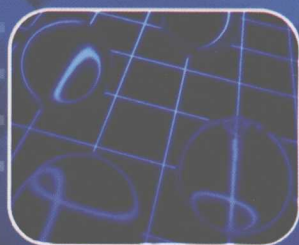
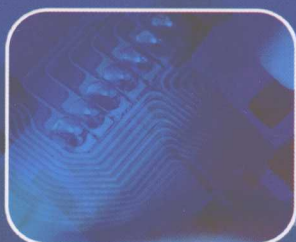




普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21世纪高职高专电子信息类规划教材

模拟电子技术及应用

第2版



赠电子课件

熊伟林◎主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪高职高专电子信息类规划教材

模拟电子技术及应用

第2版

主编 熊伟林

参编 林海峰 毛瑞丽 张建新

王连起 魏玉敏

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第178800号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:于宁 封面设计:李斌

责任校对:李斌 版式设计:李斌

北京市印刷厂印刷

2008年2月第2版第1次印刷

184mm×260mm,1/32开,294千字

0-001-4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-11142-0

定价:19.00元

凡购本书,如蒙函索,即寄样书,由本社发行部函寄



机械工业出版社

本书介绍了现代电子技术中广泛使用的元器件的特性及其应用电路, 主要包括二极管及其应用、晶体管及其应用、场效应晶体管及其应用、集成运算放大器及其应用、模拟电子技术应用实例、模拟电路实验等内容。本书推崇项目教学法, 采用项目设计培养理论应用能力与实践操作能力, 突出实用性和工具性。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材, 供高职高专电子工程技术类专业电子技术课程的教学使用, 也可作为电子工程技术人员的参考书。

为方便教学, 本书配有免费电子教案, 凡选用本书作为教材的学校, 均可来电索取, 咨询电话: 010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术及应用/熊伟林主编. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2008.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪高职高专电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-11145-0

I. 模… II. 熊… 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 (2007) 第 178890 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 于宁 责任校对: 李汝庚

封面设计: 陈沛 责任印制: 李妍

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2008年2月第2版第1次印刷

184mm × 260mm · 12.25印张 · 294千字

0 001—4 000册

标准书号: ISBN 978-7-111-11145-0

定价: 19.00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) 88379758

封面无防伪标均为盗版

前 言

PREFACE

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，供高职高专电子信息工程技术类专业《模拟电子技术》课程的教学使用。其任务是使高职高专学生掌握模拟电子技术及其应用的有关知识，提高学生专业知识水平、职业技能和综合素质，增强适应职业变化的能力和继续深入学习其他课程的能力。

本书特色 本教材是根据当前国内高职高专教学的需要，针对该层次学生的学习特点，结合实际教学经验编写而成的。在内容选择和讲解方面，力图体现教学内容适宜和适度，通观全面，突出重点，重视实验。在整体上体现了科学、实用，讲法新颖；文字简练，特色鲜明；化难为易，通俗易懂，层次分明。教学起点低，适合高职高专学生学习，针对性强；条理清晰，强调培养技能，实用性强。

本书引入项目设计，推崇项目教学法。项目任务对于学生来说既有综合性又有探索性，它主要侧重于某些理论知识的灵活运用，并在任务的完成过程中学习新知识。例如，完成特定功能的电子电路的设计、安装、调试、检测等。要求学生在教师指导下完成查阅资料、设计方案与组织实验等工作，最后写出项目报告。然而随着现代电子技术的迅速发展和应用领域的日益扩大，可用作选题的项目范围十分广泛，因此确定选题原则十分重要，本教材中确定项目选题的基本原则是：

- 项目具有实际工程应用背景，具有真实性和现实性。
- 项目任务内容与课程知识要点密切相关，并尽可能覆盖课程中所要求的多种能力。
- 项目任务工作（活动）具有多样性，既有独立工作的内容，又有与他人合作的内容，能够为学生提供发展多种能力的机会。
- 项目任务中含有适当的新知识（对学生而言），使学生通过实际动手和自学掌握新知识。
- 项目任务的考核与评价标准要明确、适当，完成期限实际可行。

本书引入了电子设计自动化仿真电路（见附录 A）。电子设计自动化（Electronic Design Automation, EDA）是人们进行电子产品设计、开发和制造过程中十分关键的一步，其核心工作就是电子电路的设计与仿真。EDA 是在电子产品向更复杂、更高级、数字化、集成化、微型化和低功耗化方向发展过程中逐渐产生并日趋完善的，在这种方法中，设计过程的大部分工作（特别是底层工作）均由计算机自动完成。本书利用 EDA 电路仿真功能，使电子电路的工作原理更直观地显现出来。

电路仿真是利用 EDA 系统工具的模拟功能对电路环境（含电路元器件及测试仪器）和电路过程（从激励到响应的全过程）进行仿真。这个工作对应传统电子电路设计的电路搭试和性能测试。由于不需要真实电路环境的介入，获得结果快捷、准确、形象、效率高，所以，电子仿真被许多高校引入到电路实验的辅助教学中，形成虚拟实验，即模型化的实验环境，实验过程也是理想化的模拟过程。

