



DI PIN DIAN ZI XIAN LU



- 主编
- 方明昌
- 范嵘嵘
- 主审
- 吴恒泉

低频电子线路

武汉测绘科技大学出版社

低 频 电 子 线 路

主 编
方明昌 范嵘

副 主 编
易培林 胡光华 龚光明

主 审
吴恒泉

编 者
黄淑蓉 林春芳 刘俊 曹天良
魏汉勇 杨培德 吴德余 郭守田

(排名不分先后)

武汉测绘科技大学出版社

〔鄂〕新登字14号

责任编辑：郑建军

封面设计：张 权

低频电子线路

方明昌 范嵘嵘 主编 吴恒泉 主审

武汉测绘科技大学出版社出版发行

（湖北省武汉市珞瑜路39号）

武汉测绘科技大学印刷厂印刷

※

787×1092mm 1/32 17.45印张 446.4千字

1991年6月第一版 1991年6月第1次印刷

ISBN 7-81030-176-4/T·34 印数：0001—6000 定价：7.5元

前 言

本书是参照机电部1991年所拟订的《中等专业学校无线电技术专业〈低频电子线路〉教学大纲》编写的。在编写过程中编者把着眼点放在培养学生分析问题和解决问题的能力上。在教材内容的安排上既考虑到知识的系统性、科学性和实用性，又照顾到学生的认识规律，将难点适当分散，便于读者自学。在内容的叙述上尽量采用通俗的语言、由浅入深地阐明问题，以物理概念为主，尽量减少繁琐的数学演算。

本书根据大纲要求以单元电路为基础，突出集成电路，将分立元件电路分析与集成电路分析有机地结合起来。通过本书的学习，读者能够了解各种常见电子器件的内部机理，掌握其外部特性和参数；掌握各种低频单元电子线路的基本概念、基本原理和基本分析方法，并具备阅读电子线路的基本能力。

根据《低频电子线路教学大纲》的规定，本书教学时数为146学时（不包括实验课和课程设计的教学时数）。

本书作为普通中等专业学校电子类专业《低频电子线路》课程的教材，也可作为函授、职业高中等相应专业的教材，亦可供从事电子技术工作的工程技术人员及业余自学者参考。

本书由武汉铁路运输学校高级讲师方明昌、浙江省电子工业学校高级讲师范嵘嵘主编。由易培林、胡光华、龚光明任副主编。参加编写的还有黄淑蓉、刘俊、吴德余、魏汉勇、曹天良、杨培德、郭守田、林春芳。方明昌负责全书的定稿工作。

本书由湖北省电子工业学校高级讲师吴恒泉主审，并由高级讲师秦裕瑞进行了认真细致的复审，提出了许多宝贵的意见。

本书在编写过程中得到了湖北省电子工业学校、浙江省电子工业学校、河南省电子工业学校、武汉市电子工业学校、沙市市机械电子工业学校、贵州省电子工业学校、贵州无线电工业学校、安徽省电子工业学校、黄石市职业技术教育中心、重庆市电子工业学校、武汉铁路运输学校等校领导的指导和支持。以上各校的有关教师参加了本书的审稿会议，对书稿进行了认真地讨论，提出了宝贵意见。

本书在编写过程中，得到国家机电部教材编审专业指导委员会成员陈继生的热情支持和帮助。

另外，官显华、梁学廉、王诗平、张问鹏、王武梅、魏兰、江立宪等同志为促进本书的编写做了大量具体工作。

我们对上述单位和个人在此一并致谢。

由于编者水平有限、时间仓促、书中存在的缺点和错误，恳请读者批评指正。

编者

1991年7月

绪 论

一、电子技术的发展与应用概况

自古以来,人类一直在寻求以各种方式来实现信息的传递。早在公元前七百余年,我们的祖先曾以烽火台、击鼓鸣钟、信鸽、旗语、驿站等方式来传递信息。在那时,信息的内容和形式都比较简单,信息的传递方式在距离、速度、准确性和可靠性都受到局限。

随着人类实践活动的发展,要求传递信息的内容和形式更为复杂。传递的距离、速度、准确性和可靠性已远远不能满足要求。到19世纪初,1837年英国的莫尔斯(F·B·Morse)发明了电报;1865年英国的麦克斯韦(J·C·Maxwell)在总结前人科技成果的基础上提出了电磁波学说,并于1873年发表了著名的电磁波理论;1876年美国贝尔(A·G·Bell)电话的发明,实现了利用导线来传递信息,即有线电通信。与此同时,人们还致力于研究以电磁波形式在空间传递信息。1887年德国的赫兹(H·Hertz)通过实验证实了麦克斯韦的电磁波理论;1895年意大利的马可尼(M·G·Marconi)和俄国的波波夫(A·C·波波夫)发明了无线电,实现了无线电通信,开辟了无线电技术的新纪元。

