

高等学校函授教材
(兼作高等教育自学用书)

模拟电子技术基础

应巧琴 田志芬 朱慕荣 朱桂范 编

高等教育出版社
1984年

内 容 提 要

本书是根据高等工业学校《电子技术基础函授教学大纲》(模拟电子技术部分)编写的。内容包括: 半导体二极管和三极管、放大电路基础、放大器的频率响应和阶跃响应、场效应管及其放大电路、负反馈放大电路、正弦波振荡电路、直接耦合放大器和集成运算放大器、运算放大器的应用、功率放大器、直流稳压电源、晶闸管电路。书中通过对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、基本原理和基本方法。各章均附有内容小结、思考题、习题; 并设有测验题, 以便检查学习效果。

本书可作为高等学校工科基础课程的函授教材和自学用书, 也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

本书由华中工学院江庚和主审, 由江庚和、李本藩、张明浩、林卫中、肖锡湘、朱如琪参加的审稿会复审, 同意作为函授教材出版。

高等学校函授教材

模拟电子技术基础

应巧琴 田志芬 朱襄荣 朱桂范 编

•
高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

•
开本787×1092 1/16 印张27 字数617 000

1985年6月第1版 1991年1月第7次印刷

印数30 271—33 382

ISBN 7-04-001581-1/TN·62

定价 6.95 元

序 言

本书是根据高等工业学校《电子技术基础函授教学大纲》(模拟电子技术部分)编写的, 正式出版前曾经东北工学院函授和夜大试用。

考虑到函授自学的特点, 本书选材比较精练, 阐述比较细致, 注意循序渐进由浅入深, 力求做到讲解清楚、概念准确。每章前都明确提出学习要求, 每节后都有一个小结。为了做到既不损害教材的系统性, 又能解决学生在学习过程中容易出现的糊涂概念, 在书中的重点章节内加入了一些“讨论”, 用来帮助学生加深对若干重要概念的理解。为了培养分析解决实际问题的能力, 书中除了在讲解和举例时尽可能联系实际和引用实际资料外, 还在一些章节后面加入了“实用电路举例”。注意到电子线路的发展趋势, 本书对线性集成电路及其应用作了适当的加强。

本书附有比较多的复习思考题和习题, 这些复习思考题和习题安排在各节后面, 以便读者充分、及时地复习和练习, 书末还附有部分习题的答案, 可供读者解题时参考。本书每章末都有“测验题”, 供读者在学完一章后作自我检查自学效果之用。

本书内容分大字排印和小字排印两种, 其中大字排印的为必读内容, 小字排印的为选读内容, 可根据情况具体掌握。对后继课程中还要讲解晶闸管电路的专业来说, 本书的最后一章可删去不读, 否则就应该要求阅读。

全书共分十一章。第一、三、七、八章由应巧琴同志编写, 第二、四、十一章由田志芬同志编写, 第五、六章由朱慕荣同志编写, 第九、十章由朱桂范同志编写, 应巧琴和田志芬负责全书定稿。东北工学院电子技术教研室的陆缀道副教授和王文辉, 李景华、刘淑英等同志对本书的编写提出了宝贵意见, 许多同志为本书的编写做了大量工作。

本书由华中工学院江庚和副教授主审, 参加审阅的还有李本藩、张明浩、林卫中、肖锡湘和朱如琪同志。在评审过程中, 中南矿冶学院, 北京钢铁学院、东北电力学院等兄弟院校也对本书提出了许多宝贵的意见。在此表示深切感谢。

由于我们水平有限, 经验不足, 书中一定会存在不少缺点和错误, 诚恳地希望读者给予批评指正。

编者

1984年6月

本课程特点及学习方法

电子技术基础是高等工业学校电力和自动化类专业的一门技术基础课。学习本课程之前,读者必须具备高等数学和电路理论等先修课程的知识。

学习本课程的要求是:比较系统地理解一些常用电子器件和基本电子电路的工作原理;掌握分析、计算电子电路的一些基本方法;通过实验,在电子线路的安装、调试方面获得一定的训练;为学习后续的有关专业课打下必要的基础。

本课程的特点是具有明显的工程性。这主要表现在两个方面:一是内容安排以实用典型电路为纲,而不是以分析方法为纲。在分析一个电路时,根据需要,往往要夹杂使用若干不同的方法;二是分析计算时常常要忽略一些相对次要的因素和数据,而不是把所有因素都考虑进去。由于电路元件(尤其是半导体器件)参数的分散性和有限的稳定性,把所有因素全部考虑进去并不会增加计算的准确性,而忽略一些相对次要的因素不但可得到足够的计算准确度,而且可使分析简便,概念清楚。这两个方面的特点应该在学习之前预先明确,以便在学习过程中随时注意。

阅读教材是函授自学中最重要的环节。教材内容分必读内容(大字)和选读内容(小字)两类。读者可以在完成必读内容的阅读和复习思考题、习题的前提下,根据自己的能力,再去阅读选读内容。阅读可以以节为单位,先粗读后精读。粗读时侧重于对内容有一个轮廓性的认识,精读时则应该认真思考,把每一个细节都搞清楚。阅读完一节后,最好自己记一下笔记,简要写出这一节所讨论的主要问题,分析问题的方法和得到的重要结论以及主要公式。

每一节末都有复习思考题,其中有的是用来帮助读者复习本节主要内容的复习性问题,有的是用来启发读者深入思考的思考性问题。对于复习性问题,应该尽可能用自己的语言来加以解答,对于思考性问题,则应该认真思考,以便更加深刻地理解一些重要概念。复习思考题不必做在作业本上。

每节末一般都有习题。习题应做在作业本上并交给教师批阅。做习题应该注意条理清晰,书写整齐;运算时应先列出文字式,经过化简,最后才代入数字得出结果,并注明单位。书末附有部分习题的参考答案。由于每个习题的答案可能因解题方法不同而有所差异,所以给出的答案仅供参考。

