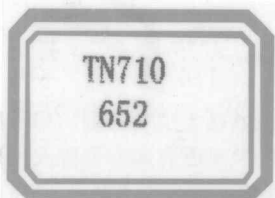


模拟电子 技术基础

黄丽亚 杨恒新 编著



21世纪高等院校电子信息
与电气学科系列规划教材

模拟电子 技术基础

黄丽亚 杨恒新 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书是在总结了多年本科“电子电路”课程教学改革经验的基础上编写而成，为紧跟现代电子技术的发展和适应社会对硬件设计型人才的需求，对传统教学内容进行了较大幅度的更新，引入了电子电路的设计、可编程模拟器件、电子电路仿真等内容。全书共分 11 章，内容包括：半导体器件、放大电路基础、集成运算放大器、频率响应、反馈放大器、集成运算放大电路的应用、功率放大电路、直流稳压电源、在系统模拟可编程器件、电子电路仿真和集成逻辑门电路。

本书可作为高等院校电子信息类、电气信息类、自动控制类和计算机类各专业“模拟电子线路”或“模拟电子技术”课程的教材和教学参考书，也可作为相关工程技术人员的参考书。

版权所有，侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/黄丽亚, 杨恒新编著. —北京: 机械工业出版社, 2009. 2
(21 世纪高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)

ISBN 978-7-111-25953-4

I. 模… II. ①黄… ②杨… 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(2008)第 207730 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 曾 珊

三河市明辉印装有限公司印刷

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.75 印张

标准书号: ISBN 987-7-111-25953-4

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有倒页、脱页、缺页, 由本社发行部调换

本社购书热线: (010)68326294

随着信息技术的迅猛发展,培养“适应 21 世纪时代需求的、有创新能力的复合型人才”已成为当前高等院校教育工作的重点。新型的人才培养模式应以基础扎实,拓宽专业口径为着眼点,突出培养学生的科学研究能力和工程设计能力。“编写精品教材,创建精品课程”是实现新型培养模式的基本保证。为进一步配合全国高校提高教育教学质量,共享优质教学资源,推动电子电气类精品课程的建设工作,机械工业出版社华章分社将与“教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会委员、教学名师和知名教授”一起建设“高等院校电子信息与电气学科系列规划教材”,从高校的教学改革出发,在对电子电气类课程的课程体系 and 教学内容深入研讨的基础上,建设具有先进性、创新性、实用性的精品教材和教学资源体系,使该系列教材成为“立足专业规范,面向新需求,成就高质量”的精品。

该系列教材的出版以新的教改精神和人才培养模式作为指导,这样不仅能够保证教材质量,而且有利于促进学科的发展。根据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求、学科发展和人才培养的目标”,确定教材特色如下:

- 教材的编写要以教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范和基本要求”为依据,以培养满足国家和社会发展需要的高素质人才为目标,系统整合教学改革成果,使教材结构体系具有渐进性,体现教学规律和学生的认识规律,使教材的结构完整,内容具有系统性、科学性和准确性,理论阐述严谨、正确。
- 教材的知识体系和内容结构具有较强的逻辑性,利于培养学生的科学思维能力;根据教学内容、学时、教学大纲的要求,优化知识结构,充分体现新知识、新技术、新工艺、新成果;既要加强基础理论,也要强化实践内容;理论的阐述、实验内容和习题的选取都应紧密联系实际,使学生做到运用理论处理实际问题,培养学生分析问题和解决问题的能力。

为作好该系列教材的出版工作,我们聘请了东南大学王志功教授为编审委员会顾问,天津大学孙雨耕教授为编审委员会主任,以及清华大学、北京大学、浙江大学、上海交通大学、电子科技大学、华中科技大学、西安电子科技大学、北京邮电大学、吉林大学等国内重点大学的教授为编审委员会副主任委员和委员,从根本上保证了教材的质量。我们将在今后的出版工作中广泛征询和听取一线教师的反馈意见和建议,逐步改进和完善该系列教材,积极推动高等院校教学改革和教材建设。

编审委员会

编审委员会顾问：王志功(东南大学)

编审委员会主任：孙雨耕(天津大学)

编审委员会副主任：倪光正(浙江大学)

彭启琮(电子科技大学)

张晓林(北京航空航天大学)

戴先中(东南大学)

编审委员会委员：

陈洪亮(上海交通大学)

马西奎(西安交通大学)

华成英(清华大学)

王成华(南京航空航天大学)

姜建国(上海交通大学)

李哲英(北京联合大学)

尹项根(华中科技大学)

邓建国(西安交通大学)

刘新元(北京大学)

吴建强(哈尔滨工业大学)

孟 桥(东南大学)

郭树旭(吉林大学)

陈鹤鸣(南京邮电大学)

王泽忠(华北电力大学)

陆文娟(清华大学)

蔺志青(北京邮电大学)

石光明(西安电子科技大学)

黄瑞光(华中科技大学)