在20世纪30年代以前,无线电技术主要在通信方面发展。随后,它的应用范围逐渐扩展为各种性质的信息传递。形成以研究电子元器件和电子线路及其应用技术的新学科,称为电子技术。

电子元器件和电子线路是电子技术所涉及的两大分支,二者相辅相成、互相促进。各类电子元器件的发明,丰富了电子线路的功能和应用;电子线路在实际使用中的性能指标不断提高,又推动电子元器件的改进和更新。

最早的电子器件,是1904年英国的弗莱明发明的真空二极管。经过30多年的不断改进,电子管的类型大大增多,性能不断改善。但是,复杂的电子设备,在设备体积上仍然非常庞大。

1948年发明了晶体管,导致电子技术的一场革命。仅10多年的时间,在很多电子线路和电子设备中,逐渐由半导体器件取代了电子管,使电子设备在小型化、低功耗等方面取得重大的突破。

1962年第一块集成电路问世,使电子技术获得又一次新的飞跃。它把构成一个电子线路的十几或几十个元器件和连线,做在一块几平方毫米的硅片上,称为小规模集成电路。到1966年,已经制成把数百个元器件集成在一起的中规模集成电路。1970年制成了将上千元器件集成在一起的大规模集成电路;1977年又制成了集成十几万个元器件的超大规模集成电路。

通常将电子管称为电子器件的第一代,晶体管为第二代,集成电路为第三代,大规模和超大规模集成电路为第四代。20世纪70年间,差不多每隔10年左右的时间,就出现一种新的器件,相应地更换一代电子产品。可见,电子技术的发展速度之快是十分惊人的。

电子技术在国民经济各部门的应用日益广泛,从尖端科学领域,直到日常生活中的家用电器都离不开电子技术。

在现代科学技术中,先进的科学仪器几乎没有不采用电子技术的。电子计算机的出现,给计算技术和工业自动化等开辟了新的前景。电子技术与其他工业相结合,实现了能量转

换、检测、数据运算和处理，开发了一系列新产品，产生了许多全电子产品，成本也不断降低。电子技术应用于交通管理，不仅可以改善车站、码头、机场的调度能力，而且可以大大提高运输系统管理自动化。电子技术应用于农业，可实现种子处理、农机作业、农产品存储等自动化。在国防上，应用电子技术，研制了核武器、导弹、人造卫星，实施电子侦察和电子干扰，建立以电子计算机为核心的通信情报网。因此，在科技领域和国民经济各部门中，大至天文地理、小至物质结构；从细胞、遗传问题到日常的工农业生产、国防建设，几乎已找不到没有电子技术应用的领域，它正在起着越来越重要的作用。

二、本课程的性质和任务

《低频电子线路》是中专无线电技术专业的主要专业基础课之一，也是电子技术入门的技术基础课。

电子线路是指利用电子元器件加以组合，用来实现电信号的产生、传输和处理的电路。电信号是指含有信息，随时间变化的电流和电压。按信号特征不同，可分为模拟信号和数字信号二类：模拟信号是指随时间连续变化的信号；数字信号是指随时间断续变化的信号。相应的，将产生、传输和处理模拟信号的电路，称为模拟电子线路；将产生、传输和处理数字信号的电路，称为脉冲与数字电子线路。本课程所涉及的电子线路是属模拟电子线路范畴。

所谓“低频”，是相对于“高频”而言，很难划分一个非常明确的界线。习惯上，“低频”是指电子线路工作于较低的频率范围。在此频率范围内，元器件的频率参数和分布参数对电子线路的工作影响较小，基本上可忽略不考虑。与此相反，当元器件的频率参数和分布参数对电子线路的工作影响较大，已不可忽略的频率范围，称之为“高频”。当然，也有按电子线路工作频率的高低，或按电子设备中电子线路所处位置来区别“低频”或“高频”的。

可见，本课程是研究电子器件及其在低频范围内应用的模拟电子线路。

本课程的任务，是使学生通过学习了解各种常用电子器件的内部机理，掌握其外部特性、参数和使用；掌握各种低频单元电子线路的基本概念、基本原理和基本分析方法；培养一定的工程估算能力、分析问题和解决问题的能力，并结合实验课和生产实习，培养学生电子技术的实践能力和测试技术。

