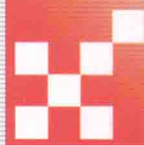




普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
第二届山东省高等学校优秀教材一等奖



# 电工学 (电子技术)

● 董传岱 主编

第2版



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  
第二届山东省高等学校优秀教材一等奖

# 电工学（电子技术）

第2版

主编 董传岱  
参编 白明 李震梅 刘雪婷 牛轶霞  
      孙霞 刘玉滨  
主审 刘润华 宋吉江



机械工业出版社

本书第一版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，2011年12月获得第二届山东省高等学校优秀教材一等奖。

本书是作者在多年从事电子技术教学及研究工作的基础上，依据教育部教学指导委员会的最新教学基本要求编写而成的。主要包括半导体器件的基本知识，放大电路的原理和分析基础，集成运算放大器及其应用，正弦波振荡电路，直流电源电路，基本逻辑门电路与组合逻辑电路，触发器与时序逻辑电路，555集成定时器及其应用电路，数据的采集、存储与转换，电子技术应用电路举例和Multisim 9、PLD等内容。本书文字叙述详细，概念阐述清楚、通俗易懂，简化理论推导，突出应用，可作为普通本科层次非电类专业学生电子技术课程的教材，也可作为非电类工程师以及其他有关专业人员的培训教材和参考书。

## 图书在版编目（CIP）数据

电工学/董传岱主编. —2版. —北京：机械工业出版社，2013.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-111-44273-8

I. ①电… II. ①董… III. ①电工学-高等学校-教材  
IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第235906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：贡克勤 责任编辑：贡克勤 徐凡

版式设计：霍永明 责任校对：任秀丽

封面设计：张静 责任印制：刘岚

北京京丰印刷厂印刷

2014年7月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·16.75印张·412千字

标准书号：ISBN 978-7-111-44273-8

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

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010) 68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010) 88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

“电工学(电子技术)”课程是高等学校本科非电类专业的一门技术基础课程。本课程的作用与任务是:使学生通过本课程的学习,获得电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能,了解电子技术应用和我国电子事业发展的概况,为今后学习和从事与本专业有关的工作打下一定的基础。

本书作者具有多年从事电子技术课程教学及研究工作的经验,主编主持完成了山东省改革试点课程“电工学(电子技术)”,并建设成为了山东省精品课程、获得了多项省级教学研究成果。本书第1版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,2011年12月获得第二届山东省高等学校优秀教材一等奖。作者依据国家教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会最新制订的电工学(电子技术)课程的基本要求,结合普通院校本科生的实际情况,按照下列原则进行编写:

1) 精选教学内容、深浅适度、主次分明、详略恰当,在内容的阐述方面,以物理概念为主,突出实践性、实用性,力求做到文字通顺流畅,通俗易懂,以便学生学习。

2) 在保留传统基本内容的基础上,突出集成电路的应用和现代电子技术内容。

本书体现了新技术、新知识、新工艺、新器件的应用,主要注意以下几个方面:①从分立元器件电路为主转到以集成电路为主;②从以器件内部分析为主转向以器件外部特性和应用为主;③把以模拟电路为主转到模拟电路和数字电路比例协调、相互兼顾上来,即适当减少模拟电路而增添数字电路内容;④重视新技术、新知识、新工艺、新器件的应用,如可编程逻辑器件(PLD)和电子仿真软件 Multisim 等。

3) 本书构建了新颖的教材结构体系,按照先模拟后数字的传统排序,最后是现代内容的顺序编写,但在模拟和数字的主要内容顺序编排上又按照先基础后应用分章讲解。

模拟部分基础内容包括半导体器件的基本知识、基本放大电路;模拟部分应用内容包括几种常用放大电路、运算放大电路的应用和正弦波振荡电路、直流电源电路等。数字部分基础内容包括门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路;数字部分应用内容包括常用组合逻辑器件及其应用,常用时序逻辑器件及其应用,数据的存储、采集与转换(A/D、D/A),555集成定时器及其应用,实用电子电路举例。新器件部分教学内容包括:可编程器件与编程技术及 Multisim 简介等。

“卓越工程师教育培养计划”是教育部为贯彻落实党的十七大提出的走中国特色新型工业化道路、建设创新型国家、建设人力资源强国等战略部署,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》而率先启动的一项高等教育重大改革计划。为落实教育部“卓越工程师教育培养计划”,培养具有良好的思想品质、职业道德和宽厚扎实的基础知识,具备较强的社会适应能力、工程实践能力、组织领导能力与创新创业能力,富有进取精神和国际视野,“强实践、能管理、善创新”的高级工程技术和管理人员,我们在第1版的基础上进一步加强了实用性,增添修改了大量习题等;电子技术发展迅速,所以在第2版中更新了部分集成芯片应用,将 Multisim 7 更新为 Multisim 9;根据我校及有关院校5届

学生的使用情况，修改了部分不尽人意的内容叙述等。

特别说明的是，应用内容各章均按照“模块化”方式编写，突出了本书的实践性和针对性，在学习了基础章节内容的基础上，任意组合应用章节的内容，都不影响本书的系统性和知识的前后联系，比如在讲授完门电路后，可以把集成定时器555内容提前讲授等；可以按照不同专业、不同学时灵活组织教学内容，既满足宽基础的要求，又适应弹性教学、培养多样化专门人才的需要。其中，第13~15章的内容可以让学生自学，只要任课老师在讲述前面教学内容时简单介绍相关内容即可。本教材适于48~64学时的教学计划。

