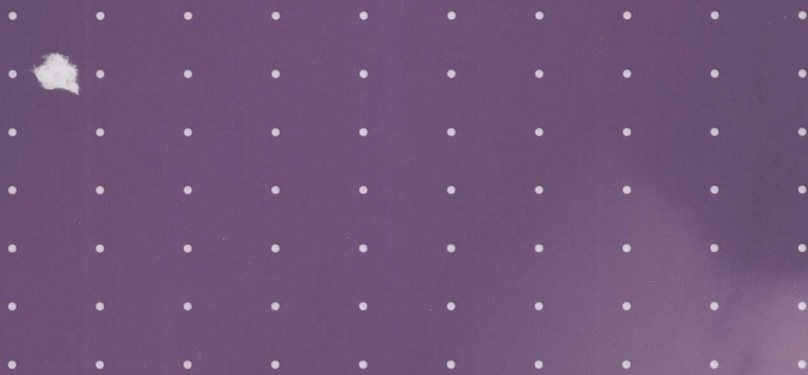


教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

# 电 工 学 (下册)

## ——电子技术

■ 雷 勇 主编 宋黎明 副主编



1544775

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材



# 电 工 学 (下册)

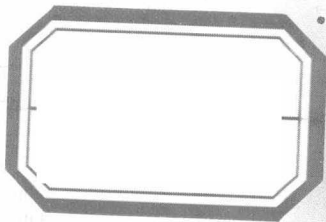
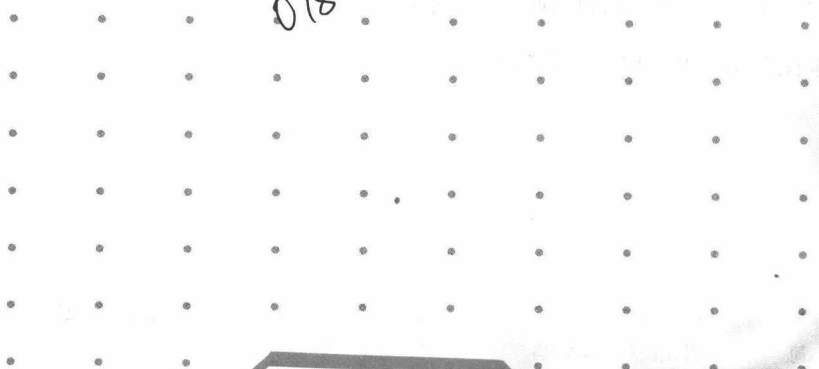
DIANGONGXUE

## ——电子技术

■ 雷 勇 主编 宋黎明 副主编

DIANZI JISHU

TM1  
078-2



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书是按照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的“电工学”课程教学基本要求编写的。本书包含模拟电子技术和数字电子技术两大部分,共分为11章,包含电子系统简介、二极管和直流电源、双极型晶体管及其应用、场效应晶体管及其应用、集成运算放大器及其应用、电子电路中的反馈和振荡电路、数字逻辑电路基础、组合逻辑电路、时序电路、CPLD/FPGA基础和测试系统设计等内容。

本书可作为高等学校非电类专业“电工学”课程的教材,也可供有关技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

电工学.下册,电子技术 / 雷勇主编. -- 北京 :  
高等教育出版社, 2013. 1  
ISBN 978-7-04-036522-1

I. ①电… II. ①雷… III. ①电工学-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第285578号

策划编辑 金春英      责任编辑 杨希      封面设计 于文燕      版式设计 王艳红  
插图绘制 尹莉      责任校对 李大鹏      责任印制 韩刚

---

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
邮政编码	100120		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
印刷	高教社(天津)印务有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
开本	787mm×1092mm 1/16		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
印张	17.25	版次	2013年1月第1版
字数	420千字	印次	2013年1月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定价	25.50元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 36522-00

# 前 言

本教材是参照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的高等学校“电工学”课程教学基本要求,为高等学校非电类各专业编写的电子技术基础教材。作者结合多年的教学经验及教学改革成果和“电工学”精品课程建设内容,从优化课程结构的总体要求出发,注重教材的适用性,并充分考虑到非电类学生学习电工电子技术的实际情况及教学特点,特别注重调动学生的学习积极性。

本教材主要阐述电子技术必要的基本理论、基本知识和基本技能,全书共分 11 章,包括电子系统简介、二极管和直流电源、双极型晶体管及其应用、场效应晶体管及其应用、集成运算放大器及其应用、电子电路中的反馈和振荡电路、数字逻辑电路基础、组合逻辑电路、时序电路、CPLD/FPGA 基础和测试系统设计。

本教材每章在一个电子电路或系统的层次上展开问题,调动学生求知的兴趣。以电子设备或系统为核心,通过对电子设备或系统各部分的总体功能介绍,逐步细化到各个电子器件的基本概念和基本应用,从而使学生知道自己的学习目的,充分调动学生的学习主动性。考虑到非电类学生的学习要求,在细化的过程中,着重于总体概念,不求详细的理论推导,以使学生对电子设备或系统有相应的认识。如数字电路部分,注重外部逻辑功能的描述和分析,强调外特性和重要参数,不讲内部电路。这样组织内容的目的是用较少的时间让学生了解更多数字电路的概念和分析方法。

