

中等专业学校试用教材

电子技术基础

工科电工类(少学时)专业通用

李德润 宋熙茂 张如森 编



DIAN ZI JISHU JICHU



本书是根据国家教育委员会 1987 年 3 月制定的中等专业学校工科电工类(少学时)《电子技术基础教学大纲》编写的。为适应教学上的灵活性和因材施教的需要,适当地安排了部分加宽加深的选讲内容。

本书分上、下两篇。上篇模拟电子技术基础包括:半导体二极管和三极管、基本放大电路、场效应管及其放大电路、集成运算放大器、负反馈放大器、信号的运算及处理电路、功率放大电路、波形发生器和直流电源。下篇数字电子技术基础包括:逻辑门电路、数制及逻辑代数、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、脉冲的产生与变换、数-模和模-数转换。

本书通过对各种半导体器件及其电路的分析,阐述了电子技术中的基本概念、基本原理和基本分析方法。为了突出能力的培养,还安排了习题课和讨论课内容。书中附有一定数量的例题、思考题和习题。

本书可作为中等专业学校工科电工类理论教学约 140 学时和学时相近的其他类专业电子技术基础课程的教材,也可供有关工程技术人员自学和参考。

责任编辑 任庆陵

中等专业学校试用教材

电子技术基础

工科电工类(少学时)专业通用

李德润 宋熙茂 张如森 编

*

高等教育出版社出版

新华书店上海发行所发行

商务印书馆上海印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 29.25 字数 665,000

1990 年 3 月第 1 版 1990 年 3 月第 1 次印刷

印数 0001—10,140

ISBN 7-04-002722-4/TN·130

定价 5.40 元

前 言

本书是以国家教育委员会 1987 年 3 月制定的中等专业学校工科电工类(少学时)《电子技术基础教学大纲》为依据编写的。考虑到大纲拟定较早,电子技术发展很快,本书对模拟电子技术基础部分的内容和要求作了若干调整,以体现教育要面向现代化、面向世界、面向未来的精神。本书供理论教学约 140 学时使用,其参考课时分配如下表:

篇章	内 容	教学时数				篇章	内 容	教学时数			
		讲课	习题课	讨论课	合计			讲课	习题课	讨论课	合计
上	模拟电子技术基础	64	6	4	74	下	数字电子技术基础	54	6	4	64
一	半导体二极管和三极管	8			8	十	逻辑门电路	10		2	12
二	基本放大电路	10	2		12	十一	数制及逻辑代数	6	2		8
三	场效应管及其放大电路	4			4	十二	组合逻辑电路	8	2		10
四	集成运算放大器	8			8	十三	集成触发器	6			6
五	负反馈放大器	6		2	8	十四	时序逻辑电路	10	2		12
六	信号的运算及处理电路	4	2		6	十五	脉冲的产生与变换	10		2	12
七	功率放大电路	4			4	十六	数-模和模-数转换	4			4
八	波形发生器	8			8						
九	直流电源	12	2	2	16						

本书在推陈出新方面曾做了较多的考虑。例如,在讨论分立电路时,系以分立为集成服务的思路安排教学内容的。在模拟电子技术基础中,将模拟集成电路一章提前,以便在负反馈放大器及其以后各章中,均以模拟集成电路为主要对象进行讨论,形成以模拟集成电路为主干的体系。在数字电子技术基础中,以小规模数字集成电路引路,逐步向中规模集成电路深入,并使学生能达到初步使用中规模功能块的水平。数字电子技术基础部分以数字逻辑为主体,将脉冲电路从属于数字逻辑。删掉十五、十六两章并不影响数字逻辑体系。

为了适应中专培养应用型、工艺型人才和加强专业基础课的要求,对于学时较多的章节分别安排了习题课和讨论课,这在中专教科书中尚属初次尝试。在习题课和讨论课中,安排了一定数量的电子电路实例分析,有利于提高学生阅读电子电路图的能力。本书例题、习题与正文紧密配合,有些例题是正文的补充,某些内容有意让读者通过习题去探索掌握,以调节教学节奏,利于理解深化。

考虑到中专学生来源、程度以及各校讲课进度上的差异,书中增设了注“*”的部分。它们可以作为加深加宽的内容,目的在于拓宽读者的知识面,删略后对基本教学内容无影响。本书在阐述方法上,模拟电子技术基础部分比较详尽,而数字电子技术基础部分则比较精练,这对初学者是有利的。

本教材是在 1987 年春全国中等专业学校电子技术基础课程组和高等教育出版社组织重

点、难点章节编写评选的基础上选定主编的。第二航空技术专科学校宋熙茂同志被选定为模拟电子技术基础部分主编，其中第四、五两章由长春地质学校张如森同志编写；东北水电专科学校李德润同志被选定为数字电子技术基础部分主编。全书由李德润同志负责统稿。

本书审稿系采用双轨制。华中理工大学陈大钦副教授担任全书主审。全国中专电子技术基础课程组成员宋在龙同志担任模拟电子技术基础部分主审，课程组成员张如森同志担任数字电子技术基础部分主审。参加审稿的还有章浩平、谢之恒、彭容修、杨华等同志。主审和参审同志对书稿提出了许多宝贵的改进意见，纠正了某些叙述不十分确切或错误之处，对有些文字叙述也做了润色，对此我们表示衷心感谢。