本书内容 本书讲解了现代电子技术中广泛使用的元器件特性及其应用电路的工作原

理,给出了典型且重要的模拟电子电路实验方法,加强实践技能的训练。全书共分6章,主要包括二极管及其应用、晶体管及其应用、场效应晶体管及其应用、集成运算放大器及其应用、模拟电子技术应用实例、模拟电路实验等内容。例题与习题尽可能以实际应用电路为主,避免复杂的理论推导和计算,保证基础,适当延伸。与第1版相比较,第2版增加了三个项目设计,便于采用项目教学法进行教学。此外,每一小节后都增加了思考与练习题。鉴于第1、2章是全书的重要基础知识,故增加了两套自测题,便于学生进行阶段性自我考查。

教学建议 在教学中,全书内容大约需要64学时。

第1章二极管及其应用(8学时),重点讲解了二极管的基本特性,给出了电子技术中典型的二极管应用电路,同时有一个项目设计。第2章晶体管及其应用(14学时),在系统介绍了晶体管基本特性的基础上,讲解了电子技术中常用的共射、共基、共集放大器的电路组成和工作原理,同时介绍了低频功率放大器的基本特性和工作原理。本章也有一个项目设计。第3章场效应晶体管及其应用(6学时),重点讲解了各种场效应晶体管的基本特性,并介绍了常用的共源极放大器和源极输出器的电路结构和工作原理。第4章集成运算放大器及其应用(8学时),讲解了集成运算放大器的基本特性及其应用电路,并引入重要的反馈概念。第5章模拟电子技术应用实例(8学时),运用前四章所学的基础知识进行讲解分析一般模拟电子电路的方法。通过一些典型实例,使学生掌握几种常见的模拟电子实际应用电路的工作原理和功能,同时获得分析和解决一般模拟电子电路问题的能力。在此,也有一个项目设计。第6章模拟电路实验(20学时),给出了10个模拟电路基本实验,用于加强对模拟电子技术基础知识的深入理解与掌握,提高动手能力。

此外,为了方便读者学习和查阅,本书还给出了常用模拟集成器件引脚功能图、部分习题参考答案和参考文献。

本书编者 本书由北京信息职业技术学院电子工程系副教授熊伟林主编,林海峰、王连起、魏玉敏、毛瑞丽、张建新等教师参加编写。第1、3章由林海峰编写并修订,第2章由魏玉敏编写、毛瑞丽修订,第4章由王连起编写、张建新修订,第5章以及三个项目设计由熊伟林编写并修订,第6章由全体作者共同编写并修订。北京化工大学信息科学与技术学院张诚庆副教授主审。

书中如有错漏和不妥之处,热情欢迎广大读者批评指正。

编者

本书常用符号说明

- A 放大倍数及增益通用符号
 A_F 闭环增益
 A_i 电流放大倍数、电流增益
 A_p 功率放大倍数、功率增益
 A_u 电压放大倍数、电压增益
 A_{uc} 共模电压放大倍数、电压增益
 A_{ud} 差模电压放大倍数、电压增益
 A_{uo} 开环差模电压放大倍数、电压增益
 BW 通频带、频带宽度、频率范围
 C 电容通用符号
 F 反馈系数通用符号
 F_u 电压反馈系数
 f_H 上限频率
 f_L 下限频率
 f_M 最高工作频率
 f_T 特征频率
 g_m 晶体管或场效应晶体管的跨导
 g_d 交流电导
 i_i 交流输入电流
 I_i 交流输入电流 i_i 的有效值
 I_B 晶体管基极的直流电流
 I_{BQ} 晶体管基极的静态工作点电流
 i_b 晶体管基极的交流电流
 I_b 晶体管基极的交流电流 i_b 的有效值
 i_B 包含交、直流成分的晶体管基极电流
 I_C 晶体管集电极的直流电流
 I_{CQ} 晶体管集电极的静态工作点电流
 i_c 晶体管集电极的交流电流
 I_c 晶体管集电极的交流电流 i_c 的有效值
 i_c 包含交、直流成分的晶体管集电极电流
 I_E 晶体管发射极的直流电流
 I_{EQ} 晶体管发射极的静态工作点电流
 i_e 晶体管发射极的交流电流
 I_e 晶体管发射极的交流电流 i_e 的有效值
 i_E 包含交、直流成分的晶体管发射极电流
 i_d 二极管或场效应晶体管漏极的交流电流
 I_D 二极管或场效应晶体管漏极的直流电流
 i_D 包含交、直流成分的二极管电流或场效应晶体管漏极电流
 I_{CBO} 晶体管反向饱和电流（发射极开路）
 I_{CEO} 晶体管穿透电流（基极开路）
 I_{CO} 晶体管集电极电流的直流分量
 I_{CM} 晶体管集电极最大允许电流
 I_{DM} 场效应晶体管漏极最大允许电流
 I_{DSS} 结型或耗尽型场效应晶体管的漏极饱和电流
 I_F 正向电流
 I_{FM} 二极管最大整流电流
 I_Q 静态工作电流
 I_R 反向电流
 I_S 反向饱和电流
 I_Z 稳压管的稳定电流
 K_{CMR} 共模抑制比
 P_C 晶体管集电极功耗
 P_{CM} 晶体管集电极最大允许功耗
 P_{DC} 直流电源供电功率
 P_i 输入功率
 P_M 最大功率（功耗）
 P_O 输出功率
 P_{OM} 最大输出功率
 r_{be} 晶体管基-射极间交流等效电阻（微变电阻）
 r_d 二极管交流电阻（动态电阻）
 R_f 反馈电阻