本教材依据教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会颁布的“电子线路”课程教学基本要求，结合多年教学和实践经验进行编写。在内容安排上，尽量做到思路清晰、叙述详尽，并突出电路的设计方法，以达到引导学生思考、激发学生创新的目的。

本教材具有以下特点：

- 精选内容，突出重点，强化三基。以分立元件电路为基础，以集成电路为重点。注重强调概念的物理本质和含义，把基本概念、基本原理和基本分析方法讲述深刻透彻。
- 注重培养电路设计能力。电子电路(包括模拟电路和数字电路)的教学必须以分析为基础，以设计为主导，只有通过电路设计才能真正掌握电子电路这门技术，这是关于电子电路教学的一个共识。电子电路理论的价值，主要体现在它能够解决生产实际中的需要。各种实际的需要必须通过电路设计来满足，换言之，在电子电路领域，技术人员面对的主要是电路设计问题，电路的分析只是设计工作的一部分。所以电子电路理论的深化必须以电路设计为主导，这是贯穿本书的基本指导思想。在这一思想的指导下，本书将会面向实际需要，理论联系实际，增加相关的设计实例，通俗易懂地介绍模拟电路的设计方法。
- 加强电子电路工程性的认识。在电路设计过程中往往对一些模型和计算公式进行简化，有时还必须做出某些假设，一些参数的取值不是依照公式而是根据经验，这些都重复体现了电子电路理论的工程性特点。电子电路理论教学中，往往比较强调理论的系统性和严密性，较小涉及电子电路的工程性，学生对这一特点往往认识不足。本教材在介绍电路的设计方法时对相关的工程性问题进行了详细的说明。
- 加强模拟电子新技术的介绍。为更好地体现模拟电子技术的发展趋势，本教材引入了在系统可编程模拟器件(ispPAC)的原理和应用、电子电路仿真软件(Multisim)的功能及其应用。
- 协调处理模拟电路与数字电路教学内容的衔接，将集成门电路内容纳入模拟电路部分。

本书第1~6章由黄丽亚执笔，第7~11章由杨恒新执笔。另外，张苏参与编写了静态工作点、噪声和负反馈的稳定性方面的部分内容，参与本课程教学的王厚大、赵华、王伟、车晶、何艳、曹开田、袁丰、周洪敏、方承志和张瑛等为本书的编写提出了宝贵的意见。编者在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，对于书中的错误和不当之处，恳请读者批评指正。

编者

2008年9月

章次	学习要点	教学要求	参考课时 (不包括实验和机动学时)
1	本章介绍半导体物理基础知识、PN 结和二极管及其基本电路	重点内容：二极管的特性、二极管基本电路	4
2	本章介绍晶体管的工作原理、特性曲线，放大电路的放大原理、静态动态分析和多级放大电路的性能指标计算	重点内容：双极型晶体管的工作原理、特性和参数、大信号和小信号模型。晶体管基本放大器的组成、工作原理及性能特点；静态工作点的基本概念和偏置电路的估算；图解分析方法和小信号等效电路分析方法，掌握动态参数(\dot{A}_u 、 R_i 、 R_o 、 U_{om})的分析方法	14
3	本章介绍场效应管的工作原理及其基本放大电路	重点内容：场效应管的外部特性、主要参数；场效应管基本放大电路的组成、工作原理及性能特点；放大电路静态工作点和动态参数(\dot{A}_u 、 R_i 、 R_o 、 U_{om})的分析方法	4
4	本章介绍放大电路频率响应的基本概念，晶体管、场效应管和多级放大电路的频率响应，放大电路的噪声	重点内容：放大电路频率响应的基本概念，掌握放大器的低频、中频和高频等效电路，晶体管频率参数、共射电路频率响应特性。单管放大电路频率响应的分析方法。波特图的概念及画法	6
5	本章介绍集成放大电路的内部电路结构，包括电流源电路、差动电路、复合管放大电路，输出级电路，还介绍了集成运算放大器的基础应用电路	重点内容：电流源电路，差动电路的工作原理和特性，集成运算放大电路的基础应用电路	8
6	本章介绍负反馈放大电路的基本概念、基本方程和组态，负反馈对放大电路的影响以及深负反馈下放大电路的近似计算，最后介绍了负反馈放大电路的稳定性讨论	重点内容：反馈的基本概念和反馈类型的判断方法；深度负反馈条件下放大电路的近似估算法。负反馈对放大电路性能的影响	10
7	本章介绍集成运算放大器在线性系统和非线性系统中的典型应用，包括模拟信号的基本运算、电压比较器、弛张振荡器、精密二极管电路、有源滤波器	重点内容为：比例运算、求和运算、电压比较器、弛张振荡器、有源滤波器	6
8	本章介绍功率放大电路的特点、典型电路的结构、工作原理及性能参数，常见的集成功率放大器及功率器件	重点内容为：互补推挽乙类功率放大电路的工作原理和主要性能参数	3
9	介绍整流、滤波、串联稳压电路的工作原理，典型单片集成稳压器的功能及其应用，同时简要介绍开关型集成稳压器的基本原理	重点内容为：整流、滤波、串联稳压电路的原理、性能指标和设计方法	3
10	简单介绍 ispPAC 的原理及应用、Multisim 8 的功能及应用	重点内容为：ispPAC 的原理及 Multisim 8 的应用	2
11	介绍双极型晶体管和 MOS 管的开关特性，讨论 TTL 门电路和 CMOS 门电路的工作原理、逻辑功能特性及电气特性，特别是输入特性和输出特性	重点内容为：TTL 门电路和 CMOS 门电路的工作原理、电气特性	4