每章末的测验题是供读者在学完一章时作自我检查学习效果用的。做测验题时不要看书。测验题中注明了答题时间和评分标准,读者可根据它们自行评分,以资自我衡量。

本课程是一门实践性较强的课程,所以实验是本课程的一个重要环节,除了阅读教材之外,还必须完成一定的实验项目。做实验时应该做到认真预习,认真记录实验中的现象和数据,认真分析所记现象和数据。具体的实验内容、实验报告的写法要严格按照有关实验指导书的要求,认真完成。

目 录

第一章 半导体二极管和三极管1	2-1-3 放大电路的工作原理47
1-1 半导体的物理基础.....1	小结、复习思考题、习题51
1-1-1 半导体的晶体结构1	2-2 图解分析法52
1-1-2 本征半导体2	2-2-1 静态工作情况分析52
1-1-3 N型半导体和P型半导体4	2-2-2 动态工作情况分析55
1-1-4 漂移电流和扩散电流7	2-2-3 电路参数对静态工作点的影响59
小结、复习思考题7	2-2-4 非线性失真60
1-2 PN结8	2-2-5 最大输出电压幅值62
1-2-1 平衡状态的PN结8	小结、复习思考题、习题63
1-2-2 外加正向电压时的PN结10	2-3 计算分析法66
1-2-3 外加反向电压时的PN结12	2-3-1 静态工作点的计算66
1-2-4 PN结的伏安特性.....13	2-3-2 晶体管的 h 参数微变等效电路68
1-2-5 PN结的反向击穿.....14	2-3-3 晶体管输入电阻 r_{be} 的近似计算.....73
1-2-6 PN结的电容效应.....14	2-3-4 用微变等效电路法计算放大倍数75
小结、复习思考题16	2-3-5 放大器的输入电阻和输出电阻77
1-3 半导体二极管.....17	小结81
1-3-1 二极管的结构17	讨论 关于运用计算分析法的几个问题82
1-3-2 二极管的伏安特性17	复习思考题、习题87
1-3-3 二极管的主要参数19	2-4 静态工作点的稳定89
1-3-4 二极管的近似等效电路20	2-4-1 温度对静态工作点的影响89
小结、复习思考题、习题21	2-4-2 分压式电流负反馈偏置电路91
1-4 稳压管.....23	2-4-3 其它工作点稳定电路97
复习思考题、习题25	小结、复习思考题、习题100
1-5 半导体三极管.....26	2-5 放大器的技术指标102
1-5-1 三极管的结构和类型26	复习思考题103
1-5-2 三极管的工作原理26	2-6 放大电路的三种接法
1-5-3 三极管的特性曲线31	及其性能比较103
1-5-4 三极管的主要参数35	2-6-1 共基极放大电路103
1-5-5 温度对晶体管参数的影响39	2-6-2 共集电极放大电路106
小结、复习思考题、习题41	2-6-3 三种基本放大电路的比较110
测验题.....43	小结、复习思考题、习题110
第二章 放大电路基础45	2-7 阻容耦合多级放大器114
2-1 放大电路的工作原理.....45	2-7-1 多级放大器的组成114
2-1-1 放大器的功用45	2-7-2 多级放大器的耦合方式115
2-1-2 共发射极放大电路的组成46	2-7-3 多级放大器的电压放大倍数116

2-7-4 多级放大器的输入电阻和输出电阻	119
小结、复习思考题、习题	120
测验题	122
第三章 放大器的频率响应和阶跃响应	124
3-1 放大器的频率特性的概念	124
3-1-1 为什么要研究放大器的频率特性	124
3-1-2 关于频率失真	125
3-1-3 频率特性的表示法	126
小结、复习思考题、习题	127
3-2 单级阻容耦合放大器的频率特性	128
3-2-1 单级阻容耦合放大器的低频特性	128
3-2-2 单级阻容耦合放大器的高频特性	131
3-2-3 单级阻容耦合放大器频率特性 计算举例	135
小结、复习思考题、习题	137
3-3 多级放大器的频率特性	138
小结、复习思考题、习题	141
3-4 阻容耦合放大器的阶跃响应	141
3-4-1 关于阶跃响应的概念	141
3-4-2 单级阻容耦合放大器的阶跃响应	142
3-4-3 放大器的阶跃响应与频率响应的 关系	144
小结、复习思考题、习题	145
测验题	146
第四章 场效应管及其放大电路	147
4-1 结型场效应管	147
4-1-1 结型场效应管的结构和工作原理	148
4-1-2 结型场效应管的特性曲线	150
4-1-3 结型场效应管的主要参数	152
4-1-4 结型场效应管的特点	153
小结、复习思考题、习题	154
4-2 绝缘栅场效应管	156
4-2-1 N 沟道增强型MOS管的结构和 工作原理	156
4-2-2 N 沟道增强型MOS管的特性 曲线和参数	157
4-2-3 N 沟道耗尽型MOS管	159
4-2-4 各种场效应管特性比较	162
小结、复习思考题、习题	162
4-3 场效应管放大电路	163

4-3-1 直流偏置电路及静态工作点计算	164
4-3-2 场效应管的微变等效电路	167
4-3-3 利用微变等效电路计算 A_v , r_i 和 r_o	168
4-3-4 共漏放大电路——源极输出器	169
小结、复习思考题、习题	170
测验题	174
第五章 负反馈放大电路	176
5-1 反馈的基本概念	177
5-1-1 什么叫反馈?	177
5-1-2 反馈放大器的分类	178
小结、复习思考题、习题	181
5-2 负反馈放大器的基本关系式	182
5-2-1 负反馈放大器的方块图	182
5-2-2 负反馈放大器的基本关系式	183
5-2-3 使用基本关系式时的注意事项	184
小结	185
讨论 反馈放大器中的几个基本问题	186
复习思考题、习题	188
5-3 闭环放大倍数的近似计算	190
5-3-1 电压串联负反馈	190
5-3-2 电流串联负反馈	191
5-3-3 电压并联负反馈	192
5-3-4 电流并联负反馈	192
小结、复习思考题、习题	193
5-4 负反馈放大器的输入电阻和输出 电阻	195
5-4-1 对输入电阻的影响	195
5-4-2 对输出电阻的影响	197
小结、复习思考题、习题	199
5-5 负反馈对放大器其它性能的影响	200
5-5-1 降低了放大倍数的不稳定程度	200
5-5-2 扩展了放大器的通频带	202
5-5-3 减小了放大器非线性 and 内部噪声的 影响	204
小结、复习思考题、习题	205
5-6 反馈放大器的自激	206
5-6-1 自激的表现	206
5-6-2 自激条件	207
5-6-3 负反馈放大器的自激	208
5-6-4 高频自激的消除	209