本教材在写作风格上,进一步理顺教学内容,突出教学实用性,便于自学。适度增删,突出教学重点和工程实用性。在例题与习题中,增加大量的工程实例,题图中,采用一些实物照片或实物简图,便于学生了解工程实际。

针对非电类学生的特点,在培养时既要掌握一定的基础理论知识,具有较宽的知识面,又要注重掌握新技术,适应发展。本教材具有知识面自顶向下,从大到小,模块化的特点,结合丰富具体的工程应用,使得该教材能较好地解决基础与应用、理论与实践、现状与发展、点线面之间的矛盾,使课程内容体系具有系统性、科学性、先进性、实用性。

“电工学”(含“电工技术基础”、“电子技术基础”)是为非电类专业学生讲授电工电子技术的理论和应用的基础课程。一方面由于这些专业、教学计划所能提供的学时有限,用电知识还不是这些专业所必需的专业基础知识。另一方面,非电专业学生研究分析与思考问题的思路和方法可能与电专业有很大不同,侧重于从宏观、全面来观察分析。因此,按照传统的电工学内容与要求进行教学,往往难以取得好的效果。

我们认为“电工学”课程的特点应该是:知识面宽,侧重于原理应用。重点在概貌性,原理性,知识性,先进性,应用性,普及性。本教材在系统结构及叙述方法上应尽可能做到把理论与实际用电设备及用电系统的介绍结合在一起,尽可能多的介绍一些实例以增加学习兴趣,在文字方面力求通俗易懂,深入浅出,避免采用过分浓缩的方法压缩字数,避免衔接上的不协调。

本教材由四川大学雷勇主编,负责全书的组织、统稿和定稿;宋黎明、张行、梁斌、徐雪梅参与

编写。其中,第1、5章由雷勇编写,第2、6章由梁斌编写,第3、8章由宋黎明编写,第7、9章由徐雪梅编写,第4、10章由张行编写,第11章由雷勇和翁嫣琬共同编写。

本教材承华南理工大学殷瑞祥教授认真地审阅。殷教授对全书的体系结构、内容等方面给予了悉心指导,提出了许多宝贵意见和修改建议,谨致以衷心谢意。

由于编者能力有限,加之时间比较仓促,书中难免有错误和不妥当之处,殷切希望使用本书的师生和其他读者积极地提出批评和改进意见,以便今后修订提高。编者邮箱:yong.lei@163.com。

编 者

2012年11月于四川大学

# 目 录

第 1 章 电子系统简介	1	3.3 放大电路的分析方法	37
1.1 电子系统	1	3.3.1 放大电路的电压放大作用	37
1.2 电子系统组成框图	1	3.3.2 直流通路和交流通路	38
1.3 电子技术及其发展概述	2	3.3.3 放大电路的静态分析	39
第 2 章 二极管和直流电源	5	3.3.4 放大电路的动态分析	41
2.0 引言	5	3.4 放大电路静态工作点的 稳定问题	47
2.1 二极管	6	3.4.1 静态工作点稳定的必要性	48
2.1.1 半导体基础知识	6	3.4.2 静态工作点稳定电路	48
2.1.2 PN 结及其单向导电性	7	3.5 放大电路的频率响应	51
2.1.3 二极管	8	3.6 射极输出器	53
2.2 稳压管	10	3.6.1 静态分析	53
2.2.1 稳压管的常用参数	10	3.6.2 动态分析	53
2.2.2 稳压管的基本电路	10	3.7 多级放大电路	56
2.3 直流稳压电源	12	3.7.1 多级放大电路的耦合方式	56
2.3.1 整流电路	12	3.7.2 多级放大电路的动态分析	59
2.3.2 滤波电路	16	3.8 差分放大电路	61
2.3.3 稳压电路	20	3.8.1 差分放大电路的工作原理	61
小结	22	3.8.2 差分放大电路对差模信号的 分析	63
习题	23	3.8.3 差分放大电路的共模放大倍数和 共模抑制比	64
第 3 章 双极型晶体管及其应用	26	3.8.4 差分放大电路的输入—输出方式	65
3.0 实例	26	3.9 功率放大电路	66
3.1 双极型晶体管的放大作用	27	3.9.1 对功率放大电路的基本要求	66
3.1.1 晶体管的基本结构	27	3.9.2 功率放大电路的工作状态	67
3.1.2 晶体管的电流放大作用	28	3.9.3 互补对称放大电路	68
3.1.3 晶体管的共射特性曲线	29	3.9.4 集成功率放大电路	70
3.1.4 晶体管的主要参数	31	小结	71
3.1.5 光电晶体管	33	习题	72
3.2 基本共射极放大电路的组成及 各元件的作用	34	第 4 章 场效应晶体管及其应用	77
3.2.1 放大的概念	34	4.0 引例	77
3.2.2 放大电路的性能指标	35	4.1 绝缘栅场效应晶体管概述	79
3.2.3 基本共射极放大电路的组成及 各元件的作用	36		