山东理工大学董传岱教授组织了本书的编写，制定了详细的编写提纲，并负责了全书的统稿。全书共15章，其中第1、2、3、4、7、9章由董传岱编写；第5、6、15章由白明编写；第8、10、11、14章由李震梅编写；第12、13章由李震梅和刘雪婷合作编写；牛轶霞参加了第1、9章的编写；孙霞参加了第2、4章的编写；刘玉滨和白明合作编写了全部习题。

本书由教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会电子电气基础课程教学指导分委员会委员，中国高等学校电工学研究会常务理事，山东省高等学校电工学研究会理事长，中国石油大学（华东）刘润华教授主审，他提出了许多建设性意见和建议。山东理工大学的宋吉江教授也给出了许多宝贵意见和建议。本书的编写还得到了山东理工大学电工电子教研室和实验教学中心全体教师的大力支持，编者在这里一并向他们表示感谢。在编写过程中参阅或引用了部分参考资料，对这些作者，我们也表示衷心的感谢。

本书与魏佩瑜主编的《电工学（电工技术）（第2版）》一书配套使用，也可以单独使用。限于编者的水平，本书中不妥和错误之处在所难免，望读者及同行老师们给予批评指正。

编 者

# 第 1 版前言

电工学(电子技术)课程是高等学校本科非电类专业的一门技术基础课程。目前,电子技术应用十分广泛,可以说:“无所不用,无处不在”,电子技术发展迅速,并且日益渗透到其他学科领域,促进其发展,在我国社会主义现代化建设中具有重要的作用。本课程的作用与任务是:使学生通过本课程的学习,获得电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能,了解电子技术应用和我国电子事业发展的概况,为今后学习和从事与本专业有关的工作打下一定的基础。

本书作者都有从事多年电子技术课程教学工作的经验,本书也是作者于 2005 年完成的山东省改革试点课程的总结。在本书的编写过程中,作者依据国家教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会最近制定的电工学(电子技术)课程的基本要求,结合普通本科院校本科学生的实际情况,本着下列原则编写的:

(1) 精选教学内容,深浅适度、主次分明、详略恰当,在内容的阐述方面,以物理概念为主,突出实践性、实用性,力求做到文字通顺流畅,通俗易懂,以便学生学习。

(2) 在保留传统的基本内容基础上,突出集成电路的应用和现代电子技术内容。

本书体现了新技术、新知识、新工艺、新器件的应用,主要注意以下几个方面:①从分立元件电路为主转到以集成电路为主;②从以器件内部分析为主转向以器件外部特性和应用为主;③把以模拟电路为主转到模拟电路和数字电路比例协调、相互兼顾,适当减少模拟电路而增添数字电路内容;④重视新技术、新知识、新工艺、新器件的应用,如可编程逻辑器件 PLD 和电子仿真软件 Multisim 等。

(3) 本书构建了新颖的教材结构体系,全书按照先模拟后数字的传统排序,最后是现代内容的顺序编写,但在模拟和数字的主要内容顺序编排上又按照先基础后应用分章讲解。

模拟部分包括:基础内容有半导体器件的基本知识、基本放大电路;应用内容有几种常用放大电路、运算放大电路的应用和正弦波振荡电路、直流电源电路等。数字部分包括:基础内容有门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路;应用内容有常用组合逻辑器件及其应用,常用时序逻辑器件及其应用,数据的存储、采集与转换(A/D、D/A),555 集成定时器及其应用,实用电子电路举例。现代部分教学内容包括:可编程器件与编程技术, Multisim 简介等。

特别说明的是,应用内容各章均按照“模块化”方式编写,突出了教材的实践性和针对性,在学习了基础章节内容的基础上,任意组合应用章节的内容,都不影响本书的系统性和知识的前后联系,可以按照不同专业、不同学时灵活组织教学内容,既满足宽基础的要求,又适应弹性教学、培养多样化专门人才的需要。其中,第 13~15 章的内容可以以自学为主,任课老师在讲述前面教学内容时可以灵活引入简单介绍相关内容。本书中有些图形符号由于是开发软件中的符号,故不宜改动。本教材适于 48~64 学时的教学计划。

山东理工大学董传岱教授组织了本书的编写,制定了详细的编写提纲,并负责了全书的统稿。全书共 15 章,其中第 1、2、3、4、7、9 章由董传岱编写;第 8、10、11、14 章由李

震梅编写；第5、6章由房华玲编写；第15章由白明编写；第12、13章由李震梅和刘雪婷合作编写；李领华参加了第1、6章的编写；白明还编写了第1~6章的习题等。

本书由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委员、中国高等学校电工学研究会常务理事、山东省高等学校电工学研究会理事长、中国石油大学(华东)刘润华教授主审，他提出了许多建设性的意见和建议；济南大学的成谢锋教授也给出了许多宝贵的意见和建议；本书的编写还得到了山东理工大学电工电子实验教学中心全体教师的大力支持。编者在这里一并向他们表示感谢。在编写过程中参阅或引用了部分参考资料，对这些作者，我们也表示衷心的感谢。

