

//
高等职业教育教材

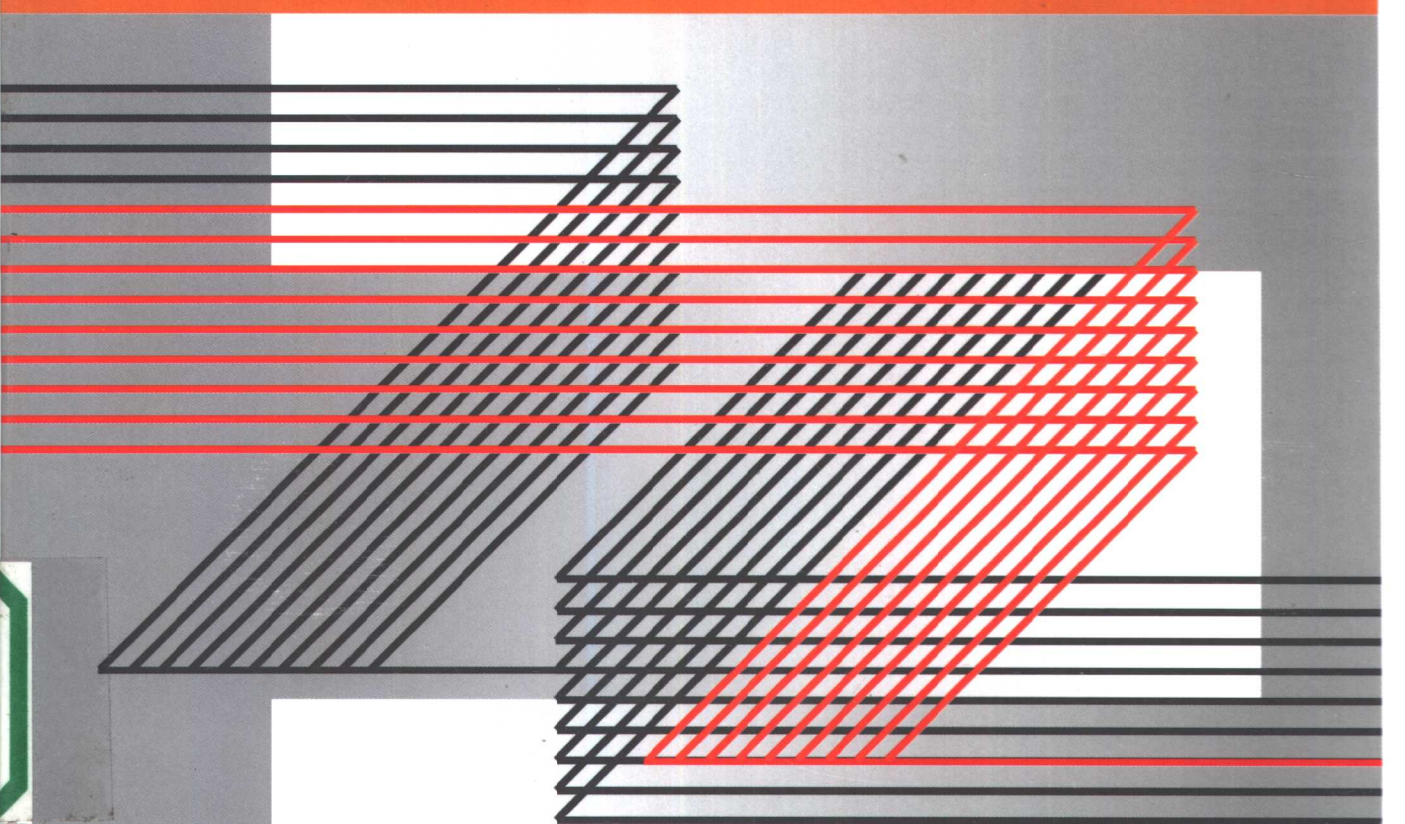


低频电子线路

天津市高等教育自学考试委员会 组编

徐开友 王成珍 王保均 牛秀卿 编著

徐开友 主编



天津大学出版社

高等职业教育教材

低 频 电 子 线 路

天津市高等教育自学考试委员会 组编
徐开友 王成珍 王保均 牛秀卿 编著
徐开友 主编

天 津 大 学 出 版 社

内容提要

本书是由长期从事高职和高自考教学的教师编写的。在编排体例上力求通过正文和例题讲清基本概念、基本内容和基本方法。

全书共分 8 章。每章最后为本章小结,以帮助学生归纳整理所学知识的重点和难点。每章末有自我检查题和习题,并附有参考答案,以便学生自我检测学习情况。

本书是高等职业学校电子类专业教材,也适合高自考学生及有关培训人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