由于电子技术更新快，编者水平有限，书稿虽根据各方面意见数次修改，但还会存在不少缺点和错误，恳切希望使用本书的师生和读者批评指正。

编者

1988年12月

上篇 模拟电子技术基础

电子技术是发展很迅速的学科之一。目前,它已广泛应用到各种领域,成为现代先进科学技术的一个重要组成部分。

电子技术也称为电子学(Electronics)。简单地说,电子技术就是应用电子元器件或电子设备来达到某种特定目的或完成某项特定任务的技术。电子技术研究的对象是电子器件(Electronic device)和由电子器件构成的各种基本功能电路,以及由某些基本功能电路所组成的有各种用途的装置或系统。电子技术按照其处理信号的不同可分为模拟电子技术和数字电子技术两部分。所谓模拟电子技术是研究在模拟信号(是指平滑的,连续变化的电压或电流)下工作的电子电路;而数字电子技术是研究在数字信号(是指离散的、不连续的电压或电流)下工作的电子电路。模拟电子电路主要分析放大及各种形式信号的产生、变换和反馈等。

根据教学大纲,电子技术基础课程是一门电子技术方面入门性质的基础技术课。它的任务是使学生获得电子技术的基本理论、基本知识和基本技能,培养学生分析问题和解决问题的能力,为以后深入学习电子技术的某些领域,以及为电子技术在专业中的应用打好基础。基本理论主要是指在已经学过“电路”课的基础上,进一步掌握电子电路的分析方法(例如图解法、等效电路法等);基本知识是指要求熟悉基本的电子器件和电子电路的性能及其主要应用;基本技能是指学会电子测试技术和电子电路的运算能力和识图能力。

对于器件、电路、应用的三者关系,编写时依据的原则是:管、路、用结合,管为路用,以路为主,也就是把课程重点放在最基本的电路上。对于电子器件(包括模拟集成组件),重点在于了解它们的外部性能和如何用于电路中。对于分立电路(Discrete circuit)与集成电路(Integrated circuit)的关系上,前三章为分立电路的基础部分,将“模拟集成电路”一章提前,以致有可能在“反馈放大器”及后续各章中,均以模拟集成电路为主要对象进行讨论,形成了分立为基础、集成电路为重点、分立为集成服务的体系,以适应当前电子技术的发展趋向。

目 录

上篇 模拟电子技术基础

第一章 半导体二极管和三极管	1	2.5 共集电极电路	61
1.1 半导体的基本知识	1	2.5.1 电路分析	61
1.1.1 半导体及其特性	1	2.5.2 射极输出器的应用	63
1.1.2 本征半导体	2	2.5.3 放大电路三种基本组态的比较	64
1.1.3 掺杂半导体	3	2.6 阻容耦合放大电路的频率特性	66
1.2 PN 结	5	2.6.1 单级阻容耦合放大电路的频率特性分析	66
1.2.1 PN 结的形成过程	5	2.6.2 单级阻容耦合放大电路的频率特性曲线	67
1.2.2 PN 结的单向导电原理	7	2.6.3 多级放大电路的频率特性及通频带	68
1.3 半导体二极管	9	2.7 习题课(阻容耦合放大电路的分析与计算)	69
1.3.1 半导体二极管的结构	9	2.7.1 多级电压放大电路的级间耦合方式	69
1.3.2 半导体二极管的特性和参数	10	2.7.2 两级阻容耦合放大电路的分析与计算	69
1.3.3 稳压二极管的特性和参数	14	2.7.3 具有射极输出器的多级阻容耦合放大电路的分析与计算	74
1.4 半导体三极管	15	本章小结	77
1.4.1 半导体三极管的工作原理	16	思考题与习题	78
1.4.2 半导体三极管的特性曲线	22	第三章 场效应管及其放大电路	86
1.4.3 半导体三极管的主要参数	25	3.1 结型场效应管	86
本章小结	29	3.1.1 结型场效应管的结构和工作原理	86
思考题与习题	29	3.1.2 结型场效应管的特性曲线及主要参数	87
第二章 基本放大电路	33	3.2 绝缘栅(MOS)场效应管	90
2.1 基本放大电路的组成及工作原理	33	3.2.1 N 沟道增强型场效应管	91
2.1.1 基本放大电路的组成	33	3.2.2 N 沟道耗尽型绝缘栅场效应管的工作特点	93
2.1.2 基本放大电路的直流通路和交流通路	34	3.2.3 场效应管的使用注意事项	95
2.1.3 共射基本放大电路的工作原理	37	3.3 场效应管放大电路	95
2.1.4 基本放大电路三种连接形式	39	3.3.1 共源放大电路	95
2.2 图解分析法	40	*3.3.2 源极输出器	98
2.2.1 静态分析	40	*3.3.3 三种基本放大电路的性能比较	100
2.2.2 动态分析	43	本章小结	100
2.2.3 非线性失真	46	思考题与习题	101
2.3 微变等效电路分析法	48		
2.3.1 简化的晶体管低频(H 参数)微变等效电路	49		
2.3.2 用简化的低频微变等效电路分析共发射极放大电路	51		
2.4 静态工作点的稳定	56		
2.4.1 温度对静态工作点的影响	56		
2.4.2 分压式电流负反馈稳定偏置电路	58		

