

电 子 技 术

上 册

(模拟部分)

黄 嵩 如 编

电子工业出版社

内 容 简 介

本书(上册)为模拟电路部分,主要包括双极型晶体管、放大电路的基本知识、负反馈放大器、低频功率放大器、集成运算放大器及其应用、调谐放大器、正弦波振荡器、频率变换电路、场效应管及其电路、整流和稳压电路等。介绍了晶体管特性,各种单元电路的工作原理和分析方法。在分立器件的基础上,着眼于集成电路的分析和应用。

本书系高等工科院校非无线电专业(诸如电子材料、半导体器件、激光等专业)“电子技术”课程的教材,同时也可以作为电大、夜大有关专业的教材和工程技术人员的参考书。

电 子 技 术

上 册

(模拟部分)

黄嵩如 编

责任编辑 王玉国

*

电子工业出版社出版 (北京市万寿路)

北京通县潮白印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 21.75 插页: 1 字数: 556.8 千字

1986年2月第一版 1986年4月第一次印刷

印数: 10000册 定价: 3.60元

统一书号: 15290.316

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》、中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二年到一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共217种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由〈无线电技术与信息系统〉教材编审委员会〈电路与系统〉编审小组的约编,并推荐出版。

“电子技术”教材分上、下两册出版。本书是上册:模拟部分,下册为数字部分。

本书由成都电讯工程学院黄嵩如副教授担任主编,华中工学院罗辉映副教授担任主审。编者均依据〈电路与系统〉编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程模拟部分的参考教学时数为90学时,其主要内容为以分立元件电路为基础,着眼于集成电路的分析和应用,并结合国内一些先进典型产品进行介绍。前四章阐述分立双极型晶体管及其放大电路的基本工作原理和分析方法,为以后各章引入集成电路奠定基础。其中第三章论述负反馈放大器,引入编者提出的环路电压传输函数和环路电流传输函数相等的概念,从而用统一的公式来计算各种负反馈放大器,使问题得到简化。第五章为直流放大器和运算放大器,较详细地介绍了集成电路中的各种特殊电路及集成运放的原理和应用。第六章至第八章介绍了调谐放大器、正弦振荡器和频率变换等三章高频电路,阐述了它们的基本概念,一般只作定性分析。第九章采用与双极型电路作对比的手法,分析了场效应管模拟电路,并对CMOS集成运算放大器作了介绍。在最后整流和稳压一章中,本书没有采用传统的分析方法,而是从倍压电路入手,突出电容滤波器、桥式整流电路的分析,使篇幅大为减少。本书在附录中编入了两个典型电路,以培养学生应用所学原理进行电路分析的能力。使用本教材时应注意,本书是一本基础教材,不论从深度和广度来说,都不足以概括当前电子技术的成就。对于不同专业还要开设后续课程,如有的专业需要另开集成电路课,有的专业需要另开高频电路课,在使用本教材时可以删节各有关部分的内容。

编者认为每章小结应由学生自己来作。因而在每章之末列有复习思考题,以作为学生复习的线索。本教材没有编入实验内容,而电子技术是一门实践性很强的课程,编审小组建议,模拟电路部分的实验学时数应不少于30学时,同时建议安排1~2个综合性安装实验。

参加审阅工作的还有武汉大学张肃文教授、北京工业学院戚叔伟教授和杭州电子工业学院的张晓云和郁伯康同志。在编写过程中成都电讯工程学院的唐俊奇、李福权、张崇国等同志看过部分初稿。以上同志都为本书提出许多宝贵意见。成都电讯工程学院的李春元同志和编者的研究生柏维同志,对本书的编写给予了大力协助。编者在此表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1985年7月