本书与魏佩瑜主编的《电工学(电工技术)》一书配套使用，也可以单独使用。

限于编者的水平，本书中不妥和错误之处在所难免，望读者及同行老师们给予批评指正。

编 者

# 目 录

## 第 2 版前言

## 第 1 版前言

## 第 1 章 半导体器件的基本知识 ..... 1

### 1.1 半导体基本知识 ..... 1

#### 1.1.1 本征半导体及其导电特性 ..... 1

#### 1.1.2 N 型半导体 ..... 2

#### 1.1.3 P 型半导体 ..... 2

### 1.2 半导体二极管 ..... 3

#### 1.2.1 PN 结的形成及单向导电特性 ..... 3

#### 1.2.2 二极管的基本结构 ..... 5

#### 1.2.3 二极管的伏安特性 ..... 5

#### 1.2.4 二极管的主要参数 ..... 5

#### 1.2.5 稳压二极管 ..... 6

### 1.3 晶体管 ..... 8

#### 1.3.1 晶体管的基本结构 ..... 8

#### 1.3.2 晶体管的电流分配与放大原理 ..... 9

#### 1.3.3 伏安特性曲线 ..... 10

#### 1.3.4 晶体管的主要参数 ..... 11

### 1.4 光电器件 ..... 13

#### 1.4.1 发光二极管 ..... 13

#### 1.4.2 光敏二极管 ..... 14

#### 1.4.3 光敏晶体管 ..... 14

### 1.5 绝缘栅场效应晶体管 ..... 15

#### 1.5.1 增强型绝缘栅场效应晶体管 ..... 15

#### 1.5.2 绝缘栅场效应晶体管的 4 种基本类型 ..... 16

#### 1.5.3 主要参数 ..... 18

#### 1.5.4 晶体管和场效应晶体管的比较 ..... 18

### 习题 ..... 19

## 第 2 章 基本放大电路 ..... 21

### 2.1 基本放大电路的组成 ..... 21

### 2.2 放大电路的主要技术指标 ..... 22

### 2.3 共射极基本放大电路 ..... 24

#### 2.3.1 直流通路和交流通路 ..... 24

#### 2.3.2 静态工作点及其估算 ..... 24

#### 2.3.3 放大电路的图解分析法 ..... 25

#### 2.3.4 放大电路的微变等效电路

分析法 ..... 28

### 2.4 射极偏置放大电路 ..... 31

#### 2.4.1 静态工作点的稳定 ..... 31

#### 2.4.2 静态工作点的估算 ..... 32

#### 2.4.3 动态分析 ..... 32

### 2.5 射极输出器 ..... 34

#### 2.5.1 静态分析 ..... 34

#### 2.5.2 动态分析 ..... 34

### 2.6 场效应晶体管放大电路 ..... 35

#### 2.6.1 场效应晶体管放大电路的静态偏置 ..... 35

#### 2.6.2 场效应晶体管的微变等效电路 ..... 36

#### 2.6.3 共源极放大电路 ..... 36

#### 2.6.4 源极输出器 ..... 37

### 习题 ..... 37

## 第 3 章 几种常用的放大电路 ..... 40

### 3.1 多级放大电路 ..... 40

#### 3.1.1 耦合方式及其特点 ..... 40

#### 3.1.2 阻容耦合多级放大电路 ..... 41

### 3.2 差动放大电路 ..... 43

#### 3.2.1 差动放大电路的基本形式 ..... 43

#### 3.2.2 长尾式差动放大电路 ..... 45

### 3.3 功率放大电路 ..... 48

#### 3.3.1 对功率放大电路的基本要求 ..... 49

#### 3.3.2 OTL 互补对称功率放大电路 ..... 49

#### 3.3.3 甲乙类 OCL 互补对称功率放大电路 ..... 50

#### 3.3.4 采用复合管的互补对称功率放大电路 ..... 51

#### 3.3.5 集成功率放大电路 ..... 52

### 3.4 集成运算放大器 ..... 52

#### 3.4.1 集成运算放大器的特点及其组成 ..... 53

#### 3.4.2 集成运算放大器的主要参数 ..... 54

#### 3.4.3 理想运算放大器及其分析依据 ..... 56

### 习题 ..... 57

## 第 4 章 集成运算放大器的应用 ..... 59



4.1 比例运算电路	59	6.2.2 单相桥式整流电路	88
4.1.1 反相比例运算电路	59	6.3 滤波电路	90
4.1.2 同相比例运算电路	60	6.3.1 电容滤波器	90
4.1.3 差动比例运算电路	61	6.3.2 RC- $\pi$ 形滤波电路	92
4.2 集成运算放大电路中的负反馈	62	6.4 稳压管稳压电路	93
4.2.1 反馈的概念	62	6.5 串联型晶体管稳压电路	94
4.2.2 反馈的类型	62	6.6 集成稳压电源	95
4.2.3 负反馈的作用	63	6.7 开关型稳压电路	97
4.3 加法运算和积分运算电路	64	6.8 可控整流电路	99
4.3.1 反相比例求和运算电路	64	6.8.1 晶闸管	99
4.3.2 积分运算电路	65	6.8.2 可控整流电路简介	102
4.4 测量实用电路	66	习题	104
4.4.1 可调电压源	66	<b>第7章 门电路与组合逻辑电路</b>	106
4.4.2 直流电压测量电路	66	7.1 概述	106
4.4.3 直流电流测量电路	67	7.1.1 脉冲信号	106
4.5 有源滤波器	67	7.1.2 数制	107
4.5.1 滤波器的功能和分类	67	7.1.3 码制	110
4.5.2 低通滤波器	68	7.2 逻辑代数基础	112
4.5.3 高通滤波器	69	7.2.1 基本逻辑运算	113
4.6 电压比较器	70	7.2.2 逻辑代数的基本公式	115
习题	70	7.2.3 逻辑函数表达式及其化简	115
<b>第5章 正弦波振荡电路</b>	73	7.3 逻辑门电路	118
5.1 产生正弦波振荡的条件	73	7.3.1 分立元件门电路	119
5.1.1 自激振荡条件	73	7.3.2 TTL集成门电路	121
5.1.2 正弦波振荡电路的组成	74	7.3.3 MOS反相器	126
5.1.3 正弦波振荡电路的类型	74	7.4 组合逻辑电路的分析	127
5.2 RC振荡电路	75	7.4.1 组合逻辑电路分析的基本步骤	127
5.2.1 RC桥式振荡电路	75	7.4.2 组合逻辑电路的分析示例	127
5.2.2 其他形式的RC振荡电路	77	7.5 组合逻辑电路的设计方法	129
5.2.3 RC振荡电路的特点	77	7.5.1 组合逻辑电路设计的基本步骤	129
5.3 LC振荡电路	78	7.5.2 组合逻辑电路的设计示例	129
5.3.1 变压器反馈式LC振荡电路	78	习题	131
5.3.2 其他形式的LC振荡电路	79	<b>第8章 常用组合逻辑器件及其应用</b>	133
5.3.3 LC振荡电路应用举例——接近开关	80	8.1 编码器	133
5.4 石英晶体振荡电路	81	8.1.1 二进制编码器	133
5.4.1 石英晶体的特性	81	8.1.2 二—十进制编码器	134
5.4.2 石英晶体振荡电路的形式	82	8.1.3 优先编码器	135
习题	83	8.2 译码器	137
<b>第6章 直流电源电路</b>	86	8.2.1 二进制译码器	137
6.1 直流电源的组成	86		
6.2 整流电路	87		
6.2.1 单相半波整流电路	87		