第四章 集成运算放大器	103	5.6.1 反馈极性与组态的判断	145
4.1 恒流源电路	104	5.6.2 不同组态负反馈电路的特点及适用 场合	147
4.1.1 晶体管恒流源	104	5.6.3 关于应用负反馈扩展通频带问题	147
4.1.2 镜像电流源	105	5.6.4 关于负反馈放大器的自激问题	148
4.2 差动放大电路	107	本章小结	149
4.2.1 直耦放大器的温度漂移	107	思考题与习题	149
4.2.2 差模信号与共模信号	108	第六章 信号的运算及处理电路	153
4.2.3 差动放大电路	109	6.1 基本运算电路	153
4.3 简单的运算放大器	115	6.1.1 理想运算放大器	153
4.3.1 运算放大器的组成	115	6.1.2 加法运算电路	154
4.3.2 复合管	116	6.1.3 减法运算电路	155
4.3.3 简单的运算放大器	117	6.1.4 积分运算电路	157
4.4 集成运放 F007 简介	119	6.1.5 微分运算电路	158
4.5 集成运算放大器的主要参数	121	*6.2 集成模拟乘法器	159
本章小结	123	6.2.1 变跨导式乘法器电路	159
思考题与习题	123	6.2.2 应用举例——调制、解调器	161
第五章 负反馈放大器	127	*6.3 有源滤波器简介	162
5.1 反馈的基本概念	127	6.3.1 基本概念	163
5.1.1 什么是反馈、什么是负反馈	127	6.3.2 一阶有源滤波器	164
5.1.2 反馈放大器的框图	127	6.4 习题课(运算放大器运算电路的分 析与计算)	166
5.1.3 负反馈放大器的两个基本关系式	128	6.4.1 基本运算电路的分析与计算	166
5.1.4 直流反馈与交流反馈	128	*6.4.2 模拟乘法器应用举例	173
5.1.5 反馈极性的判断	128	本章小结	174
5.1.6 反馈方式	130	思考题与习题	174
5.2 负反馈放大器的组态	131	第七章 功率放大电路	177
5.2.1 电压串联负反馈	131	7.1 功率放大电路的任务与特点	177
5.2.2 电压并联负反馈	132	7.2 直接耦合互补对称电路(OCL电 路)	178
5.2.3 电流串联负反馈	133	7.2.1 乙类互补对称电路	178
5.2.4 电流并联负反馈	133	7.2.2 甲乙类互补对称电路	180
5.3 负反馈放大器放大倍数的一般表达 式	133	7.3 单电源互补对称电路(OTL电路)	182
5.4 负反馈对放大器性能的影响	135	7.4 集成功率放大器 DG(LA)4100 系 列简介	184
5.4.1 提高放大倍数的稳定性	135	7.4.1 DG4100 低频功率放大电路外形图及 应用电路	184
5.4.2 展宽频率	136	7.4.2 DG4100 低频功率放大电路的主要参 数	185
5.4.3 减小非线性失真	137	*7.5 变压器耦合推挽功率放大器	187
5.4.4 改变输入电阻和输出电阻	138	本章小结	190
5.5 深度负反馈放大电路的计算	139	思考题与习题	190
5.5.1 深度负反馈的特点	139	第八章 波形发生器	193
5.5.2 电压串联负反馈放大电路——同相 放大器	140	8.1 正弦波发生器	193
5.5.3 电压并联负反馈放大电路——反相 放大器	143	8.1.1 正弦波发生器的基本原理	193
5.5.4 电流串联负反馈放大电路	143		
5.5.5 电流并联负反馈放大电路	143		
5.6 讨论课	145		

8.1.2 RC 桥式正弦波振荡电路	196
8.1.3 LC 正弦波振荡电路	199
*8.1.4 石英晶体正弦波振荡器简介	203
8.2 非正弦波发生器	207
8.2.1 比较器	207
8.2.2 方波发生器	210
*8.2.3 锯齿波发生器	212
本章小结	244
思考题与习题	215
第九章 直流电源	222
9.1 单相整流电路	222
9.1.1 单相半波整流电路	223
9.1.2 单相桥式整流电路	224
9.2 滤波电路	226
9.2.1 电容滤波电路	226
9.2.2 电感滤波电路	229
9.3 硅稳压管稳压电路	230
9.3.1 硅稳压管稳压电路的工作原理	231
9.3.2 直流稳压电源的质量指标	231
9.4 晶体管串联型稳压电源	233
9.4.1 基本电路	233
9.4.2 稳压原理	234
9.4.3 输出电压的调节范围	234
9.4.4 对调整管的考虑	235
9.5 集成稳压电源	235
9.5.1 W7800 系列三端固定式集成稳压 器	235
*9.5.2 W317(W117)系列三端可调稳压	

器	239
9.6 晶闸管	241
9.6.1 晶闸管的结构和工作原理	241
9.6.2 晶闸管的伏安特性	243
9.6.3 晶闸管的主要参数	244
9.6.4 双向晶闸管简介	245
9.7 可控整流电路	246
9.7.1 单相可控整流电路	246
9.7.2 三相桥式半控整流电路	249
9.8 单结晶体管触发电路	252
9.8.1 晶闸管对触发电路的要求	252
9.8.2 单结晶体管	253
9.8.3 单结晶体管的张弛振荡器	255
9.8.4 单结管同步触发电路	257
9.9 讨论课(识读实用串联型稳压电 路)	259
9.9.1 提高串联型稳压电源性能的措施	259
9.9.2 晶体管串联型稳压电源的实例	263
9.9.3 晶体管串联型稳压电源读图练习	264
9.10 习题课(晶闸管应用电路分析)	265
9.10.1 晶闸管应用概况	265
9.10.2 单向晶闸管组成的自动稳压、稳流 电路	266
*9.10.3 交流控制器	268
本章小结	269
思考题与习题	270
上篇参考文献	276

下篇 数字电子技术基础

第十章 逻辑门电路	279
10.1 晶体管开关特性	279
*10.1.1 二极管开关特性	279
10.1.2 三极管开关特性	281
10.2 基本逻辑门	284
10.2.1 与逻辑及与门	284
10.2.2 或逻辑及或门	286
10.2.3 正负逻辑体制	287
10.2.4 非逻辑及非门	287
10.2.5 复合门	289
10.3 集成 TTL 与非门	289
10.3.1 浅饱和 TTL 与非门	289
*10.3.2 抗饱和 TTL 与非门	293
10.3.3 集电极开路与非门	294
10.4 CMOS 逻辑门	296

10.4.1 CMOS 反相器	296
10.4.2 CMOS 逻辑门	297
10.4.3 CMOS 传输门和三态门	298
10.5 讨论课	299
10.5.1 反相器应用举例	299
10.5.2 接口电路	302
本章小结	303
思考题与习题	304
第十一章 数制及逻辑代数	308
11.1 数制与码制	308
11.1.1 数制	308
11.1.2 码制	311
11.2 逻辑代数的基本公式	313
11.2.1 基本定律	313
11.2.2 常用公式	314