出版说明	
前言	
教学建议	
第 1 章 半导体二极管及其应用	1
1.1 半导体物理基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.2 PN 结	4
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的单向导电性	5
1.2.3 PN 结的反向击穿特性	7
1.2.4 PN 结的电容特性	8
1.3 半导体二极管及其基本电路	8
1.3.1 半导体二极管的伏安特性曲线	9
1.3.2 半导体二极管的主要参数	10
1.3.3 半导体二极管的电路模型	11
1.3.4 二极管基本应用电路	12
1.4 特殊二极管	15
1.4.1 稳压二极管	15
1.4.2 变容二极管	17
1.4.3 光电二极管	17
1.4.4 发光二极管	17
思考题	18
习题	18
第 2 章 双极型晶体管及其放大电路	21
2.1 双极型晶体管的工作原理	21
2.1.1 双极型晶体管的结构	21
2.1.2 双极型晶体管的工作原理	22
2.2 晶体管的特性曲线	24
2.2.1 共射极输出特性曲线	24
2.2.2 共射极输入特性曲线	26
2.2.3 温度对晶体管特性的影响	27
2.2.4 晶体管的主要参数	27
2.3 晶体管放大电路的放大原理	28
2.3.1 放大电路的组成	28
2.3.2 静态工作点的作用	29
2.3.3 晶体管放大电路的放大原理	30
2.3.4 基本放大电路的组成原则	30
2.3.5 直流通路和交流通路	31
2.4 放大电路的静态分析和设计	31
2.4.1 晶体管的直流模型及静态工作点的估算	31
2.4.2 静态工作点的图解分析法	32
2.4.3 晶体管工作状态的判断方法	33
2.4.4 放大状态下的直流偏置电路	35
2.5 共射放大电路的动态分析和设计	37
2.5.1 交流图解分析法	38
2.5.2 放大电路的动态范围和非线性失真	39
2.5.3 晶体管的交流小信号模型	41
2.5.4 等效电路法分析共射放大电路	44
2.5.5 共射放大电路的设计实例	47
2.6 共集放大电路(射极输出器)	50
2.7 共基放大电路	52

2.8 多级放大电路	54	4.4.1 场效应管的高频小信号 等效电路	101
2.8.1 级间耦合方式	54	4.4.2 共源放大电路的频率 响应	102
2.8.2 多级放大电路的性能 指标计算	56	4.5 多级放大器的频率响应	103
2.8.3 常见的组合放大电路	58	4.5.1 多级放大电路的上限 频率	104
思考题	60	4.5.2 多级放大电路的下限 频率	104
习题	60	4.6 放大电路的噪声	107
第3章 场效应晶体管及其放大电路	70	4.6.1 电子元件的噪声	107
3.1 场效应晶体管	70	4.6.2 噪声的度量	108
3.1.1 结型场效应管	70	思考题	110
3.1.2 绝缘栅场效应管	73	习题	110
3.1.3 场效应管的参数	77	第5章 集成运算放大电路	114
3.2 场效应管工作状态分析及其 偏置电路	78	5.1 集成运算放大电路的特点	114
3.2.1 场效应管工作状态分析	78	5.2 电流源电路	115
3.2.2 场效应管的偏置电路	79	5.3 以电流源为有源负载的放大 电路	118
3.3 场效应管放大电路	81	5.4 差动放大电路	119
3.3.1 场效应管的低频小信号 模型	81	5.4.1 零点漂移现象	119
3.3.2 共源放大电路	81	5.4.2 差动放大电路的工作原理 及性能分析	120
3.3.3 共漏放大电路	83	5.4.3 具有电流源的差动放大 电路	127
思考题	84	5.4.4 差动放大电路的大信号 分析	128
习题	85	5.4.5 差动放大电路的失调和 温漂	131
第4章 放大电路的频率响应和噪声	88	5.5 复合管及其放大电路	133
4.1 放大电路的频率响应和频率 失真	88	5.6 集成运算放大电路的输出级 电路	135
4.1.1 放大电路的幅频响应和 幅频失真	89	5.7 集成运算放大电路举例	136
4.1.2 放大电路的相频响应和 相频失真	90	5.7.1 双极型集成运算放大电路 F007	136
4.1.3 波特图	91	5.7.2 CMOS 集成运算放大电路 MC14573	138
4.2 晶体管的高频小信号模型和 高频参数	93	5.8 集成运算放大电路的外部特性 及其理想化	139
4.2.1 晶体管的高频小信号 模型	93	5.8.1 集成运放的模型	139
4.2.2 晶体管的高频参数	93	5.8.2 集成运放的主要性能 指标	140
4.3 晶体管放大电路的频率响应	95	5.8.3 理想集成运算放大电路	141
4.3.1 共射放大电路的频率 响应	96		
4.3.2 共基、共集放大器的 频率响应	101		
4.4 场效应管放大电路的频率响应	101		