低频电子线路/徐开友主编;王成珍编著. —天津:天津大学出版社,2001.3
高等职业教育教材
ISBN 7-5618-1413-5

I. 低… II. ①徐…②王… III. 低频-电子电路-高等教育;职业教育-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 04674 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨风和
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
印 刷 河北省昌黎县印刷总厂
经 销 全国各地新华书店
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 17
字 数 438 千
版 次 2001 年 3 月第 1 版
印 次 2001 年 3 月第 1 次
印 数 1~3 000
定 价 23.00 元

高等职业教育教材编审委员会名单

主任委员:乔丽娟

委 员:(以姓氏笔画为序)

丁桂芝	王松岭	边奠英	刘凤桐
李占伦	李维祥	吴功宜	陈家修
赵雅兴	徐宝强	徐娟敏	高希庚
葛洪贵			

序

全国高等教育自学考试指导委员会副主任 王明达
中国职业技术教育学会副会长

中国高等教育大众化目标的实现必然伴随着高等教育形式和结构多样化的变革。单纯以学术水平为追求目标的高等教育无法满足社会对于多种专门人才的需求。因此要大力发展高等职业教育,培养社会需要的各类专门人才,以适应我国经济和社会发展的要求。

什么是高等职业教育?职业教育的特征不在于办学形式,主要体现在培养目标上。培养生产、服务、管理第一线的实用人才的教育即为职业教育。按照专业所需接受教育的年限达到相当于普通高等教育学习年限的职业教育即为高等职业教育。

高等职业教育如何实现培养实用人才的目标?首要的就是专业设置。既然培养的是生产第一线的实用人才,所设专业就一定是直接与社会生产、生活相联系的,是社会生产、生活中最必需的。这与普通高等学校开设专业的思路有着本质的区别。其次是教学内容的安排和教学计划的制定。接受高等职业教育的学生的学习内容必须是成熟的技术和管理规范,教学计划、课程设置应该按照职业岗位群的职业能力要求来确定,而不应从学科体系出发。再次,为使学生毕业就能基本顶岗工作,要求增大实习训练所占的比例,在校期间就基本完成上岗前的实践训练。为了保证实践训练得到社会认可,要实行学历证书与职业资格证书“双证书”制度,同时要求双师型教师任教。只有按部就班实现以上要求的高等职业教育才会被社会认同,也才会有生命力。

办出特色是高等职业教育生命力的源泉。学生毕业即能顶岗是职业教育区别于其他教育的一个突出特点。要想做到这一点,一方面学习理论知识要以必需和够用为度,让学生掌握基本理论和知识;一方面要多方面开辟实习基地,保证充足的实训时间。高等职业教育的水准主要是通过专业设置、课程内容以及实训能力的培养体现的。

为落实第三次全教会“完善自学考试制度、大力发展高等职业教育”的改革思路,1999年全国高等教育自学考试指导委员会决定在天津市开展高等教育自学考试职业技术专业的试验工作。天津市高等教育自学考试委员会在深入调查研究

的基础上,从职业岗位群的技能需求出发,以能力本位教育(CBE)为理论依托,设计了12个职业技术专业,于2000年面向社会开考。

高等教育自学考试开考职业技术专业的试验在完善高等教育自学考试专业建设、拓展自学考试教育功能方面,在探索开放式教育培养应用型高级人才方面,在职业教育课程体系建设方面,在教育与产业的有机结合方面,在构建完整的职业教育体系方面,以及在实践技能考核的研究、管理方面对于我国高等教育自学考试制度的完善和高等职业教育的发展都具有重要意义。