目 录

绪 论

第一章 双极型晶体管1

§ 1-1 PN 结 1

§ 1-1-1 半导体的物理特性 1

§ 1-1-2 本征半导体的导电机构 1

§ 1-1-3 N 型和 P 型半导体 4

§ 1-1-4 载流子的漂移与扩散 5

§ 1-1-5 PN 结的形成 6

§ 1-1-6 PN 结的伏安特性 6

§ 1-1-7 PN 结电容 7

§ 1-1-8 PN 结的击穿 8

§ 1-2 晶体二极管 9

§ 1-2-1 晶体二极管概述 9

§ 1-2-2 二极管的特性曲线和主要参数10

§ 1-2-3 二极管的动态电阻11

§ 1-3 晶体三极管12

§ 1-3-1 三极管的结构12

§ 1-3-2 晶体管的工作原理——电流分配关系和放大作用13

§ 1-3-3 晶体三极管的特性曲线15

§ 1-3-4 晶体管的参数19

§ 1-3-5 温度对晶体管参数的影响22

§ 1-4 晶体三极管小信号等效电路23

§ 1-4-1 h 参数等效电路23

§ 1-4-2 晶体管混合 π 参数及其等效电路27

§ 1-4-3 晶体三极管的几个频率参数29

复习思考题33

习题33

第二章 线性放大电路的基础知识36

§ 2-1 概述36

§ 2-1-1 放大器的用途和增益36

§ 2-1-2 线性放大和三极管的线性运用37

§ 2-1-3 三极管的能量转换作用38

§ 2-2 RC 耦合放大电路及其工作原理39

§ 2-2-1 直流和交流通路40

§ 2-2-2 采用固定偏置的 RC 放大级	41
§ 2-2-3 正弦信号作用下各极的电流、电压波形	41
§ 2-3 放大器的图解分析方法	43
§ 2-3-1 放大器的动态特性	43
§ 2-3-2 输入端和输出端的对应图形	46
§ 2-3-3 Q 点在交流负载线上位置的选择	47
§ 2-4 放大器的 h 参数等效电路分析法	48
§ 2-4-1 描绘等效电路	48
§ 2-4-2 计算公式的推导	49
§ 2-4-3 两种分析方法的比较	51
§ 2-5 工作点的稳定与偏置电路	51
§ 2-5-1 三极管参数变化对 Q 点的影响	52
§ 2-5-2 分压式电流负反馈偏置稳定电路	53
§ 2-5-3 双管直接耦合放大电路	54
§ 2-5-4 基极补偿电路	55
§ 2-6 放大器的频率响应	56
§ 2-6-1 线性失真	56
§ 2-6-2 频率响应特性	57
§ 2-7 RC 耦合放大器的频率响应特性	59
§ 2-7-1 RC 放大级的等效电路	59
§ 2-7-2 中频段的频率响应特性	60
§ 2-7-3 低频段的频率响应	60
§ 2-7-4 高频段的频率响应	66
§ 2-7-5 多级放大器的带宽	71
复习思考题	72
习题	73

第三章 负反馈放大器.....76

§ 3-1 概述	76
§ 3-1-1 反馈放大器的一些定义和基本关系	76
§ 3-1-2 负反馈放大器电路的分类	78
§ 3-1-3 环路电压传输函数和环路电流传输函数	79
§ 3-2 负反馈对放大器性能的影响	80
§ 3-2-1 负反馈对放大倍数的稳定作用	81
§ 3-2-2 负反馈对非线性失真系数和信噪比的改善	81
§ 3-2-3 负反馈对放大器输入阻抗的影响	83
§ 3-2-4 负反馈对放大器输出阻抗的影响	84
§ 3-2-5 负反馈对频率响应的改善	85
§ 3-3 两种基本负反馈放大器的经典分析	87
§ 3-3-1 单级串联电流负反馈放大电路	87
§ 3-3-2 单级并联电压负反馈放大电路	90

§ 3-4 几种其它常用负反馈电路的分析	93
§ 3-4-1 单级负反馈放大器	94
§ 3-4-2 两级串联电压负反馈放大器	98
§ 3-5 负反馈放大器的稳定问题	99
§ 3-5-1 产生自激振荡的条件	100
§ 3-5-2 增益和相位的稳定裕量	101
§ 3-6 负反馈放大器的稳定补偿网络	101
§ 3-6-1 滞后补偿	103
§ 3-6-2 滞后-超前补偿	104
§ 3-6-3 相位超前补偿	105
§ 3-6-4 电源去耦滤波器	107
复习思考题	108
习题	108

第四章 低频功率放大器

§ 4-1 概述	112
§ 4-1-1 晶体管的工作状态	112
§ 4-1-2 晶体管集电极的安全工作区	113
§ 4-1-3 集电极损耗 P_{CM} 和热稳定	114
§ 4-1-4 晶体管的二次击穿	115
§ 4-2 甲类功率放大器	115
§ 4-2-1 负载线的确定	116
§ 4-2-2 集电极回路的功率关系	117
§ 4-3 推挽功率放大器	118
§ 4-3-1 推挽电路的工作原理	118
§ 4-3-2 投影偏置	120
§ 4-3-3 功率和效率	121
§ 4-4 单端输出推挽功率放大器	123
§ 4-4-1 单端推挽电路的工作原理	123
§ 4-4-2 分负载式倒相器输入的单端推挽电路	124
§ 4-4-3 互补单端推挽电路	125
§ 4-4-4 复合管等效互补单端推挽电路	127
复习思考题	129
习题	129

第五章 直流放大器与运算放大器

§ 5-1 概述	132
§ 5-2 单端直接耦合放大电路和零点漂移	133
§ 5-2-1 两管电路	134
§ 5-2-2 共射放大器的级间耦合电路	134
§ 5-2-3 直流放大器的零点漂移	135