8.2.2 二—十进制译码器 .....	139	11.3.2 倒T形电阻网络 D/A 转换器 .....	180
8.2.3 显示译码器 .....	141	11.3.3 集成 D/A 转换器 .....	181
8.3 加法器 .....	143	11.3.4 D/A 转换器的主要参数 .....	182
8.3.1 半加器 .....	143	11.4 模/数转换电路 .....	182
8.3.2 全加器 .....	143	11.4.1 A/D 转换器的基本原理 .....	182
8.3.3 多位加法器 .....	144	11.4.2 逐次比较型 A/D 转换器 .....	183
8.4 数据选择器 .....	145	11.4.3 集成 A/D 转换器 .....	185
8.4.1 数据选择器的功能 .....	145	11.4.4 A/D 转换器的主要技术指标 .....	186
8.4.2 集成数据选择器 74LS151 .....	145	习题 .....	186
习题 .....	147	<b>第 12 章 集成 555 定时器及其应用</b> .....	187
<b>第 9 章 触发器与时序逻辑电路</b> .....	149	12.1 集成 555 定时器 .....	187
9.1 触发器 .....	149	12.1.1 集成 555 定时器的结构 .....	187
9.1.1 RS 触发器 .....	149	12.1.2 集成 555 定时器的工作原理 .....	188
9.1.2 JK 触发器和 D 触发器 .....	151	12.2 多谐振荡器 .....	189
9.1.3 触发器功能间的相互转换 .....	152	12.2.1 电路组成 .....	189
9.2 时序逻辑电路的分析方法 .....	153	12.2.2 工作原理 .....	189
9.2.1 时序逻辑电路的特点及其 分类 .....	153	12.2.3 主要参数 .....	190
9.2.2 同步时序逻辑电路分析的基本 步骤 .....	154	12.3 单稳态触发器 .....	191
9.2.3 同步时序逻辑电路的分析 示例 .....	154	12.3.1 电路组成 .....	192
习题 .....	156	12.3.2 工作原理 .....	192
<b>第 10 章 常用时序逻辑电路及其 应用</b> .....	158	12.3.3 输出脉冲宽度 $t_w$ .....	193
10.1 寄存器 .....	158	12.3.4 单稳态触发器的应用 .....	193
10.1.1 数码寄存器 .....	158	12.4 施密特触发器 .....	194
10.1.2 移位寄存器 .....	158	12.4.1 电路组成 .....	194
10.2 计数器 .....	161	12.4.2 工作原理 .....	194
10.2.1 二进制计数器 .....	161	12.4.3 主要参数 .....	195
10.2.2 同步十进制计数器 .....	165	12.4.4 施密特触发器的应用 .....	195
10.2.3 利用集成计数器构成 $N$ 进制 计数器 .....	167	习题 .....	196
习题 .....	169	<b>第 13 章 实用电子电路举例</b> .....	198
<b>第 11 章 数据的存储、采集与 转换</b> .....	171	13.1 叮咚门铃 .....	198
11.1 半导体存储器 .....	171	13.2 报警器 .....	198
11.1.1 只读存储器 .....	171	13.2.1 可燃气体报警器电路 .....	198
11.1.2 随机存取存储器 .....	174	13.2.2 简易低水位报警器 .....	199
11.2 采样和保持电路 .....	177	13.2.3 温度上下限报警电路 .....	200
11.3 数/模转换电路 .....	179	13.2.4 停电和来电报警电路 .....	200
11.3.1 D/A 转换器的基本原理 .....	179	13.3 光控照明电路 .....	201
		13.4 低失真 10W 音频功率放大器 .....	201
		13.5 家电密码开关电路 .....	203
		13.6 彩灯控制电路 .....	204
		13.7 数字钟 .....	205
		13.8 简易镍铜电池充电器 .....	209
		<b>第 14 章 可编程逻辑器件与编程</b>	