天津市高等教育自学考试委员会将根据职业技术专业试验工作的需要陆续出版有关考试课程的教材。教材编撰者多为具有职业教育经验的学科专家和职业教育专家。他们根据职业教育的专业培养目标重新整合了学科知识体系,尽力体现理论知识必需、够用的原则。当然,由于认识水平的局限和时间的紧迫,这些教材还需要继续完善提高。尽管如此,迈出的这第一步是十分可贵的。我深信,高等教育自学考试职业技术专业的试验工作一定能取得成功。

2001年1月于北京

前 言

由于高等职业教育和高等自学教育发展的需要,在有关领导的组织下,由南开大学、天津大学、天津师范大学、天津职业技术师范学院和天津理工学院等长期从事该门课程教学的教师编写了这本适合该教育领域的“低频电子线路”教材。

在编写过程中,我们参考了国内许多优秀的同类教材,并力图将分析问题时用到的数学方法和分析方法讲清,同时对重点内容多举例,多练习,希望通过这些手段提高高职学生分析问题的能力。考虑到职业教育和自学教育的发展,特别注意到本书的编写能适合自学的要求,因此在具体内容的编排上,加强了运算放大器的应用这一章的内容。同时,在负反馈放大器这一章中,也增加了对运算放大器负反馈的分析。而在正弦波振荡器中,只介绍了应用较多的 RC 串并联振荡器。

本书第1、2章由徐开友编写,第3章、第6章由王成珍编写,第5章和第8章由王保均编写,第4章和第7章由牛秀卿编写。全书由徐开友负责审核定稿。

由于编者水平有限,书中若存在缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编者

2000年12月

常用符号表

A 增益	f_H 放大器的上限频率
a 整流元件的阳极(正极)	f_T 特征频率
A_F 反馈放大电路的闭环增益	f_a BJT 共基极截止频率
A_V 电压增益	G 电导
A_I 电流增益	g 微变电导
A_{VC} 共模电压增益	g_m 双口有源器件的互导(跨导)
A_{VD} 差模电压增益	g 场效应管的栅极
A_{VO} 开环电压增益	H 双口网络的混合参数
A_{VF} 闭环电压增益	$h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe}$ BJT 共射接法的 h 参数
B 势垒	I, i 电流
b BJT 的基极	I_s 信号源电流
BW 频谱宽度, 带宽	I_i 输入电流
C 电容	I_o 输出电流
C_b 隔直电容(耦合电容)	I_{CC} 空载正电源电流
C_e 发射极旁路电容	I_{DD} 空载漏电源电流
$C_{b'c}$ 基极-集电极电容	I_{EE} 空载负电源电流
$C_{b'e}$ 基极-发射极电容	I_L 负载电流
C_B 势垒电容	I_{IB} 输入偏置电流
C_D 扩散电容	I_{IO} 输入失调电流
C_j 结电容	I_{OM} 最大输出电流
C_F 反馈电容	I_{OO} 输出失调电流
C_i 输入电容	I_{CS} 输出短路电流
C_o 输出电容	I_{REF} 参考电流(基准电流)
C_L 负载电容	J 电流密度
c BJT 的集电极	k 玻耳兹曼常数
D 扩散系数	k 整流元件的阴极(负极)
D 二极管	K_{CMR} 共模抑制比
d 场效应管的漏极	L 自感系数, 电感
E 能量	L 负载
e 电子的电荷量	l 长度
e BJT 的发射极, 自然对数的底	M 互感系数
ε 电场强度	N 电子型半导体
F 反馈系数	N 绕阻匝数
F_V 电压反馈系数	N_F 噪声系数
f 频率	P 功率
f_L 放大器的下限频率	P 空穴型半导体