三、本课程的内容、特点和学习方法

本课程的主要内容：第一章为本课程的基础知识部份。介绍了半导体器件的物理基础，讨论了晶体二、三极管的内部结构、外部特性、参数及使用。

第二章为放大电路基础。阐述基本放大器的基本概念、基本原理和基本分析方法；还介绍了场效应管的导电机理及其放大电路。本章是其他电子线路的基础，是本书重要的一章。

第四章阐述了负反馈的基本概念、负反馈类型的判别、负反馈对放大器性能的影响。

第五章为放大器的频率响应与稳定性。讨论了晶体管的频率参数、放大器的频率特性，介绍了展宽放大器通频带的方法；还讨论了造成放大器不稳定的原因和提高稳定性的方法。

第三、六章阐述了集成运算放大器的组成、特点、参数及使用知识；讨论了基本运算放大器的工作原理及其典型应用。由于集成电路发展迅速，应用范围日趋广泛，因此本章也是

全书的重点。

第七、八章阐述了低频功率放大器和直流稳压电源。讨论了这些基本单元电路的特点、工作原理和工程上分析、计算的方法。

在分立元件构成的电子线路和集成电路构成的电子线路关系上，集成电路的应用范围迅速扩大。但是，集成电路是在分立元件电子线路的基础上发展起来的，考虑到从事电子技术工作必须熟悉分立元件电子线路，还考虑到中专学生的认识能力，在本书中，仍以分立元件构成的单元电子线路为基础。在选择内容时，以“分立元件电路为集成电路服务”的原则增删，以突出集成电路，为进一步学习、研究和应用集成电路打好扎实的基础。

在电子器件、电子线路和应用关系上，则是“管、路、用”三结合，管为路用，以路为主，就是把教材重点放在最基本的单元电路上。对于电子器件（包括集成电路），则着眼于它的外部特性和应用，不纠缠于内部的物理过程及生产工艺等。至于应用，受到授课时数的限制，只能在一定的范围内适当考虑。但是，必须足够重视，经常查阅有关新的书籍和杂志，扩大和丰富自己的应用知识。

本课程具有以下特点：

一、本课程是一门技术基础课，既不同于数理化等基础课，又区别于专业课。它强调基本概念、基本原理和基本分析方法，注意理论联系实际，着眼解决实际问题。在分析和计算电路时，需从实际出发，抓住主要矛盾，忽略次要因素，建立工程观念。

二、电子技术是一门内容翻新、发展迅速的学科。新的器件、新的单元电路层出不穷，日新月异。所以，在教学计划规定的学时内，试图包罗万象、面面俱到是不可能的。因此，在掌握课内“三基”（基本概念、基本原理、基本分析方法）的同时，必须注意灵活性和课外新知识的补充，以便尽快地学习、掌握、运用电子技术的最新成果。

三、本课程是一门实践性很强的课程。实践环节和动手能力的培养在课程中占有重要地位。学习成绩优劣的最终检验标准，应该是能否解决有关电子线路的具体问题。所以，要强调实践环节，通过实验和生产实习，倡导理论联系实际的学风，提高电子技术方面的动手能力，培养严谨的科学作风。

《低频电子线路》对初学者来说，常常感到新的概念多、电路形式多、联系实际问题的多而不易掌握。针对本课程的内容和特点，就如何学好本课程提出以下学习方法。

一、抓住“三基”。

搞清基本概念是学好本课程的关键。从概念的内涵，抓住问题的实质。要防止死背硬记和以数学推导掩盖问题的物理本质。对电子线路的工作原理，要深入地进行定性分析，了解其物理过程。要抓住问题的提出，掌握分析思路和分析方法，分清主要矛盾和次要因素，力求问题得到简化，便于解决。

二、改进学习方法，尽快提高自己学习知识、分析问题、解决问题的能力。

由于当今知识更新很快，而新技术、新成果反映到教材上，总需经过相当长的时间。这就要求我们在教学过程中，认真听课、记好听课笔记；课后要刻苦阅读教材、独立完成练习；查阅参考书和资料。要改变中学生的那套学习方法，尽快掌握适应中专课程的学习方法。

三、培养工程观点和实验技术

由于本课程接近实际，工程计算中必须考虑许多实际因素的影响。而为了简化计算，又往往忽略一些次要因素；元器件性能存在离散性，元件有标称值；有些因素又难以得到确切数值。因此，采用工程估算法。最后用调试来达到技术指标的要求。