4.1.1 增强型绝缘栅场效应晶体管	79	6.1 反馈的基本概念	121
4.1.2 耗尽型绝缘栅场效应晶体管	80	6.1.1 什么是反馈	121
4.2 场效应晶体管的分类	82	6.1.2 反馈的分类及判别	121
4.3 场效应晶体管放大器	84	6.1.3 负反馈放大电路的四种组态	123
4.3.1 静态工作点的确定	85	6.2 放大电路中的负反馈	126
4.3.2 小信号模型分析法	86	6.2.1 负反馈对放大电路性能的影响	126
4.4 MOS 场效应晶体管开关电路	91	6.2.2 直流稳压电源中的负反馈	129
4.4.1 MOS 管的开关作用	91	6.3 振荡电路	131
4.4.2 MOS 管的开关特性	92	6.3.1 自激振荡	131
小结	92	6.3.2 正弦波振荡电路	131
习题	93	小结	133
<b>第 5 章 集成运算放大器及其应用</b>	<b>95</b>	习题	134
5.0 实例	95	<b>第 7 章 数字逻辑电路基础</b>	<b>137</b>
5.1 集成运算放大器的简单介绍	96	7.1 模拟信号与数字信号	137
5.1.1 集成运算放大器的组成	96	7.2 数制与数制转换	137
5.1.2 集成运算放大器的主要参数及 基本特点	96	7.2.1 数制	137
5.1.3 理想运算放大器的电路分析	98	7.2.2 二进制数的计算	138
5.2 运算放大器在信号运算方面的 应用	99	7.3 二进制代码	139
5.2.1 比例运算	99	7.4 逻辑代数	140
5.2.2 加法运算	101	7.4.1 基本逻辑	140
5.2.3 减法运算	101	7.4.2 逻辑代数的运算法则	141
5.2.4 积分运算	102	7.5 逻辑函数的代数变换及化简	143
5.2.5 微分运算	103	7.5.1 代数法化简	143
5.3 运算放大器在信号处理方面的 应用	105	7.5.2 卡诺图化简	145
5.3.1 有源滤波	105	小结	149
5.3.2 采样保持电路	107	习题	149
5.3.3 电压比较器	108	<b>第 8 章 组合逻辑电路</b>	<b>151</b>
5.3.4 波形发生器	111	8.0 引例	151
5.4 运算放大器应用设计	113	8.1 门电路	151
5.4.1 运算放大器使用技巧	113	8.1.1 基本门电路及其组合	152
5.4.2 运算放大器设计方法	115	8.1.2 TTL 门电路	156
小结	117	8.1.3 CMOS 门电路	160
习题	117	8.2 逻辑函数的表示方法及其转换	162
<b>第 6 章 电子电路中的反馈和振荡电路</b>	<b>120</b>	8.2.1 逻辑函数的表示方法	162
6.0 引言	120	8.2.2 逻辑函数表示方法之间的转换	164
		8.3 组合逻辑电路的分析与设计	166
		8.3.1 组合逻辑电路的分析	166
		8.3.2 组合逻辑电路的设计	169

8.4 常用组合逻辑电路 .....	172	习题 .....	221
8.4.1 加法器 .....	172	<b>第 10 章 CPLD/FPGA 基础</b> .....	225
8.4.2 编码器 .....	174	10.1 发展及概述 .....	225
8.4.3 译码器和显示输出 .....	177	10.2 结构和原理 .....	231
8.4.4 数据分配器和数据选择器 .....	182	10.2.1 基于乘积项的原理与结构 .....	231
小结 .....	184	10.2.2 基于查找表的原理与结构 .....	234
习题 .....	185	10.2.3 CPLD/FPGA 逻辑实现 .....	237
<b>第 9 章 时序电路</b> .....	190	10.3 CPLD/FPGA 的开发设计	
9.0 引言 .....	190	基础 .....	237
9.1 双稳态触发器 .....	192	小结 .....	240
9.1.1 双稳态触发器的概念及逻辑功能 .....	192	习题 .....	240
9.1.2 双稳态触发器的转换 .....	200	<b>第 11 章 测试系统设计</b> .....	241
9.2 寄存器 .....	201	11.0 实例 .....	241
9.2.1 寄存器的概念及逻辑功能 .....	201	11.1 测量系统和传感器 .....	242
9.2.2 寄存器的种类 .....	202	11.2 测量系统接地、接线和噪声 .....	243
9.3 计数器 .....	204	11.2.1 测量系统接地 .....	243
9.3.1 二进制计数器 .....	204	11.2.2 测量系统接线 .....	245
9.3.2 二—十进制计数器 .....	207	11.2.3 测量系统噪声与干扰 .....	247
9.3.3 用集成计数器构成任意进制		11.3 信号调理 .....	249
计数器 .....	211	11.4 模数和数模转换 .....	250
9.3.4 环形计数器和环形分配器 .....	213	11.4.1 模数转换器 ADC .....	250
9.4 单稳态触发器和振荡电路 .....	215	11.4.2 数模转换器 DAC .....	254
9.4.1 单稳态触发器的概念及 555		11.5 数字化数据的传输 .....	259
定时器 .....	215	小结 .....	263
9.4.2 由 555 定时器构成的电路 .....	217	习题 .....	263
小结 .....	221	<b>参考文献</b> .....	264



