形成少子的反向漂移电流。由于少子由本征激发产生，浓度很低，所以 PN 结反偏时，流过的反向电流很小，PN 结呈现高电阻，处于反向截止状态。当反向电压并不是很高时，几乎所有的少子就都参与了漂移运动，此时的反向电流称为反向饱和电流，记作 I_s 。

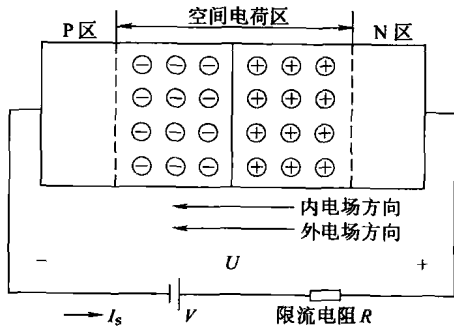


图 1-10 PN 结反向偏置

综上所述，PN 结具有单向导电特性：当 PN 结外加正向电压时，正向电阻很小，PN 结正向导通；当 PN 结外加反向电压时，反向电阻很大，PN 结反向截止。

1.2.3 PN 结的伏安特性

PN 结的单向导电性说明了 PN 结的电压与电流具有非线性关系。若规定 PN 结两端电压 u 的正方向为 P 型半导体一端且为“正”，则 N 型半导体一端为“负”；规定流过 PN 结的电流 i 的正方向为 P 区流向 N 区，则其电压电流关系可以由下列方程表述为

$$i = I_s (e^{u/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中， I_s 为反向饱和电流； U_T 为温度电压当量， $U_T = kT/q$ ，其中 T 是热力学温度， k 是玻耳兹曼常数， q 是电子电量，常温下，即热力学温度 $T = 300\text{K}$ 时， $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

由式 (1-1) 可知，当 $u = 0$ 时， $i = 0$ ；当 PN 结外加正向电压，且 $u \gg U_T$ 时， $i \approx I_s e^{u/U_T}$ ，即 i 随 u 按指数规律变化；当 PN 结外加反向电压，且 $|u| \gg U_T$ 时， $i \approx -I_s$ ，即反向电流的大小与反向电压的大小几乎无关。 i 与 u 的关系曲线如图 1-11 所示，称为 PN 结的伏安特性曲线，其中 $u > 0$ 的部分称为正向特性， $u < 0$ 的部分称为反向特性。

当反向电压超过一定数值 (U_{BR}) 后, 共价键遭到破坏, 使价电子脱离共价键束缚, 产生“自由电子—空穴对”, 反向电流急剧增加, 称为反向击穿。若对反向电流不加限制, 就会造成 PN 结永久性破坏。

1.2.4 PN 结的电容效应

PN 结具有电容效应, 按产生的原因不同分为“势垒电容”和“扩散电容”两种。

1. 势垒电容 C_B

当外加在 PN 结两端的电压发生变化时, 空间电荷区的宽度将随之变化, 即耗尽层的电荷量随外电压增大或减小, 这一现象类似于电容器的充放电过程, 是一种电容效应, 用势垒电容 C_B 表征。 C_B 是非线性电容, 它与 PN 结的面积、耗尽层的宽度、半导体的介电常数及外加电压有关。当 PN 结加反向电压时, C_B 明显随电压 u 的变化而变化, 因此可以利用这一特性制成变容二极管。

2. 扩散电容 C_D

扩散电容 C_D 是由于载流子在扩散运动中的积累所形成的。当 PN 结正向偏置时, 多子扩散到对方区域后, 在 PN 结边界附近有积累, 并会存在一定的浓度梯度。积累的电荷量也会随外加电压变化, 引起电容效应, 用扩散电容 C_D 表示。 C_D 也是非线性电容。当 PN 结的正向电压增大时, 扩散到对方区域的多子浓度增大, 相应的浓度梯度也增大, 扩散电容大; 当外加正向电压减小时, 与上述变化相反。而 PN 结反向偏置时, 扩散电容很小, 一般可忽略。

3. 结电容 C_j

PN 结的结电容 C_j 是扩散电容 C_D 和势垒电容 C_B 之和, 即

$$C_j = C_D + C_B \quad (1-2)$$

PN 结正向偏置时, C_j 一般以 C_D 为主; 反向偏置时, 则近似等于 C_B 。由于 C_D 和 C_B 一般都很小, 对于低频信号呈现出很大的容抗, 其作用可忽略不计, 所以, 在信号频率较高时才考虑结电容的作用。

1.2.5 PN 结的温度特性

当温度升高时, PN 结两边的热平衡少数子浓度相应升高, 从而使 PN 结的反向饱和电流 I_S 升高。实验发现温度每升高 10°C , I_S 约增大一倍。

同样, 随温度的上升, PN 结的正向伏安特性曲线将左移, 反向伏安特性曲线下移, 如图 1-12 所示。在室温附近, 温度每升高 1°C , 正向压降减少 $2 \sim 2.5\text{mV}$ 。