在学习过程中，必须重视实验课和生产实习。通过这些实践环节，不仅使学到的知识得以巩固和加深，而且能培养装配、调试能力，熟悉电子仪器的使用。

目 录

绪 论

- 一、电子技术的发展与应用概况..... (1)
- 二、本课程的性质和任务..... (2)
- 三、本课程的内容、特点和学习方法..... (2)

第一章 半导体二极管和三极管..... (1)

- § 1—1 半导体的基础知识..... (1)
 - 1-1-1 导体、半导体和绝缘体..... (1)
 - 1-1-2 半导体的原子结构和共价键..... (2)
 - 1-1-3 本征半导体..... (2)
 - 1-1-4 杂质半导体..... (3)
- § 1-2 PN 结..... (5)
 - 1-2-1 PN 结的形成..... (5)
 - 1-2-2 PN 结的单向导电性..... (6)
 - 1-2-3 PN 结的伏安特性..... (7)
 - 1-2-4 PN 结的反向伏安特性..... (7)
 - 1-2-5 PN 结电容..... (9)
- § 1-3 半导体二极管..... (10)
 - 1-3-1 二极管的结构..... (10)
 - 1-3-2 二极管的伏安特性..... (11)
 - 1-3-3 二极管的等效电路..... (11)
 - 1-3-4 二极管的主要参数..... (13)
- § 1-4 半导体三极管..... (13)
 - 1-4-1 三极管结构简介..... (14)
 - 1-4-2 三极管电流分配与放大原理..... (15)
 - 1-4-3 共射电路的特性曲线..... (18)
 - 1-4-4 三极管的主要参数..... (20)
- 本章小结..... (24)
- 附录..... (25)
- 习题..... (27)

第二章 放大电路基础..... (29)

- § 2-1 放大器的基本概念..... (29)
 - 2-1-1 放大器的分类..... (29)
 - 2-1-2 共射放大器的工作原理及电路组成..... (29)

| | | |
|--------------------|-----------------------------|--------------|
| 2-1-3 | 放大器的主要性能指标 | (33) |
| 2-1-4 | 放大器的分析方法 | (35) |
| § 2-2 | 图解分析法 | (37) |
| 2-2-1 | 静态分析 | (38) |
| 2-2-2 | 动态分析 | (38) |
| 2-2-3 | 非线性失真及输出动态范围 | (41) |
| 2-2-4 | 静态工作点的选择及电路参数的影响 | (43) |
| § 2-3 | 等效电路分析法 | (44) |
| 2-3-1 | 三极管的h参数及其等效电路 | (45) |
| 2-3-2 | 用h参数等效电路分析放大器 | (48) |
| § 2-4 | 静态工作点的稳定 | (51) |
| 2-4-1 | 温度对静态工作点的影响 | (52) |
| 2-4-2 | 常用的偏置稳定电路 | (53) |
| § 2-5 | 共集电极电路和共基极电路 | (56) |
| 2-5-1 | 共集电极电路——射极输出器 | (56) |
| 2-5-2 | 共基极电路 | (61) |
| 2-5-3 | 三种接法放大电路的比较 | (63) |
| § 2-6 | 半导体三极管的混合 π 型等效电路 | (64) |
| 2-6-1 | 混合 π 型等效电路的引出 | (64) |
| 2-6-2 | 关于混合 π 型等效电路中各元件的讨论 | (65) |
| 2-6-3 | 混合 π 型等效电路与h参数等效电路之间的关系 | (66) |
| § 2-7 | 多级放大器 | (67) |
| 2-7-1 | 多级放大器的级间耦合方式 | (67) |
| 2-7-2 | 多级放大器的电压增益计算 | (68) |
| 2-7-3 | 直接耦合放大器的特殊问题 | (69) |
| § 2-8 | 差分放大器 | (71) |
| 2-8-1 | 差分电路的结构及工作特点 | (71) |
| 2-8-2 | 差分放大电路基本性能的分析 | (73) |
| 2-8-3 | 提高CMRR的改进电路 | (77) |
| § 2-9 | 场效应管及其放大器 | (79) |
| 2-9-1 | 结型场效应管 | (79) |
| 2-9-2 | 绝缘栅型场效应管 | (84) |
| 2-9-3 | 各种场效应管的特性比较 | (87) |
| 2-9-4 | 场效应管与三极管的比较及场效应管的使用注意事项 | (88) |
| 2-9-5 | 场效应管的偏置电路 | (88) |
| 2-9-6 | 场效应管放大器性能分析 | (90) |
| | 本章小结 | (94) |
| | 习题 | (95) |
| 第三章 集成运算放大器 | | (105) |