<b>技术</b> .....	211	A. 2 电阻器的单位及换算 .....	243
14. 1 PLD 电路的表示方法 .....	211	A. 3 电阻器的标称阻值 .....	243
14. 1. 1 基本的 PLD 结构 .....	211	A. 4 电阻器的额定功率 .....	244
14. 1. 2 可编程只读存储器 .....	213	A. 5 电阻器的规格标识方法 .....	244
14. 1. 3 可编程逻辑阵列 .....	214	A. 6 电位器 .....	245
14. 1. 4 可编程阵列逻辑器件 .....	215	附录 B 电容器 .....	246
14. 1. 5 通用逻辑阵列 .....	216	B. 1 电容器的分类及型号命名方法 .....	246
14. 1. 6 现场可编程门阵列 .....	217	B. 2 电容器的单位及换算 .....	248
14. 1. 7 在系统可编程逻辑器件 .....	218	B. 3 电容器的标称容值 .....	248
14. 2 可编程逻辑器件的设计 .....	219	B. 4 电容器的额定电压 .....	249
14. 2. 1 可编程逻辑器件的设计流程 .....	219	B. 5 电容器的规格标识方法 .....	249
14. 2. 2 PLD 器件的设计过程 .....	222	附录 C 半导体分立器件 .....	250
习题 .....	223	C. 1 半导体分立器件的命名方法 .....	250
<b>第 15 章 Multisim 9 的初步应用</b> .....	225	C. 2 常用半导体分立器件的管脚 识别 .....	251
15. 1 Multisim 9 的安装及界面简介 .....	225	C. 3 部分常用半导体分立器件 .....	251
15. 1. 1 Multisim 9 的安装 .....	225	附录 D 半导体集成电路 .....	253
15. 1. 2 Multisim 9 的界面简介 .....	225	D. 1 半导体集成电路的命名方法 .....	253
15. 2 Multisim 9 的仿真步骤 .....	227	D. 2 双列直插集成电路管脚目测识别 方法 .....	254
15. 3 Multisim 9 的仿真实例 .....	230	D. 3 常用半导体集成电路 .....	254
附录 .....	242	<b>参考文献</b> .....	256
附录 A 电阻器 .....	242		
A. 1 电阻器的分类及型号命名方法 .....	242		

# 第 1 章 半导体器件的基本知识

半导体器件是电子电路中最基本的组成部分，是电子技术中最基本的知识。本章在简要说明半导体的导电规律以及 PN 结的单向导电特性后，分别介绍了常用半导体器件二极管、稳压管、晶体管的工作特性及主要参数等。此外，对绝缘栅场效应晶体管的结构、工作原理、特性曲线及主要参数也进行了简单介绍。

## 1.1 半导体基本知识

所谓半导体，顾名思义，就是它的导电能力介于导体和绝缘体之间。如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物都是半导体。

下面介绍半导体物质的内部结构和导电机理。

### 1.1.1 本征半导体及其导电特性

纯净的、不含杂质的半导体称为本征半导体。其中锗和硅使用较多，它们都是四价元素，最外层的轨道上有 4 个价电子，图 1-1 是锗和硅的原子结构图。将锗和硅提纯（去掉无用杂质）并形成单晶体后，所有原子基本上整齐排列，硅原子共价键结构如图 1-2 所示。本征半导体一般都具有这种晶体结构，所以也称之为晶体，而晶体管的名称也由此而来。

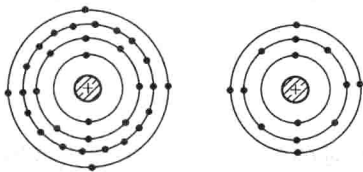


图 1-1 锗和硅的原子结构

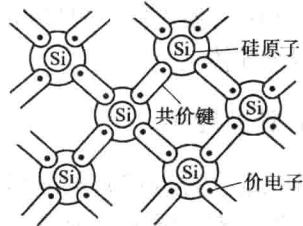


图 1-2 硅原子共价键结构

在本征半导体的晶体结构中，每一个原子与相邻的 4 个原子结合。每一原子的一个价电子与另一原子的一个价电子组成一个电子对。这个电子对是两个相邻原子共有的，它们把相邻的原子结合在一起，构成所谓共价键结构。

在共价键结构中，原子最外层虽然具有 8 个电子而处于较为稳定的状态，但是共价键中的电子并不像绝缘体中的价电子被束缚的那样紧，在获得一定能量（温度增高或受光照）后，即可挣脱原子核的束缚（电子受到激发而常称为热激发），成为自由电子。通常温度愈高，晶体中产生的自由电子数目就愈多。

在某些价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，这种空位称为空穴。在本征半导体中，电子和空穴是成对产生的，因此称为电子-空穴对。另外，原子本来是中性的，但是当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，原子的中性便被改变，形

成正离子而带正电。

有空穴的原子可以吸引相邻原子的价电子来填补这个空穴,称为电子和空穴复合。显然,此时失去了一个价电子的相邻原子的共价键中将会出现一个空穴,而这个空穴也可以由它相邻原子中的价电子来填补,这样又将产生一个空穴,这个过程如图 1-3 所示。在这个过程中,电子的逐次递补就如同空穴向反方向运动一样,因此可认为空穴运动相当于正电荷的运动,即一个空穴相当于一个单位的正电荷。

自由电子和空穴统称为载流子,电子带负电,空穴带正电,它们定向移动都能形成电流。因此,当半导体两端外加电压时,半导体中将出现两部分电流:一部分是自由电子移动所形成的电子电流;另一部分是由电子递补空穴移动所形成的空穴电流。同时存在着电子和空穴导电,这是半导体导电方式的最显著的特点。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现、成对复合、不断产生、不断复合。在一定条件下,电子空穴对的总数目也一定,形成一种动态的平衡。本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子,但由于数量极少,导电能力仍然很低。如果在其中掺入微量的杂质(某种元素),这将使掺杂后的半导体(杂质半导体)的导电能力大大增强。另外,半导体还具有热敏性和光敏性。有些半导体对温度的反应特别灵敏,环境温度增高时,它的导电能力要增强很多,利用这种特性可以制作各种热敏元件。有些半导体受到光照时,它的导电能力变得很强,当无光照时,又变得如同绝缘体那样不导电,利用这种特性则可以制作各种光电元件。