# 第 1 章 电子系统简介

实际电路系统主要有电力系统和电子系统两大类。

电力系统的主要作用是实现电能的生产、变换、传输、分配和使用。电子系统则是由电子电路和传输介质组成的、完成特定功能的整体。电子系统的主要作用是实现电信号的产生、获取、放大、变换、传输、识别和应用等功能(或部分功能),处理的对象是电信号。本书主要讨论电子元件、电子电路以及由此构成的电子系统。

## 1.1 电子系统

电子电路是由电子元件组成的、实现特定功能的电路。电子系统则是由电子电路和传输介质组成的、完成特定功能的整体。电子系统处理的对象是电信号。

信号是随时间变化的某种物理量,是信息的表现形式与传送载体。例如,体温反映人的健康信息,体温 37℃ 表示健康,38℃ 表示略有小疾。

一般情况下,用电子系统处理电信号(电压或电流)比其他方式(如机械方式)容易、成本低和可靠性高,故通常将各种非电信号转换为电信号再进行处理。

因此,电子系统成为信息化社会的物质基础,例如通信系统、多媒体系统、计算机系统和工业控制系统等。例如,有线扩音系统如图 1.1.1 所示。

图 1.1.1 中:

麦克风(或拾音器):将声音信号转换为电压或电流信号,是电子系统实际的信号源之一。

音频放大器:实现电压和功率放大的电子电路,是扩音系统的核心。

扬声器:将电信号还原为原始的声音信号的部件,去影响物理世界。通常用电阻模拟,作为电子系统的负载。

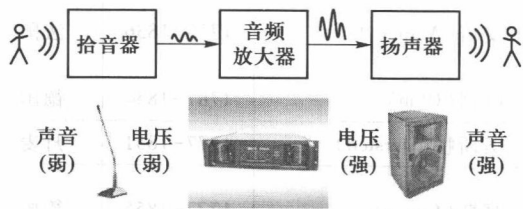


图 1.1.1 有线扩音系统

## 1.2 电子系统组成框图

电子系统是由若干互相连接和相互作用的基本电子电路组成的、实现特定功能的电路整体。电子系统的主要作用是实现电信号的产生、获取、放大、变换、传输、识别和应用等功能(或部分功能),处理的对象是电信号。电子系统组成框图如图 1.2.1 所示。

传感器:将工程实际涉及的某些物理量转换为电信号。为了避免对物理量的影响,传感器摄

取的能量很小,输出的电信号很弱(如微伏级或毫伏级的电压),且信号伴随着噪声信号。

**信号预处理:**包括信号幅度的放大和滤除干扰及噪声信号。

**信号处理操作:**包括对信号的放大,运算(加法、减法、乘法、积分和微分等),各种函数变换,频谱变换,逻辑运算等。理论上,各种信号处理操作都可以用模拟或数字方式实现。

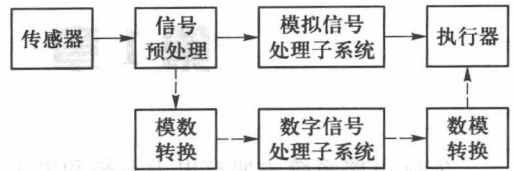


图 1.2.1 电子系统组成框图

**执行器:**将电信号还原成某种物理量,实现对工程实际的某种操作。

### 1.3 电子技术及其发展概述

电子学或电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学和技术。

电子器件是利用电子在真空或半导体中的运动规律构成特定功能的器件。目前,半导体器件是电子器件的主体,包括二极管、晶体管、集成电路等。

电子电路广泛地应用于通信、计算机、自动控制、广播电视、遥感和遥测等工程中,形成相对独立的电子工程体系。

电气工程和电子工程的诞生归功于许多科学巨人的开创性的研究成果,见表 1.3.1。

表 1.3.1 电子、电气工程开创性研究成果

姓名	出生	国籍	成果
库伦(Coulomb)	1736-1806	法国	库仑定律,使电磁学的研究从定性进入定量阶段
安培(Ampere)	1775-1836	法国	安培定律、安培定则和分子电流等,著书《电动力学现象的数学理论》
欧姆(Ohm)	1787-1854	德国	在《金属导电定律的测定》这一论文中论述了欧姆定律
奥斯特(Oersted)	1777-1851	丹麦	电流磁效应
高斯(Gauss)	1777-1855	德国	发明了磁强计,第一个电话电报系统;在数学方面有巨大的贡献
法拉第(Faraday)	1791-1867	英国	磁电感应
亨利(Henry)	1797-1878	美国	发现自感现象;研究电磁中继理论,是电报的基础
麦克斯韦(Maxwell)	1831-1879	英国	麦克斯韦方程,提出了统一的电磁理论,预测了电磁波可以在空间中传播,光是一种电磁波
赫兹(Hertz)	1857-1894	德国	用火花间隙振荡器产生了电磁波(赫兹波),证实了麦克斯韦的预测
马可尼(Marconi)	1874-1937	意大利	成功地发射赫兹波,并在 2 英里外检测到赫兹波,无线电报初露端倪
洛伦兹(Lorentz)	1853-1928	荷兰	假定了电子存在