Q, q 电荷,品质因数	V_T 温度的电压当量
Q 静态工作点	V_P 场效应管的夹断电压
R 电阻(直流电阻或静态电阻)	V_{CC}, V_+ 晶体管正电源电压
R_b, R_c, R_e BJT 的基极、集电极、发射级电阻	V_{DD} 场效应管正电源电压
R_g, R_d FET 的栅极、漏极电阻	V_{EE}, V_- 负电源电压
R_s 信号源电阻	V_{OO} 输出失调电压
R_l 负载电阻	V_{REF} 参考电压(基准电压),简称为 V_R
R_w 电位器(可变电阻)	$V_{(BR)CBO}$ 发射极开路,集电极-基极反向击穿电压
r 电阻(交流电阻或动态电阻)	$V_{(BR)EBO}$ 集电极开路,发射极-基极反向击穿电压
r_{be} BJT 的输入电阻	$V_{(BR)CEO}$ 基极开路,集电极-发射极反向击穿电压
r_{ce} BJT 的输出电阻	$V_{(BR)DS}, V_{(BR)GD}, V_{(BR)GS}$ 分别为漏源击穿电压、栅漏击穿电压和栅源击穿电压
R_i 直流输入电阻	X, x 电抗,反馈电路中的信号量
R_i 放大电路交流输入电阻	Y, y 导纳
R_o 放大电路交流输出电阻	Z, z 阻抗
R_f 反馈电阻	α BJT 共基极接法的电流放大系数
S 面积	β BJT 共射极接法的电流放大系数
S 开关	γ 稳压系数
s 复频率变量	η 效率
s FET 的源极	θ 整流元件的导电角
S/N 信噪比	μ BJT 的内部电压反馈系数
S_R 转换速率	ρ 电阻率
T 温度	σ 电导率
T 双口有源器件 ^①	φ 相角
T_r 变压器	ϕ 时钟脉冲
t 时间	τ 时间常数
V, v 电压	Ω, ω 角频率
V_s 信号源电压	
V_i 输入电压	
V_{th} 二极管、BJT 的门限电压	
V_T 场效应管的开启电压	

符号说明

I_B, V_{BE} 大写字母、大写下标表示直流量	i_B, v_B 小写字母、大写下标表示总瞬时值
I_b, V_{be} 大写字母、小写下标表示交流有效值	i_{be}, v_{be} 小写字母、小写下标表示交流分量瞬时值
$\dot{I}_b, \dot{V}_{be}$ 大写字母上面加点、小写下标表示正弦相量	

① 双口有源器件是指半导体三极管、场效应管等。

目 录

1 半导体器件基础	(1)
1.1 半导体的导电特性	(1)
1.1.1 什么是半导体	(1)
1.1.2 本征半导体的导电特性	(2)
1.1.3 杂质半导体的导电特性	(3)
1.2 PN结的导电特性	(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结的击穿特性	(6)
1.2.4 PN结的电容效应	(7)
1.3 半导体二极管	(8)
1.3.1 二极管的基本结构	(8)
1.3.2 半导体二极管的特性	(9)
1.3.3 二极管的主要参数及注意事项	(9)
1.3.4 二极管的选择	(10)
1.3.5 二极管简单电路的分析方法	(10)
1.3.6 稳压二极管	(16)
1.4 双极型晶体管	(17)
1.4.1 晶体管的结构、符号和特点	(17)
1.4.2 晶体管内部的电流分配关系和放大原理	(18)
1.4.3 晶体管共射极电路的特性曲线	(20)
1.4.4 三极管的主要参数	(22)
1.5 场效应三极管	(24)
1.5.1 结型场效应管	(25)
1.5.2 绝缘栅型场效应管	(29)
1.6 本章小结	(31)
自我检查题和习题	(34)
参考答案	(36)
2 放大电路基础	(37)
2.1 放大电路的性能指标与放大电路的组成原则	(37)
2.1.1 放大的概念	(37)
2.1.2 放大器的性能指标	(38)
2.1.3 直流通路与交流通路	(39)
2.1.4 共射极放大器的基本结构与工作原理	(40)