因此,半导体具有热敏性、光敏性和掺杂性 3 个主要导电特性。

根据掺入的杂质不同,可以得到不同的杂质半导体。杂质半导体可分为两大类:N 型半导体和 P 型半导体。

### 1.1.2 N 型半导体

在四价元素(硅或锗)的晶体中掺入五价元素(磷或砷等)时,由于掺入的五价元素原子数比四价元素的原子数少很多,因此整个晶体结构基本上不变,只是某些位置上的四价元素原子被五价元素原子取代。而五价元素原子参加共价键结构只需 4 个价电子,那么多余的第五个价电子很容易挣脱原子核束缚而成为自由电子,五价元素原子则成为正离子(见图 1-4)。这样半导体中的自由电子数量将大大增加,自由电子导电成为这种杂质半导体的主要导电方式,故称为电子型半导体或 N 型半导体。在 N 型半导体中,自由电子数目远多于空穴的数目,因此自由电子被称为多数载流子(简称多子),而空穴被称为少数载流子(简称少子)。

### 1.1.3 P 型半导体

在四价元素(硅或锗)的晶体中掺入三价元素(硼或镓等)时,由于掺入的三价元素

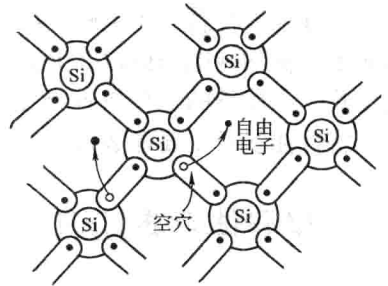


图 1-3 空穴和自由电子的形成

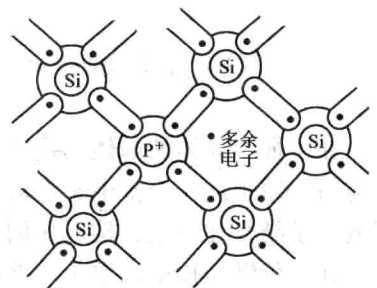


图 1-4 硅晶体中掺磷出现自由电子

原子数比四价元素的原子数少很多，因此整个晶体结构基本上不变，只是某些位置上的四价元素原子被三价元素原子取代。而三价元素原子参加共价键结构只有3个价电子，那么缺少的一个空位就成为空穴（见图1-5）。因此，空穴导电成为这种杂质半导体的主要导电方式，故称它为空穴型半导体或P型半导体。在P型半导体中，空穴数目远多于自由电子的数目，因此空穴被称为多数载流子（简称多子），而自由电子被称为少数载流子（简称少子）。

显然，多数载流子的数目取决于掺杂的多少，而少数载流子的数目取决于热激发，一般情况下温度越高，少数载流子的数目也就越多。应当注意，不论是N型半导体还是P型半导体，虽然它们都有一种载流子占多数，但是考虑到原子核中带电的质子，整个晶体仍是不带电的。

很奇妙的是将不同掺杂类型和浓度的N型杂质半导体和P型半导体用各种方式结合到一起时，能制作出功能各异、品种繁多的半导体器件。

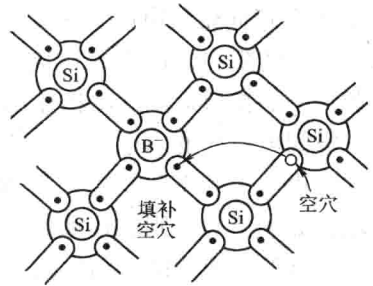


图1-5 硅晶体中掺硼出现空穴

## 1.2 半导体二极管

### 1.2.1 PN结的形成及单向导电特性

#### 1. PN结的形成

当P型半导体和N型半导体连接为一体时，在交界的地方就必然发生由于浓度不均匀分布而引起的多数载流子的扩散运动，如图1-6a所示。由于P区有大量的空穴（浓度大），而N区的空穴较少（浓度小），因此空穴要从浓度大的P区向浓度小的N区扩散，同样N区的自由电子要向P区扩散。在扩散过程中，空穴和电子不断地复合消失，在交界面附近的P区就会留下一些带负电的离子，形成负空间电荷区。在交界面附近的N区留下带正电的离子，形成正空间电荷区。这样，在P型半导体和N型半导体交界面的两侧就形成了一个空间电荷区（或离子层），如图1-6b所示，这个空间电荷区就是PN结。

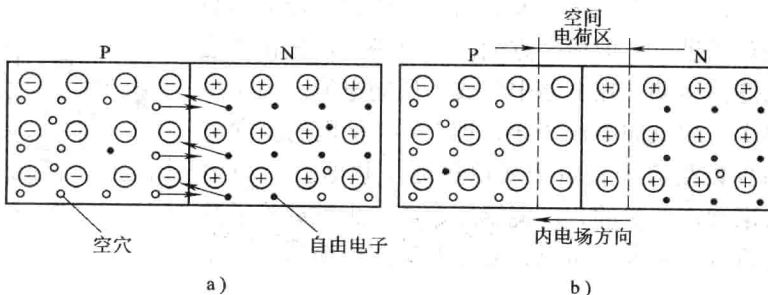


图1-6 PN结的形成

a) 多数载流子的扩散 b) 空间电荷区的形成

形成空间电荷区的正负离子虽然带电，但是它们不能移动，不参与导电，而在这个区域

内载流子极少，所以空间电荷区的电阻率很高。此外，这个区域的多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了，故空间电荷区也叫耗尽层。