| | |
|-------------------------|--------------|
| § 3-1 概述 | (105) |
| 3-1-1 集成运放简介 | (105) |
| *3-1-2 半导体集成电路的结构和制造工艺 | (106) |
| 3-1-3 集成电路的特点 | (108) |
| 3-1-4 集成运放的特性及电路组成 | (109) |
| § 3-2 典型集成运放电路分析举例 | (110) |
| 3-2-1 集成运放的典型电路 | (110) |
| 3-2-2 典型集成运放(F007)电路分析 | (115) |
| § 3-3 集成运放的主要参数及测试方法 | (117) |
| 3-3-1 主要参数 | (117) |
| 3-3-2 主要参数测试方法 | (119) |
| *3-3-3 集成运放使用注意事项 | (121) |
| 本章小结 | (123) |
| 习题 | (123) |
| 第四章 负反馈放大器 | (125) |
| § 4-1 概述 | (125) |
| 4-1-1 反馈的基本概念 | (125) |
| 4-1-2 负反馈放大器的理想模型 | (126) |
| 4-1-3 负反馈放大器的一般表达式 | (126) |
| § 4-2 负反馈放大器的分类及判别 | (127) |
| 4-2-1 负反馈的四种类型 | (127) |
| 4-2-2 反馈类型及性质的判别 | (129) |
| 4-2-3 判别方法举例 | (130) |
| § 4-3 负反馈对放大器的影响 | (132) |
| 4-3-1 提高增益的稳定性 | (132) |
| 4-3-2 减小非线性失真和展宽通频带 | (133) |
| 4-3-3 对输入电阻和输出电阻的影响 | (135) |
| § 4-4 深度负反馈条件下放大器增益的估算 | (137) |
| 4-4-1 单级负反馈放大器的分析 | (137) |
| 4-4-2 多级深度负反馈条件下电压增益的估算 | (140) |
| 本章小结 | (142) |
| 习题 | (143) |
| 第五章 放大器的频率响应与稳定性 | (146) |
| § 5-1 简单RC电路的频率响应 | (146) |
| 5-1-1 RC高通电路 | (146) |
| 5-1-2 RC低通电路 | (148) |
| § 5-2 晶体管的频率参数以及它们之间的关系 | (149) |
| 5-2-1 晶体管的频率参数 | (149) |

| | | |
|------------|--|--------------|
| 5-2-2 | f_{β} 、 f_{α} 、 f_T 之间的关系 | (151) |
| § 5-3 | 放大器的频率响应 | (152) |
| 5-3-1 | 单级RC共射放大器的频率响应 | (152) |
| 5-3-2 | RC共射、共基、共集放大器频率响应比较 | (158) |
| 5-3-3 | 多级放大器的频率响应 | (160) |
| § 5-4 | 展宽放大器通频带的方法 | (161) |
| 5-4-1 | 常用的展宽放大器通频带的方法 | (161) |
| 5-4-2 | 集成宽带放大器举例 | (164) |
| § 5-5 | 放大器的稳定性 | (166) |
| 5-5-1 | 造成放大器不稳定的原因 | (166) |
| 5-5-2 | 稳定工作条件 | (167) |
| 5-5-3 | 寄生反馈及抑制方法 | (167) |
| 5-5-4 | 集成运放的相位补偿 | (169) |
| | 本章小结 | (170) |
| | 习题 | (170) |
| 第六章 | 集成运算放大器的应用 | (173) |
| § 6-1 | 集成运放应用电路的分析方法 | (173) |
| § 6-2 | 基本运算放大器 | (174) |
| 6-2-1 | 反相输入比例运算放大器 | (175) |
| 6-2-2 | 同相输入比例运算放大器 | (175) |
| 6-2-3 | 差动输入比例运算放大器 | (176) |
| § 6-3 | 运算电路 | (178) |
| 6-3-1 | 加法和减法运算 | (178) |
| 6-3-2 | 积分和微分运算 | (179) |
| 6-3-3 | 对数和指数运算 | (181) |
| 6-3-4 | 乘法和除法运算 | (182) |
| § 6-4 | 有源滤波电路 | (183) |
| 6-4-1 | RC有源滤波电路 | (184) |
| 6-4-2 | 开关电容滤波电路 | (186) |
| § 6-5 | 电压比较器 | (189) |
| 6-5-1 | 过零比较电路 | (189) |
| 6-5-2 | 电平检测电路 | (190) |
| 6-5-3 | 具有滞回特性的比较电路 | (191) |
| § 6-6 | 波形产生电路 | (191) |
| 6-6-1 | 正弦波发生器 | (191) |
| 6-6-2 | 方波发生器 | (193) |
| 6-6-3 | 三角波发生器 | (194) |
| | 本章小结 | (195) |
| | 习题 | (197) |