思考题	142	7.2.1 电压比较器概述	190
习题	142	7.2.2 单门限比较器	192
第6章 反馈	148	7.2.3 迟滞比较器	193
6.1 反馈的基本概念及类型	148	7.2.4 窗口比较器	194
6.1.1 反馈的概念	148	7.3 弛张振荡器	195
6.1.2 反馈放大电路的基本 框图	149	7.4 精密二极管电路	196
6.1.3 负反馈放大电路的基本 方程	150	7.4.1 精密整流电路	196
6.1.4 负反馈放大电路的组态和 四种基本类型	151	7.4.2 峰值检波电路	198
6.2 负反馈对放大电路性能的 影响	157	7.5 有源滤波器	199
6.2.1 稳定放大倍数	157	7.5.1 滤波电路的作用与分类	199
6.2.2 展宽通频带	157	7.5.2 一阶有源滤波器	199
6.2.3 减小非线性失真	158	7.5.3 二阶有源滤波器	202
6.2.4 减少反馈环内的干扰和 噪声	159	7.5.4 开关电容滤波器	207
6.2.5 改变输入电阻和输出 电阻	160	思考题	209
6.3 深度负反馈放大电路的近似 计算	162	习题	209
6.3.1 深负反馈放大电路近似 计算的一般方法	163	第8章 功率放大电路	217
6.3.2 深负反馈放大电路的 近似计算	163	8.1 功率放大电路的特点与分类	217
6.4 负反馈放大电路的稳定性	167	8.2 甲类功率放大电路	219
6.4.1 负反馈放大电路的自激 振荡	167	8.3 互补推挽乙类功率放大电路	220
6.4.2 负反馈放大电路稳定性的 判断	168	8.3.1 双电源互补推挽乙类功率 放大电路	220
6.4.3 负反馈放大电路自激振荡 的消除方法	171	8.3.2 单电源互补推挽乙类功率 放大电路	226
思考题	176	8.3.3 采用复合管的准互补推挽 功率放大电路	227
习题	176	8.4 集成功率放大器	228
第7章 集成运算放大器的应用	183	8.5 功率器件	230
7.1 基本运算电路	183	8.5.1 双极型大功率晶体管	230
7.1.1 比例运算电路	183	8.5.2 功率 MOS 器件	232
7.1.2 求和运算电路	185	8.5.3 绝缘栅—双极型功率管 及功率模块	234
7.1.3 积分和微分运算电路	188	8.5.4 功率管的保护	235
7.1.4 对数和反对数运算电路	189	思考题	236
7.2 电压比较器	190	习题	236
		第9章 直流稳压电源	240
		9.1 直流电源的组成	240
		9.2 整流电路	241
		9.2.1 单相半波整流电路	241
		9.2.2 单相全波整流电路	242
		9.2.3 单相桥式整流电路	243
		9.2.4 倍压整流电路	244
		9.3 滤波电路	246

9.3.1 电容滤波电路	246	思考题	289
9.3.2 电感滤波电路	248	习题	289
9.3.3 复合型滤波电路	249		
9.4 稳压电路	249	第 11 章 集成逻辑门电路	291
9.4.1 稳压电路的主要指标	249	11.1 双极型晶体管的开关特性	291
9.4.2 线性串联型直流稳压电路	250	11.2 MOS 管的开关特性	292
9.4.3 开关型直流稳压电路	256	11.3 TTL 门电路	293
思考题	260	11.3.1 TTL 标准系列与非门	293
习题	260	11.3.2 其他类型的 TTL 标准 系列门电路	301
第 10 章 可编程模拟器件与电子电路		11.3.3 TTL 其他系列门电路	306
仿真软件	263	11.4 ECL 门电路简介	307
10.1 在系统可编程模拟电路原理 与应用	263	11.5 CMOS 门	308
10.1.1 ispPAC10 的结构和 原理	263	11.5.1 CMOS 反相器	308
10.1.2 其他 ispPAC 器件的 结构和原理	266	11.5.2 其他类型的 CMOS 电路	310
10.1.3 ispPAC 的典型应用	270	11.5.3 使用 CMOS 集成电路的 注意事项	312
10.2 Multisim 软件及其应用	271	11.5.4 CMOS 其他系列门 电路	312
10.2.1 Multisim 8 的基本 界面	271	11.6 CMOS 电路与 TTL 电路的 连接	314
10.2.2 元件库	274	思考题	315
10.2.3 仿真仪器	282	习题	316
10.2.4 仿真分析方法	283		
10.2.5 在模拟电路设计中的 应用	285	参考文献	320

