

模拟电子 技术基础

■ 李震梅 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

Moni Dianzi Jishu Jichu

Moni Dianzi Jishu Jichu



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新修订的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求,结合作者多年的教学改革成果和教学经验,本着“精选内容,注重应用,启发创新”的原则而编写。主要内容包括:半导体二极管及其应用电路,双极型三极管及其放大电路,场效应管及其放大电路,放大电路的频率响应,功率放大电路,集成运算放大器,负反馈放大电路,信号的运算、测量及处理电路,波形发生及变换电路,直流电源,模拟电子电路的 Multisim 仿真。

本书概念阐述清楚,深浅适度,通俗易懂,突出应用,便于自学,在体现科学性、先进性、系统性方面具有特色。本书可作为高等学校电气信息类专业模拟电子技术基础课程的教材或教学参考书,也可作为工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/李震梅主编. —北京:高等教育出版社,2010.11
ISBN 978-7-04-030326-1

I. ①模… II. ①李… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 172540 号

策划编辑 欧阳舟 责任编辑 李葛平 封面设计 李卫青 责任绘图 尹 莉
版式设计 余 杨 责任校对 王 超 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 河北省财政厅票证文印中心

开 本 787×1092 1/16
印 张 29.5
字 数 720 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010 年 11 月第 1 版
印 次 2010 年 11 月第 1 次印刷
定 价 42.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 30326-00

前 言

根据当前电子技术发展的趋势和 21 世纪对人才能力培养的要求,针对普通高等本科院校学生的具体情况,依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新修订的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求,结合作者多年的教学改革成果和教学经验,本着“精选内容,注重应用,启发创新”的原则编写了本教材。在编写时,我们主要考虑了以下几点:

1. 精选教学内容、深浅适度、主次分明、详略恰当,在内容的阐述方面,以物理概念为主,突出实践性、实用性,力求做到文字通顺流畅、通俗易懂,以便学生学习。

2. 充分吸收新概念、新理论和新技术,妥善处理传统内容的继承与现代内容的引进,在保留传统的基本内容基础上,突出集成电路的应用和现代电子技术内容。如增加音频集成功率放大电路、集成函数发生器、集成开关稳压器等的应用。引入 Multisim9 仿真实例,仿真围绕教学的基本要求和重点内容进行。

3. 突出电子技术的应用性、实践性,强化实际应用能力的培养,本书一方面注重基础理论知识的传授,另一方面更注重应用能力和创新能力的提高。在内容的安排上,增加了许多实用和最新内容,如信号测量放大器、隔离放大器、开关电容滤波器等。

4. 参考了国内外近年出版的优秀教材,并总结多年来教学体会,每小节内容后附有针对本节内容的复习思考题,每章后附有自测题,精选了许多具有实用性的例题和习题,书末附有大部分习题的参考答案,其题源丰富,覆盖面宽,具有较强的针对性、启发性、指导性和补充性。

本书可作为高等学校电气信息类专业模拟电子技术基础课程的教材或教学参考书,也可作为工程技术人员的参考用书。本教材建议授课学时为 60 学时左右,部分章节内容,各校可根据实际情况进行调整。

参加本书编写的教师多年从事电子技术课程体系、课程内容的教学改革与实践,具有丰富的模拟电子技术课程的教学经验。山东理工大学李震梅教授组织了本书的编写,制订了详细的编写提纲,并负责全书的统稿。全书共 12 章,其中第 1、4 章由申晋编写,第 2、3 章由刘雪婷编写,第 5、6 章由董传岱编写;第 7 章由董传岱、白明共同编写。第 8、9、10 章由李震梅编写;第 11 章及附录由白明编写,杨雪岩参加了第 2、10 章的编写。

本书由国防科学技术大学高吉祥教授审阅,他提出了许多建设性意见和建议;本书的编写还得到了山东理工大学电工电子教研室全体老师的大力支持,编者在这里一并向他们表示感谢。在编写过程中参阅或引用了部分参考资料,对其作者我们也表示衷心的感谢。