PN 结形成后，正负空间电荷在交界面两侧形成一个电场，称为内电场，其方向从带正电的 N 区指向带负电的 P 区，如图 1-6b 所示。由 P 区向 N 区扩散的空穴在空间电荷区将受到内电场的阻力，而由 N 区向 P 区扩散的自由电子也将受到内电场的阻力，即内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，所以空间电荷区又称为阻挡层。

空间电荷区的内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，但内电场对少数载流子（P 区的自由电子和 N 区的空穴）则可推动它们越过空间电荷区，进入对方。少数载流子在内电场的作用下规则的运动称为漂移运动。

在开始形成空间电荷区时，多数载流子的扩散运动占优势。但在扩散运动进行过程中，空间电荷区逐渐加宽，内电场逐步加强，于是，在一定条件下，多数载流子的扩散运动逐渐减弱，而少数载流子的漂移运动则逐渐增强。最后，扩散运动和漂移运动达到动态平衡，也就是 P 区的空穴（多子）向 N 区扩散的数量与 N 区的空穴（少子）向 P 区漂移的数量相等，对自由电子来讲也是这样。达到动态平衡后，空间电荷区的宽度基本上稳定下来，PN 结就处于相对稳定的状态。

### 2. PN 结的单向导电性

如果在 PN 结上加正向电压，即外电源的正极接 P 区，负极接 N 区（见图 1-7）。可见外电场与内电场方向相反，因此扩散与漂移运动的平衡被破坏。

外电场驱使 P 区的空穴进入空间电荷区抵消一部分负空间电荷，同时 N 区的自由电子进入空间电荷区抵消一部分正空间电荷。于是，整个空间电荷区变窄，内电场被削弱，多数载流子的扩散运动加强，形成较大的扩散电流。至于漂移运动，本来就是少数载流子的运动形成的，数量很少，故对总电流的影响可以忽略。所以正向接法的 PN 结为导通状态，耗尽层变窄，呈现的电阻很低。

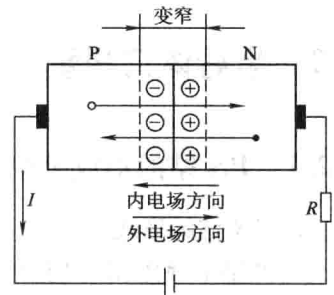


图 1-7 PN 结加正向电压

如果在 PN 结上加反向电压，即外电源正极接 N 区，负极接 P 区，如图 1-8 所示，则外电场与内电场方向一致，也破坏了扩散与漂移运动的平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走，空间电荷区变宽，内电场增强，使多数载流子的扩散运动难以进行。但另一方面，内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动，在电路中形成了反向电流。由于少数载流子数量很少，故反向电流很小，即 PN 结呈现的反向电阻很高。又因为少数载流子是由于获得热能（热激发）价电子挣脱共价键的束缚而产生的，环境温度愈高，少数载流子数量愈多，反向电流也就愈大。所以，温度对反向电流的影响很大。

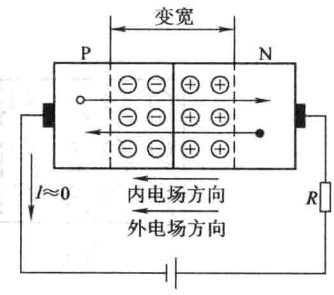


图 1-8 PN 结加反向电压

综上所述，PN 结具有单向导电性，即在 PN 结上加正向电压时，PN 结变窄，电阻很低，两端压降较小，PN 结处于导通状态；加反向电压时，PN 结变厚，电阻很高，反向电流很小（常被忽略不计），PN 结处于截止状态。

### 1.2.2 二极管的基本结构

将PN结加上电极引线和管壳并封装起来,就成为半导体二极管。按结构分,二极管有点接触型和面接触型两类。点接触型二极管的特点是PN结的面积小,因此管子中不允许通过较大的电流,但其高频性能好,适用于高频和小功率的工作。面接触型二极管由于PN结的面积大,故允许流过较大的电流,但只能在较低频率下工作,可用于整流电路。图1-9a示出了一些常见二极管的外形图。图1-9b是二极管的图形符号,其中阳极从P区引出,阴极从N区引出。

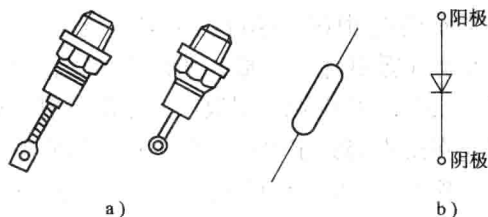


图1-9 半导体二极管的外形及符号

a) 外形图 b) 符号

### 1.2.3 二极管的伏安特性

在二极管的两端加上电压 $U$ ,然后测出流过管子的电流 $I$ ,电流与电压之间的关系曲线 $I=f(U)$ 即是二极管的伏安特性,如图1-10所示。由图可见,当外加正向电压很低时,由于外电场还不能克服PN结内电场对多数载流子扩散运动的阻力,故正向电流很小,几乎为零。当正向电压超过一定数值后,内电场被大大削弱,电流增长很快。这个定值被称为死区电压,其大小与材料及环境温度有关。通常,硅管的死区电压约为0.5V,锗管约为0.2V。管子导通后,正向电流在较大范围内变化时,管子的电压降变化很小,称为管子的导通压降,硅管约为0.6V,锗管约为0.3V。