11.2.3 基本规则	314
11.3 逻辑函数的化简	315
11.3.1 逻辑函数化简的意义	315
11.3.2 逻辑函数的卡诺图化简法	317
11.4 习题课	322
11.4.1 具有约束条件的逻辑函数的化简	323
11.4.2 两种 CMOS 集成逻辑门逻辑功能的分析	323
11.4.3 逻辑函数的五种表示方法	325
本章小结	326
思考题与习题	326
第十二章 组合逻辑电路	330
12.1 组合电路的设计	330
12.1.1 组合电路设计举例	331
*12.1.2 组合电路中竞争冒险现象	335
12.2 数码显示译码器	335
12.2.1 数码显示器件	335
12.2.2 数码显示译码器的分析	338
12.3 数据选择器和数据分配器	341
12.3.1 数据选择器	341
12.3.2 数据分配器	343
12.3.3 典型应用——数据传输	344
12.4 习题课(组合电路的分析与设计举例)	344
本章小结	348
思考题与习题	348
第十三章 集成触发器	353
13.1 RS 触发器	353
13.1.1 基本 RS 触发器	353
13.1.2 同步 RS 触发器	354
13.1.3 主从 RS 触发器	355
13.1.4 RS 触发器逻辑功能的表示方法	356
13.2 JK 触发器	358
13.2.1 主从 JK 触发器	358
*13.2.2 一次变化问题	359
*13.2.3 边沿 JK 触发器	360
13.3 D 触发器和 T 触发器	361
13.3.1 D 触发器	361
13.3.2 T 触发器	362
13.4 CMOS 触发器	363
13.4.1 CMOS 主从 D 触发器	363
*13.4.2 CMOS 主从 JK 触发器	364
本章小结	366
思考题与习题	366

第十四章 时序逻辑电路	369
14.1 时序逻辑电路概述	369
14.2 寄存器	370
14.2.1 数码寄存器	370
14.2.2 移位寄存器	371
14.3 二进制计数器	374
14.3.1 异步二进制计数器	374
14.3.2 同步二进制计数器	378
14.4 同步计数器的分析	379
14.5 异步计数器的分析	383
14.5.1 异步计数器的分析方法	383
14.5.2 中规模集成异步计数器逻辑功能的分析与扩展	388
14.6 习题课	392
14.6.1 中规模集成同步计数器	392
14.6.2 节拍发生器	394
本章小结	396
思考题与习题	396
第十五章 脉冲的产生与变换	402
15.1 多谐振荡器	402
*15.1.1 TTL 与非门基本多谐振荡器	402
15.1.2 RC 环形多谐振荡器	404
15.1.3 石英晶体多谐振荡器	406
*15.1.4 分立集-基耦合多谐振荡器	406
15.2 单稳态触发器	408
15.2.1 TTL 与非门微分型单稳态触发器	408
*15.2.2 分立集-基耦合单稳态触发器	410
15.2.3 单稳态触发器的应用	411
15.3 双稳态触发器	412
15.3.1 带电平转移二极管的施密特触发器	412
15.3.2 回差电压可调的施密特触发器	413
*15.3.3 分立射极耦合施密特触发器	414
15.3.4 施密特触发器的应用	415
*15.3.5 分立集-基耦合双稳态触发器	416
15.4 集成定时器	418
15.4.1 CMOS 定时电路的分析	418
15.4.2 定时器的应用	420
15.5 讨论课	423
15.5.1 定时器的应用	423
15.5.2 综合应用——数字钟	425
本章小结	425
思考题与习题	426
第十六章 数-模和模-数转换	430

16.1 数-模转换器	430	思考题与习题	440
16.1.1 T型电阻 DAC	430	下篇参考文献	442
16.1.2 集成倒 T 型电阻 DAC	433	附录 I 国产半导体分立器件型号命名方	
16.2 模-数转换器	434	法	443
16.2.1 模-数转换器的基本概念	434	附录 II 半导体器件的主要参数	444
16.2.2 逐次比较型 ADC	436	附录 III 半导体集成电路型号命名方法 ...	450
16.2.3 双积分 ADC	438	部分习题答案	452
本章小结	440		

第一章 半导体二极管和三极管

本章简单介绍本征半导体和掺杂半导体的导电规律,讨论 PN 结的单向导电特性,在此基础上,介绍半导体二极管和三极管。

1.1 半导体的基本知识

1.1.1 半导体及其特性

一、半导体

各种物质的导电能力是不同的,按照其导电能力的强弱,可以分为三大类:导电能力特别强的物质叫导体,例如一般的金属、碳、电解液等,导体的电阻率通常在 $10^{-4} \sim 10^{-1} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; 导电能力非常差,几乎可以看成不导电的物质叫绝缘体,例如胶木、橡胶、陶瓷等,绝缘体的电阻率通常在 $10^{13} \sim 10^{26} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; 而导电能力在导体与绝缘体之间的物质叫半导体 (Semiconductor), 常用的半导体材料有锗、硅、硒及许多金属氧化物和硫化物等,半导体的电阻率在 $10^1 \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 范围内^①。

二、半导体的特性

半导体之所以得到广泛的应用,并不是因为它的导电能力介于导体与绝缘体之间,而是由于它具有一些独特的导电性能,这些特性主要表现在其导电能力对一些因素的影响十分敏感。

1. 杂敏性: 半导体对杂质很敏感。在金属导体中,即使掺入千分之一的杂质,其电阻率的变化也是微不足道的。而在半导体硅中只要掺入亿分之一的硼,电阻率就会下降到原来的几万分之一。这是半导体最显著、最突出的特性。正因为半导体具有这种特性,于是人们就用控制掺杂的方法,制造出各种不同性能、不同用途的半导体器件。