限于编者的水平,本书中不妥和错误之处在所难免,望读者及同行老师们给予批评指正。

编者

2010 年 5 月

目 录

第1章 半导体二极管及其应用 电路 1

1.1 半导体的导电特性..... 1	
1.1.1 本征半导体及其导电特性..... 1	
1.1.2 N型半导体..... 3	
1.1.3 P型半导体..... 3	
1.2 PN结的形成及特性..... 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结的电容效应..... 6	
1.3 二极管..... 7	
1.3.1 二极管的基本结构..... 7	
1.3.2 二极管的伏安特性..... 7	
1.3.3 二极管的参数、型号及选择..... 10	
1.3.4 二极管的分析方法..... 11	
1.3.5 二极管的应用..... 13	
1.4 特殊二极管..... 14	
1.4.1 稳压二极管..... 14	
1.4.2 光电二极管..... 17	
1.4.3 发光二极管..... 18	
1.4.4 变容二极管..... 20	
本章小结..... 20	
习题..... 21	
自测题..... 23	

第2章 双极型三极管及其放大 电路 25

2.1 双极型三极管..... 25	
2.1.1 三极管的基本结构..... 25	
2.1.2 三极管的电流分配和放大	

原理..... 26	
2.1.3 三极管的伏安特性曲线..... 29	
2.1.4 三极管类型和工作状态的判断..... 31	
2.1.5 三极管的主要参数..... 33	
2.1.6 温度对三极管参数的影响..... 36	
2.1.7 三极管的类型、型号和选用原则..... 37	
2.1.8 特殊三极管..... 38	
2.2 共发射极放大电路的组成和工作原理..... 40	
2.2.1 单管共发射极放大电路的组成..... 40	
2.2.2 单管共发射极放大电路的工作原理..... 41	
2.2.3 放大电路的主要技术指标..... 42	
2.3 放大电路的静态分析..... 44	
2.3.1 直流通路..... 45	
2.3.2 静态工作点的近似估算..... 45	
2.3.3 图解法分析静态工作点..... 46	
2.4 放大电路的动态分析..... 47	
2.4.1 交流通路..... 47	
2.4.2 图解分析法..... 48	
2.4.3 微变等效电路法..... 51	
2.5 放大电路静态工作点的稳定..... 56	
2.5.1 温度对静态工作点的影响..... 57	
2.5.2 静态工作点稳定电路..... 57	
2.6 共集电极和共基极放大电路..... 60	
2.6.1 共集电极放大电路..... 60	

2.6.2 共基极放大电路	62
2.6.3 三种基本组态的比较	64
2.7 多级放大电路	65
2.7.1 多级放大电路的耦合 方式	65
2.7.2 多级放大电路的动态 分析	70
本章小结	73
习题	74
自测题	81
第3章 场效应管及其放大电路	84
3.1 结型场效应管	84
3.1.1 结型场效应管的结构	84
3.1.2 结型场效应管的工作 原理	85
3.1.3 结型场效应管的特性 曲线	86
3.2 绝缘栅型场效应管	88
3.2.1 N沟道增强型 MOS 场效 应管	88
3.2.2 N沟道耗尽型 MOS 场效 应管	91
3.3 场效应管的主要参数及 特点	93
3.3.1 场效应管的主要参数	93
3.3.2 场效应管的特点及使用 注意事项	94
3.4 场效应管放大电路	95
3.4.1 共源极放大电路	95
3.4.2 分压-自偏压式共源极放大 电路	99
3.4.3 共漏极放大电路	100
3.4.4 三种基本放大电路的性能 比较	102
本章小结	103
习题	103
自测题	106