5-6-5 放大器的低频自激	212	7-2-4 共模抑制比和共模输入电压范围	262
小结、复习思考题	213	7-2-5 失调与调零	263
5-7 反馈放大器计算举例	214	7-2-6 差动放大电路的几种接法	265
小结、复习思考题	218	小结、复习思考题、习题	267
5-8 实用反馈电路举例	218	7-3 集成运算放大器	270
小结、复习思考题、习题	221	7-3-1 概述	270
测验题	222	7-3-2 集成运算放大器电路介绍	273
第六章 正弦波振荡电路	224	7-3-3 双运放与四运放	279
6-1 振荡的基本概念	224	7-3-4 集成运算放大器的技术指标	280
6-1-1 振荡的平衡及其平衡条件	224	小结、复习思考题	283
6-1-2 振荡器的起振	225	测验题	284
6-1-3 正弦信号的获得	225	第八章 运算放大器的应用	286
6-1-4 振幅的稳定	226	8-1 基本运算放大器	286
小结、复习思考题	227	8-1-1 反相输入比例运算放大器	286
6-2 RC 正弦波振荡器	227	8-1-2 同相输入比例运算放大器	292
6-2-1 移相式振荡电路	227	小结、复习思考题、习题	294
6-2-2 串并联式振荡电路	228	8-2 运算放大器在信号运算方面的	
小结、复习思考题、习题	231	应用	296
6-3 LC 正弦波振荡器	233	8-2-1 加法和减法运算	296
6-3-1 LC 谐振电路的特点	233	讨论 关于抑制共模干扰的几个问题	300
6-3-2 变压器反馈式振荡电路	235	8-2-2 积分和微分运算	303
6-3-3 电感反馈式振荡电路	236	8-2-3 对数和反对数运算	306
6-3-4 电容反馈式振荡电路	237	小结、复习思考题、习题	309
6-3-5 石英晶体振荡器	238	8-3 运算放大器在信号处理方面的	
小结、复习思考题、习题	240	应用	311
6-4 实用电路举例	242	8-3-1 电压比较器	312
6-4-1 RC 振荡器举例	242	8-3-2 采样-保持电路	314
6-4-2 LC 振荡器举例	243	8-3-3 RC 有源滤波器	315
测验题	244	小结、复习思考题、习题	317
第七章 直接耦合放大器和集成运算		8-4 运算放大器在波形产生方面的	
放大器	246	应用	319
7-1 直接耦合放大器及其特殊问题	246	8-4-1 正弦波发生器	319
7-1-1 概述	246	8-4-2 方波发生器	319
7-1-2 几种常用的直接耦合电路	248	8-4-3 方波-三角波发生器	321
7-1-3 零点漂移	251	8-4-4 锯齿波发生器	322
小结、复习思考题、习题	253	小结	323
7-2 差动式放大电路	254	讨论 关于运用理想运算放大器的特点	
7-2-1 基本差动放大电路	254	分析运算放大器的几个问题	323
7-2-2 具有射极公共电阻的差放电路	257	复习思考题、习题	326
7-2-3 具有恒流源的差放电路	259	8-5 集成运算放大器在使用中的几个	

问题	327	10-2 稳压电源	361
8-5-1 集成运算放大器的参数测试	327	10-2-1 稳压的必要性和主要指标	361
8-5-2 调零	330	10-2-2 硅稳压管稳压电路	362
8-5-3 电压转换速率	331	10-2-3 串联型晶体管稳压电源	365
测验题	332	10-2-4 集成稳压器	368
第九章 功率放大器	334	10-2-5 串联开关调整型稳压电路	372
9-1 双电源互补对称电路	334	小结、复习思考题、习题	374
9-1-1 双电源互补对称电路的输出功率和效率	335	测验题	377
9-1-2 双电源互补对称电路的管耗	337	第十一章 晶闸管电路	379
9-1-3 复合互补对称电路	338	11-1 晶闸管	379
9-2 单电源互补对称电路	340	11-1-1 晶闸管的工作原理	379
9-2-1 单电源互补对称电路的输出功率和效率	340	11-1-2 晶闸管的伏安特性和主要参数	381
9-2-2 实用的单电源互补对称放大电路	342	小结、复习思考题、习题	386
9-2-3 互补对称电路的缺点	344	11-2 单相桥式半控整流电路	387
小结、复习思考题、习题	344	11-2-1 单相半波可控整流电路	387
9-3 功率放大器的一个实例电路	346	11-2-2 单相桥式半控整流电路	389
9-3-1 单元电路分析	346	小结、复习思考题、习题	394
9-3-2 估算指标	350	11-3 三相桥式半控整流电路	395
复习思考题、习题	351	小结、复习思考题、习题	401
测验题	351	11-4 触发电路	402
第十章 直流稳压电源	353	11-4-1 单晶体管	403
10-1 单相整流和电容滤波电路	353	11-4-2 单晶体管触发电路	405
10-1-1 单相桥式整流电路	354	小结、复习思考题、习题	408
10-1-2 单相桥式整流电容滤波电路	355	11-5 应用实例	410
10-1-3 倍压整流电路	358	测验题	412
小结、复习思考题、习题	359	参考文献	414
		部分习题参考答案	415