2. 热敏性: 半导体对温度很敏感。当环境温度变化时,金属导体的电阻率变化较小。例如,温度升高 10°C , 铜的电阻率仅增加 4% 左右。但半导体的电阻率随温度升高而显著减小。例如,温度每升高 10°C , 半导体的电阻率减小为原来的二分之一。对温度变化反应很灵敏,是半导体的又一个重要特性。它对半导体器件的工作性能有许多不利的影响。但利用这一特性可制成自动控制中有用的热敏元件,如热敏电阻等。

3. 光敏性: 半导体对光照很敏感。金属导体放在阳光下或者放在暗处,它的电阻率通常看不出有什么变化。但是,半导体受光照射时,它的电阻率会显著减小。例如,一种硫化镉 (CdS) 的半导体材料,在一般灯光照射下,它的电阻率是移去灯光后的几十分之一或几百分之一。自动控制中用的光电二极管和光敏电阻等,就是利用半导体这一特性制成的。

半导体之所以具有以上特性的根本原因在于半导体的特殊结构及其导电特性。下面就研

^① 见参考文献[12]第 1 页。

究本征半导体是怎样导电的。

1.1.2 本征半导体

不含有杂质的、完全纯净的半导体称为本征半导体(或称纯净半导体)。半导体和其他各种物质一样,是由原子组成的,但这些原子不是任意地堆在一起的,而是按照一定的规律、很整齐地排列着,如图1.1所示,这就是半导体单晶体晶格结构。原子有规律地整齐排列而形成的物体称为晶体。锗和硅等半导体都是晶体,所以半导体管又称晶体管。

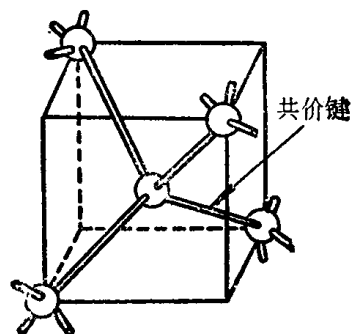


图 1.1 硅和锗晶体晶格结构图

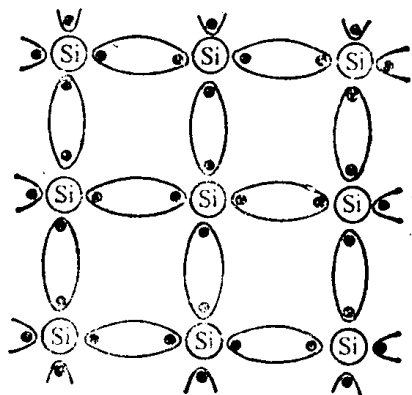


图 1.2 硅单晶体的共价键结构平面图

硅、锗原子的外层电子都是四个,它组成晶体时,晶体内部结构的组合方式是共价键结构,如图1.2所示。每个价电子由于受到相邻两个原子核的束缚,故它既不象在导体中那样容易挣脱,也不象在绝缘体中那样被束缚得很紧,所以晶体的导电能力比导体差很多,但比绝缘体好。在光和热的作用下,晶体中的价电子获得能量,比较容易挣脱共价键的束缚成为自由电子(Free electron)。

一、本征激发产生自由电子-空穴对

在一定温度下或在一定强度光的照射下,本征半导体硅和锗中的少数价电子获得足够的能量后(在室温条件下,硅为 1.1eV ,锗为 0.72eV)^①,能挣脱共价键的束缚而形成带单位电荷的自由电子,同时在原来共价键上,留下了相同数量的空位,这种现象称本征激发。在本征

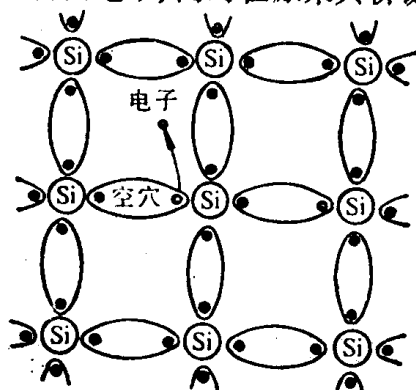


图 1.3 单晶体中本征激发产生电子与空穴

半导体中,每激发出来一个自由电子,就必然在共价键上留下一个空位,这个空位称带单位电荷的空穴(Hole)。可见,自由电子和空穴总是相伴而生,成对出现,我们称它为自由电子-空穴对,如图1.3所示。在产生电子-空穴对的同时,有的自由电子在杂乱的热运动中又会不断地与空穴相遇,重新结合,使电子-空穴对消失,这称之为复合。电子-空穴对又激发又复合,这是半导体内进行着的一对矛盾运动。但是,在温度一定的条件下,电子-空穴对的激发和复合可以逐渐达到动态平衡。这时,本征激

^① 见参考文献[11]第182页。

发和复合虽然仍在继续不断地进行,但在整块半导体内,电子-空穴对的数目相对地保持一定。例如,室温时纯硅的自由电子或空穴的浓度 n_i 约为 $1.5 \times 10^{10}/\text{cm}^3$, 纯锗约为 $2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ ①,而金属中的自由电子浓度要高得多,约为 $10^{23}/\text{cm}^3$ 。因此,本征半导体的导电能力是很低的。温度越高,本征激发越厉害,所产生的电子-空穴对也越多,动态平衡时电子或空穴的浓度也越大,半导体的导电能力也就越强。

二、本征半导体的导电特性

1. 两种载流子

单晶体中一个原子上的价电子,在本征激发后成为自由电子时,这个本来电中性的原子就带正电,相当于失去一个电子后,留下的空穴带一个正电荷。这样邻近原子上的价电子就很容易跳过来填补这个空穴,这时空穴就转移到邻近的那个原子上去了,这个新空位又会被其邻近的价电子所填补。依次递补,必然形成一种价电子填补空穴的运动,在效果上如同一个带正电的空穴在价电子移动的相反方向上的运动一样。为了区别于带负电的自由电子的运动,就把受束缚的价电子填补空位的运动叫“空穴”运动。