| | |
|---------------------------|-------|
| 第七章 低频功率放大器 | (201) |
| § 7-1 概述..... | (201) |
| § 7-2 变压器耦合放大器..... | (202) |
| § 7-3 无变压器功率放大器..... | (207) |
| 7-3-1 互补对称电路的基本工作原理..... | (207) |
| 7-3-2 互补对称式OTL电路..... | (208) |
| 7-3-3 复合互补对称式OTL电路..... | (210) |
| 7-3-4 OCL电路..... | (211) |
| 7-3-5 BTL电路简介..... | (212) |
| 7-3-6 无变压器功率放大器的性能分析..... | (213) |
| § 7-4 集成功率放大器..... | (216) |
| § 7-5 晶体管的安全使用与散热..... | (220) |
| 7-5-1 功率管的散热..... | (220) |
| 7-5-2 功率管的保护..... | (222) |
| 附: 变压器耦合单管功率放大器..... | (225) |
| 本章小结..... | (227) |
| 习题..... | (228) |
| 第八章 直流稳压电源 | (230) |
| § 8-1 单相整流和滤波电路..... | (230) |
| 8-1-1 单相桥式整流电路..... | (230) |
| 8-1-2 滤波电路..... | (232) |
| 8-1-3 倍压整流电路..... | (235) |
| § 8-2 硅稳压管稳压电路..... | (236) |
| 8-2-1 稳压电路工作原理..... | (237) |
| 8-2-2 限流电阻的选择..... | (237) |
| 8-2-3 稳压电路的主要性能指标..... | (238) |
| 8-2-4 硅稳压管稳压电路的性能指标..... | (238) |
| 8-2-5 设计举例..... | (239) |
| § 8-3 串联式晶体管稳压电路..... | (239) |
| 8-3-1 电路的组成和工作原理..... | (240) |
| 8-3-2 性能指标分析..... | (243) |
| 8-3-3 提高稳压性能的措施..... | (244) |
| 8-3-4 稳压电路的过流保护..... | (247) |
| § 8-4 线性集成稳压电源..... | (248) |
| 8-4-1 多端可调电压式集成稳压器..... | (248) |
| 8-4-2 三端固定电压式集成稳压器..... | (251) |
| § 8-5 开关式集成稳压电源..... | (253) |
| 8-5-1 开关稳压器的基本原理..... | (254) |

| | |
|--------------------|-------|
| 8-5-2 集成开关稳压器..... | (255) |
| 本章小结..... | (257) |
| 习题..... | (258) |
| 读图练习..... | (261) |

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是近代电子学的重要组成部分。由于半导体器件具有体积小,重量轻,使用寿命长,输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛的应用。集成电路,特别是大规模和超大规模集成电路的出现,使电子设备在可靠性和微型化等方面大大前进了一步。

本章首先简要地介绍半导体的基础知识,接着讨论半导体二极管和三极管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数,为后续各章的讨论提供必要的基础知识。

§1—1 半导体的基础知识

1—1—1 导体、半导体和绝缘体

物质按其导电能力的大小可分为导体、半导体和绝缘体三类。银、铜和铝等金属的导电性能良好,它们都是导体,电阻率在 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 以下。塑料、陶瓷和橡胶等物质的导电性能很差,它们都是绝缘体,电阻率在 $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上。而半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间,电阻率在 $10^{-3}\sim 10^9\Omega\cdot\text{cm}$ 范围内。在自然界中属于半导体的物质很多,目前用于制造半导体器件的主要材料是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓($\text{Ga}_{0.5}\text{As}_{0.5}$)等。半导体除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外,它还具有不同于其它物质的特点。例如,当半导体受到外界光和热的激发时,其导电能力将发生显著的变化。又如在纯净的半导体中加入微量的杂质,其导电能力也会有显著的增强。半导体之所以具有以上特点,是由于半导体内部的原子结构与导体和绝缘体不同。我们知道物质都是由分子和原子组成的,而原子则是由带正电的原子核和带负电的电子构成。电子按它具有能量的多少,分层围绕原子核不停地高速旋转,最外层电子具有的能量最高,且受原子核的束缚力最小。因此,最外层的电子受外界因素(如温度)影响时就容易挣脱原子核的束缚而成为能在原子之间自由运动的自由电子。这些自由电子也就是物质中能载运负电荷的载流子。这些自由电子在外电场的作用下作定向运动形成电流。由于金属原子的外层电子受原子核的束缚力很小,在常温下就有大量的电子能摆脱原子核的束缚而成为自由电子,所以金属具有良好的导电性能。