- RP 电位器
 R_i 输入电阻
 R_L 负载电阻
 R_o 输出电阻
 R_s 信号源内阻
 r_z 稳压管动态电阻
 S_V 稳压系数
 S_t 温度系数
 T 温度、周期
 t 时间
 t_{on} 导通时间
 t_{off} 截止时间
 U_{BE} 晶体管发射结直流偏压
 U_{BEQ} 晶体管发射结静态偏压
 $U_{(BR)CEO}$ 晶体管基极开路时反向击穿电压
 $U_{(BR)CBO}$ 晶体管发射极开路时反向击穿电压
 $U_{(BR)EBO}$ 晶体管集电极开路时反向击穿电压
 U_{BR} 反向工作电压
 u_{BE} 包含交、直流成分的晶体管发射结偏压
 u_{be} 晶体管发射结交流偏压
 U_{CEQ} 晶体管集-射静态电压
 u_{CE} 包含交、直流成分的晶体管集-射电压
 U_D 二极管导通压降
 u_i 交流输入电压
 U_i 交流输入电压 u_i 的有效值
 U_I 直流输入电压
 u_i 包含交、直流成分的输入电压
 U_F 正向电压 (偏压)
 U_R 反向电压 (偏压)
 U_{RM} 最高反向工作电压
 U_T 温度电压当量 (常温下约为 26mV)
 u_o 交流输出电压
 U_o 交流输出电压的大小
 U_O 直流输出电压
 u_o 包含交、直流成分的输出电压
 u_s 信号源电压
 U_P 集成运算放大器同相端电位
 U_N 集成运算放大器反相端电位
 u_{GS} 场效应晶体管的栅源电压
 $U_{GS(off)}$ 结型或耗尽型场效应晶体管的夹断电压
 $U_{GS(th)}$ 增强型场效应晶体管的开启电压
 U_{th} 死区电压或开启电压
 V_{CC} 晶体管集电极直流电源
 V_{DD} 场效应晶体管漏极直流电源
 V_{EE} 晶体管发射极直流电源
 V_{BB} 晶体管基极直流电源
 X_i 一般输入量
 X_{id} 一般差模输入量或净输入量
 X_f 一般反馈量
 X_o 一般输出量
 α 晶体管共基交流电流放大系数
 $\bar{\alpha}$ 晶体管共基直流电流放大系数
 β 晶体管共射交流电流放大系数
 $\bar{\beta}$ 晶体管共射直流电流放大系数
 ω 角频率

目 录

CONTENTS

前言

本书常用符号说明

第1章 二极管及其应用	1
学习目标	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 半导体的主要特性	1
1.1.2 N型半导体与P型半导体	2
1.1.3 PN结的导电特性	3
思考与练习题	6
1.2 二极管的基本特性	6
1.2.1 二极管的伏安特性与主要参数	6
1.2.2 二极管的命名方法及分类	9
思考与练习题	11
1.3 二极管的应用	11
1.3.1 二极管电路的分析方法	11
1.3.2 二极管限幅电路	13
1.3.3 二极管整流电路	15
1.3.4 滤波电路	17
1.3.5 二极管稳压电路	19
思考与练习题	21
1.4 其他二极管简介	21
1.4.1 发光二极管	21
1.4.2 光敏二极管	22
1.4.3 变容二极管	22
1.5 二极管性能的检测	23
1.5.1 普通二极管性能的检测	23
1.5.2 发光二极管性能的检测	24
1.5.3 光敏二极管性能的检测	24
思考与练习题	24
1.6 项目设计——二极管应用电路	24
1.6.1 项目说明	25
1.6.2 任务内容	25
1.6.3 成果形式	25

1.6.4 评价标准	25
本章小结	26
习题1	26
自测题1	28
第2章 晶体管及其应用	31
学习目标	31
2.1 晶体管的基本特性	31
2.1.1 结构类型与电流的关系	31
2.1.2 晶体管的特性曲线	32
2.1.3 晶体管的主要参数	37
2.1.4 晶体管的命名方法	40
思考与练习题	40
2.2 晶体管的性能检测	41
2.2.1 管脚的判别	41
2.2.2 β 值的测量	42
思考与练习题	43
2.3 共射放大器	43
2.3.1 信号的输入和输出	43
2.3.2 电路的组成	44
2.3.3 电路的分析方法	44
思考与练习题	52
2.4 共集与共基放大器	52
2.4.1 共集放大器	53
2.4.2 共基放大器	54
2.4.3 三种组态放大器的性能比较	55
思考与练习题	56
2.5 多级放大器	56
2.5.1 直接耦合多级放大器	56
2.5.2 阻容耦合多级放大器	58
2.5.3 变压器耦合多级放大器	60
思考与练习题	60
2.6 放大器主要性能参数的测试	61
2.6.1 电压增益 A_u 的测试	61