第一章 半导体二极管和三极管

半导体器件是组成半导体电路的核心元件,电路的性能与其所用器件的特性有密切的关系。因此,学习半导体电路,必须首先了解半导体器件的工作原理,掌握它的工作特性和参数。半导体器件种类很多,本章只讨论半导体二极管(包括稳压管)和三极管。还有一些常用器件,以后逐步介绍。

学完本章后应达到下列要求:

- 1) 掌握二极管(包括稳压管)的特性、主要参数和近似等效电路,为今后选择和使用二极管及分析二极管电路打下基础。
- 2) 掌握三极管的电流分配关系,共射输入、输出特性曲线和主要参数,能合理选择和正确使用三极管,为今后分析三极管电路打下基础。
- 3) 熟悉温度对管子特性参数的影响,熟悉锗管和硅管的性能差别。
- 4) 了解PN结的形成,PN结空间电荷区宽度与外加电压的关系,PN结正向电流和反向电流传输过程。
- 5) 了解三极管中电流传输过程和基区中非平衡载流子的分布规律。
- 6) 会解释下列名词术语

本征半导体 杂质半导体 多数载流子 空间电荷区 漂移电流 扩散电流 非平衡载流子

1-1 半导体的物理基础

半导体器件,如二极管、三极管、场效应管、集成电路以及半导体光敏和热敏元件等,都是由半导体材料制成的。因此,要了解半导体器件,首先必须对半导体材料的性质有所认识。

世界上有许多物质,就其导电性能而言,大体可以分为导体、绝缘体和半导体。对于导体和绝缘体,大家都已有所了解,这里,我们只讨论半导体。顾名思义,半导体是一种导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。然而半导体材料之所以受到人们重视,主要还在于它的导电能力具有独特的性质。例如:纯净的半导体受到光照或加热时,电导率会显著增加;在纯净半导体材料中加入微量的“杂质”元素,它的电导率就会成千上万倍地增长。正是利用了半导体的这样一些性质,人们制成了各种各样的半导体器件。

本节将从半导体的结构出发,讨论半导体的导电机理和导电性能。

1-1-1 半导体的晶体结构

物质都是由原子组成的,物质的导电性能是由物质内部原子的结构和原子间的结合方式决

定的。原子由带正电的原子核和若干个围绕原子核运动的带负电的电子组成。原子核所带的正电荷量与围绕它的电子的负电荷量相等，整个原子呈电中性。元素周期表中的原子序数就是该元素单个原子中的电子个数，这些电子按一定规律，分层围绕原子核不停地运动。目前，用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si)和锗(Ge)。它们的原子结构模型如图 1-1 所示。硅的原子序数是 14，有 14 个电子按一定规律分布在三层电子轨道上，外层有 4 个电子。锗的原子序数是 32，有 32 个电子分布在四层轨道上，外层也是 4 个电子。通常称外层的电子为价电子。有几个价电子，就称为几价元素，硅和锗都有 4 个价电子，所以都是四价元素。

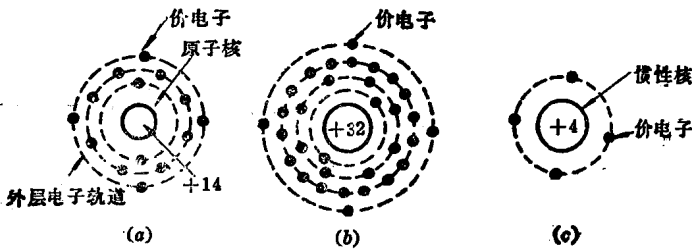


图 1-1 硅和锗的原子结构
(a) 硅(Si)原子结构 (b) 锗(Ge)原子结构
(c) 硅和锗原子结构简化模型

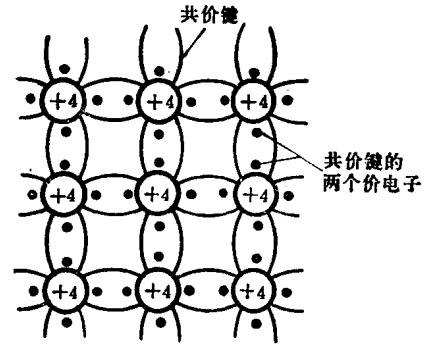


图 1-2 晶体的共价键结构

原子的内层电子与原子核结合较紧密，很少有离开运动轨道的可能，不影响导电性能。元素的化学性质和导电性能都与价电子有很大关系。因此，我们把内层电子与原子核看成一个整体，称为惯性核，把外层电子(价电子)单独画出来，这样原子结构模型可以画成图 1-1(c)的简化形式。原子核的一部分正电荷与围绕它的内层电子的负电荷相抵消，因此惯性核的净电荷量与价电子的电荷数值相等。硅和锗都是四价元素，惯性核带四个电子电荷量的正电，围绕惯性核的有四个价电子。

硅和锗材料必须制成单晶才能用来制做半导体器件。在单晶半导体中，原子的排列是非常整齐的，原子按四角形系统组成晶体点阵，每个原子之间的距离都相等。其中每个原子的四个价电子不仅受自身原子核的束缚，还受周围相邻的四个原子的影响，于是每两个相邻原子之间都有一对价电子为这两个原子所共有，它们有时围绕自身原子核运动，有时也出现在相邻原子所属的轨道上。这种由两个原子各拿出一个价电子作为共有的价电子所构成的联系称为共价键。共价键使两个相邻的原子牢牢地结合在一起。每个原子的四个价电子分别与相邻的四个原子的价电子形成稳定的共价键结构。图 1-2 是晶体共价键结构的平面示意图。

1-1-2 本征半导体

纯净的单晶半导体，即既不含任何杂质^{*}，也没有结构上的缺陷，称为本征半导体。

物质导电能力的大小取决于其中能参与导电的粒子——载流子的多少。例如金属中有很多自由电子作为载流子，所以电导率大，导电能力强；橡胶、陶瓷等绝缘材料中自由电子极少，所以