半导体二极管及其应用

1.1 半导体物理基础知识

在物理学中，按照材料导电的能力，可以将它们分为导体和绝缘体两大类。导体中有大量的自由电子，加上电场后，自由电子运动，形成电流。因此，导体的电阻率很小 ($\rho < 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$)，导电能力很强，如铜、铁、铝、银等。绝缘体中自由电子很少，加上电场后，几乎没有电流形成，因此，它的电阻率很大，导电能力很差 ($\rho > 10^9 \Omega \cdot \text{m}$)，如塑料、陶瓷、石英、橡胶等。

除这两类外，还有一种导电能力介于两者之间的物质，我们称之为半导体。如硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。由于半导体具有一些独特的物理特性，使得它在电子技术领域发挥着极其巨大的作用。目前的集成电路就主要以硅晶体为基本材料，美国的半导体生产基地“硅谷”也是由此而得名(目前“硅谷”的含义已扩展为以微电子技术为先导的科技园)。本节将从半导体材料的基本性质出发，学习半导体器件的基本原理和特性。

1.1.1 本征半导体

一、本征半导体硅和锗的共价键结构

常用的半导体材料硅和锗的原子序号分别为 14 和 32，相应的原子结构如图 1.1.1a、b 所示，它们的最外层电子都是 4 个。最外层电子受原子核的束缚力最小，决定着物质的化学性质和导电能力，称之为价电子。为了突出价电子的作用，研究半导体导电性能时，常采用图 1.1.1c 所示的简化模型表示半导体材料，其中四个点表示最外层的四个价电子，中间的圆圈表示半导体原子核，圈中的数字 +4 表示中和最外层价电子应具有的内层电子。

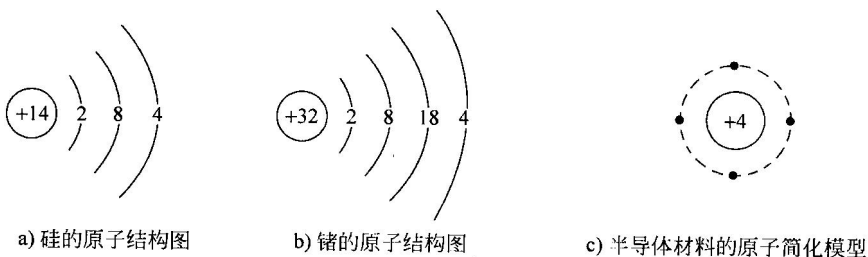


图 1.1.1 常用半导体材料的原子结构和简化模型

纯净的单晶半导体称为**本征半导体**。在本征硅和锗的单晶中，原子按一定间隔排列成有规律的空间点阵(称为晶格)。由于原子间相距很近，价电子不仅受到自身原子核的约束，还要受到相邻原子核的吸引，使得每个价电子为相邻原子所共有，形成共用电子对，称为**共价键**。这样四个价电子与相邻的四个原子中的价电子分别组成四对共价键，依靠共价键使晶体中的原子紧密地结合在一起。图 1.1.2 是单晶硅或锗的共价键结构的平面示意图。

二、半导体中的两种载流子

在绝对零度 $T=0\text{K}$ (-273.15°C) 时，价电子没有能力脱离共价键的束缚，形成能够自由移动的带电粒子，我们把这种粒子称为**载流子**。这时的本征半导体是良好的绝缘体，但是半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中束缚得那样紧，只需在室温(300K)下，价电子就会获得足够的随机热振动能量而挣脱共价键的束缚，成为自由电子。这些自由电子很容易在晶体中运动，在外加电压的作用下，就会形成电流，因此自由电子是半导体的一种载流子。

当价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时，共价键中就留下了一个空位，这个空位被称为**空穴**。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。由于空穴处失去一个电子，使得该处所属原子核多了一个未被抵消的正电荷，因此可将空穴看成是一个带正电荷的粒子。由于共价键中出现了空穴，相邻共价键的价电子在正电荷的吸引下会填补这个空位，而在其原有的位置上产生一个空穴。依此类推，空穴便可在整个晶体内自由移动，如图 1.1.3 所示。当有电场作用时，价电子定向地填补空位，使空穴作相反方向的移动，这种空穴移动等效于带正电荷的粒子作定向运动，也可以形成电流。

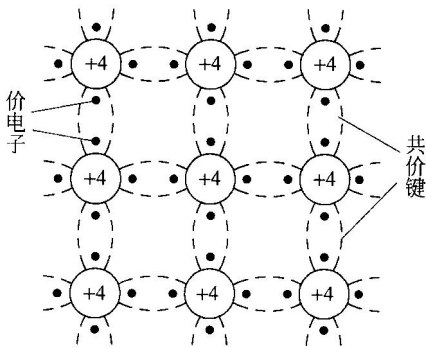


图 1.1.2 单晶硅和锗的共价键结构示意图

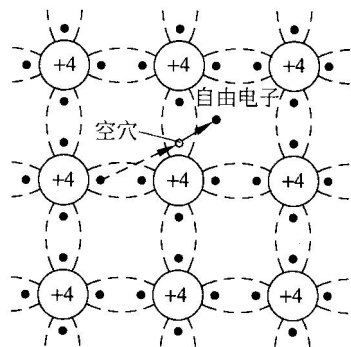


图 1.1.3 本征激发产生电子空穴对

可见，本征半导体中有两种**载流子**：自由电子和空穴，两者都可以参加导电，所不同的是，电子带负电而空穴带正电，在电场作用的运动方向相反。空穴与自由电子总是成对出现，因此称为**电子-空穴对**。从宏观上看，自由电子和空穴的数量相等，晶体仍然是电中性的。