2.6.2 输入电阻 R_i 的测试	61	4.1.1 集成运算放大器的基本结构	90
2.6.3 输出电阻 R_o 的测试	61	4.1.2 集成运算放大器的图形符号 与主要参数	91
思考与练习题	62	4.1.3 理想集成运算放大器	92
2.7 低频功率放大器	62	思考与练习题	93
2.7.1 功率放大器的基本概念	62	4.2 反馈的基本概念	93
2.7.2 OCL 功放电路	62	4.2.1 正反馈与负反馈	94
2.7.3 OTL 功放电路	64	4.2.2 电压反馈与电流反馈	94
2.7.4 低频功放基本参数的测试	65	4.2.3 串联反馈与并联反馈	95
思考与练习题	66	4.2.4 负反馈对放大器性能的影响	95
2.8 项目设计 放大电路的设计	66	思考与练习题	99
2.8.1 项目说明	66	4.3 基本运算电路	99
2.8.2 任务内容	67	4.3.1 比例运算电路	100
2.8.3 成果形式	67	4.3.2 加法与减法运算电路	100
2.8.4 评价标准	67	4.3.3 积分与微分运算电路	103
本章小结	67	4.3.4 对数与指数运算电路	104
习题 2	68	思考与练习题	105
自测题 2	73	4.4 集成运算放大器基本参数 的测试	105
第 3 章 场效应晶体管及其应用	77	4.4.1 开环增益 A_{uo} 的测试	106
学习目标	77	4.4.2 共模抑制比 K_{CMR} 的测试	106
3.1 场效应晶体管的基本特性	77	4.4.3 集成运放的保护措施	107
3.1.1 结型场效应晶体管	77	思考与练习题	108
3.1.2 绝缘栅场效应晶体管	79	4.5 集成运算放大器应用电路	108
3.1.3 场效应晶体管的特性参数	82	4.5.1 电压比较器	108
3.1.4 场效应晶体管与晶体管的 性能比较	82	4.5.2 有源滤波器	110
3.1.5 VMOS 场效应晶体管	83	4.5.3 采样保持电路	114
思考与练习题	84	思考与练习题	115
3.2 共源极场效应晶体管放大电路	84	本章小结	115
3.2.1 电路结构	84	习题 4	116
3.2.2 直流静态工作点	84	第 5 章 模拟电子技术应用实例	121
3.2.3 交流放大特性	85	学习目标	121
思考与练习题	86	5.1 直流稳压电源	121
3.3 源极输出器	86	5.1.1 直流稳压电源的基本组成	121
3.3.1 电路结构	86	5.1.2 串联型稳压电路	122
3.3.2 交流放大特性	86	5.1.3 过载保护电路	123
思考与练习题	87	5.1.4 直流稳压电源的主要技术指标	125
本章小结	87	5.1.5 集成稳压器的应用	125
习题 3	88	5.1.6 开关稳压电源	127
第 4 章 集成运算放大器及其应用	90	思考与练习题	129
学习目标	90	5.2 正弦波振荡器	130
4.1 集成运算放大器的基本特性	90		

5.2.1 振荡器的基本工作原理	130	实验三 共射放大器的制作 与调试	153
5.2.2 RC 正弦波振荡器实例	131	实验四 射极输出器的制作与 调试	155
思考与练习题	133	实验五 场效应晶体管放大器的 制作与调试	157
5.3 函数信号发生器	133	实验六 负反馈对放大器性能 的影响	158
5.3.1 函数信号发生器的基本电路	133	实验七 功率放大器的制作与 调试	160
5.3.2 集成函数信号发生器	137	实验八 基本运算电路的测试	162
思考与练习题	138	实验九 直流稳压电路的制作 与调试	164
5.4 模拟乘法器及其应用	138	实验十 RC 正弦波振荡器的制作 与调试	167
5.4.1 模拟乘法器的基础知识	138	附录	169
5.4.2 模拟乘法器的应用电路举例	140	附录 A 电子设计自动化 (EDA) 仿真电路	169
思考与练习题	142	附录 B 常用模拟集成器件 引脚功能	173
5.5* 模拟电路在测量技术中 的应用	142	附录 C 综合试卷	176
5.6 项目设计 集成运算放大器 的应用	146	附录 D 部分习题、自测题参考 答案	179
5.6.1 项目说明	147	参考文献	186
5.6.2 任务内容	147		
5.6.3 成果形式	147		
5.6.4 评价标准	147		
本章小结	148		
习题 5	148		
第 6 章 模拟电路实验	151		
学习目标	151		
实验一 常用电子仪器的使用	151		
实验二 常用半导体器件性能 的检测	152		

第1章 二极管及其应用

学习目标

本章主要学习半导体的基础知识，二极管及其应用电路。其主要学习目标如下：

1. 了解半导体的基本概念和本征半导体、N型半导体、P型半导体的特点。
2. 了解PN结的形成，掌握PN结的单向导电性。
3. 了解半导体二极管的结构，掌握二极管的伏安特性及主要参数。
4. 掌握常见的二极管应用电路（如整流滤波电路、稳压电路等）的工作原理及分析方法。
5. 掌握使用万用表对二极管作简易测试的方法。

1.1 半导体基础知识

1.1.1 半导体的主要特性

物质按照其导电能力的强弱可分为导体、半导体和绝缘体三类。常见的金、银、铜等金属，是良好的导体。另一些物质，如橡胶、干木材、陶瓷等，则几乎不导电，称为绝缘体。导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，称为半导体。用于制造半导体元器件的半导体材料有锗、硅和砷化镓等。

1. 半导体的特点

半导体之所以被用来制造电子元器件，是因为它的导电能力在外界某种因素作用下会发生显著的变化。

1) 半导体的电导率会因掺入杂质而发生显著的变化。例如在室温时，纯锗中掺入一万分之一的杂质，其电导率会增加几百倍。各种不同器件的制作，正是利用了掺杂工艺来改变和控制半导体的电导率。

2) 温度的变化也会使半导体的电导率发生显著的变化，利用这种热敏效应，人们作出了热敏元件。但另一方面，热敏效应会使半导体元器件的热稳定性下降，所以应采取有效措施以克服因半导体元器件热敏特性造成的电路不稳定。