* 实际本征半导体的杂质含量低于 $1/10^8$ 。

导电能力很弱。为了了解半导体的导电性能,我们要先讲解半导体中载流子的情况。

1. 两种载流子

本征半导体中,价电子都被束缚在共价键中,如不给它们额外的能量,是不会脱离其轨道的,因此,在绝对零度和无外界激发时,不存在自由电子。这时的半导体不能导电,相当于绝缘体。

当半导体的温度升高时,共价键中的电子因受热而获得能量。当一部分价电子得到的能量足够大时,便脱离共价键的束缚而成为自由电子。实际上,半导体中价电子所受的束缚不象绝缘体中那样紧,只要在室温条件下,便有一些价电子脱离共价键而成为自由电子。所以,在室温条件下,本征半导体便具有一定的导电能力。

必须指出的是:半导体中除了自由电子作为载流子之外,还存在另外一种称为空穴的载流子,空穴和自由电子同时参加导电,是半导体的重要特点。

共价键上的电子挣脱束缚成为自由电子后,在它原来所在的共价键位置上留下了一个空位,这个空位叫做空穴。带有空穴的原子因为少了一个电子而带正电,我们把这个正电看成是空穴所带的正电荷量。在本征半导体中,激发出一个自由电子,同时便产生一个空穴,电子和空穴总是成对地产生,称为电子空穴对,如图 1-3 所示。半导体中共价键分裂产生电子空穴对的过程叫做本征激发。除了加热之外,用光或其它射线照射半导体,也能产生本征激发。

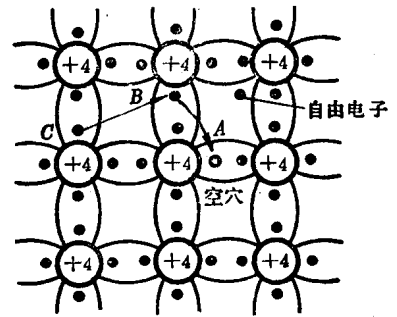


图 1-3 本征激发产生电子空穴对

空穴也能够运动,不过它的运动方式和自由电子的运动方式完全不同,空穴的运动实质上是价电子填补共价键上空位的运动的结果。例如在图 1-3 上,共价键 A 处有一个空穴,即 A 处共价键上有一个空位,附近共价键上的价电子便可能过来填补这个空位,假设共价键 B 处的电子去填补了共价键 A 处的空位,于是 A 处的空穴消失, B 处出现了空穴。这就如同空穴从 A 处移动到了 B 处。如果共价键 C 处的价电子又来填补 B 处的空位,那么空穴便从 B 处移动到 C 处。由于空穴带有正电荷,空穴的移动必伴随有正电荷的移动,所以空穴也是载流子。

可见,半导体中有两种载流子:自由电子载流子(以下简称电子)和空穴载流子(以下简称空穴)。

半导体中载流子的多少用单位体积中载流子的个数表示。 n 表示单位体积中电子的个数,叫做电子浓度; p 表示单位体积中空穴的个数,叫做空穴浓度。用 n_i 和 p_i 分别表示本征半导体中的电子和空穴浓度。因为本征半导体中,电子和空穴总是成对产生,所以必定有 $n_i = p_i$ 。

2. 载流子的产生与复合、载流子的平衡浓度

半导体由于热激发而不断产生电子空穴对,那么,电子空穴对是否会越来越多,电子和空穴浓度是否会越来越大呢?实验表明,在一定的温度下,电子浓度和空穴浓度都保持一个定值。这是因为半导体中一方面存在载流子的产生过程,同时还存在另一个过程。那就是自由电子在运动过程中释放能量而填入空穴,于是共价键恢复,电子空穴对消失的过程。这个过程称为载流子的复合过程。单位时间内载流子产生的数量叫做载流子的产生率。对于一定的材料,产生率的

大小决定于温度,温度越高,产生率越大。单位时间内载流子复合的数量叫做复合率。温度一定时,复合率与载流子的浓度有关,浓度越大,复合率越大。显然,一块半导体中如果载流子的产生率大于复合率。则载流子浓度要增加;反之,若复合率大于产生率,则载流子浓度要减小;只有当产生率等于复合率时,载流子浓度才保持不变。因此,一块半导体在某一温度下,载流子的产生率如果大于复合率,则载流子浓度增加,但随着浓度不断增加,复合率会越来越来大,最后总会到达复合率等于产生率的平衡状态,载流子浓度不增加也不减少,这时载流子的浓度叫做平衡浓度。

对于一定的半导体材料,载流子的平衡浓度随温度升高而增加。因为温度升高时,热激发作用增强,产生率便要大于复合率,打破了原来温度下的平衡状态,载流子浓度增加,而随着载流子浓度增加,复合率也跟着增大,当浓度增加到一定数值时,复合率又会等于产生率,复合与产生作用在新的水平上达到新的平衡,这时载流子的平衡浓度已经大于原来较低温度时的平衡浓度。同理,温度降低时,载流子的平衡浓度减小。

室温下($T=300\text{K}$),本征硅中电子和空穴的平衡浓度为 $n_i = p_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,本征锗中为 $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。锗的载流子浓度比硅大上千倍,这是因为硅的价电子所受的束缚力大于锗的价电子所受的束缚力,要使它变成自由电子需要更大的能量。实际上,在室温下,本征硅中大约在 10^{12} 个原子中才有一个共价键分裂产生电子空穴对,本征锗中大约 10^9 个原子中有一个共价键分裂产生电子空穴对。这也说明,室温下的本征半导体,无论是硅或锗,它们的载流子浓度都很小,所以导电能力都很弱。

综上所述:

- (1) 半导体中有两种载流子:电子载流子和空穴载流子,电子带负电,空穴带正电。
- (2) 本征半导体中,电子和空穴总是成对地产生, $n_i = p_i$ 。
- (3) 半导体中,同时存在载流子的产生和复合过程,产生率等于复合率时,达到载流子的平衡浓度。载流子的平衡浓度与温度有关。室温下,本征半导体中电子和空穴的平衡浓度很小,所以电导率很低。温度升高时,载流子浓度迅速增大,电导率也随之增大。