我们知道,金属导体的导电作用是通过带负电的自由电子的定向运动来实现的。半导体的导电作用则是通过带负电的自由电子和带正电的空穴的同时定向运动来实现的。我们把电子和空穴这些能运载电荷的粒子叫载流子。应当指出,虽然金属导体中只有一种载流子——自由电子,而半导体中有两种载流子——自由电子和空穴,但由于后者的载流子总浓度远远低于前者,所以本征半导体的导电能力远远不如金属导体强。

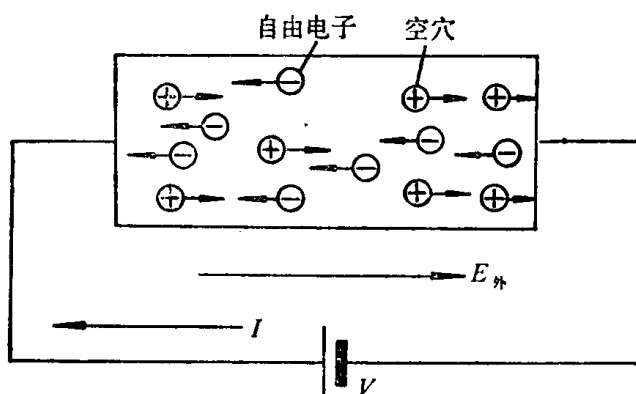


图 1.4 本征半导体的两种导电方式

2. 两种导电方式

如图 1.4 所示,当在一块本征半导体的两端加上电压时,就有电流产生。这电流是由两部分组成的,一部分是自由电子在外电场作用下逆电场方向运动形成的电子电流;另一部分是空穴在外电场作用下顺电场方向运动形成的空穴电流。由于电子和空穴所带电荷的极性相反,它们的运动方向也是相反的,因此形成的电流方向则是一致的。即流过外电路的电流等于二者之和。

1.1.3 掺杂半导体

在本征半导体中,虽然有自由电子和空穴两种载流子,但本征激发的载流子数目是有限的,所以其导电能力很弱,而且导电能力的强弱也不好控制。为了克服上述缺点,人们在实践中发现:如果在本征半导体中,适当地掺入少量的有用杂质元素,就可以大大提高半导体的导电能力,而且可以利用掺杂的多少来精确地控制半导体导电能力的强弱。因而掺杂半导体在

① 见参考文献[10]第1页。

实际中得到广泛的应用。在本征半导体中,自由电子数和空穴数是相等的,但是掺入少量杂质后,两种载流子数就不相等了。根据所掺杂质的不同,在掺杂半导体中,所增加的载流子可能是自由电子,也可能是空穴,因而掺杂半导体有电子型(N型)和空穴型(P型)之分。

一、N型半导体

如果在本征硅(Si)内掺入微量的五价元素磷(P),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为磷原子所取代,如图 1.5(a) 所示。磷原子有五个价电子,其中四个与周围的四个硅原子的价电子组成共价键,而剩下的一个价电子所受的束缚力较弱。理论计算表明,把它分离出来成为自由电子所需能量很小:硅约为 0.05 eV,锗约为 0.01 eV。因而,在常温下这些受束缚甚弱的电子几乎全部可以成为自由电子,而留下带正电的杂质离子。由此可见,每个杂质原子提供一个自由电子。如在本征硅内掺入亿分之一的五价元素,则杂质原子提供的自由电子数为 $10^{-8} \times 10^{23}/\text{cm}^3 = 10^{14}/\text{cm}^3$, 远远超过其本征激发的本征载流子浓度($10^{10}/\text{cm}^3$)。在这样的半导体中,自由电子数远超过空穴数,电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子),它的导电以电子为主,故这种半导体称为电子型(N型)半导体。每掺入一个五价元素便可以施出一个多余的电子,故把这类杂质称施主杂质。

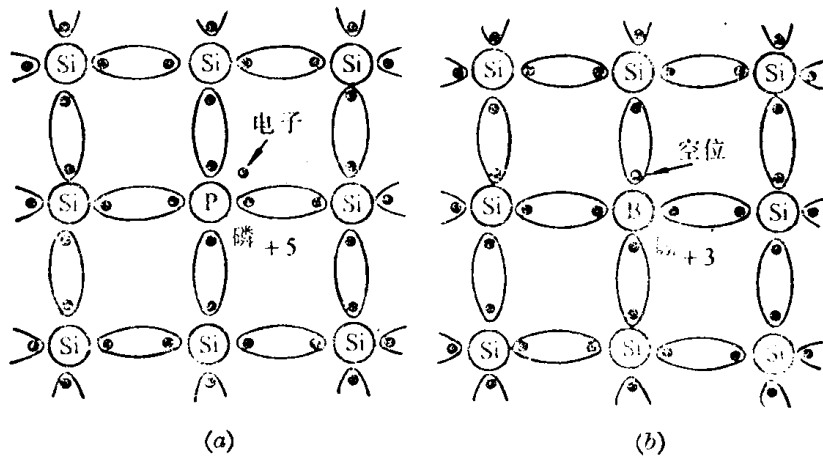


图 1.5 硅单晶中掺杂的示意图
(a) 硅中掺磷形成自由电子 (b) 硅中掺硼形成空穴

二、P型半导体

在本征半导体内掺入微量的三价元素硼(B)时,便发生另一种情况。具有三个价电子的硼原子在与周围的硅原子组成共价键时,尚有一个空位未被填满,如图 1.5(b) 所示,其邻近硅原子的价电子很容易填补这个空位(仅需 0.0112 eV),从而产生一个空穴及一个带负电的杂质离子。在这种半导体中,空穴数远大于电子数,空穴为多子,电子为少子,它的导电以空穴为主,故称空穴型(P型)半导体。由于每掺入一个三价元素便产生一个能接受电子的空穴,故把这类杂质称受主杂质。