续表

姓名	出生	国籍	成果
汤普森(Thompson)	1856-1940	英国	通过实验发现了电子
弗莱明(Fleming)	1849-1945	英国	发明了真空电子二极管(diode),用于检测微弱的无线电信号(电磁波)
福雷斯特(Forest)	1873-1961	美国	发明了具有放大作用的真空电子三极管

此后的近半个世纪,真空电子器件在无线电通信中得到广泛的应用,并逐渐扩展到无线电广播、电视和计算机等工程领域。

世界上第一台数字电子计算机于1946年在美国研制成功,IBM公司将其取名为ENIAC(Electronic Numerical Integrator and Calculator)。这台计算机使用了18 800个电子管,占地170 m<sup>2</sup>,重达30 t,耗电140 kW,价格40多万美元。ENIAC每秒可进行5 000次加法和减法运算,把计算一条弹道的时间缩短为30 s。ENIAC服役长达9年。

1947年底美国贝尔实验室的肖克莱(Shockley, 1910-1989)、布拉顿(Brattain, 1902-1987)、巴丁(Bardeen, 1908-1991)发明了晶体管,他们三人也因为发明晶体管而荣获1956年的诺贝尔物理学奖。

电子管制造复杂,成本高,体积大,耗电多。在大多数领域中电子管已逐渐被晶体管取代,真空管时代结束,晶体管时代诞生。

在1958年,美国诺伊斯(Noyce, 1927-1990)与基尔比(Kilby, 1923-2005)间隔数月分别发明了集成电路(Integrated Chip, IC),标志着电子技术发展到了一个新的阶段——微电子技术时代(Microelectronics)。基尔比也因为发明集成电路而在2000年荣获诺贝尔物理学奖。

集成电路技术是通过一系列特定的加工工艺,将电子电路“集成制造”在一块半导体晶片上,执行特定的电路或系统功能。集成电路实现了材料、元件、电路三者之间的统一。

集成电路具有如下优点:成本低、功耗小、工作速度快、可靠性高、体积小。

微电子技术是信息社会的基石。实现信息化的网络及其关键部件(无论是各种计算机还是通信电子装备)都是以集成电路为基础的。

传统的产业只要与微电子技术结合,用集成电路芯片进行智能化改造,就会使传统产业重新焕发青春。集成电路制造技术的发展日新月异,其中最具有代表性的集成电路芯片主要包括以下几类:微控制芯片(MCU)、可编程逻辑器件(PLD)、数字信号处理器(DSP)、大规模存储芯片(RAM/ROM),它们构成了现代数字系统的基石。总之,如同细胞组成人体一样,集成电路芯片已成为现代工农业、国防装备和家庭耐用消费品的细胞。

同时,微电子技术改善了科学研究设备,拓展了人类研究自然界的视野和计算能力,大大促进了先进科学技术的发展。微电子技术与其他学科结合诞生了各种新的技术,比如:

以计算机为工作平台,融合应用电子技术、计算机技术、智能化技术最新成果而研制成的电子CAD通用软件包,主要用来辅助IC设计、电子电路设计和PCB设计;

集微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路、接口电路、通信和电源于一体的完整的微型机电系统(MEMS),是微电子、材料、机械、化学、传感器、自动控制等多学科交叉的产物。在此基础上增加光学部件又产生了微光学电子机械系统;

与生物技术结合,产生生物芯片,它类似于计算机芯片的装置,在几秒钟的时间里,可以进行数以千次计的生物反应,如基因解码等;

从微电子技术到纳米电子器件将是电子器件发展的第二次变革,与从真空管到晶体管的第一次变革相比,它含有更深刻的理论意义和丰富的科技内容。在这次变革中,传统理论将不再适用,需要发展新的理论,并探索出相应的材料和技术。

纳米电子学主要在纳米尺度空间内研究电子、原子和分子运动规律和特性,研究纳米尺度空间内的纳米膜、纳米线。纳米点和纳米点阵构成的基于量子特性的纳米电子器件的电子学功能、特性以及加工组装技术。其性能涉及放大、振荡、脉冲技术、运算处理和读写等基本问题。其新原理主要基于电子的波动性、电子的量子隧道效应、电子能级的不连续性、量子尺寸效应和统计涨落特性等。

随着社会的发展,电子器件的应用已深入到工业生产和社会生活的各个方面,实际的需要必将极大地推动器件的不断创新。微电子学中的超大规模集成电路技术将在电子器件的制作中得到更广泛的应用;具有高载流子迁移率、强的热电传导性以及宽带隙的新型半导体材料的运用将有助于开发新一代高结温、高频率、高动态参数的器件。从结构看,器件将复合型、模块化;从性能看,发展方向将是提高容量和工作频率、降低通态压降、减小驱动功率、改善动态参数和多功能化;可以预见,电子器件的发展将会日新月异,电子器件的未来将充满生机。