3) 光照不仅可以改变半导体的电导率，而且可以产生电动势，这种现象统称半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光敏晶体管、光耦合器和光电池等。

2. 本征半导体的导电性

完全纯净的、结构完整的半导体晶体称为本征半导体，其原子核外层的价电子彼此共用，形成共价键结构。在热力学温度 0K (-273°C) 下并且没有外界激发时，由于共价键中的价电子被束缚着，所以在本征半导体中，没有可以自由运动的带电粒子——载流子，这时它相当于绝缘体。

但是，半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中的电子被束缚的那样紧。如图 1-1 所

示, 在室温 (300K) 下, 由于热激发, 会使一些价电子获得足够的能量而挣脱共价键的束缚, 成为自由电子, 这种现象称为本征激发。在电子挣脱共价键的束缚成为自由电子之后, 共价键中就留下一个空位, 这个空位叫做空穴 (如图 1-1 中的 A 处), 空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。由于共价键中出现了空穴, 邻近的价电子就可以填补到这个空位上 (如图 1-1 中的 B 到 A)。而在这个电子原来的位置上又留下新的空位, 以后其他电子又可以转移到这个新的空位 (如图 1-1 中的 C 到 B)。这样, 就使共价键中出现一定的电荷迁移。

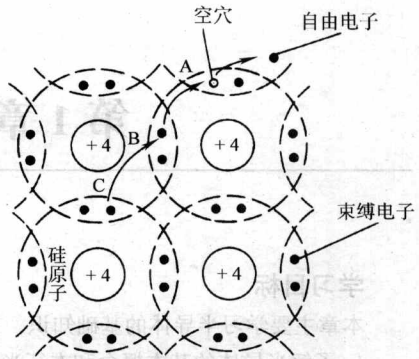


图 1-1 电子和空穴的移动

在本征半导体内, 自由电子和空穴总是成对出现的。在没有外加电场时, 晶体中空穴和自由电子移动的方向都是杂乱无章的, 对外部不呈现电流。理论和实践证明: 随着温度的升高, 电子-空穴对急剧增加, 其增加速度遵循指数规律。

在实际的半导体中, 除了产生电子-空穴对以外, 还存在一个逆过程。这就是自由电子也会释放能量而进入有空位的共价键, 同时消失一个自由电子和空穴, 这种现象称之为复合。当温度一定时, 激发和复合数相等, 维持一个动态平衡。

1.1.2 N 型半导体与 P 型半导体

在本征半导体中, 人为地掺入少量三价元素 (如硼、铝等) 或五价元素 (如磷、砷等), 可以使半导体的导电性能发生显著的变化。掺入的元素称为杂质, 因掺入杂质性质的不同, 杂质半导体可分为 N 型半导体 (电子型半导体) 和 P 型半导体 (空穴型半导体) 两大类。

1. N 型半导体

本征半导体中掺入少量的五价元素, 使每一个五价元素的原子取代一个半导体基体原子在晶体中的位置, 可以形成 N 型半导体。常用掺杂的五价元素有磷、砷和钨。一个磷原子取代一个硅原子后晶体的共价键结构如图 1-2 所示。因为磷原子有五个价电子, 它以四个价电子与相邻的硅原子组成共价键后, 必定还多余一个价电子。这个多余的价电子只要较小的能量就能挣脱磷原子核的吸引而成为自由电子。

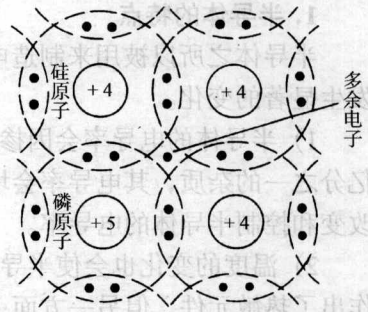


图 1-2 N 型半导体的共价键结构

磷原子因失去电子而成为正离子, 但在产生自由电子的同时并不产生新的空穴, 这是不同于本征半导体的。除了杂质给出的自由电子外, 原晶体本身也会产生少量的电子-空穴对, 但自由电子数远大于空穴数。在 N 型半导体中以自由电子导电为主, 自由电子称为多数载流子 (简称多子), 而空穴称为少数载流子 (简称少子)。

2. P 型半导体

本征半导体中掺入少量的三价元素, 使每一个三价元素的原子取代一个半导体基体原子在晶体中的位置, 可以形成 P 型半导体。常用掺杂的三价元素有硼、铝和镓。图 1-3 示

出了一个硼原子取代一个硅原子后晶体的共价键结构示意图。因硼原子只有三个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生了一个空位，当相邻共价键上的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时，就有可能填补这个空位，使硼原子成为不能移动的正离子，原来硅原子的共价键则因缺少一个电子而形成了空穴。

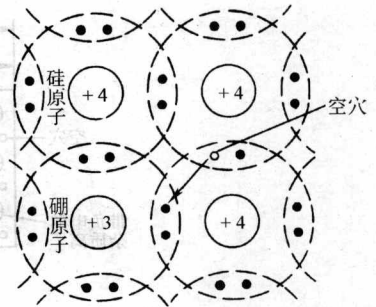


图 1-3 P型半导体的共价键结构

产生空穴的同时并不产生新的自由电子，这一点也是和本征半导体不同的，原来的硅晶体本身仍会产生少量的电子-空穴对。在P型半导体中，空穴数远大于自由电子数，以空穴导电为主，空穴称为多数载流子，而自由电子称为少数载流子。