2.1.5 放大电路必须遵循的原则	(42)
2.2 图解分析法	(42)
2.2.1 静态情况分析	(42)
2.2.2 图解分析动态	(44)
2.2.3 图解法的步骤	(46)
2.2.4 图解法的应用	(46)
2.3 静态工作点的稳定	(48)
2.3.1 温度变化对静态工作点的影响	(48)
2.3.2 偏置电路	(48)
2.4 微变等效电路法	(49)
2.5 用简化 h 参数等效电路分析共射放大电路	(51)
2.6 用微变等效电路分析工作点稳定的电路	(54)
2.7 共集电极电路	(56)
2.8 共基极电路	(59)
2.9 三种基本组态的比较	(60)
2.10 放大器的频率特性	(61)
2.10.1 放大器频率特性的概念	(61)
2.10.2 单管共射放大电路的频率响应	(61)
2.10.3 波特图	(65)
2.11 场效应管放大电路	(67)
2.11.1 放大电路的静态分析	(67)
2.11.2 放大电路的动态分析	(71)
2.12 多级放大器	(73)
2.12.1 多级放大器的耦合方式	(73)
2.12.2 阻容耦合放大电路的计算	(74)
2.13 本章小结	(76)
自我检查题和习题	(77)
参考答案	(81)
3 功率放大电路	(83)
3.1 功率放大电路的特点	(83)
3.2 功率放大电路提高效率的主要途径	(83)
3.2.1 甲类工作状态	(84)
3.2.2 乙类工作状态	(85)
3.2.3 甲乙类工作状态	(86)
3.3 乙类双电源互补对称功率放大电路	(86)
3.3.1 电路结构	(86)
3.3.2 工作原理	(87)
3.3.3 功率放大电路主要指标的估算	(88)

3.4 甲乙类互补对称功率放大电路	(92)
3.4.1 交越失真及消除办法	(92)
3.4.2 静态工作点的设置方案	(93)
3.4.3 性能指标	(94)
3.4.4 甲乙类单电源互补对称电路	(94)
3.5 复合管互补对称电路	(97)
3.5.1 复合管	(97)
3.5.2 复合管组成的互补对称输出级	(99)
3.5.3 准互补对称电路	(99)
3.6 一个实用的功率放大电路	(99)
3.6.1 电路简介	(100)
3.6.2 自举电路分析	(101)
3.6.3 主要性能指标的估算	(102)
3.7 集成功率放大电路	(103)
3.7.1 通用型集成功放	(103)
3.7.2 专用型集成功放	(104)
3.8 本章小结	(105)
自我检查题和习题	(106)
参考答案	(110)
4 集成运算放大电路	(115)
4.1 集成电路的特点	(115)
4.2 集成运算放大器中的电流源	(115)
4.3 差分式放大电路	(117)
4.3.1 基本差分式放大电路	(118)
4.3.2 改进型差分放大电路	(123)
4.3.3 差分式放大电路的传输特性	(124)
4.4 由复合管构成差分电路	(125)
4.5 集成电路运算放大器	(126)
4.5.1 通用型集成电路运算放大器	(126)
4.5.2 集成电路运算放大器的主要参数	(128)
4.6 本章小结	(132)
自我检查题和习题	(132)
参考答案	(135)
5 反馈放大电路	(138)
5.1 反馈的基本概念与分类	(138)
5.1.1 反馈的基本概念	(138)
5.1.2 反馈的分类	(139)

5.2	负反馈放大电路的组态	(143)
5.3	反馈的表示方法	(148)
5.3.1	方框图表示法	(148)
5.3.2	负反馈放大电路的一般表达式	(148)
5.4	负反馈对放大器性能的影响	(149)
5.4.1	提高增益的稳定性	(149)
5.4.2	减小非线性失真及抑制干扰噪声	(150)
5.4.3	展宽频带	(151)
5.4.4	改变放大器的输入、输出电阻	(152)
5.4.5	引入负反馈原则	(153)
5.5	深度负反馈放大电路的计算	(156)
5.5.1	深度负反馈的特点	(156)
5.5.2	闭环电压放大倍数的估算	(157)
5.5.3	估算输入电阻和输出电阻	(157)
5.6	负反馈放大电路的自激振荡	(163)
5.6.1	自激振荡的条件	(163)
5.6.2	负反馈放大电路的稳定判断	(163)
5.6.3	负反馈放大电路的稳定裕度	(163)
5.6.4	常用的消振方法	(164)
5.7	本章小结	(165)
	自我检查题和习题	(167)
	参考答案	(172)
6	集成运算放大器的应用	(174)
6.1	理想运算放大器的条件及分析方法	(174)
6.1.1	理想运放的条件	(174)
6.1.2	理想运放工作在线性区的特点	(174)
6.1.3	理想运放工作在非线性区的特点	(175)
6.2	运算放大器的三种输入方式	(175)
6.2.1	反相输入放大电路	(176)
6.2.2	同相输入放大电路	(178)
6.2.3	差动输入放大电路	(180)
6.3	基本运算电路	(181)
6.3.1	加法运算电路	(181)
6.3.2	加减运算电路	(183)
6.3.3	积分电路和微分电路	(185)
6.4	对数和反对数运算电路	(187)
6.4.1	对数运算电路	(187)
6.4.2	反对数运算电路	(189)
6.5	电压比较器	(189)