## 第 2 章 二极管和直流电源

本章主要介绍二极管 (diode) 这一基本半导体器件的结构和特点,通过齐纳二极管 (zener diode) 和整流二极管 (rectifier diode) 应用电路的分析,扩展出直流电源 (DC power supply) 的相关知识,包括了整流 (rectifier)、滤波 (filter)、稳压 (regulator) 等各组成部分的电路结构和工作原理。

学习目的:

1. 了解二极管的工作原理、性能指标及其主要应用场合;
2. 分析和设计简单的稳压电路;
3. 理解和掌握半波整流电路和桥式整流电路的原理及参数设计;
4. 了解小功率直流稳压电源的基本结构和各组成部分的功能;
5. 识别不同类型的滤波电路,理解其相应的特点;
6. 掌握集成稳压器的使用。

### 2.0 引言

任何电子设备都有一个共同的电路——电源电路,其功能就是提供持续稳定、满足负载要求的电能。在各种电源电路中,直流电源电路的应用最为普遍,几乎涉及我们生活中的方方面面,它的最大特点就是交流电转换为符合要求的直流电压。要实现交直流的转换,目前广泛使用半导体器件来完成,如图 2.0.1 所示即是一个常见的直流电源电路,它通过 1N4001 整流二极管实现交流到直流的转换。因此介绍直流电源电路前,需要对半导体材料及其基本元件二极管有一定的基本认识。

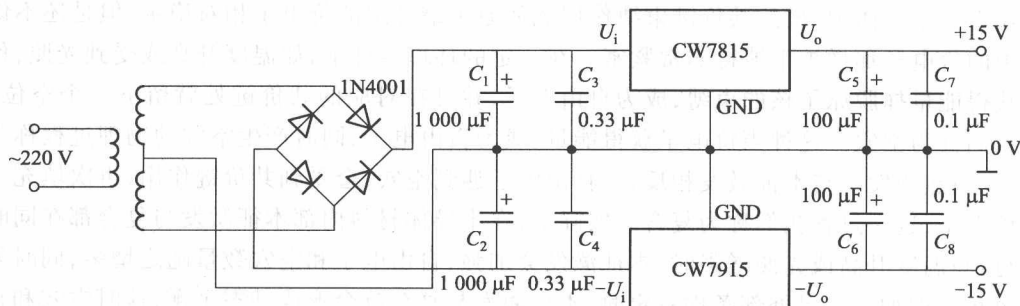


图 2.0.1 输出  $\pm 15\text{ V}$  的直流电源电路

## 2.1 二极管

### 2.1.1 半导体基础知识

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、硒等材料都是半导体。半导体材料之所以能得到广泛的应用,并不仅仅是因为它的导电率与导体和绝缘体不同,而是由于它具有一些其他物质不具备的独特导电性能。例如,在纯净的半导体中掺入某种特定的微量元素后,其导电能力可以增加很多,这就是半导体材料的掺杂特性;而当半导体受到外界光和热的激励时,其导电能力也会显著变化,即所谓的热敏和光敏特性。要理解半导体的这些特性,需要先了解其内部结构及导电机理。

硅和锗是最常见的半导体材料,下面我们以硅材料为例分析。硅的原子结构如图 2.1.1 所示。

硅是四价元素,其原子核最外层有四个价电子。纯净的硅材料具有晶体结构,其原子有序排列,相邻原子间由共价键紧密连接,形成一种相对稳定的共价键结构,如图 2.1.2 所示。这种完全纯净、结构完整的半导体称为本征半导体。

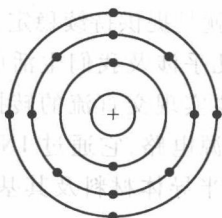


图 2.1.1 硅原子结构示意图

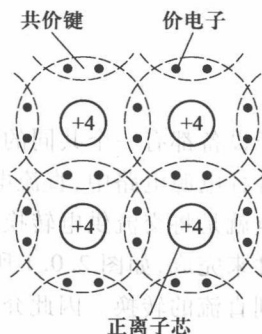


图 2.1.2 硅晶体的共价键结构

在本征半导体中,虽然共价键束缚作用能使原子最外层的价电子相对稳定,但是还不像在绝缘体中的价电子那样被束缚得非常紧密。在一定的环境条件下,如温度升高或受到光照,价电子即可获得能量挣脱原子核的束缚,成为自由电子,并且在对应的共价键处就留下一个空位,这个空位我们称为空穴。这种当价电子获得能量,成为自由电子,同时产生空穴的物理过程称为本征激发,也叫热激发。与本征激发相反,当自由电子遇到空穴,会受到共价键作用,再次填充空穴而变为价电子,这一过程我们称为复合。实际上,在半导体材料内部本征激发与复合都在同时不断的进行:当温度升高或光照增强时,本征激发会加强,自由电子和空穴数量随之增多,同时复合的概率也相应增加。如果外部条件一定时,本征激发与复合就会形成动态平衡,这时空穴和自由电子的数量将维持在一个稳定的水平。

空穴携带正电荷,而自由电子携带负电荷,它们称为载流子。在外加电场的作用下,半导体中的载流子定向移动形成了电流,其中包括了电子电流和空穴电流。电子电流由携带负电荷量