三、掺杂半导体的导电特性

由于掺杂半导体的载流子数比本征半导体多得多,所以在同样温度条件下,它的导电能力比本征半导体也高得多。掺杂半导体的导电过程与本征半导体基本相同,所不同的是 P 型半

导体中的电流主要是空穴电流, 自由电子电流几乎可以忽略不计; 而 N 型半导体中的电流主要是自由电子电流, 空穴电流几乎可以忽略不计。

应该指出, 在掺杂半导体中, 本征激发仍然存在, 只不过本征激发所产生的载流子浓度远小于掺杂所带来的载流子浓度。

还须指出, 无论是 N 型半导体还是 P 型半导体, 它们虽然都有一种载流子占多数, 但是, 就整块半导体来说, 它既没有失去电子, 也没有获得电子, 掺杂并没有破坏整块半导体内正、负电荷的平衡状态, 是呈电中性的, 即对外是不带电的。只有在掺杂半导体的两端加上电压时, 才有电流产生, 才反映出掺杂半导体的导电特性。

总之, 半导体的导电能力随掺入微量杂质多少、温度高低, 光照强弱而显著变化。半导体不仅有本征半导体, 还有掺杂半导体。决定半导体导电性能的载流子不仅有电子, 还有空穴。本征半导体的主要特征是两种载流子的浓度相等, 掺杂半导体的主要特征是两种载流子的浓度不相等。掺杂半导体有 P 型、N 型之分。在 P 型中, 空穴是多子, 它近似等于受主杂质的原子数, 电子是少子, 它小于本征电子数; 在 N 型中, 电子是多子, 它近似等于施主杂质的原子数, 空穴是少子, 它小于本征空穴数。

1.2 PN 结

在一块完整的晶片上, 通过一定的掺杂工艺, 一边形成 P 型半导体, 另一边形成 N 型半导体。在 P 型和 N 型半导体结合面的两侧, 便形成一个特殊的带电薄层, 这个薄层叫 PN 结 (PNjunction)。PN 结的形成是至关重要的, 因为它是构成半导体二极管、三极管、场效应管、可控硅和半导体集成电路等多种半导体器件的基础。

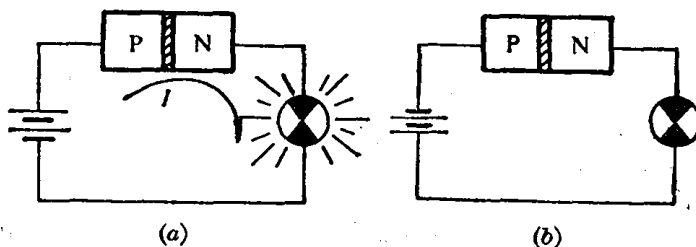


图 1.6 PN 结单向导电的实验

(a) 正向接法 (灯亮) (b) 反向接法 (灯不亮)

在电源和灯泡所组成的电路中, 接入一个 PN 结, 如图 1.6 所示。改变电源极性, 可以发现, 当电源的正极与 P 型半导体连接 (即为正向连接时), 灯泡就亮, 说明流过灯泡的电流较大; 当电源的负极与 P 型半导体连接 (即为反向连接) 时, 则灯泡不亮, 说明流过灯泡的电流非常小。由此可见, PN 结具有单向导电的特性。PN 结之所以具有这种特性, 是由它的内部载流子运动所决定的。本节将对 PN 结的形成过程和单向导电特性做深入的讨论。

1.2.1 PN 结的形成过程

一、内电场的建立

由于 P 型和 N 型半导体结合面两侧同类型载流子存在浓度差, P 型区多子空穴的浓度比

N 型区少子空穴的浓度高得多, P 型区的空穴就会向 N 型区扩散; 而 N 型区多子电子的浓度比 P 型区少子电子的浓度高得多, N 型区的电子就会向 P 型区扩散。所以多子扩散运动是指载流子在同类型载流子浓度差作用下的定向运动。通常, 扩散是从浓度差最大的交界面附近开始的, 如图 1.7(a) 所示。图中的 P 型和 N 型半导体只画出了其中的杂质离子和多数载流子, 至于晶格系上的半导体原子及少数载流子均未画出。