§ 5-3 差分放大器	137
§ 5-3-1 差分放大器的工作原理	137
§ 5-3-2 差分放大器的基本特性	142
§ 5-3-3 差分放大器的改进电路	147
§ 5-4 线性集成电路中的几种特殊电路	149
§ 5-4-1 集成电路中的元器件	150
§ 5-4-2 恒流源电路	152
§ 5-4-3 有源负载电路	154
§ 5-4-4 双端输出转变为单端输出电路	155
§ 5-4-5 电平位移电路	157
§ 5-4-6 输出电路	158
§ 5-5 运算放大器	159
§ 5-5-1 概述	159
§ 5-5-2 差动运算放大器的一些基本特性和应用	161
§ 5-5-3 集成运算放大器典型电路分析	167
§ 5-5-4 运算放大器主要参数的测量	171
§ 5-5-5 运算放大器的稳定问题	174
§ 5-5-6 集成运算放大器的保护电路	177
复习思考题	179
习题	179

第六章 调谐放大器182

§ 6-1 无线电通讯系统的方框图	182
§ 6-1-1 发射机的组成和工作过程	182
§ 6-1-2 接收机的组成和工作过程	183
§ 6-2 谐振回路的基本特性	184
§ 6-2-1 LC 并联回路的基本特性	184
§ 6-2-2 电感抽头的阻抗变换作用	188
§ 6-2-3 LC 串联谐振电路	189
§ 6-3 晶体管高频 y 参数等效电路	190
§ 6-4 线性单回路调谐放大器	194
§ 6-4-1 线性单回路调谐放大器的指标	195
§ 6-4-2 单回路调谐放大器的分析	196
§ 6-4-3 调谐放大器的稳定问题	200
§ 6-5 调谐功率放大器	202
§ 6-5-1 调谐功率放大器的工作原理	203
§ 6-5-2 集电极余弦脉冲电流的分解	204
§ 6-5-3 输出功率与效率	206
§ 6-5-4 高频调谐功率放大器的馈电线路	207
§ 6-5-5 高频功率放大器的调谐	208
复习思考题	209

习题	210
第七章 正弦波振荡器	212
§ 7-1 概述	212
§ 7-2 正弦波振荡器的基本工作原理	212
§ 7-2-1 振荡器的自激条件	213
§ 7-2-2 振荡的建立和振幅的稳定	213
§ 7-2-3 相位稳定条件	215
§ 7-3 LC 正弦振荡器电路	217
§ 7-3-1 三端式电路的一般形式	217
§ 7-3-2 晶体管三端式振荡电路	218
§ 7-3-3 互感耦合振荡电路	220
§ 7-4* 石英晶体振荡器	220
§ 7-5 RC 正弦振荡器	222
§ 7-5-1 文氏电桥正弦振荡器	223
§ 7-5-2 RC 移相式振荡器	226
复习思考题	228
习题	228
第八章 频谱变换电路	231
§ 8-1 概述	231
§ 8-2 调幅原理及其电路	232
§ 8-2-1 调幅波的频谱和功率	232
§ 8-2-2 调幅器电路	234
§ 8-3 频率调制原理及其电路	238
§ 8-3-1 调频波的频谱分析	239
§ 8-3-2 调频电路	240
§ 8-3-3 调频波的发送和接收	243
§ 8-4 调幅检波器	244
§ 8-4-1 小信号检波——平方律检波	245
§ 8-4-2 直线检波——包络检波	246
§ 8-5 鉴频器	250
§ 8-5-1 相位鉴频器	250
§ 8-5-2 比例鉴频器	252
§ 8-6 变频原理与应用	254
§ 8-6-1 变频的基本概念	254
§ 8-6-2 二极管混频器的工作原理	255
§ 8-6-3 晶体管变频电路	256
复习思考题	258
习题	259

第九章 场效应管及其电路	261
§ 9-1 概述	261
§ 9-2 结型场效应管	262
§ 9-2-1 结型场效应管的工作原理	262
§ 9-2-2 结型场效应管的特性曲线	263
§ 9-3 绝缘栅场效应管	266
§ 9-3-1 N 沟道增强型 MOS 场效应管	266
§ 9-3-2 N 沟道耗尽型 MOS 场效应管	268
§ 9-4 场效应管小信号等效电路	270
§ 9-5 场效应管的偏置电路	272
§ 9-5-1 场效应管对偏置电压的要求	272
§ 9-5-2 场效应管的基本偏置电路	272
§ 9-6 场效应管放大电路	274
§ 9-6-1 RC 耦合共源放大电路	274
§ 9-6-2 源极输出器(源极跟随器)	276
§ 9-7 场效应管应用电路	277
§ 9-7-1 场效应管变阻效应及其应用	277
§ 9-7-2 场效应管调谐放大器	278
§ 9-7-3 场效应管振荡与混频电路	279
§ 9-7-4 场效应管和晶体管的组合电路	280
§ 9-8 CMOS 集成运算放大器	281
§ 9-8-1 CMOS 集成运算放大器的概述	281
§ 9-8-2 基本 CMOS 放大级	282
§ 9-8-3 典型 CMOS 集成运放的分析	283
复习思考题	285
习题	285
第十章 整流电路与稳压电路	288
§ 10-1 概述	288
§ 10-2 倍压整流电路	289
§ 10-2-1 二倍压整流电路	289
§ 10-2-2 多倍压整流电路	290
§ 10-3 电容滤波的桥式整流电路	291
§ 10-3-1 电路工作原理	291
§ 10-3-2 电路参数的近似计算	292
§ 10-4 Π 型滤波器和有源滤波器	294
§ 10-4-1 Π 型滤波器	294
§ 10-4-2 有源滤波器	295
§ 10-5 硅稳压管稳压电路	296
§ 10-5-1 稳压管的特性和参数	297