的自由电子定向移动产生,而空穴电流由携带正电荷量的空穴定向移动产生。实际上,原子携带的空穴本身并不能移动,只是在外加电场的作用下,相邻原子的价电子会递补这个空穴,让空穴出现在相邻原子的附近,如此连续不断的递补,就好像空穴发生了定向运动。

在本征半导体中,自由电子和空穴由本征激发形成,通常其浓度很低,因此本征半导体导电能力很弱。可是,向本征半导体中掺入某种微量元素,形成杂质半导体,其导电性能就会显著改变。按掺入杂质类型的不同,杂质半导体可分为电子(N)型半导体和空穴(P)型半导体两大类。在四价元素硅晶体中掺入少量的五价杂质元素,如磷、锑、砷等,因为杂质原子(有5个价电子)与周围硅原子(有4个价电子)形成共价键结构时,会多出一个电子,这个电子没有共价键的束缚,很容易摆脱原子核的吸引成为自由电子,而失去电子的五价杂质原子则成为正离子。掺入五价杂质后的半导体中自由电子浓度会远远高于空穴的浓度,自由电子成为多数载流子(简称多子),而空穴则为少数载流子(简称少子)。这类半导体的导电能力主要由多数载流子(自由电子)提供,故称其为电子型半导体,或N型半导体。

同样,在纯净硅晶体中掺入三价杂质元素,如硼等。只有3个价电子硼原子与周围4个价电子的硅原子结合成共价键时,因缺少一个价电子,会产生出一个空位,形成空穴。因此,这类半导体中空穴的数量会远远大于自由电子的数量,其主要依靠空穴导电,故称为空穴型半导体,或P型半导体。在P型半导体中的空穴为多子,而自由电子为少子。形成杂质半导体时,掺入杂质的浓度越高,多子的浓度就越高,其导电能力也越强。

### 2.1.2 PN结及其单向导电性

使用一定掺杂工艺在同一个纯净半导体晶体材料的两个区域分别注入三价和五价杂质元素,会形成相邻的P型半导体区域(简称P区)和N型半导体区域(简称N区)。P区和N区中同类型载流子存在浓度的差别,P区内空穴浓度高,而N区内自由电子浓度高。在P区和N区的交界处,载流子由浓度高的区域向浓度低的区域扩散:P区内多数载流子空穴会向N区扩散,留下了带负电的杂质离子;N区的多数载流子自由电子向P区扩散,填补P区的空穴,留下了带正电的杂质离子。由于物质结构的关系,这些带电杂质离子不能任意移动,在P区和N区的交界面附近,形成了一层很薄的空间电荷区,这就是所谓的PN结(如图2.1.3所示)。带电杂质离子在PN结处形成方向由N区指向P区的电场,称为内电场。内电场会阻止P区和N区的多数载流子相互扩散,同时也促进其少数载流子向对方做漂移运动。当载流子的相互扩散和漂移达到动态平衡时,PN结的宽度处于稳定状态。

在PN结上加正向电压,即电源正极接P区,负极接N区时,PN结处于正向偏置状态(如图2.1.4(a)所示)。这时,外加电场与PN结内电场方向相反,会削弱内电场的作用(即促进多子的扩散运动)。如果外加电场强于内电场,P区的多数载流子空穴和N区的多数载流子自由电子就可以在外电场作用下顺利通过PN结定向移动,形成了正向偏置电流。此时主要由多数载流子参与导电,电流较大,PN结呈现低电阻,处于导通状态。

在PN结上加反向电压(如图2.1.4(b)所示),PN结处于反向偏置状态,外加电场与PN

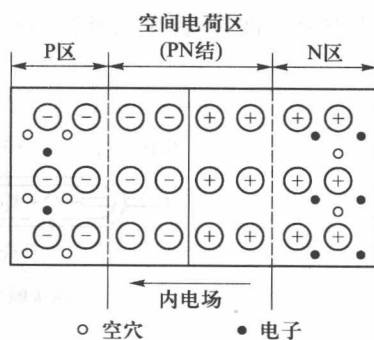


图 2.1.3 PN 结

结内电场方向相同,将进一步阻止多数载流子的扩散运动,促进少数载流子的漂移运动。PN结内部仅有少数载流子在电场作用下定向运动,形成反向偏置电流。此时,由少数载流子参与导电,其数量很少,携带的电荷量也少,形成的反向电流极小,PN结呈现高电阻,处于截止状态。