由此可见，在掺入杂质后，载流子的数目都有相当程度的增加。掺入百万分之一的杂质，载流子浓度将增加一百万倍。因此，在半导体内掺入微量的杂质，是提高半导体导电能力最有效的方法。

1.1.3 PN结的导电特性

在一块本征半导体上，通过掺杂使一侧形成N型半导体，另一侧形成P型半导体，则在两种半导体交界面上形成一个很薄的空间电荷区，叫做PN结。PN结是构成各种半导体器件的基础，了解PN结的性质对掌握半导体器件的原理是非常重要的。

1. PN结的形成

当P型半导体和N型半导体结合后，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差，这样，电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。因此有一些电子要从N型区向P型区扩散，同时也有一些空穴要从P型区向N型区扩散，如图1-4所示。

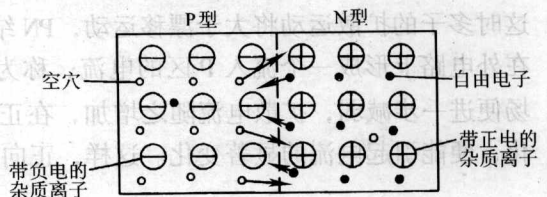


图 1-4 载流子的扩散

扩散到P区的电子与空穴复合，扩散到N区的空穴与电子复合，随着扩散的进行，在界面附近的P型区中空穴数大量减少，出现了带负电的离子区；而在N型区一侧因缺少电子，显露出带正电的离子区。半导体中的离子虽然也带电，但由于物质结构的关系，它们不能任意移动，因此并不参与导电。这些不能移动的带电粒子通常称为空间电荷，它们在交界面上形成一个很薄的空间电荷区，称为PN结。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了，因此该电荷区又叫做耗尽层，如图1-5所示。

在出现了空间电荷区以后，由于正负电荷之间的相互作用，在空间电荷区中就形成了一个电场，其方向是从带正电的N区指向带负电的P区，由于这个电场是由载流子扩散运动即由内部形成的，故称为内电场。

PN结的内电场是阻止扩散的，因为这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反，所以空间电荷区又可看作是一个阻挡层，它对多数载流子的扩散有阻挡作用。另一方面，我们根据电场的方向和电子空穴的带电极性还可以看出，这个电场将使N区的少数载流

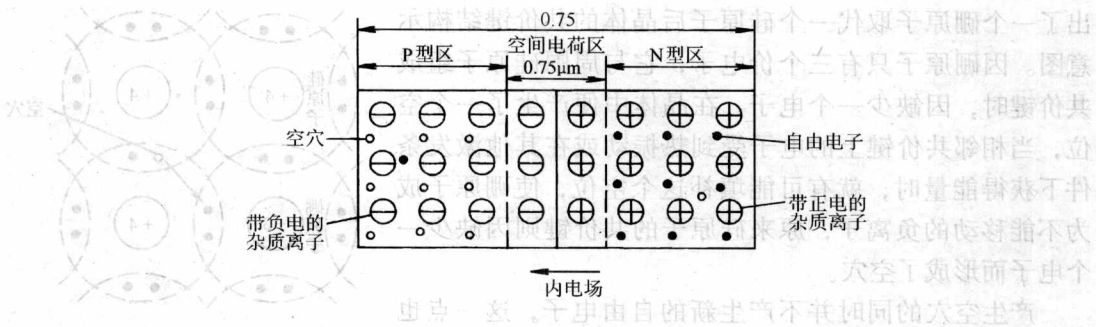


图 1-5 PN 结的形成

子空穴向 P 区漂移，使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移。漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。而多数载流子扩散和少数载流子漂移达到动态平衡时，它们的作用大小相等、方向相反，相互抵消，外部宏观不呈现电流现象。

2. PN 结的单向导电性

(1) 外加正向电压 如图 1-6 所示，在 PN 结上外加正向电压 U_F ，即 U_F 的正端接 P 区，负端接 N 区，外加电场与 PN 结内电场方向相反。在外加电场的作用下，P 区中的多数载流子空穴和 N 区中的多数载流子电子都要向 PN 结移动，当 P 区空穴进入 PN 结后，就要和原来的一部分负离子中和，使 P 区的空间电荷量减少。同样，N 区的电子进入 PN 结后中和了部分正离子，使 N 区的空间电荷量减少，结果使 PN 结变窄，即阻挡层的厚度变薄，电阻减小。所以在这个方向的外加电压称为正向电压或正向偏置电压，简称正偏。这时多子的扩散运动将大于漂移运动，PN 结内的电流便由起支配地位的扩散电流所决定，在外电路上形成一个流入 P 区的电流，称为正向电流 I_F 。当外加电压 U_F 升高，PN 结电场便进一步减弱，扩散电流随之增加，在正常工作范围内，PN 结上外加电压只要稍有变化，便能引起电流的显著变化。这样，正向的 PN 结表现为一个很小的电阻。