第4章 放大电路的频率响应 107

4.1 频率响应的基本概念	107
4.1.1 研究放大电路频率响应的 必要性	107
4.1.2 放大电路频率特性的定性 分析	108
4.2 RC 低通和高通电路的频率 响应	109
4.2.1 RC 低通电路的频率响应 ...	109
4.2.2 RC 高通电路的频率响应 ...	112
4.3 三极管的混合 π 形等效电路 及参数估算	114
4.3.1 三极管的混合 π 形等效 电路	114
4.3.2 混合 π 形等效电路的参数 估算	116
4.3.3 三极管的频率参数	117
4.4 单管共发射极放大电路的频率 响应	120
4.4.1 阻容耦合共发射极放大电路 的频率响应	120
4.4.2 放大电路频率响应的 改善	129
4.4.3 其他电容对频率特性的 影响	131
4.5 多级放大电路的频率响应	133
4.5.1 多级放大电路的幅频特性 和相频特性	133
4.5.2 多级放大电路的截止 频率	134
本章小结	137
习题	138
自测题	142

第5章 功率放大电路 145

5.1 功率放大电路的一般问题	145
5.1.1 对功率放大电路的基本	

要求	145	放大器 ICL7614	190
5.1.2 功率放大电路的分类	146	6.3.3 特殊集成运算放大器	191
5.2 互补对称功率放大电路	147	6.4 集成运算放大器的主要参数	192
5.2.1 乙类 OTL 互补对称功率 放大电路	147	6.4.1 直流性能指标	192
5.2.2 甲乙类 OTL 互补对称功率 放大电路	151	6.4.2 差模小信号性能指标	193
5.2.3 甲乙类 OCL 互补对称功率 放大电路	154	6.4.3 大信号工作的性能指标	193
5.2.4 采用复合管的互补对称功 率放大电路	158	6.4.4 电源性能指标	194
5.3 集成功率放大电路	160	6.5 集成运算放大器的工作特性	194
5.3.1 LM386 通用型集成功率 放大电路	161	6.5.1 集成理想运放的性能 参数	194
5.3.2 专用型集成功率放大 电路 XG4140	163	6.5.2 集成运放的电压传输 特性	195
5.3.3 音频集成功率放大电路 CD4100	164	6.5.3 运放工作在线性区的 特点	195
本章小结	165	6.5.4 运放工作在非线性区的 特点	196
习题	166	本章小结	196
自测题	169	习题	197
第 6 章 集成运算放大器	171	自测题	200
6.1 集成运算放大器的特点及 组成	171	第 7 章 负反馈放大电路	203
6.1.1 集成运算放大器的特点	171	7.1 反馈的基本概念	203
6.1.2 集成运算放大器的组成	172	7.1.1 反馈的概念	203
6.2 集成运算放大器的单元电路	172	7.1.2 正反馈和负反馈	204
6.2.1 差分放大电路	173	7.2 负反馈放大电路的类别及 判断	204
6.2.2 电流源电路	181	7.2.1 有无反馈的判别	204
6.2.3 采用复合管和有源负载的 中间放大级	185	7.2.2 正、负反馈的判别	204
6.2.4 输出级中的过载保护 电路	185	7.2.3 直流反馈和交流反馈	207
6.3 典型集成运算放大器介绍	186	7.2.4 串联反馈和并联反馈的 判别	209
6.3.1 BJT 通用型集成运算 放大器 μ A741	186	7.2.5 电压反馈和电流反馈	210
6.3.2 MOS 通用型集成运算		7.3 负反馈放大电路的一般 表达式及四种组态	213

7.3.4	电压并联负反馈	216
7.3.5	电流并联负反馈	217
7.4	负反馈对放大电路性能的影响	219
7.4.1	提高放大倍数的稳定性	219
7.4.2	减小非线性失真和抑制干扰	220
7.4.3	扩展放大电路的通频带	221
7.4.4	对输入电阻的影响	222
7.4.5	负反馈对输出电阻的影响	224
7.4.6	放大电路中引入负反馈的一般原则	226
7.5	负反馈放大电路的分析计算	227
7.5.1	估算的依据及步骤	227
7.5.2	电压串联负反馈举例	228
7.5.3	电压并联负反馈举例	229
7.5.4	电流串联负反馈举例	231
7.5.5	电流并联负反馈举例	232
7.6	负反馈放大电路的稳定性	234
7.6.1	负反馈放大电路产生自激振荡的原因及条件	235
7.6.2	反馈放大电路稳定性的定性分析	236
7.6.3	负反馈放大电路稳定性的判断	236
7.6.4	负反馈放大电路中自激振荡的消除方法	240
	本章小结	243
	习题	244
	自测题	249