§ 10-5-2 硅稳压管稳压电路	298
§ 10-6 串联型晶体管稳压电路	299
§ 10-6-1 串联型晶体管稳压电路的工作原理	299
§ 10-6-2 稳压系数和输出电阻	301
§ 10-6-3 稳压电源各部分电路的分析	303
§ 10-6-4 串联型晶体管稳压电源的设计举例	308
§ 10-7 集成稳压器	311
复习思考题	313
习题	314
附录	316
附录前言	316
附录 I TDA1220A 调频-调幅收音机电路分析	316
附录 II XD-1 低频信号发生器电路分析	323
参考文献	329

第一章 双极型晶体管

晶体管是电子线路中关键的有源元件。其原理和特性是分析晶体管电路的基础。晶体管分为场效应管和双极型管两大类,本章只讨论双极型晶体管,对于场效应管则留待第九章再予介绍。在本章中,我们首先讨论晶体管的基本结构——PN结,在PN结的基本特性基础上,讲述晶体二极管和三极管的工作原理,着重讨论管子的外特性和应用参数,最后介绍常用的晶体管小信号等效电路等。

§ 1-1 PN 结

§ 1-1-1 半导体的物理特性

固体材料按它们的导电性能分类,可以划分为:导体、半导体和绝缘体。在室温时,金属与合金的电阻率在 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 以下,绝缘体的电阻率在 $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上,半导体的电阻率介于两者之间,通常在 $10^{-3}\sim 10^9\Omega\cdot\text{cm}$ 这个范围内。

半导体在现代电子技术中获得较为广泛的应用,不仅在于它的导电能力处于导体与绝缘体之间,而重要的是它的导电能力具有受外界影响的一些特殊性。

第一,半导体的导电能力随温度升高而迅速增加。与金属导体相比,主要有两个区别:(1) 半导体电阻率的温度系数是负的,而金属则是正的。也就是说,当温度升高时,半导体的电阻率会迅速减少,而金属的电阻率却会增大。(2) 半导体电阻率随温度的变化很大,而金属的电阻率变化则要小得多。以纯净的半导体硅为例,当温度从 30°C 降低到 20°C 时,其电阻率增加一倍;而金属铜,即便温度上升 100°C ,电阻率的增加也不到一半。

第二,半导体的导电能力随所含的微量杂质而发生十分显著的变化。一般材料(例如化学试剂)含量达到 99% 或 99.9%,就认为纯度是很高了,此时剩余的 1% 或 0.1% 的杂质,通常不会影响物质原来的特性。而对半导体来说,情况就不同了。在室温时,纯净的硅(Si)的电阻率为 $2.14\times 10^4\Omega\cdot\text{cm}$ 。如果在硅中以一百万分之一比例掺入杂质原子(例如磷(P)原子),此时硅的纯度虽然仍高达 99.9999%,但其电阻率却从 $2.14\times 10^4\Omega\cdot\text{cm}$ 一下子降到 $0.2\Omega\cdot\text{cm}$ 。几乎只有原来的一百万分之一。

第三,半导体的导电能力随光照而发生显著变化。例如一个沉积在绝缘基片上的硫化镉薄膜,其暗电阻为几十 $\text{M}\Omega$ 。当受光照后,电阻可能下降到只有几十 $\text{k}\Omega$,只有原来的几百分之一。实际上,硫化镉薄膜就是一个光敏电阻。

此外,半导体的导电能力还会随电场、磁场等的作用而改变。

由上所述,我们知道半导体就是这样一种容易受热、光、电、磁和杂质等外界影响,而显著地改变其导电性能的固体材料。半导体为什么会有这些特点呢?我们最感兴趣的是半导体硅和锗,下面我们就用它们的导电机理来解释上述一些主要现象。