在绝缘体中,最外层的电子受原子核的束缚力很大,在常温下,能够成为自由电子的数量极少,因此,绝缘体的导电性能很差。

半导体的原子结构比较特殊,载流子的情况也较复杂,下面我们将详细讨论。

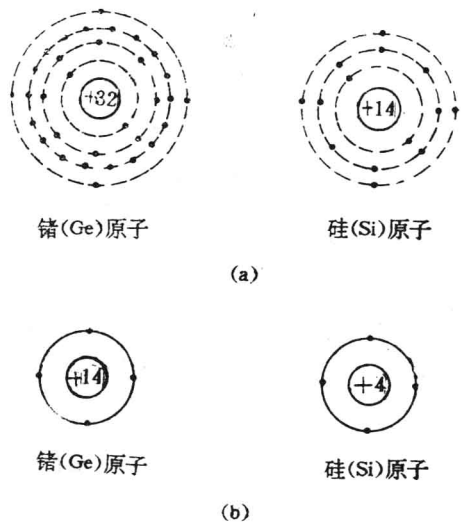


图 1—1—1 锗和硅原子结构模型
(a)原子结构图 (b)简化模型

1-1-2 半导体的原子结构和共价键

目前用得最多的半导体材料是硅和锗，它们的原子结构见图1-1-1(a)。硅和锗的外层电子都是4个，所以硅和锗都是四价元素。外层电子受原子核的束缚力最小，称为价电子。物质的化学性质是由最外层的价电子数决定的，半导体的导电性质也与价电子有关，因此价电子是我们研究的对象。为了简化，可把原子核和内层电子看成一个比较稳定的整体，称为惯性核。因此，一般画图时，只用图1-1-1(b)所示的简化模型。

目前所用的半导体材料都要先制成单晶（称为“拉单晶”），然后再用来制造半导体管。单晶体的原子是按一定规则整齐地排列着的。硅和锗原子组成晶体后，原子之间靠得很近，原来分属于每个原子的价电子就要受到相邻原子的影响而使价电子为两个原子所共有了，这样，每个电子的轨道就变成两个相邻原子之间两个价电子的公共的轨道，形成了晶体中的共价键结构。图1-1-2表示硅和锗晶体构成共价键的示意图。由图可见，共价键上的两个电子是由相邻原子各用一个价电子组成的，共价键内的两个电子称为束缚电子。因此，共价键是表示两个共有价电子所形成的束缚作用。由于共价键有很强的结合力，使各原子在晶体中按一定形式排列。而共价键的电子，受两个原子核引力的约束，如果没有足够的能量是不易脱离公共轨道的。因此在绝对零度和无外界激发时，硅和锗晶体中没有自由电子存在。只有在激发的情况下，例如在常温下，少数电子获得一定的动能才能挣脱共价键的束缚成为自由电子。

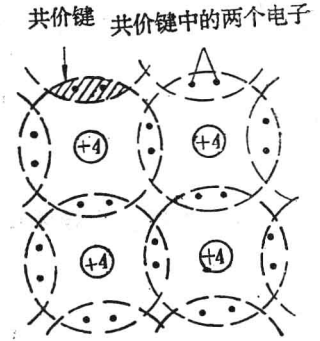


图1-1-2 硅和锗晶体共价键结构

1-1-3 本征半导体

本征半导体就是非常纯净、晶体结构十分完整的半导体。在 $T=0\text{K}$ 和没有外界激发时，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象绝缘体中的电子被束缚得那样紧。在常温（ $T=300\text{K}$ ）下，由于热激发，就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后，共价键中就留下一个空位，这个空位叫做空穴。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。

由于共价键中出现了空穴，在外加电场或其他能源的作用下，邻近价电子就可以填补到这个空位上，而在这个电子原来的位置上又留下新的空位，以后其他电子又可填补到这个新的空位上。在共价键中出现的这种电荷的移动可用图1-1-3来说明，图中用圆圈表示空穴。如果在 A_1 处出现一个电子的空位， A_3 处的电子便可以填补到这个空位上，从而使空位从 A_1 移到 A_3 。如果接着 A_2 处的电子又填补到 A_3 处的空位上，这样空位又由 A_3 移到了 A_2 位。在这个过程中，电子由 $A_2 \rightarrow A_3 \rightarrow A_1$ ，但仍