为了保证 PN 结能正常工作, 就有一个最高温度的限制, 硅管约为 $150 \sim 200^\circ\text{C}$, 锗管约为 $75 \sim 100^\circ\text{C}$ 。

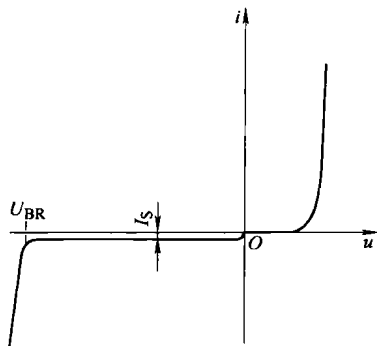


图 1-11 PN 结的伏安特性

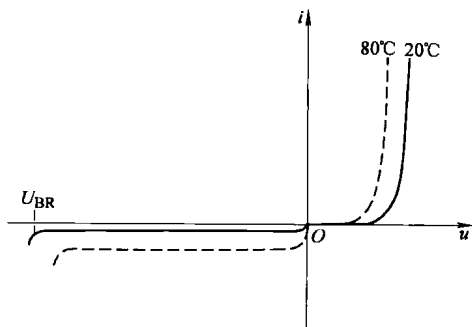


图 1-12 PN 结随温度变化的伏安特性

1.3 半导体二极管

1.3.1 半导体二极管的结构和类型

半导体二极管是以 PN 结为核心, 在 PN 结的两端各引出一个电极, 加管壳封装而成。由 P 区引出的电极为阳极 (或称为正极), 由 N 区引出的电极为阴极 (或称为负极)。普通二极管按使用的材料不同可分为硅管和锗管; 按结构形式不同, 可分为点接触型、面接触型和平面型几种, 如图 1-13a、b、c 所示。

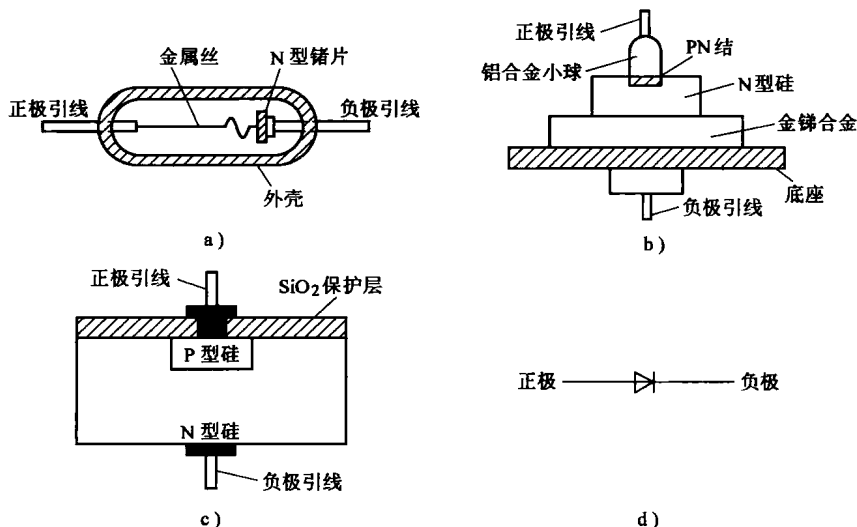


图 1-13 半导体二极管的结构和符号

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型 d) 图形符号

点接触型的二极管 PN 结的接触面积小, PN 结的等效电容也小, 不能通过很大的正向电流, 也不能承受较高的反向电压, 但它的高频性能好, 适宜于在高频检波电路和小功率电路中使用。例如, 2AP1 为点接触型锗二极管, 最大整流电流为 16mA, 最高工作频率为 150MHz。

面接触型的二极管 PN 结的接触面积大, 可以通过较大电流, 能承受较高的反向电压, 但结电容也大, 因此这类管子适用于整流等低频电路中。例如面接触型硅二极管 2CP1, 最大整流电流为 400mA, 而最高工作频率只有 3kHz。

平面型二极管是用制造集成电路的工艺制成的, 结面积较大的平面型二极管可用于整流等低频电路; 结面积小的平面型二极管, 由于极间电容小, 适用于高频电路和脉冲数字电路, 常用的有 2CK9 ~ 19 等。

二极管的图形符号如图 1-13d 所示。

1.3.2 半导体二极管的伏安特性

半导体二极管两端电压 u 与流过二极管的电流 i 之间的关系称为伏安特性。在实际的二极管内存在着引线电阻、PN 结两侧区域的体电阻及管外电极间的漏电阻等。引线电阻及体电阻与 PN 结串联, 主要影响二极管伏安特性中的正向特性; 漏电阻较大, 与二极管并联, 主要影响二极管伏安特性中的反向特性。

半导体二极管 2CP10 (硅二极管) 和 2AP15 (锗二极管) 的伏安特性曲线如图 1-14a、b 所