§ 1-1-2 本征半导体的导电机构

我们知道金属导电是由于体内存在有大量的自由电子;但在绝缘体和半导体内则有所

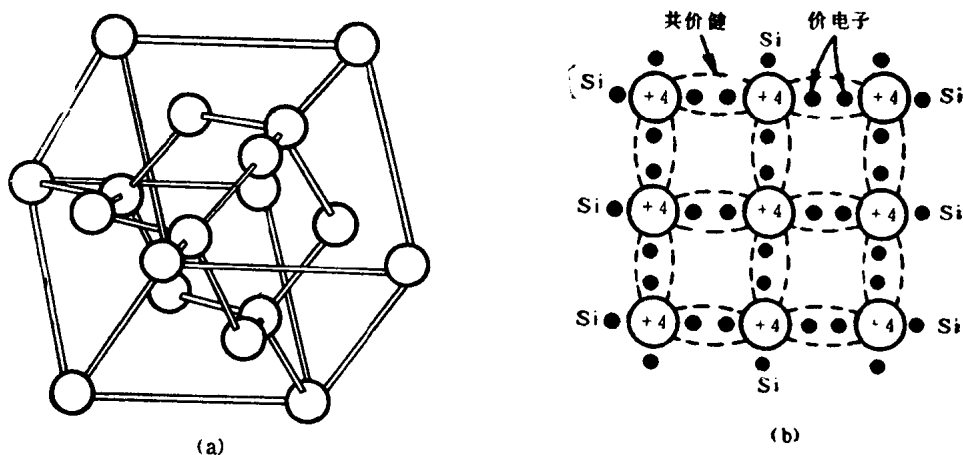


图 1-1 硅和锗晶体结构

不同,这须从晶体结构加以说明。

制造半导体器件用的材料都是晶体¹⁾。硅(Si)和锗(Ge)的晶体结构如图 1-1(a) 所示,称为金刚石晶体结构。图 1-1(b) 为硅(锗)晶体结构的平面示意图。

在这种晶体中,每个原子都被其相邻的四个原子所包围,每个原子间的距离都是一样的。图 1-2(a)、(b) 分别为硅和锗原子结构的平面示意图。硅原子由一个原子核和 14 个电子组成,最外一层是四个电子,原子核与除去最外一层电子的其余 10 个电子组成惯性核。在锗中,每一个原子由一个原子核和 32 个电子所组成,最外一层也是四个电子,原子核与除去最外一层电子的其余 28 个电子组成惯性核。由于每一个原子呈电中性,这样,惯性核可认为带有 +4 个电子电荷,在图 1-1(b) 中惯性核用圆圈表示。硅原子和锗原子最外层四子电子叫价电子。四个价电子分别受到四个紧邻的惯性核的约束,它们在相邻原子之间构成了共价键,在图 1-1(a)、(b) 中用双线代表键。由于键内两个电子的相对运动形成了两个原子之间的约束力。这个约束力和带正电荷的惯性核之间的静电斥力刚好平衡,这就把各原子牢固地保持在这种金刚石结构之中,因此这种晶体也叫共价晶体。

不含杂质、晶体结构完整无缺的半导体称为本征半导体。

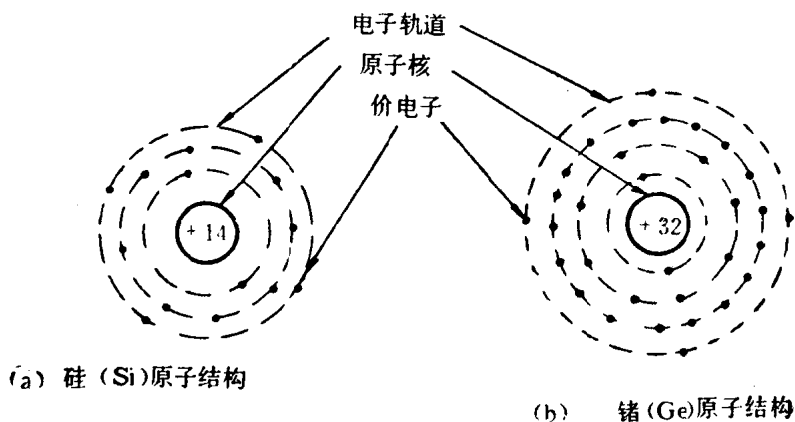


图 1-2 硅和锗原子结构的平面示意图

1) 严格说是单晶体。

在没有外来因素影响(包括 $T = 0\text{K}$)时,本征半导体的共价键是稳定的,价电子的运动局限于其键内,而内层电子又受束缚于核心,因此,即使在电场的作用下,这些电子都不能在晶体中自由移动。这样,纯净的、完整无缺的锗、硅晶体就表现得和绝缘体一样。然而,只要它们受到外界影响而使共价键遭到破坏时,就可以发生导电现象。