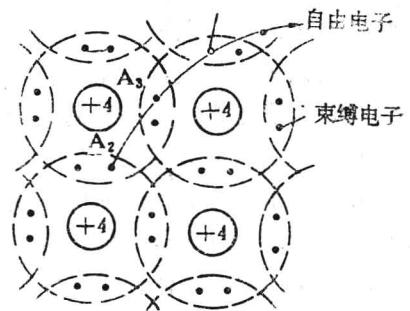


图1-1-3 电子和空的移动

处于束缚状态，而空位由 $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3$ ，就是说，空穴的移动方向和电子的移动方向是相反的，因而可用空穴移动产生的电流来代表束缚电子移动产生的电流。因此，只有当共价键中出现了空穴以后，半导体才能开始导电。而且空穴又是失去电子以后留下的空位，因此在分析时，用空穴的运动来代替共价键中电子的运动就更加方便。在这里可把空穴看成是一个带正电的粒子，它所带的电量与电子相等，符号相反，在外加电场的作用下，可以自由地在晶体中运动，从而和自由电子一样可以参加导电。因此空穴也是一种载流子，不过种载流子的运动是人们根据共价键中出现空穴的移动而虚拟出来的，它实际上是共价键中束缚电子移动形成的。空位越多，半导体中的载流子数目就越多，因此形成的电流就愈大。

在本征半导体内，自由电子和空穴总是成对出现的。也就是说，有一个自由电子就必定有一个空穴，因此在任何时候，本征半导体中的自由电子和空穴数总是相等的，被称做“电子—空穴对”。

电子和空穴都属载流子，它们的定向运动都会产生电流。当半导体中出现了电子—空穴对后，并非静止不动，而是不停地运动着：一方面由于本征激发生成电子—空穴对；另一方面在运动过程中某些电子和空穴可能相遇，空穴将被自由电子填补，电子—空穴对消失，共价键得到恢复，这种现象称为“复合”。在本征半导体中不断地进行着“激发”与“复合”这两种相反的过程。在恒定的温度下，这两种过程将达到动态平衡，载流子浓度（即 1cm^3 晶体中的自由电子或空穴数）保持一定的数值。

温度升高时，原来的平衡被破坏，而转化为新的平衡，结果载流子的数量增多。室温下的本征硅大约温度每升高 8°C ，载流子浓度增加一倍；本征锗大约温度每升高 12°C ，载流子浓度增加一倍。由于导电能力的强弱取决于载流子数量的多少，所以半导体具有热敏和光敏特性。可见，温度是影响半导体性能的一个十分重要的外部因素。在相同的温度下，本征激发的载流子浓度，锗远大于硅。这是因为锗原子中价电子处于第四层（硅则处于第三层），更容易摆脱共价键的束缚，所以硅的温度稳定性优于锗。

1-1-4 杂质半导体

在本征半导体中人为地掺入微量其它元素（称为杂质），便得到杂质半导体，其导电能力将大为增强，可用来制造各类半导体器件。按掺入的杂质性质不同，可分为N型半导体和P型半导体两类。

一、N型半导体

在本征硅（或锗）中，掺入微量的五价元素磷（或锑）后，磷原子将均匀分布于硅晶体中，当磷原子取代硅晶体中的硅原子时，以四个价电子与相邻的硅原子组成共价键，必多余一个价电子，由于它不受共价键的束缚，在室温下极易成为自由电子，如图1-1-4所示。每掺入一个杂质原子，便产生（施给）一个自由电子，故常将掺入的五价元素称为施主杂质。

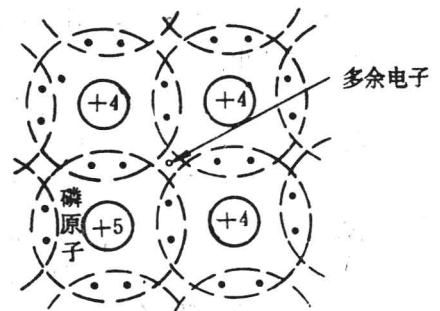


图1-1-4 N型硅半导体结构示意图

施主杂质原子失去电子后，本身即成为正离子，被束缚在晶体结构中，不起导电作用，这与本征激发不同。

通常由掺杂所产生的自由电子数目大大超过本征激发产生的电子—空穴对数目，于是