第8章 信号的运算、测量及处理电路

252

8.1	基本运算电路	252
8.1.1	比例运算电路	252
8.1.2	加法运算电路	257
8.1.3	减法运算电路	260

8.1.4	积分和微分运算电路	262
8.2	对数、指数运算电路	267
8.2.1	对数运算电路	267
8.2.2	指数运算电路	269
8.3	乘法器及其应用电路	271
8.3.1	乘法器的基础知识	271
8.3.2	对数-指数型模拟乘法器	272
8.3.3	变跨导式模拟乘法器	273
8.3.4	集成模拟乘法器	274
8.3.5	模拟乘法器的应用	275
8.4	信号测量放大电路	278
8.4.1	三运放测量放大器	278
8.4.2	可变增益放大器	281
8.4.3	隔离放大器	284
8.5	信号变换电路	285
8.5.1	电压-电流转换器	285
8.5.2	电流-电压转换器	287
8.6	有源滤波器	289
8.6.1	滤波器的功能和分类	289
8.6.2	低通有源滤波器	290
8.6.3	高通有源滤波器	295
8.6.4	带通有源滤波器	297
8.6.5	带阻有源滤波器	299
8.6.6	开关电容滤波电路	300
	本章小结	303
	习题	303
	自测题	312

第9章 波形发生及变换电路

314

9.1	正弦波振荡电路的基本原理	314
9.1.1	自激振荡的条件	314
9.1.2	正弦波振荡电路的组成	315
9.1.3	正弦波振荡电路的类型	316
9.1.4	正弦波振荡电路的分析步骤	316
9.2	RC 正弦波振荡电路	317
9.2.1	RC 桥式正弦波振荡电路	317
9.2.2	RC 移相式振荡电路	323

9.2.3 双 T 网络正弦波振荡电路	324	10.2.2 单相桥式整流电路	375
9.3 LC 正弦波振荡电路	325	10.3 滤波电路	379
9.3.1 LC 并联网络的选频特性 ...	325	10.3.1 电容滤波电路	379
9.3.2 变压器反馈式 LC 振荡电路	327	10.3.2 电感滤波电路	383
9.3.3 电感三点式振荡电路	329	10.3.3 其他形式的滤波电路	384
9.3.4 电容三点式振荡电路	331	10.4 稳压二极管稳压电路	385
9.4 石英晶体振荡电路	334	10.4.1 电路组成及工作原理	385
9.4.1 正弦波振荡电路的频率稳定问题	334	10.4.2 稳压电路的主要指标	386
9.4.2 石英晶体的特性	335	10.4.3 稳压电路中限流电阻 R 的选择	387
9.4.3 石英晶体振荡电路	336	10.5 串联型直流稳压电路	389
9.5 电压比较器	337	10.5.1 串联型直流稳压电路的组成	389
9.5.1 单限比较器	338	10.5.2 串联型直流稳压电路的稳压原理	390
9.5.2 滞回比较器	341	10.5.3 串联型直流稳压电路的参数计算	390
9.5.3 双限电压比较器	344	10.6 串联型集成稳压器	392
9.5.4 集成电压比较器	345	10.6.1 基准电压源	393
9.6 非正弦信号产生电路	346	10.6.2 保护电路	394
9.6.1 方波发生电路	346	10.6.3 三端固定式输出集成稳压器及其应用	396
9.6.2 三角波发生电路	349	10.6.4 三端可调输出集成稳压器及其应用	400
9.6.3 锯齿波发生电路	351	10.7 开关型直流稳压电源	402
9.7 集成函数发生器	352	10.7.1 开关型直流稳压电源的特点和分类	402
9.7.1 集成函数发生器 ICL8038 及其应用	352	10.7.2 串联开关型稳压电路的组成及工作原理	403
9.7.2 高频函数发生器 MAX038 及其应用	355	10.7.3 集成开关稳压器及其应用	406
本章小结	358	10.7.4 数字电源简介	408
习题	359	本章小结	409
自测题	366	习题	410
第 10 章 直流电源	370	自测题	416
10.1 稳压电源的分类及组成	370	第 11 章 模拟电子电路的 Multisim 仿真	418
10.1.1 稳压电源的分类及其特点	370		
10.1.2 直流稳压电源的组成	371		
10.2 单相整流电路	372		
10.2.1 单相半波整流电路	372		