6.5.1 什么是电压比较器	(189)
6.5.2 简单电压比较器	(190)
6.5.3 比较器的特点及分析方法	(193)
6.5.4 滞回比较器(施密特触发器)	(194)
6.5.5 集成电压比较器	(198)
6.5.6 窗口比较器	(199)
6.6 非正弦信号产生电路	(201)
6.6.1 方波发生器	(201)
6.7 本章小结	(204)
自我检查题和习题	(204)
参考答案	(215)
7 正弦波振荡	(220)
7.1 正弦波振荡电路的基础知识	(220)
7.2 RC 桥式正弦波振荡电路	(221)
7.3 其他形式的 RC 振荡电路	(224)
7.4 本章小结	(224)
自我检查题和习题	(225)
参考答案	(228)
8 直流电源	(229)
8.1 直流电源组成	(229)
8.2 整流电路	(229)
8.2.1 整流电路的工作原理	(229)
8.2.2 整流电路的基本参数	(231)
8.3 滤波电路	(234)
8.3.1 电容滤波电路	(234)
8.3.2 电容滤波电路的性能特点	(234)
8.3.3 电感滤波与复式滤波电路	(236)
8.4 倍压整流电路	(238)
8.5 稳压电路	(239)
8.5.1 稳压电源的质量指标	(239)
8.5.2 稳压管稳压电路	(240)
8.5.3 串联型稳压电路	(242)
8.5.4 集成稳压电路	(245)
8.6 本章小结	(247)
自我检查题和习题	(248)
参考答案	(252)
参考文献	(254)

1 半导体器件基础

本章首先介绍半导体中的载流子和半导体的导电规律,再讨论 PN 结的原理、特性,然后介绍半导体二极管、双极型三极管、场效应管的工作原理、特性曲线和主要参数。在半导体基础知识方面,着重阐述一些基本概念。对半导体器件,要了解它们的结构和工作原理,重点掌握它们的外特性和参数,以便能正确使用和合理选择这些器件,并为以后学习各种电子线路打下基础。

1.1 半导体的导电特性

半导体二极管、双极性三极管、场效应管、集成电路、可控硅整流器等半导体器件都是由半导体材料构成的。下面介绍半导体材料的一些基本特性。

1.1.1 什么是半导体

在生产实践和日常生活中,有些物质(如银、铜、铝、铁)很容易导电,叫做导体。另一些物质(如塑料、有机玻璃、橡皮)很不容易导电,叫做绝缘体。而半导体是导电性能介于导体和绝缘体之间的物质锗、硅、硒等元素及其合成物,各种金属的氧化物及硫化物等都是半导体。而锗和硅(其化学元素符号分别是 Ge 和 Si)是两种主要的半导体材料。

为什么有的物质容易导电,有的物质不容易导电呢?根本原因在于物质内部的原子结构,看其内部运载电荷的粒子(简称载流子)有多少。原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成的,电子分几层围绕原子核不停地运动。原子核对内层电子的吸引力较大,对外层电子的吸引力较小。

金属导体的外层电子受原子核的束缚力很小,因此在室温下有大量电子能够挣脱束缚而成为自由电子。这些自由电子成为载流子,它们在外电场的作用下做定向运动就形成了电流。由于金属的载流子很多,所以导电性能很好。