在一定温度下 ($T > 0\text{K}$),晶体中的原子及电子存在着热运动。个别的电子可能因为热运动而获得较大的能量,摆脱共价键的束缚而成为可在晶体中运动的自由电子。在外界电场作用下,这些带负电荷的电子将朝着电场相反的方向漂移,从而形成电流。

实际上,除了价电子获得了较大能量摆脱共价键的束缚而导电外,由这个电子遗留下来的不饱和(电子未填满)的共价键也可以形成电流。因为这时在这个共价键附近的其它共价键中的电子就很容易移动到这个共价键上来。移动来的电子填补了这个共价键,却又造成了新的未饱和键,在后者附近的共价键中的电子又有机会跑到它上面来,从而又造成另一个新的未饱和键,如此推演,即不断有电子的运动。在外电场作用下,电子的这种运动同电场方向相反的几率较大,因此也就表现出顺着电场方向的电流。我们把未饱和的共价键(电子留下的空位)称为空穴,则电子的这种填充运动完全可以用空穴运动来表达,而干脆说成是空穴(即缺少电子的共价键)运动。不言而喻,空穴的运动方向同共价键电子填充运动的方向是相反的,即在电场作用下,空穴是顺着电场方向运动的,对提供电流来说其效果和电子相同,为此,我们说空穴是带有与电子电荷相等而符号相反的载流子。

这样,在半导体中可有两种载流子:导电电子和带正荷的空穴。只要不致于混淆,导电电子也常称为电子。

这种由于热运动而产生电子和空穴的现象常称为热激发。在本征半导体中,电子和空穴是成对产生的,因而同时存在有两种数量相等的载流子,这是本征激发的一个特点。电子和空穴在运动过程中也可能相遇,这时电子就落入未饱和的共价键而使其饱和,于是这个电子和空穴对同时消失,我们称这种现象为“复合”。

在一定温度下,电子-空穴对达到一定数目之后,每秒内由热激发产生的电子-空穴对的数目恰好等于每秒内通过复合而消失的对数时,则称之为达到了动态平衡。这样就使半导体维持了一定数量的电子-空穴对。数量的多少当然取决于温度的高低及电子摆脱共价键的难易。共价键中电子受原子核束缚强的晶体(用能带图来说明,就说它禁带宽度 E_g 很大),即使温度很高,本征激发还是极少,因此就表现为绝缘体,而束缚较弱的晶体(其 E_g 较小),常常在室温环境,就有一定程度的本征激发,这种晶体就是半导体。由此可见,半导体和绝缘体之间的确没有严格的界限,只是一种程度上的差别而已。

然而半导体导电性质的改变比金属及绝缘体大得多,其根本原因就在于:半导体的载流子完全是依靠这种或那种因素的刺激而产生的,而金属中经常有许多载流子,外界或内部的因素对载流子的影响就不显著,在绝缘体中,载流子的激发则往往特别困难。由于半导体的这一特点,才使它得到广泛的应用。

如果用 n 表示 1cm^3 半导体中的导电电子数(称为电子浓度),以 p 表示 1cm^3 半导体中的空穴数(称为空穴浓度),则根据本征激发的特点

$$n = p = n_i \quad (1-1)$$

式中 n_i 为半导体的本征载流子浓度。两种载流子浓度相等是本征半导体导电机构的一个重要特点。

§ 1-1-3 N 型和 P 型半导体

在纯净的硅或锗晶体中掺入少量的杂质原子，并让这些杂质原子在样品中不规则的分布。这样的晶体称为掺杂晶体。掺杂的典型浓度是一亿分之一。因此每一杂质原子实际上可认为是晶体中的一个孤立原子，不受其余杂质原子的影响，因为它们的平均间距相当大。

在硅和锗中掺入少量的三价元素，例如硼(B)，便形成 P 型半导体；掺入少量的五价元素，例如磷，便形成 N 型半导体。工艺上把这种掺杂过程称为硼扩(散)或磷扩(散)。

我们首先来讨论 N 型半导体。在本征硅(或锗)中扩散杂质磷，这种五价元素的原子，其外层有五个电子，当一个磷原子取代一个硅原子时，就得到图 1-3(a) 所示的新结构。杂质原子的五个价电子中，有四个与相邻的硅原子形成共价键，第五个多余的价电子则不束缚于共价键中，而只受磷原子惯性核的轻微束缚，因为惯性核中只多一个正电荷，其所产生的库仑引力自然很轻微。和本征激发不一样，这个多余电子不需要很高的温度，就有足够的热能以摆脱这种束缚而离开这个磷原子，这种现象称为杂质电离。电离后的电子在晶体中作不规则的热运动，就成了导电电子。这种五价元素杂质能提供导电电子，故称为施主杂质。