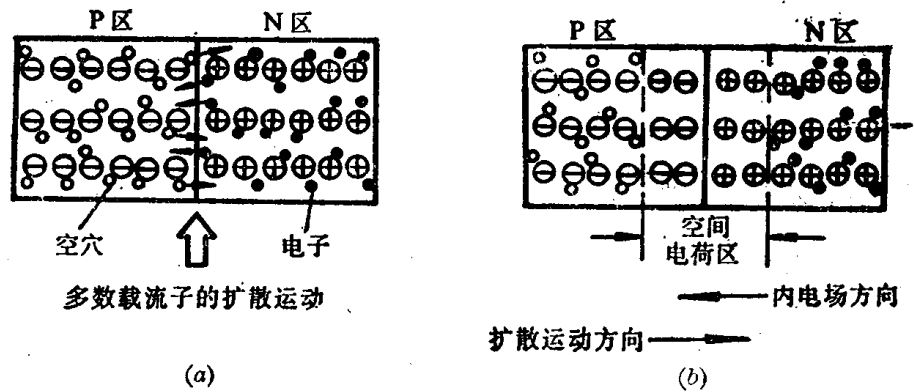


图 1.7 PN 结的形成过程

(a) 构成 PN 结时, 多子的扩散运动 (b) 空间电荷区的形成和内电场建立

扩散运动的结果是: P 区的空穴进入 N 区后, 便淹没在 N 区大量的电子之中, 并与之复合。在邻近界面的 P 区, 由于空穴向 N 区扩散, 并与由 N 区来的电子复合, 这样在 P 型一侧由于空穴减少, 出现了带负电的杂质离子层; 同理, 在 N 区一侧由于电子的减少, 出现了带正电的杂质离子层, 如图 1.7(b) 所示。由于这些离子固定排列在晶格的结点上, 不能自由运动, 所以并不参与导电, 这样, 在交界面两侧形成一个带异性电荷的薄层, 称空间电荷区 (Space charge region), 即所谓 PN 结。这个空间电荷区中的正、负离子形成了一个空间电场, 称它为内电场, 用 ϵ_0 表示。空间电荷区中的正、负电荷产生的电位差, 称为接触电位差或称势垒。而空间电荷区以外的 P 区和 N 区仍是电中性区。

二、内电场对多数载流子的作用

多子(电子和空穴)的扩散运动形成的电流分别称为电子和空穴扩散电流, 如前所述, 两者的方向是相同的, 总的扩散电流为电子扩散电流和空穴扩散电流之和。多子扩散运动的方向与内电场方向相反。由此可知, 多子的扩散运动建立内电场, 而内电场反过来又会阻碍多子扩

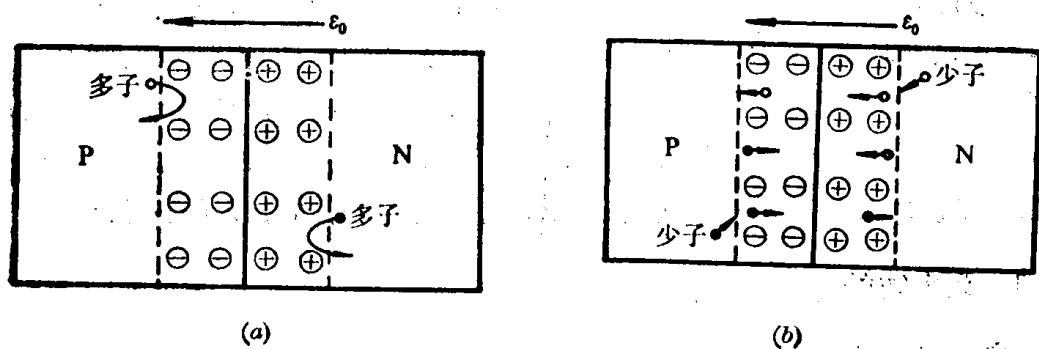


图 1.8 内电场的作用

(a) 阻碍多子扩散 (b) 帮助少子漂移

散运动的进行,如图 1.8(a) 所示。当 P 型区的空穴扩散到内电场里以后,受到一个与扩散运动方向相反的电场力作用,力图把它拉回到 P 型区;当 N 型区的电子扩散到内电场里以后,也受到一个与扩散运动方向相反的电场力的作用,也力图把它再拉回到 N 型区。可见,随着扩散的不断进行,交界面两侧积聚的电荷逐渐增多,扩散电流就会逐渐减小。由于内电场对多子的扩散有阻碍作用,因此,空间电荷区中的正、负离子层又称阻挡层。在这个区域内,多子已扩散到对方因复合而消耗殆尽,所以又称耗尽层。

三、内电场对少数载流子的作用

由于空间电荷区的出现,当 P 型区的少子(电子)和 N 型区的少子(空穴)一旦到空间电荷区边缘,即被内电场拉向对方,形成与扩散运动相反的运动,我们把少子在内电场的作用下的这种运动叫做漂移运动,如图 1.8(b) 所示。少子漂移运动形成的电流,叫做漂移电流。两个区域里少子漂移运动形成的电流方向相同,总和为电子漂移电流和空穴漂移电流之和。漂移电流的大小,决定于少子的多少和运动情况,在同一半导体里又取决于环境温度的高低。温度高,少子数目就多,在一定时间里进入到内电场中的数目也多,漂移电流也较大。

所以,PN 结内同时存在着机理不同、方向相反的两种电流——多子的扩散电流和少子的漂移电流,PN 结的宏观电流应为两者之差。PN 结中载流子的运动方向和电流方向列于表 1.1 中。

表 1.1 PN 结中载流子的运动方向和电流方向

运动方式	产生的原因	载流子运动方向	电 流 方 向
扩 散	载流子浓度分布不均匀	由浓度高处向浓度低处	空穴: 同运动方向 电子: 反运动方向
漂 移	电场力的作用	空穴: 顺电场 电子: 逆电场	与电场方向相同

四、PN 结形成

由上面分析知道,内电场有两个作用:阻碍多子继续扩散,使扩散运动削弱;帮助少子不断漂移,使漂移运动增强。当扩散电流的减小与漂移电流的增大达到大小相等、方向相反而互相抵消时,从宏观上看,在交界面处没有电流,空间电荷区就不再加宽,PN 结的厚度稳定不变,达到暂时的动态平衡状态,称为平衡 PN 结。平衡 PN 结的总厚度通常约为零点几个微米。平衡 PN 结的接触电位差 V_0 。一般为零点几伏。 V_0 的大小一般与半导体材料、掺杂浓度和温度有关,通常有:

硅 PN 结 $V_0 \approx 0.6 \sim 0.7 \text{ V}$

锗 PN 结 $V_0 \approx 0.2 \sim 0.3 \text{ V}$

当温度升高时,PN 结的接触电位差下降,其温度系数约为 $-2.5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$,这是造成半导体器件特性随温度变化的原因之一。

1.2.2 PN 结的单向导电原理

在 PN 结两端加外电压,称为给 PN 结以偏置。当给 PN 结加上正向电压(外电源正极接