11.1	Multisim 9 入门	418	附录	444
11.1.1	Multisim 9 的安装	418	附录 A 半导体分立元件型号命名	
11.1.2	Multisim 9 的界面	419	方法	444
11.1.3	Multisim 9 的使用	420	附录 B 部分常用半导体分立元件的	
11.2	Multisim 电子电路仿真举例	428	参数	445
11.2.1	单管共发射极放大电路		附录 C 半导体集成电路型号命名	
	仿真	428	方法	448
11.2.2	阻容耦合单级共发射极		附录 D 常用半导体集成电路的	
	放大电路频率响应仿真 ...	430	参数	449
11.2.3	功率放大电路的仿真	433	部分习题自测题参考答案	451
11.2.4	差分放大电路的仿真	436	参考文献	459
11.2.5	负反馈放大电路的仿真 ...	439		

第 1 章 半导体二极管及其应用电路

半导体器件是构成各种电子电路的基础,二极管是最常用的半导体器件之一。本章首先介绍半导体的导电特性,阐述 PN 结的形成及特性,然后介绍二极管的基本结构、伏安特性、主要参数、分析方法及应用,最后简单介绍稳压二极管等几种特殊的二极管。

1.1 半导体的导电特性

物质按其导电能力可分为导体、绝缘体和半导体三种。通常人们把易导电的物质称为导体,如金、银、铜等;把在正常情况下很难导电的物质称为绝缘体,如陶瓷、云母、塑料、橡胶等;把导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体,如硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物。

通常情况下纯净半导体的导电能力较差,但随着外界条件的改变,其导电能力会有较大改变。半导体具有以下特性。

(1) 热敏特性:当半导体受热时,电阻率会发生变化,利用这个特性可制成热敏元件,如热敏电阻。热敏电阻分为正温度系数和负温度系数两种,如 MF58 属于负温度系数的热敏电阻,即其电阻值随着温度的升高而降低。

(2) 光敏特性:当半导体受到光照时,电阻率会发生改变,利用这个特性可制成光电器件,如光敏电阻、光电二极管、光电三极管等。如光敏电阻随着光照强度的增加,其电阻值下降。

(3) 掺杂特性:在纯净的半导体中掺入某种微量的杂质后,它的导电能力就可增加几十万乃至几百万倍。例如在纯净硅中掺入百万分之一的硼后,硅的电阻率就从 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右,利用这种特性就做成了各种不同用途的半导体器件,如半导体二极管、三极管、场效应管及晶闸管等。半导体为什么会具有上述特性呢?要回答这个问题,必须研究半导体的内部结构。下面介绍半导体物质的内部结构和导电机理。

1.1.1 本征半导体及其导电特性

用得最多的半导体材料是硅和锗。硅和锗的原子结构如图 1.1.1(a)所示,硅的原子序数是 14,在硅原子中共有 14 个电子围绕着原子核旋转,在最外层轨道上有 4 个电子,称为价电子。同样,锗的原子序数是 32,最外层轨道上也有 4 个电子,所以硅和锗都是四价元素,为了简单明了,常常用带有 +4 电荷的正离子以及它周围的 4 个价电子来表示一个四价元素的原子,如图 1.1.1(b)所示。