绝缘体中的原子的外层电子受原子核的束缚力很大,在室温下不容易挣脱出来。由于载流子很少,所以绝缘体导电性能很差。

半导体的原子结构比较特殊,在室温下,载流子数目比导体少得多,但比绝缘体多很多,所以导电性能介于导体和绝缘体之间。为了定量描述导体、绝缘体、半导体,引入了电阻率这个物理量。用电阻率的大小来区分导体、绝缘体、半导体。通常将电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为导体;电阻率大于 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质称为绝缘体;电阻率介于前两者之间的一大类物质统称为半导体。

半导体材料之所以备受人们关注,并且得到广泛的应用,不是源于它们的电阻率在数值上与导体和绝缘体的区别,而是在于它们具有独特的区别于导体和绝缘体的物理特性。第一,半导体的电阻率具有热敏性,随温度的升高而明显地降低(负温度系数),而一般金属的电阻率随温度的升高而增加。利用半导体的这种特性,很容易制成热敏电阻或其他对温度敏感的传感器。第二,半导体的电阻率具有光敏性,即光照可改变半导体的导电特性,光照越强,电阻率越低。这是半导体区别于导体和绝缘体的另一特性。例如硫化铝薄膜电阻,无光照时,电阻为几十兆欧姆,当光照时,其电阻仅为几万欧姆。第三,半导体的电阻率受杂质的影响很大,这种杂

质性与导体和绝缘体截然不同。在金属导体中掺入少量杂质后,其电阻率虽有增加但变化不大;而半导体却不同,在纯净的半导体晶体中掺入极微量的杂质,就能使其导电性能大幅度地改变。不仅如此,选择不同类型的杂质,还可以改变半导体的导电类型。

1.1.2 本征半导体的导电特性

本征半导体就是纯净(不含杂质)而且具有完整晶体结构的半导体。硅和锗的晶体结构相同,下面以硅原子为例讨论。

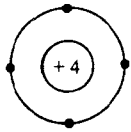


图 1.1 硅的简化原子结构模型

硅原子的原子序号为 14,由原子核和 14 个外层电子组成中性原子。它的最外层轨道上有 4 个价电子。硅原子的物理、化学性质主要由这 4 个价电子决定。在实际问题中,为了突出价电子的作用和便于讨论,通常把原子核和内层电子看做一个整体,称为惯性核。它的静电量为 4 个电子电量。于是就可以得到硅原子的简化模型如图 1.1 所示。硅原子的每一个价电子分别与相邻硅原子的 1 个价电子组成 1 个价电子对,这个价电子对为相邻 2 个原子所共有。价电子对中的每一个价电子,一方面围绕原来的原子核转动,同时又围绕相邻原子核转动,它们同时受到两个原子核的吸引作用。我们把这种对共有价电子所形成的束缚作用叫做共价键,并用套住两个相邻原子的共价电子的线环表示共价键,如图 1.2 所示。

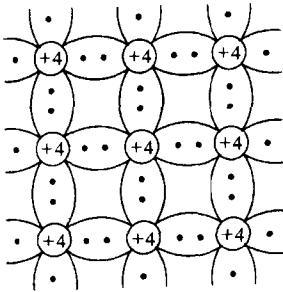


图 1.2 硅晶体平面结构示意图

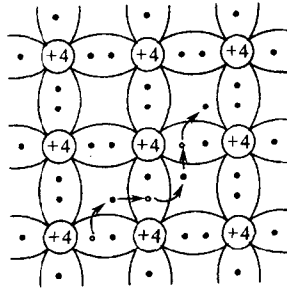


图 1.3 自由电子—空穴对的产生

在温度为绝对零度(约 -273°C)时,价电子不能从外界获得能量,不能挣脱原子核的束缚。此时本征半导体中没有可以自由运动的带电粒子,如同绝缘体一样。

在一定温度下或在一定强度光的照射下,少数价电子可以从外界获得足够的能量而挣脱共价键的束缚,成为自由电子。自由电子是一种可以参与导电的带电粒子,称为载流子。在外加电场的作用下,自由电子做定向运动形成电流。这与金属导电是相同的。

一部分价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时,在原来的共价键中留下一个空位,这种空位称为空穴,如图 1.3 所示。由于存在这样的空位,附近共价键中的电子就比较容易进来填补,而在附近的共价键中留下一个新的空位,其他地方的电子又有可能来填补后一个空位。从效果上看,这种共有电子的填补运动,相当于带正电荷的空穴在运动一样。为了与自由电子的运动区别开来,称这种运动为空穴运动,并将空穴看成带正电的载流子。这是金属导电所没有的。