在施主掺杂硅中，仍有空穴存在，因为以前提到的热激发仍然存在。但是，与施主供给的电子相比，所激发的空穴数量很小，这一点还必须从动态平衡的观点来考虑。由于施主杂质供给较多的电子，有些电子就落入共价键结构中的空位，而使空穴消失，因此空穴就减少了。人们把这种晶体中电子数超过了纯硅中的电子数，而空穴数目远小于电子数的半导体称为电子导电型半导体，或叫做 N 型半导体，其中自由电子叫多数载流子(简称多子)，空穴叫少数载流子(简称少子)。

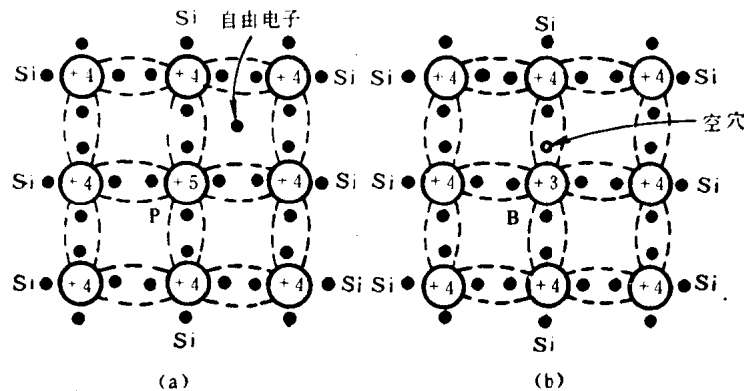


图 1-3 杂质半导体晶体结构

以上是关于施主杂质的情形。如果在完整晶体中掺入的是三个价元素的化学元素，例如硼，那么硅的晶格构造就变成如图 1-3(b) 所示的那样。由于杂质原子只有三个价电子，它和相邻四个硅原子相连的四个共价键中有一个共价键是未饱和的。这样，晶体结构中就有了一个空穴。在不高的温度下，这个空穴可以为邻近原子的价电子所填充而产生新的空穴，这个空穴就远离硼原子，即电离。由于这种杂质能提供空穴，实际是“接受”电子，因而称为受主杂质。加入受主杂质的半导体含有较多的空穴，而导电电子极少。人们把这种半导体称为空穴导电型半导体，又称 P 型半导体，其中空穴为多数载流子，电子为少数载流子，与施主杂质半导体的情形恰恰相反。

必须指出，无论是 N 型半导体，还是 P 型半导体，它们的载流子尽管有多子与少子之分，

但从宏观来看,都是呈电中性的杂质原子加入到呈电中性的纯半导体中,这个过程既未创造电荷,也未丢失电荷。因此就整体来说,电荷仍然是平衡的,半导体具有宏观的电中性。

§ 1-1-4 载流子的漂移与扩散

在半导体中,设空穴浓度为 p , 在外电场 E 的作用下,空穴以速度 v 作定向运动(称为漂移运动),那么它所产生的电流密度(用 J_p 表示)为

$$J_p = qp v \quad (1-2)$$

式中 q 为电子电荷量,等于 $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 。 v 是与外加电场成正比的空穴速度,即 $\frac{v}{E} = \mu_p$,

μ_p 称为空穴的迁移率,它表示在单位电场作用下空穴的漂移速度。把 $\mu_p = \frac{v}{E}$ 的关系式代入式(1-2),消去 v , 立即得到

$$J_p = qp \mu_p E \quad (1-3)$$

同理,可以得到电子浓度 n 所产生的电流密度为

$$J_n = qn \mu_n E \quad (1-4)$$

式中 μ_n 为电子的迁移率。在晶体中的载流子除了漂移运动外,还有扩散运动,它也能提供电流。同具有浓度梯度的中性气体一样,晶体中的载流子做着不断的热运动,其运动途径杂乱无章,经常突然改变方向。如果载流子存在一个浓度梯度,则载流子杂乱无章运动的最终方向将使载流子从高浓度区向低浓度区发散,这种现象称为扩散。扩散时载流子的流量与它的浓度梯度成正比,即

$$f = -D_n \nabla n \quad (1-5)$$

式中 f 为载流子的流量速率或通量, ∇n 为电子的浓度梯度, D_n 为电子的扩散系数,引入负号是因为向浓度低的区域扩散。对于一维的情况,如图 1-4 所示,则有

$$f = -D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (1-6)$$

式中考虑 n 也随时间变化而采用了偏微分。

载流子通量乘每一个载流子的电荷,即得到电流密度。对于电子而言,每个载流子的电荷为 $-q$, 因此,在稳定条件下电子扩散电流密度为

$$J_n = q D_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (1-7)$$

对于空穴,当然也可建立完全类似的扩散模型,但由于空穴的电荷为 $+q$, 因此由扩散所引起的空穴电流密度为

$$J_p = -q D_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1-8)$$

式中 D_p 为空穴的扩散系数。

如果电流是由电场和扩散共同引起的,则

$$J_p = q \left(p \mu_p E - D_p \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (1-9)$$

$$J_n = q \left(n \mu_n E + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right) \quad (1-10)$$