上述本征半导体受外界能量(热能、电能和光能等)激发，产生电子、空穴对的过程称为**本征激发**。由于本征激发，不断地产生电子、空穴对，使载流子浓度增加。另一方面，由于正负电荷相吸引，会使电子和空穴在运动过程中相遇。这时电子填入空穴成为价电子，同时释放出相应的能量，从而消失一对电子、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。这样在一定温度下，当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。既然存在载流子，那么在电场作用下，本征半导体的导电能力如何？

如果用 n_i 、 p_i 分别表示电子和空穴的浓度，理论分析表明在室温下，本征硅的载流子浓度 $n_i = p_i = 1.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，看上去是一个很大的数值，但与硅的原子密度 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 相比，室温下只有约三万亿分之一的价电子受激发产生电子、空穴对。因此，本征半导体的导电能力是很弱的。另外值得注意的是，本征载流子浓度随温度升高近似指数规律增大，所以其导电性能对温度的变化很敏感。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中，有选择地掺入少量其他元素，会使其导电性能发生显著变化。这些少量元素统称为杂质。掺入杂质的半导体称为**杂质半导体**，根据掺入的杂质不同，有 N 型半导体和 P 型半导体两种。

一、N 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，就得到 N 型半导体。这时杂质原子替代了晶格中的某些硅原子，它的四个价电子和周围四个硅原子组成共价键，而多出一个价电子只能位于共价键之外，如图 1.1.4 所示。由于这个键外电子受杂质原子的束缚力很弱，所以只需很小的能量便可挣脱杂质原子的束缚，成为自由电子。因此，室温下几乎每个杂质原子都能提供一个自由电子，从而使 N 型半导体中的电子数大大增加。因为这种杂质原子能“施舍”出一个电子，所以称为**施主原子**(或施主杂质)。施主原子失去一个价电子后，便成为正离子，称为施主离子。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。

在这种杂质半导体中，不但有杂质电离产生的自由电子，而且还有本征激发产生的电子空穴对，由于掺杂浓度远远大于本征激发的载流子浓度，因此自由电子的数量比空穴大得多，故称自由电子为**多数载流子**，简称**多子**，而空穴占少数，称为**少数载流子**，简称**少子**。应当指出，在 N 型半导体中，虽然自由电子数远大于空穴数，但由于施主离子的存在，使正、负电荷数相等，即自由电子数等于空穴数加正离子数，所以整个半导体仍然是电中性的。

二、P 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，就得到**P 型半导体**。这时杂质原子替代了晶格中的某些硅原子，它的三个价电子和相邻的四个硅原子组成共价键时，只有三个共价键是完整的，第四个共价键因缺少一个价电子而出现一个空位，如图 1.1.5 所示。由于空位的存在，使邻近共价键内的电子只需很小的激发就能填补这个空位，使杂质原

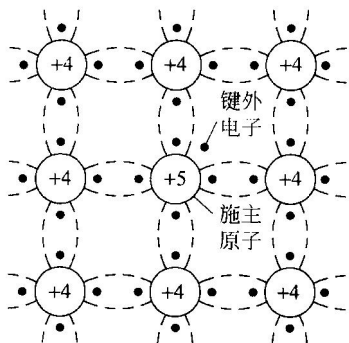


图 1.1.4 N 型半导体原子结构示意图

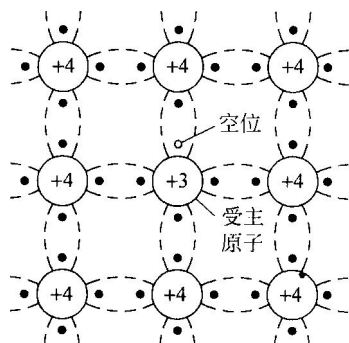


图 1.1.5 P 型半导体原子结构示意图

子因多一个价电子而成为负离子，同时在邻近产生一个空穴。由于这种杂质原子能接受价电子，所以称为受主原子(杂质)。在室温下，几乎全部的受主原子都能接受一个价电子而成为负离子，称为受主负离子，同时产生相同数目的空穴，所以在P型半导体中，空穴浓度大大增加。

在这种杂质半导体中，同样既有自由电子，又有空穴。空穴是由杂质电离和本征激发产生的；而自由电子只是由本征激发产生。空穴的数量比自由电子大得多，多子是空穴，自由电子则为少子。在P型半导体中，空穴数等于自由电子数加受主负离子数，整个半导体也是电中性的。