1-1-3 N型半导体和P型半导体

本征半导体的电导率很小,而且受温度和光照等条件影响甚大,不能直接用来制造半导体器件。实际上用来制造半导体器件的都是“杂质”半导体。这里所谓的杂质半导体并非指半导体中可以含有任意的杂质,而是在纯净的半导体中有意地掺入微量的“杂质”元素。常用的杂质元素有三价的硼、铝、镓和五价的砷、磷、锑等。掺入微量的杂质元素后,就能够显著地改变半导体的导电特性。人们可以通过控制掺入杂质元素的种类和数量来改变和控制半导体的导电特性,制成各种各样的半导体器件。

1. N型半导体

在本征半导体中加入微量的五价元素,可使半导体中自由电子浓度大为增加,形成N型半导体。

在本征半导体中掺入微量五价的杂质原子后,这些杂质原子取代晶体中某些晶格位置上的

硅(或锗)原子。由于五价杂质原子有五个价电子,而与周围四个硅原子组成共价键时只需要四个价电子,因此多余一个价电子,如图1-4所示。这个价电子虽然不受共价键束缚,但仍属于这个杂质原子,受到该原子核的正电荷吸引,只能在它周围运动。但是与共价键中的价电子相比,它所受的束缚力要小得多,只需很小的能量,就可以使它挣脱原子核的束缚,变成自由电子。实际上,只要在室温条件下,这些多余电子就具有足够的能量,全部变成自由电子,杂质原子则因失去一个电子而成为正离子。应当指出,这些正离子并非空穴,它们的共价键上没有空位,不能象空穴那样运动,所以不能参加导电,不是载流子。五价杂质原子能施放出一个电子,故称为施主杂质。

除了施主杂质原子施放出的电子之外,半导体中还有本征激发产生的少量电子空穴对。由于增加了许多由杂质原子施放出来的电子,在这种半导体中,电子的数目远大于空穴的数目,导电主要靠电子。我们把这种半导体称为N型半导体,其中的电子称为多数载流子多子,空穴称为少数载流子少子。

杂质原子离化产生一个自由电子,同时产生一个正离子;本征激发产生一个自由电子,同时产生一个空穴。所以在N型半导体中,总的自由电子数等于正离子数和空穴数之和,自由电子带负电,空穴和正离子带正电,整块半导体中正负电荷量相等,保持电中性。

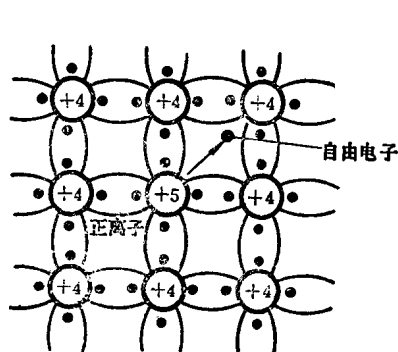


图1-4 N型半导体晶体结构示意图

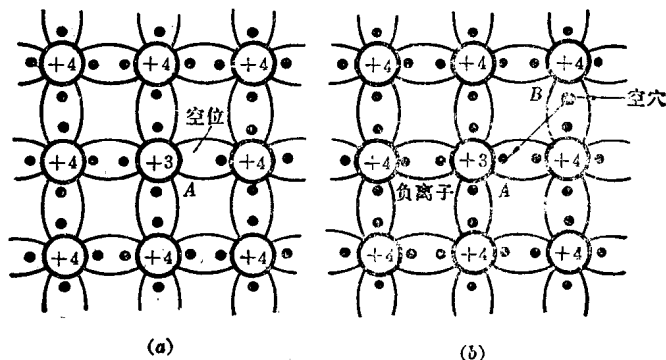


图1-5 P型半导体晶体结构示意图
(a) 空位 (b) 空穴和负离子

2. P型半导体

在本征半导体中加入微量的三价元素,可使半导体中的空穴浓度大为增加,形成P型半导体。

本征半导体中加入三价的杂质原子后,这些杂质原子取代晶体中某些晶格位置上的硅(或锗)原子。由于三价杂质原子只有三个价电子,与周围四个原子组成共价键时,缺少一个电子,有一个空位,如图1-5(a)。不过这个空位不同于空穴,它不带电,所以不是载流子。但是,邻近原子的价电子很容易来填补这个空位,于是在该价电子原来的位置上产生一个空穴,杂质原子则因为得到一个电子而成为负离子。如图1-5(b)所示,共价键B处的一个价电子填补三价原子A处的空位,于是在B处出现一个空穴,三价原子形成负离子。这里三价杂质原子在离化过程中接受

一个电子,故称为受主杂质。价电子只需很小的能量就能够填补杂质原子上的空位。实际上,常温条件下,价电子便具有足够的能量,能够将所有杂质原子上的空位填满,使全部杂质原子形成负离子,同时产生与杂质原子个数相同的空穴。

除了受主杂质产生的空穴之外,半导体中同时还有少量本征激发产生的电子空穴对。不过,由于增加了许多受主杂质产生的空穴,所以在这种半导体中,空穴数量远大于电子数量,导电主要靠空穴,我们称这种半导体为P型半导体。在P型半导体中空穴是多数载流子,电子是少数载流子。

杂质原子离化形成一个负离子,同时产生一个空穴;本征激发同时产生一个电子和一个空穴。所以在P型半导体中,总的空穴数等于负离子数与自由电子数之和,空穴带正电,负离子和自由电子带负电,整块半导体中正负电荷量相等,保持电中性。

制作半导体器件时,常常要在半导体中既掺入五价杂质又掺入三价杂质,这时,两种杂质有互相补偿作用。如果掺入的五价原子浓度大于三价原子浓度,则一部分五价原子的多余电子填充三价原子的空位(不产生空穴),其余的多余电子激发成自由电子,半导体最终呈N型。同理,如果掺入的三价杂质浓度大于五价杂质浓度,则半导体最终成P型。