载流子的扩散系数是它在晶体中运动难易的量度,迁移率也是如此。因此,这两个量之

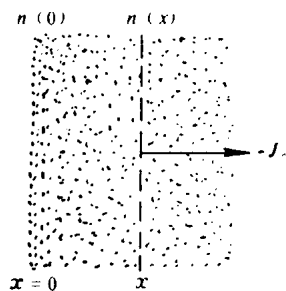


图 1-4 扩散原理图

间有一定的联系,可以证明扩散系数和迁移率之间存在有下列正比关系:

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \quad \text{及} \quad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (1-11)$$

方程式中 $\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$ 称为爱因斯坦关系式。 T 为绝对温度 (K), k 为波尔兹曼常数 ($k = 1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$)。

§ 1-1-5 PN 结的形成

现在来讨论 PN 结的形成。通过扩散等制造工艺在一块半导体内部实现 P 型和 N 型半导体的接触。在 P 与 N 交界面附近的一个小范围内,就会形成 PN 结。

由于 N 型半导体中电子是多子,空穴是少子;而在 P 型半导体中空穴是多子,电子是少子。因此,如图 1-5(a) 所示,在 P 型和 N 型半导体相接触的交界面处,分别存在着电子和空穴的浓度差,一开始, N 区中的电子就要向 P 区扩散, P 区中的空穴就要向 N 区扩散。N 区的电子向 P 区扩散后,交界面附近的 N 区中就剩下不能移动的带正电荷的电离施主,形成一个带正电荷的区域。同样, P 区中的空穴向 N 区扩散后, P 区也会剩下不能移动的带负电的电离受主,形成一个带负电荷的区域。这样在 N 型区和 P 型区交界面的两侧便形成如图 1-5(b) 所示的带正、负电荷的区域,称为空间电荷层(区),或 PN 结。在空间电荷层形成的同时,空间电荷层内的正、负电荷要形成电场,其方向是由 N 区指向 P 区,这个电场称为自建电场,简称为自建场,用 E_T 来表示。自建场一方面推动带负电的电子沿电场相反的方向作漂移运动,即由 P 区向 N 区运动;一方面推动空穴沿电场方向作漂移运动,即由 N 区向 P 区运动。也就是说,在空间电荷层内,自建场引起的电子和空穴的漂移运动方向与它们各自的扩散运动方向正好相反。随着扩散的进行,空间电荷数量不断增加,自建场越来越强,直到电场强到使载流子的漂移运动和扩散运动相互抵消(即大小相等方向相反)时,才达到平衡。

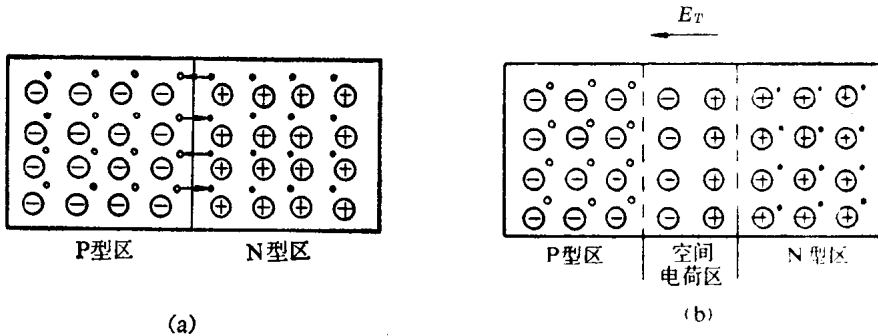


图 1-5 PN 结的剖面图

平衡时,在空间电荷层内,导电电子和空穴都已消耗(扩散)尽了,所以又称空间电荷层为耗尽层。又因为 PN 结有阻止载流子继续扩散的作用,所以也常称之为阻挡层。

阻挡层的厚度,一般为零点几微米(厚的可达几十微米)。由于自建电场 E_T 的存在, PN 结两侧便形成内建电位差 V_D (又称为接触电位差)。硅 PN 结的 V_D 约为 $0.6 \sim 0.8 \text{V}$, 锗 PN 结的 V_D 约为 $0.2 \sim 0.3 \text{V}$ 。

§ 1-1-6 PN 结的伏安特性

前面讨论了 PN 结的形成,下面我们讨论 PN 结的外部特性。如图 1-6 所示,在 PN 结两端接上外加电压 V (称为偏置电压)。当外加电压所产生的外加电场 E 与自建电场 E_T 方向相