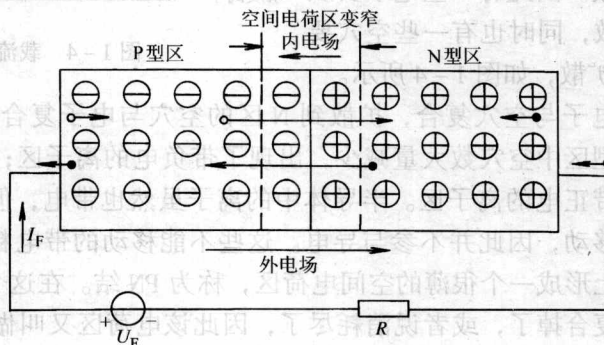


图 1-6 外加正向电压的 PN 结

在外加正向偏置电压下，有少数载流子形成的漂移电流，其方向与扩散电流相反，和正向电流比较，其数值很小，可忽略不计。

(2) 外加反向电压 如图 1-7 所示，在 PN 结上外加反向电压 U_R ，即 U_R 的正端接 N 区，负端接 P 区，外加电场与 PN 结内电场方向相同。在这种外电场的作用下，P 区中的

空穴和 N 区中的电子都将离开 PN 结, 使阻挡层厚度加宽, 这时 PN 结处于反向偏置。这样 P 区和 N 区中的多数载流子就很难越过阻挡层, 因此扩散电流趋近于零。但由于结电场的增加, 使 N 区和 P 区中的少数载流子更容易产生漂移运动, PN 结的电流就由起支配地位的漂移电流所决定。在外电路上就形成了一个流入 N 区的反向电流。但由于少数载流子的浓度很小, 所以反向漂移电流很小, 而且少数载流子是由本征激发产生的, 当材料制成后, 其数值取决于温度, 在一定温度下, 电压再高, 其值也几乎不变, 所以 PN 结在反向偏置时, 可认为基本上是不导电的, 表现为一个很大的电阻。

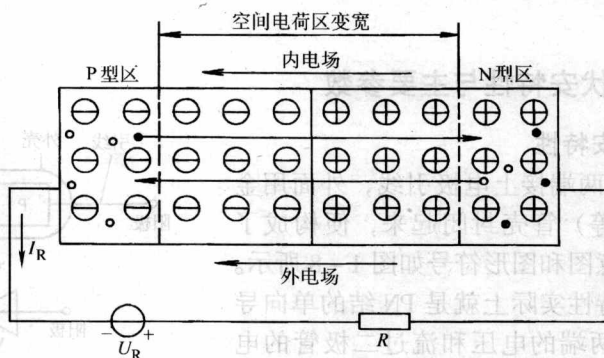


图 1-7 外加反向电压的 PN 结

由此可见, PN 结正向偏置时, 正向电阻很小, 形成较大的正向电流; PN 结反向偏置时, 呈现较大的反向电阻, 反向电流很小, 这就是 PN 结的单向导电性。PN 结具有单向导电性的关键是它的阻挡层的存在及其随外加电压而变化。

3. PN 结的击穿

当加于 PN 结的反向电压增大到一定数值时, 反向电流突然急剧增大, 这种现象称为 PN 结的反向击穿。对应于电流开始剧增时的电压称为反向击穿电压。PN 结击穿分为“雪崩击穿”和“齐纳击穿”, 又称为电击穿。

雪崩击穿是由于 PN 结内的少数载流子受强电场的加速作用而获得很大的能量, 当它与结内原子碰撞时, 把其中的价电子碰撞出来, 产生新的电子-空穴对。新的电子-空穴对在强电场的作用下, 再去碰撞其他的原子, 产生更多的电子-空穴对, 如同雪崩一样。雪崩击穿的本质是碰撞电离, 发生在掺杂浓度较低、外加电压较高的情况下。

齐纳击穿发生在高浓度掺杂的 PN 结内。由于杂质浓度高, 故形成的 PN 结很窄, 即使外加反向电压不高 (5V 以下), 结内电场也非常强, 它可以把结内的束缚电子从共价键中拉出来引起反向电流的剧增。

发生以上两种电击穿时, 当反向电压下降到击穿电压以下时, PN 结的性能仍能恢复到原来的状态。但前提条件是: 反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结允许的耗散功率, 超过了就会因为热量散不出去而使 PN 结温度上升, 直到过热而烧毁, 这种现象就是热击穿。热击穿是不可恢复的, 在应用中应尽量避免。电击穿则往往被人们所利用 (如稳压管等)。

思考与练习题

1. 什么叫半导体？什么叫本征半导体？
2. 什么叫杂质半导体？杂质半导体有哪几种？为什么要向纯净的半导体中掺入杂质？
3. 什么叫 PN 结？PN 结有什么特性？
4. 什么叫击穿？有哪几种类型？

1.2 二极管的基本特性

1.2.1 二极管的伏安特性与主要参数

1. 二极管的伏安特性

在一个 PN 结的两端接上电极引线，外面用金属（或玻璃、塑料等）管壳封闭起来，便构成了二极管。其结构示意图和图形符号如图 1-8 所示。

二极管的导电特性实际上就是 PN 结的单向导电性，加在二极管两端的电压和流过二极管的电流之间的关系称为二极管的伏安特性。它可通过测试电路（如图 1-9 所示）测试出来，即分别在二极管两端加上正向电压和反向电压，改变电压数