3. 杂质半导体的载流子浓度

杂质半导体与本征半导体一样,其中也存在载流子的产生和复合过程,当产生率等于复合率时,载流子浓度达到平衡状态。理论推导表明,在平衡状态下,杂质半导体中电子浓度 n_0 与空穴浓度 p_0 的乘积,与相同温度下本征半导体的电子浓度 n_i 与空穴浓度 p_i 的乘积相等,即

$$n_0 p_0 = n_i p_i = n_i^2 \quad (1-1)$$

温度一定时, n_i^2 是定值,因此,当掺入杂质而使多数载流子增多时,必同时减少了少数载流子。例如,本征硅的原子密度为 $4.96 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$,室温下 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 。若掺入百万分之一的五价杂质,那么杂质原子密度为 $N_D = 4.96 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。室温条件下,它们全部离化而产生自由电子,这个数值远大于本征激发产生的自由电子数,故可认为总的自由电子浓度近似等于杂质原子密度,即 $n_0 \approx N_D = 4.96 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。由式(1-1)便可以求出空穴浓度 $p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{4.96 \times 10^{16}} = 0.45 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$ 。可见,杂质浓度越大,多数载流子浓度就越大,而少数载流子浓度则越小。另外掺杂以后,乘积 $n_0 p_0$ 虽保持不变,但载流子的总数却发生很大变化。如上例中未掺杂时单位体积载流子总数为 $n_i + p_i = 3 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$,掺入百万分之一的杂质之后, $n_0 + p_0 = 4.96 \times 10^{16} + 0.45 \times 10^4 \approx 4.96 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,增大了几百万倍。所以掺入微量杂质能显著提高半导体的电导率。

本征激发产生的载流子数量随温度升高而指数增加,这使本征半导体的电导率对温度十分敏感。杂质半导体中,导电主要靠多数载流子,它的浓度基本等于杂质原子的浓度,温度升高时,少子浓度虽因本征激发增强而有所增高,但多子浓度变化不大,所以杂质半导体的电导率对温度比较稳定。

由上得出:

(1) 本征半导体中加入五价杂质元素,便形成N型半导体。N型半导体中,电子是多数载流子,空穴是少数载流子,此外还有不参加导电的正离子。

(2) 本征半导体中加入三价杂质元素, 便形成 P 型半导体。其中空穴是多数载流子, 电子是少数载流子, 此外还有不参加导电的负离子。

(3) 杂质半导体中, 多子浓度决定于杂质浓度, 掺杂越多, 多子浓度越大, 导电能力越强, 少子由本征激发产生, 其浓度与温度有关。在一定温度下, 多子和少子都要保持它的平衡浓度, 而且 $n_0 p_0 = n_i^2$ 。

1-1-4 漂移电流和扩散电流

1. 漂移电流

无电场力作用时, 半导体中电子和空穴的运动是无规则的热运动, 无一定方向, 因而不形成电流。有电场力作用时, 电子和空穴便在热运动的基础上附加以定向运动, 带负电的电子逆电场方向运动, 带正电的空穴顺电场方向运动(注意: 实际上是价电子逆电场方向依次填补共价键上的空位, 于是空穴便顺电场方向移动), 电子和空穴的定向运动, 便形成了电流。载流子在电场力作用下的定向运动称为漂移运动, 漂移运动产生的电流称为漂移电流。如图 1-6 所示, 一块半导体材料, 两端加上电压 E , 在半导体中产生电场 \mathcal{E} 。在电场 \mathcal{E} 作用下, 电子向正极漂移, 形成电子漂移电流 i_n (电流方向与电子运动方向相反), 空穴向负极漂移, 形成空穴漂移电流 i_p 。电路中总的电流是这两部分电流之和, 即 $i = i_n + i_p$ 。电场越强, 则载流子的漂移速度越快, 漂移电流就越大; 载流子的浓度越大, 则参加漂移运动的载流子数量越多, 漂移电流也越大。

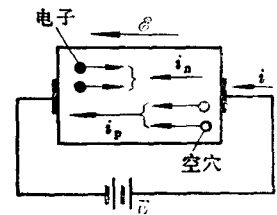


图 1-6 载流子的漂移电流

2. 扩散电流

如果半导体内载流子浓度分布不均匀, 那么无需电场力作用, 载流子便会从浓度高的区域向浓度低的区域运动。我们把这种由于浓度差而引起的定向运动称为扩散运动, 载流子扩散运动所形成的电流称为扩散电流。扩散是由浓度差引起的, 所以扩散电流的大小与载流子的浓度梯度成正比。假设半导体中沿 x 方向存在电子的浓度梯度为 dn/dx , 则必有 x 方向的电子扩散电流 $i_n \propto dn/dx$ 。电子的扩散运动总是朝着电子浓度减小的方向, 而电子运动所产生的电流的方向与电子运动的方向相反, 因此电子扩散电流是指向浓度增加($dn/dx > 0$) 的方向。如果半导体中沿 x 方向存在空穴浓度梯度 dp/dx , 则必有空穴扩散电流 $i_p \propto -dp/dx$ 。式中“ $-$ ”表示 i_p 的方向是指向浓度减小的方向, 因为空穴运动所产生的电流的方向与空穴运动的方向是一致的。

小结

1) 半导体中有两种载流子: 电子和空穴。在电场作用下, 它们都参加导电, 电子逆电场方向运动, 空穴顺电场方向运动, 二者运动方向虽相反, 所形成的电流方向却相同, 总电流是电子电流与空穴电流之和。

2) 半导体中载流子的定向运动有两种方式, 漂移运动和扩散运动, 它们分别对应于漂移电流和扩散电流。漂移电流的大小与电场强度和载流子浓度成正比; 扩散电流的大小与载流子浓度梯度成正比, 与电场强度和载流子浓度无关。