三、杂质半导体的载流子浓度

在以上两种杂质半导体中，尽管掺入的杂质浓度很小，但通常由杂质原子提供的载流子数却远大于本征载流子数。例如，在室温下，硅的本征载流子浓度 $n_i = 1.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，硅的原子密度为 $5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ，若掺入百万分之一的磷原子，则施主杂质浓度为

$$N_D = 5 \times 10^{22} \times 10^{-6} = 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

可见，由杂质提供的电子数比 n_i 大百万倍以上。因此，在杂质半导体中，多数载流子的浓度主要由掺杂浓度决定。具体而言，对N型半导体，电子浓度 n_n 近似等于施主浓度 N_D ；对P型半导体，空穴浓度 p_p 近似等于受主浓度 N_A 。

杂质半导体的少子浓度，因掺杂不同，会随多子浓度的变化而变化。理论证明，在热平衡下，两种载流子浓度的乘积恒等于本征载流子浓度值 n_i 的平方。即： $n \cdot p = n_i^2$ 。

由以上分析可知，本征半导体通过掺杂，可以大大改变半导体内载流子的浓度，并使一种载流子多，而另一种载流子少。对于多子，通过控制掺杂浓度可严格控制其浓度，而温度变化对其影响很小；对于少子，其浓度与本征激发和复合有关，受温度的影响很大。所以它对半导体器件的温度特性产生很大影响。

在同一块半导体材料中，既掺入施主杂质，又掺入受主杂质，它到底会成为哪种半导体材料呢？这主要由施主杂质和受主杂质的浓度决定。哪一种浓度高，就成为哪种半导体。由此可见，采用适当的掺杂密度，可以使P型和N型半导体相互转换。

1.2 PN结

在本征半导体材料中掺入杂质后，使其载流子浓度大大提高，导电能力大大增强。然而，提高导电能力并不是目的。如果使P型半导体和N型半导体结合在一起，在其交界处就会形成一个很薄的特殊物理层，称为PN结。PN结的出现包含了一系列极其重要的物理现象，它为现代半导体工业和电子技术的革命性发展奠定了有力的基础。

1.2.1 PN结的形成

P型半导体和N型半导体有机地结合在一起时，P区一侧空穴多，N区一侧电子多。由于存在浓度差，P区中的空穴会向N区扩散，N区中的电子也会向P区扩散，这种由于存在浓度差引起的载流子从高浓度区域向低浓度区域的运动称为扩散运动，所形成的电流称为扩散电流。扩散电流是半导体器件所特有的，在一般的导体中无法形成扩散电流。

P区的空穴向N区扩散并与N区的电子复合，N区的电子向P区扩散并与P区的空穴复

合。P区一边失去空穴，留下了带负电的受主负离子；N区一边失去电子，并留下了带正电的施主正离子。这些带电的杂质离子，由于物质结构的关系，不能随意移动，因此不参与导电。在交界面两侧形成的这种具有等量正、负离子的薄层，称为空间电荷区，又称耗尽层或阻挡层，上述过程如图 1.2.1 所示。

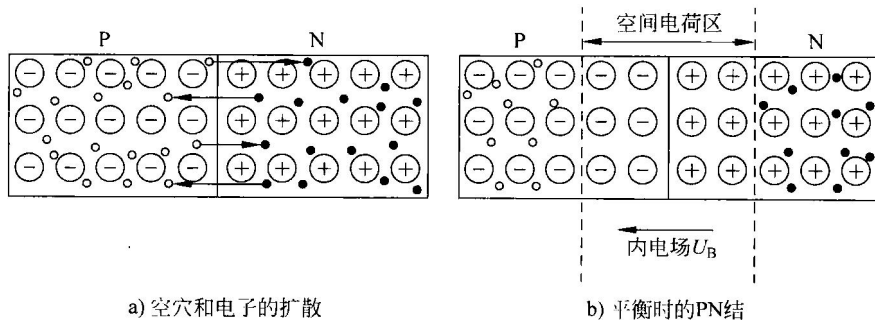


图 1.2.1 PN 结的形成

由于空间电荷区的出现，从而在界面处形成了一个由 N 区指向 P 区的内建电场，称为内电场。在内电场的作用下，N 区的少数子(空穴)向 P 区漂移，P 区的少数子(电子)向 N 区漂移。这种载流子在电场作用下的运动称为漂移运动，所形成的电流称为漂移电流。漂移运动的结果使耗尽层变窄，内建电场减弱。

多子的扩散运动和少子的漂移运动相互制约，最终扩散电流和漂移电流达到动态平衡，此时，虽然扩散和漂移仍在进行，但通过界面的净载流子数为零，因此流过 PN 结的总电流也为零，同时，耗尽层的宽度保持不变，内建电位差 U_B 也保持不变。如图 1.2.1b 所示。