在本征半导体中,受激产生一个自由电子,必然相伴产生一个空穴,电子和空穴是成对出现的,这种现象称为本征激发。如果自由电子与空穴相遇,即填补空穴,使电子—空穴对消失,

称为复合。电子—空穴对的产生与复合是一对矛盾运动,在一定温度下它们可以达到动态平衡,电子空穴对的数目相对地保持不变。当温度升高或受到光照时,电子空穴对的数量增加,本征半导体的导电能力随之增强。

虽然本征半导体中有电子和空穴 2 种载流子,而金属导体中只有电子 1 种载流子,但由于前者的载流子浓度远远低于后者,所以本征半导体的导电能力远远不如金属导体。

在室温下,本征半导体的导电能力很差,而且也不好控制,不能用来制造半导体器件。如果在本征半导体中适当地掺入少量的有用杂质元素,可以大大提高半导体的导电能力,而且可以利用掺杂元素的多少来精确地控制半导体的导电能力。这种人为掺入杂质元素的半导体称为杂质半导体,它在工程实际中得到广泛的应用。按所掺杂质元素的不同,可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1.1.3 杂质半导体的导电特性

1. N 型半导体

N 型半导体是在本征半导体硅晶体内掺入微量的五价元素磷构成的。由于所掺入的磷原子数量极微,并不改变硅单晶的共价键结构,只是使某些晶格结点上的硅原子被磷原子所取代,如图 1.4 所示。(图中电子用“.”表示,空穴用“o”表示。)磷原子有 5 个价电子,除了 4 个价电子与相邻的 4 个硅原子的价电子组成共价键外,剩下的 1 个价电子不参加共价键,只受磷原子核的微弱吸引。在室温下这个价电子受热激发获得的能量足以使它摆脱磷原子核的束缚而成为一个自由电子,几乎每一个磷原子都能提供一个这样的自由电子,失去价电子的磷本身成为一个带正电的不能移动的正离子不参与导电。所以磷原子仅提供一种载流子电子,故磷称为施主杂质。掺入施主杂质的半导体中,自由电子的数量远大于空穴的数量,这类杂质的半导体称为电子型半导体,或 N 型半导体。

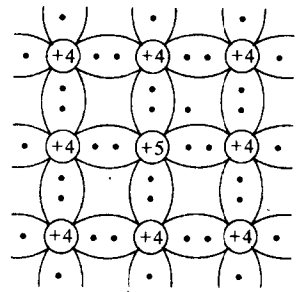


图 1.4 N 型半导体结构示意图

在 N 型半导体中,也同样存在着本征激发的现象,有电子—空穴对的产生,但比起掺杂而产生的电子来说数量少,传递电流的主要载流子是电子,故电子称为多数载流子(简称“多子”),空穴相应地称为少数载流子(简称“少子”)。而且由于电子的增多,空穴遇到电子而被复合的概率增大,N 型半导体中空穴的浓度远小于同温度下本征半导体中空穴的浓度。

在 N 型半导体中多子电子的浓度几乎由掺杂浓度决定,整个晶体呈电中性。

2. P 型半导体

如果在硅晶体中掺入微量的三价元素,如硼,由于硼的价电子只有 3 个,当它和周围的硅原子结合形成共价键时,因缺少一个电子而出现了空位,如图 1.5 所示。由于结构的不稳定,硼原子很容易从相邻硅原子的共价键中夺取一个束缚电子而形成稳定结构,硼原子接受一个电子变成带负电的不能移动的负离子不参与导电,同时硅原子的共价键中失去一个束缚电子便出现了新的空位(这就是空穴)。在常温下几乎每一个硼原子均接受硅晶体中的一个束缚电子而产生一个空穴,从而提供了与杂质硼原子相等的空穴。所以,硼原子接受电子称为受主杂质。受主杂质仅产生空穴(一种载流子)。这种掺杂三价元素的半导体中,空穴是多数载流子,所以称为空穴型半导体,或 P 型半导体。