3) 本节介绍了三种半导体, 表 1-1 列出了它们的主要特点。

表 1-1 三种半导体的特性比较

特性 \ 类型	本征半导体	N 型半导体	P 型半导体
杂质元素	无	五价元素(施主)	三价元素(受主)
载流子	电子空穴对	电子是多子 空穴是少子	空穴是多子 电子是少子
电中性	$n_i = p_i$	$n = p +$ 正离子浓度	$p = n +$ 负离子浓度
载流子平衡浓度	$n_i p_i = n_i^2 = f(T)$	$n_e p_o = n_i^2$ $n_o \gg p_o$	$n_e p_o = n_i^2$ $p_o \gg n_o$
电导率	小, 受温度影响大	大, 随杂质浓度增大而增大, 受温度影响小	同 左

复习思考题

- 1-1-1 半导体中有哪两种载流子? 它们是怎样产生的?
- 1-1-2 什么是空穴? 空穴运动与电子运动有什么不同?
- 1-1-3 P 型半导体是怎样形成的? 其中空穴的浓度决定于什么? 其中电子的浓度为什么比同一温度下的本征半导体中的电子浓度小?
- 1-1-4 N 型半导体中电子是多数, 空穴是少数, 为什么不显负电性?
- 1-1-5 说明温度对本征半导体和杂质半导体的电导率的影响。
- 1-1-6 什么叫漂移电流? 什么叫扩散电流? 它们的大小与什么因素有关? 它们的方向如何确定?

1-2 PN 结

在一块原来均匀的 P 型半导体的局部区域中掺入施主杂质, 形成一个 N 型区域, 或者在原来均匀的 N 型半导体的局部区域掺入受主杂质, 形成一个 P 型区, 这样, 使一块完整的半导体的一部分为 N 型, 一部分为 P 型, 那么, 在 P 型和 N 型的交界处便形成了一个 PN 结。

尽管 PN 结是由 P 型和 N 型半导体组成, 但是它们一旦形成 PN 结, 就产生了 P 型半导体或 N 型半导体单独存在时所没有的新特性, 从而成为各种半导体器件的基本组成单元。例如, 二极管的核心是一个 PN 结; 三极管中包含了两个 PN 结; 晶闸管中有三个 PN 结。所以, 要了解各种半导体器件的工作原理和特性, 首先要熟悉 PN 结的工作原理和特性。

1-2-1 平衡状态的 PN 结

我们已经知道: P 型半导体中空穴是多数载流子, 电子是少数载流子, 同时还有不参加导电的负离子, 并且, 空穴浓度等于自由电子浓度与负离子浓度之和, 整个区域保持电中性; N 型半导体中, 电子是多数载流子, 空穴是少数载流子, 同时还有不参加导电的正离子, 并且, 自由电子浓度等于空穴浓度与正离子浓度之和, 整个区域保持电中性。图 1-7(a) 中画出了 P 型和 N 型半导体中载流子和杂质离子的示意图。图中 ⊕ 表示正离子, ⊖ 表示负离子, ○ 表示空穴, · 表示电

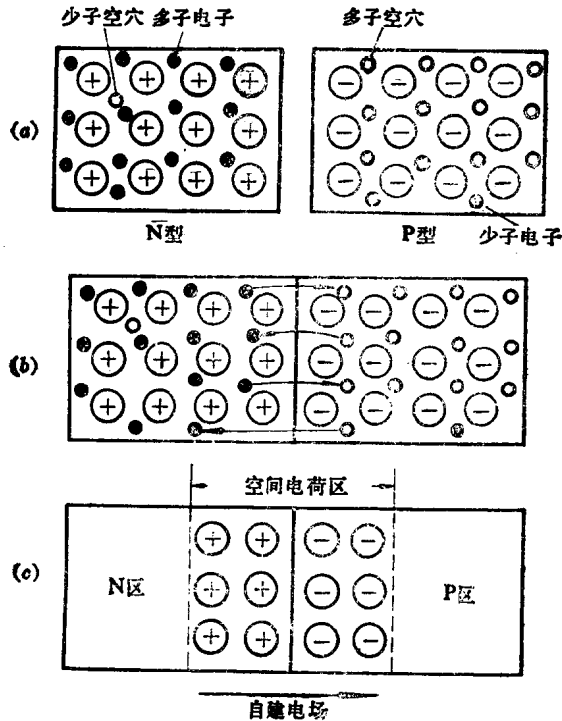


图 1-7 PN 结的形成
(a) P 型和 N 型半导体 (b) 多数载流子扩散 (c) 空间电荷区

子。

当两种半导体结合在一起时,在交界面上有很大的载流子浓度差, N 型区中电子浓度高, P 型区中空穴浓度高。电子和空穴都要从浓度高处向浓度低处扩散,于是,有一些 N 区中的电子要扩散到 P 区去,有一些 P 区中的空穴要扩散到 N 区去,如图 1-7(b)所示。如果没有外加电场力对载流子的作用,扩散将一直进行到浓度梯度消失为止。然而,电子和空穴都是带电的,它们扩散的结果,在交界面附近破坏了 P 型区和 N 型区原来的电中性,形成空间电荷区。可以这样来描述空间电荷区的形成过程: N 区边界的一个电子扩散到 P 区去,在 N 区边界留下一个正离子,这个电子扩散到 P 区去后与一个空穴复合,在 P 区边界留下一个负离子;同理 P 区边界上的一个空穴扩散到 N 区去,与 N 区的一个电子复合,便在 P 区边界留下一个负离子和在 N 区边界留下一个正离子。于是,在交界面 N 区一边由正离子形成正的空间电荷区, P 区一边由负离子形成负的空间电荷区,并且,正负空间电荷的数量显然是相等的。

空间电荷区形成之后,正负电荷的互相作用,在空间电荷区中产生了一个电场。因为这个电场是 PN 结本身由于载流子的扩散而建立起来的,故称为自建电场,其方向是由 N 区指向 P 区的,如图 1-7(c)所示。

在自建电场的作用下,少数载流子产生漂移运动,漂移运动的方向与扩散运动的方向相反,即 P 区的少子电子向 N 区漂移, N 区的少子空穴向 P 区漂移。开始,自建电场较弱,载流子的扩散运动占优势,随着扩散的进行,空间电荷区变宽,空间电荷数量增多,自建电场增强,从而使