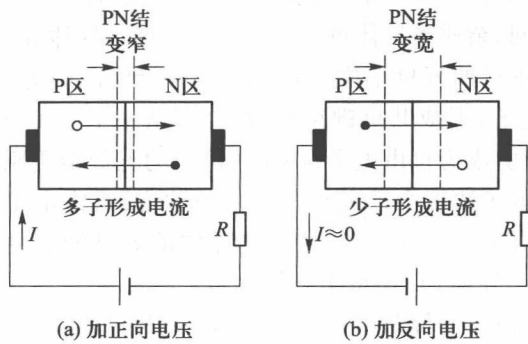


图 2.1.4 PN 结的单向导电性

由此可见,PN 结有单向导电的特性:外加正向偏置电压时,PN 结的电阻很小,处于导通状态;而外加反向偏置电压时,PN 结的电阻很大,处于截止状态。

### 2.1.3 二极管

#### 1. 二极管的结构和类型

二极管由一个 PN 结加上相应的电极引线和管壳封装构成的。从 P 区引出的电极称为阳极,从 N 区引出的电极称为阴极。其符号如图 2.1.5(c) 所示。二极管的种类很多,按照结构和工艺的差别二极管分为点接触型和面接触型等。点接触型二极管由于 PN 结的面积很小,结电容非常小,一般用于高频和小功率的环境,其结构如图 2.1.5(a) 所示;而面接触型 PN 结的面积较大,适用于低频、大电流工作状态,其结构如图 2.1.5(b) 所示。按用途的不同,二极管也可分为整流二极管、稳压二极管、开关二极管、光电二极管等种类。

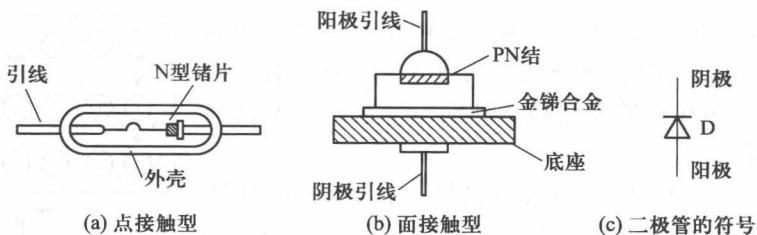


图 2.1.5 二极管的结构及符号

#### 2. 二极管的伏安特性

二极管内部实质就是一个 PN 结,具有单向导电特性。实际的二极管伏安特性如图 2.1.6 所示。



### (1) 正向特性

当二极管承受很低的正向电压时,如图 2.1.6 第①段所示。由于外加电场不足以克服 PN 结内电场对多数载流子运动的阻挡作用,二极管的正向电流很小,接近于零,二极管呈现出一个大电阻状态,这一区段称为死区。随着二极管正偏电压上升,超过一定阈值电压后,PN 结内电场阻挡作用被完全克服,正向电流明显增加。此时随着正向电压的增大,电流迅速增大,二极管的正向电阻变得很小,呈现出正向导通状态,如图 2.1.6 第②段所示。这个克服内电场所需的阈值电压称为死区电压,硅管的死区电压约为 0.5 V,锗管约为 0.1 V。硅管正向导通时的正向管压降一般约为 0.7 V,而锗管约为 0.2 V。

### (2) 反向特性

二极管承受反向电压时,由于只有少数载流子参与导电,形成的反向漏电流接近于零(如图 2.1.6 第③段所示),二极管处于反向截止状态。当反向电压上升超过某一数值时,反向电流急剧增大,这种现象称为反向击穿,反向击穿状态如图 2.1.6 第④段所示。产生反向击穿时加在二极管上的反向电压称为二极管的反向击穿电压  $U_{BR}$ 。

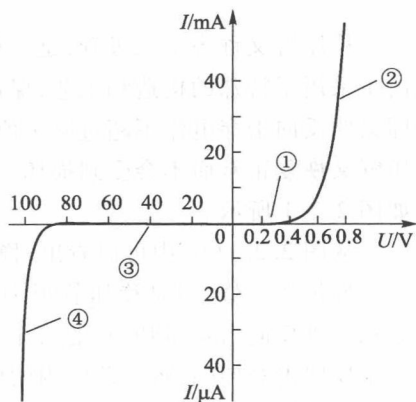


图 2.1.6 硅二极管的伏安特性曲线

## 3. 二极管的常用参数

选择和使用二极管,需要一些性能指标予以衡量,这就是二极管的参数,生产厂商会在产品手册中详细列出。下面是二极管的几个主要参数。

### (1) 最大整流电流 $I_{OM}$

最大整流电流是指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。在选用二极管时,其工作电流不能超过它的最大整流电流。超出这个指标,二极管将因为过热而损坏。例如整流二极管 1N4007,其最大整流电流为 1 A。

### (2) 反向峰值电压 $U_{RWM}$

保证二极管不被反向击穿所能承受的最大反向工作电压。手册中查到的指标均留有裕量,一般为击穿电压的一半,以确保管子安全运行。例如 2CZ52A 型硅二极管的反向峰值电压规定为 25 V,而实际击穿电压可达到 50 V。

### (3) 反向峰值电流 $I_{RM}$

反向峰值电流是指给二极管加反向峰值电压时的反向电流。由于反向电流由本征激发产生的少数载流子形成,因此该指标受温度的影响较大。指标值越小,表明二极管的单向导电性就越好,受温度的影响也越小。硅管的反向电流较小,一般在几微安以下。锗管的反向电流较大,为硅管的几十到几百倍。

## 练习与思考

- 2.1.1 P 型半导体和 N 型半导体是如何形成的? 它们各自的多数载流子和少数载流子是什么?
- 2.1.2 PN 结正向偏置和反向偏置时各有什么特点?
- 2.1.3 如何理解二极管伏安特性中的死区电压和反向击穿电压?
- 2.1.4 温度变化对二极管伏安特性会产生什么影响?