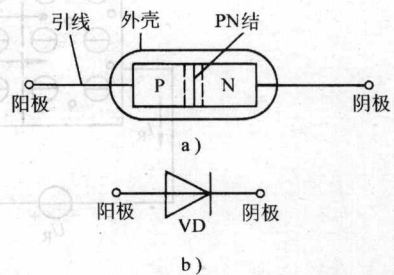


图 1-8 二极管的结构示意图和图形符号
a) 结构示意图 b) 图形符号

值的大小，同时再分别测量流过二极管的电流值，就可得到二极管的伏安特性曲线。图 1-10 所示分别为硅二极管和锗二极管的伏安特性曲线。

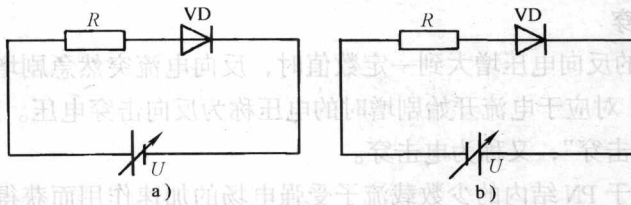


图 1-9 二极管伏安特性测试电路

a) 两端加正向电压 b) 两端加反向电压

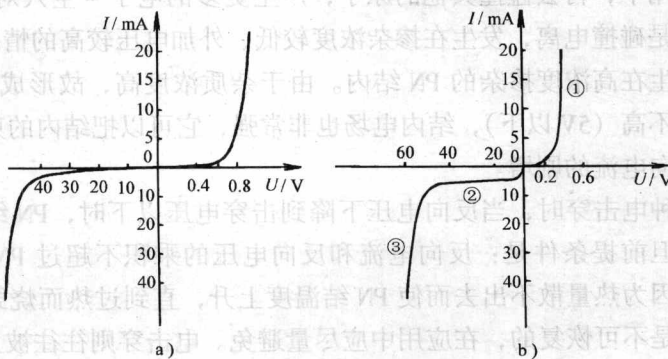


图 1-10 二极管的伏安特性曲线

a) 硅二极管伏安特性曲线 b) 锗二极管伏安特性曲线

(1) 由图中可见, 二极管两端的电压和流过二极管的电流成非线性关系, 所以二极管的伏安特性曲线是一条非线性曲线。以锗二极管为例, 如图 1-10b 所示, 曲线可分为以下三部分。

(1) 正向特性 对应于图 1-10b 的第①段, 当二极管两端加正向电压且小于某一数值时, 二极管的正向电流几乎为零; 当正向电压达到某一值时, 正向电流迅速增大, 而且电压少许增大, 正向电流就增加许多, 表现为一较小电阻。使二极管刚刚出现正向电流时所对应的正向电压称为死区电压或开启电压, 用 U_{th} 表示, 其大小和二极管的材料有关。硅二极管的 U_{th} 约为 0.5V, 锗二极管的 U_{th} 约为 0.1V。

二极管导通后, 其管压降基本不变, 二极管的正向电流发生很大变化时, 正向压降只有微小变化。硅二极管的正向压降为 0.7V 左右, 锗二极管正向压降为 0.3V 左右。但当温度升高时, 其管压降会略有下降。

(2) 反向特性 对应于图 1-10b 的第②段, 当二极管两端加反向电压, 并且反向电压小于一定数值时, 反向电流很小, 表现为一个很大的电阻。反向电流有以下特点:

① 反向电压在一定范围内变化时, 反向电流基本不变, 呈饱和性, 所以称之为反向饱和电流。一般硅管的反向饱和电流比锗管小很多。

② 反向电流受温度影响很大, 当温度升高时, 其值随温度的升高而加大, 而反向饱和电流加大, 将影响二极管的单向导电性。

(3) 反向击穿特性 对应于图 1-10b 的第③段, 当反向电压增加到某一数值时, 二极管反向电流迅速增大, 此时的二极管处于反向击穿状态。使二极管反向击穿的反向电压称为反向击穿电压, 用 U_{BR} 表示。处于反向击穿状态下的二极管将失去单向导电性。

二极管的击穿同 PN 结的击穿一样也有两种, 电击穿和热击穿。电击穿不是永久性击穿, 去掉反向电压后, 二极管能恢复正常特性。而热击穿则为永久性击穿, 当去掉反向电压后, 二极管也不能恢复正常特性, 在实际应用中应尽量避免这种情况的发生。

2. 二极管的温度特性

热振动的强度随温度的升高而增大, 因而温度升高对二极管特性的影响是不容忽视的。图 1-11 是温度对二极管特性影响的示意图。

由图中可以看出: 正向特性随温度升高而左移, 反向饱和电流随温度升高而剧增。

当温度升高, 本征半导体的电导率提高, 且二极管正向电压一定时, 正向电流随温度的升高而加大。所以二极管特性曲线将左移。这是造成以 PN 结为基础的半导体器件温度稳定性不好的原因之一。但利用这一特性在电路中可以用做温度补偿元件。

二极管的反向饱和电流也与温度密切相关。温度升高时, 少数载流子增加, 所以反向电流也将急剧增加。通常温度每升高 1°C , 反向饱和电流约增加一倍。

半导体二极管的温度稳定性不好, 所以在使用时要注意温度的影响。

3. 二极管的伏安特性表达式

理论和实验均可证明, 二极管的伏安特性可近似由式 (1-1) 表示, 即

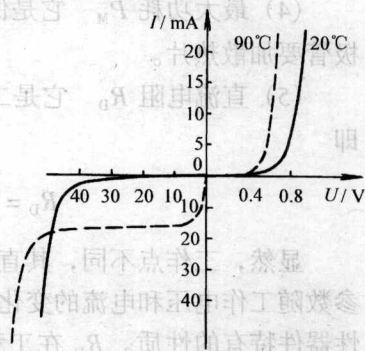


图 1-11 温度对二极管伏安特性的影响