当 P 区和 N 区的杂质浓度相等时，PN 结正、负离子区的宽度相等，称为对称结。而当两边杂质浓度不相等时，称为不对称结，用 P^+N 和 PN^+ 表示 (+ 号表示重掺杂区)。这时，由于两边电荷量相等，但正、负离子分布的疏密不同，使得耗尽层伸向轻掺杂区一边，如图 1.2.2a、b 所示。

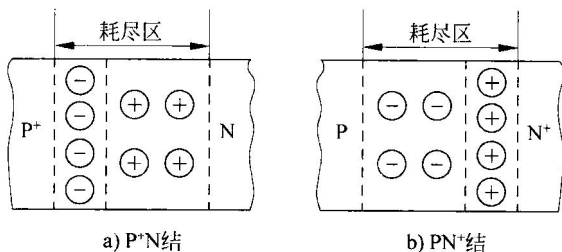


图 1.2.2 不对称 PN 结

1.2.2 PN 结的单向导电性

一、PN 结外加正向电压

将 PN 结的 P 区接电源正极，N 区接电源负极，称为 PN 结外加正向电压或正向偏置。如图 1.2.3 所示。PN 结正向偏置时，外电场与内电场方向相反，从而减弱了耗尽层的内电场，破坏了 PN 结的动态平衡，由于耗尽层的宽度减小，使得多子扩散运动大大增强，而少

子漂移运动大大减弱。因此通过外加正向电压的 PN 结的电流，扩散电流占主导地位，在外电路中形成一个流入 P 区的正向电流，用 I_F 表示。

在正常工作范围内，PN 结上外加的正向电压只要稍有增加，就能引起正向电流显著增加，因此，正向 PN 结表现为一个很小的电阻。

二、PN 结外加反向电压

将 PN 结的 P 区接电源负极，N 区接电源正极，称为 PN 结外加反向电压或反向偏置。如图 1.2.4 所示。PN 结反向偏置时，外电场与内电场方向相同，增强了耗尽层的内电场，耗尽层变宽，阻止了多子的扩散运动，使扩散电流迅速减小。同时，促进了漂移运动。由于形成漂移运动的是两侧区域的少数，且少数浓度很低，所以形成的漂移电流很小。在外电路中形成流入 N 区的电流，称为反向饱和电流，用 I_S 表示。当反偏电压增大时，两侧边界处少子的数目并无多大变化，因此， I_S 几乎不随外加电压的增大而增大，近似为一定值。

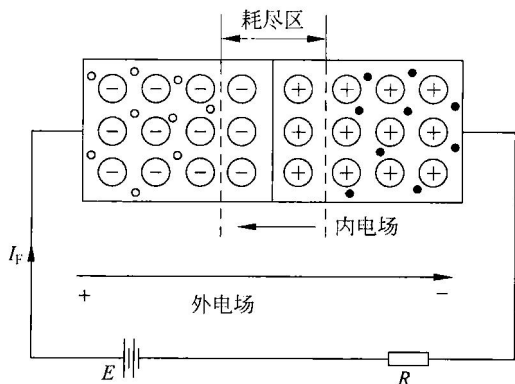


图 1.2.3 正向偏置的 PN 结

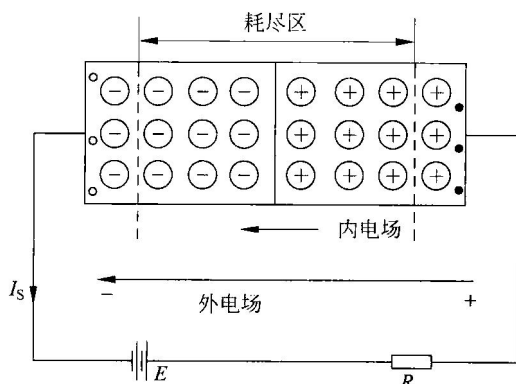


图 1.2.4 反向偏置的 PN 结

在 PN 结反向偏置时，由于 I_S 很小，PN 结表现为一个很大的电阻。同时， I_S 是少数运动产生的，因此受温度的影响很大。

综上所述，PN 结正向偏置时，电流很大，并随外加电压变化而显著变化；PN 结加反向偏置时，电流极小，且不随外加电压变化。这就是 PN 结的单向导电性。

三、PN 结电流方程

理论分析证明，流过 PN 结的电流 i 和外加电压 u 之间的关系为

$$i = I_S (e^{qu/kT} - 1) = I_S (e^{u/U_T} - 1) \quad (1.2.1)$$

其中反向饱和电流 I_S 的大小与 PN 结的材料、制作工艺、温度等有关； U_T 称为温度的电压当量，由下式计算：

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (1.2.2)$$

式中， k 为玻尔兹曼常数； q 为单位电子电荷量； T 为热力学温度。在常温 ($T = 300\text{K}$) 下， $U_T = 26\text{mV}$ 。应用式 (1.2.1) 时要注意 u 和 i 的规定正方向： u 的规定正方向为 P 区一端为“正”，N 区一端为“负”；P 区流向 N 区的方向为电流 i 的正方向。

四、PN 结的伏安特性

由式 (1.2.1) 可知，当 $u = 0$ 时， $i = 0$ ；