在二极管上加反向电压时,由于少数载流子的漂移运动,形成很小的反向电流。反向电流有两个特点:一是它受温度影响大,随温度的上升增长很快,二是在温度一定、反向电压不超过某一范围时,反向电流的大小基本不变,而与反向电压的高低无关,故通常称它为反向饱和电流,用符号 $I_S$ 表示。而当外加反向电压过高时,超过 $U_{(BR)}$ 以后,反向电流将急剧增大,这种现象称为击穿, $U_{(BR)}$ 称为反向击穿电压。二极管击穿以后,不再具有单向导电性。

必须说明一点,发生击穿并不意味着二极管被损坏。实际上,当反向击穿时,只要控制反向电流的数值不过大而使二极管过热烧坏,则当反向电压降低时,二极管的性能就可以恢复正常。

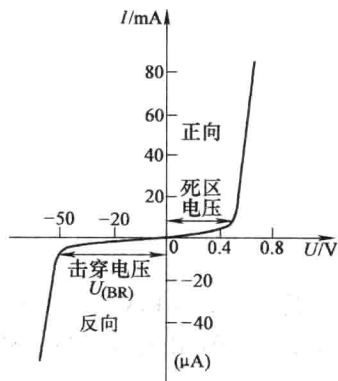


图1-10 2CP10硅二极管的伏安特性

### 1.2.4 二极管的主要参数

电子器件的参数是其特性的定量描述,也是实际工作中根据要求选用器件的主要依据。二极管的主要参数有以下几个:

#### 1. 最大整流电流 $I_F$

$I_F$ 是指二极管长期运行时,允许通过管子的最大正向平均电流。 $I_F$ 的数值是由二极管允许的温升所限定。使用时,管子的平均电流不得超过此值,否则可能使二极管过热而损坏。



### 2. 最高反向工作电压 $U_R$

$U_R$  是指工作时加在二极管两端的反向电压的极限值, 否则二极管可能被击穿。为了留有余地, 通常将击穿电压  $U_{(BR)}$  的一半定为  $U_R$ 。

### 3. 反向电流 $I_R$

$I_R$  系指在室温条件下, 二极管两端加上规定的反向电压时, 流过管子的反向电流值。通常希望  $I_R$  值越小越好。反向电流越小, 说明管子的单向导电性越好。此外, 由于反向电流是由少数载流子形成, 所以  $I_R$  受温度的影响很大。

二极管的应用范围很广, 主要是利用它的单向导电性。它可用于整流、检波、元件保护以及在脉冲与数字电路中作为开关器件等。

**例 1-1** 如图 1-11 所示的限幅电路中, 已知输入电压  $u_i$  的波形, 试画出输出电压  $u_o$  的波形, 二极管正向电阻忽略不计。

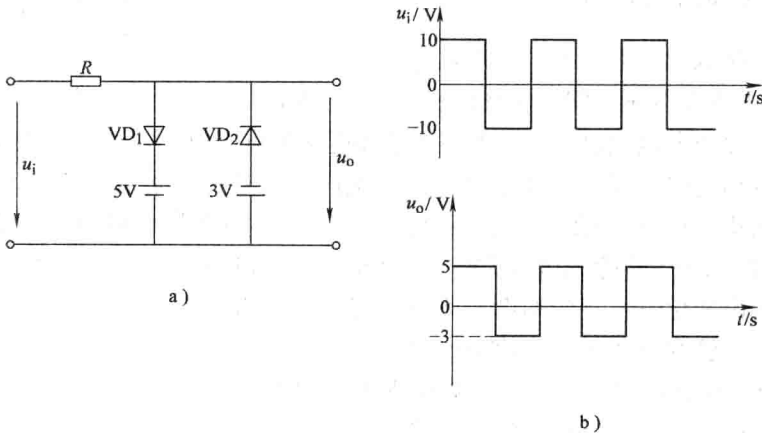


图 1-11 例 1-1 的图

a) 电路图 b) 输入输出波形图

**解:** 当  $u_i = 10V$  时,  $VD_1$  导通,  $VD_2$  截止, 输出  $u_o = 5V$ ; 当  $u_i = -10V$  时,  $VD_1$  截止,  $VD_2$  导通, 输出  $u_o = -3V$ ; 输出波形如图 1-11 所示。

### 1.2.5 稳压二极管

稳压管是一种特殊的面接触型半导体硅二极管。由于它在电路中与适当数值的电阻配合后能起稳定电压的作用, 故称为稳压管, 其表示符号、外形图和伏安特性如图 1-12 所示。

稳压管工作于反向击穿区。从反向特性上可以看出, 反向电压在一定范围内变化时, 反向电流很小。当反向电压增高到击穿电压时, 反向电流突然剧增, 稳压管反向击穿。此后, 电流虽然在很大范围内变化, 但稳压

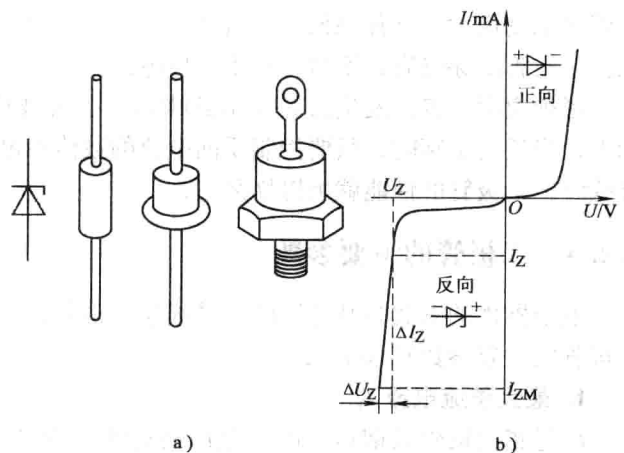


图 1-12 稳压管的符号和伏安特性

a) 符号及外形 b) 伏安特性