将纯净的半导体经过一定的工艺过程制成单晶体,即为本征半导体。晶体中的原子在空间形成排列整齐的点阵,成为晶格。在本征半导体的晶体结构中,每一个原子与相邻的 4 个原子结合。每一原子的一个价电子与另一原子的一个价电子组成一个电子对。这对价电子是每两个相

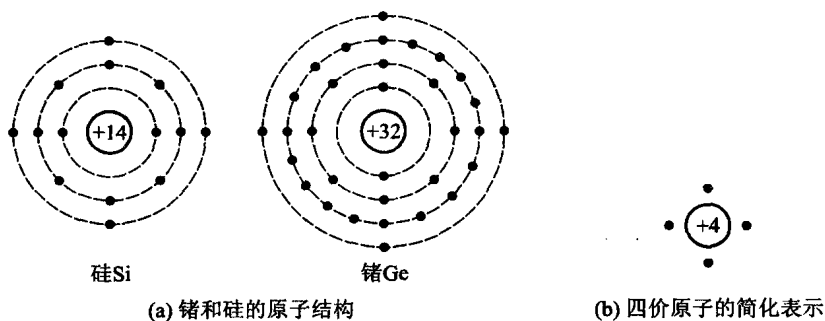


图 1.1.1 锗和硅的原子结构及简化表示

邻原子共有的,它们把相邻的原子结合在一起,构成共价键的结构,如图 1.1.2 所示。

由于晶体中共价键具有很强的结合力,因此在绝对零度(即 $T=0K$)和无外界激发时,价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚,晶体中没有能够导电的载流子,所以不能导电。但当温度升高或受光照时,将有少数价电子从外界获得足够的能量,挣脱共价键的束缚而成为自由电子,同时,在原来共价键的相应位置上留下一个空位,这个空位称为空穴,如图 1.1.3 所示。自由电子和空穴是成对出现的,称它们为电子-空穴对。在本征半导体中,自由电子与空穴的数量总是相等的。

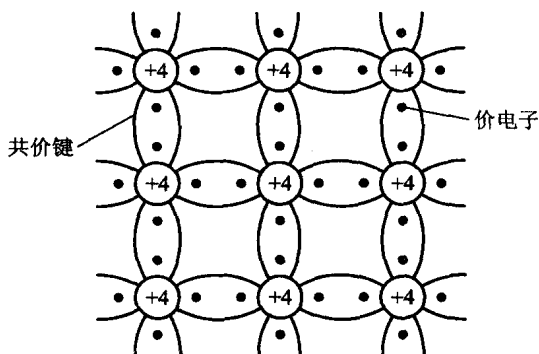


图 1.1.2 本征半导体结构示意图

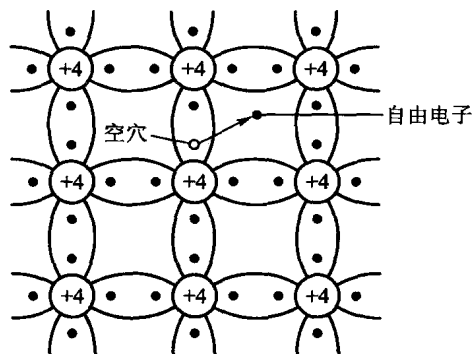


图 1.1.3 本征半导体中的自由电子与空穴

在外电场的作用下,有空穴的原子可以吸引相邻原子中的价电子,填补这个空穴。同时,在失去了一个价电子的相邻原子的共价键中出现另一个空穴,这个空穴也可以由它相邻原子中的价电子来递补,接着又出现一个空穴,如此继续下去,价电子的逐次递补就好像空穴向反方向运动一样,因此空穴运动相当于正电荷的运动。由此可见,本征半导体中存在两种载流子:自由电子和空穴。

因此,当半导体两端加上外电压时,半导体中将出现两部分电流:一是自由电子作定向运动所形成的电子电流,二是由价电子(不是自由电子)递补空穴所形成的空穴电流。在半导体中,同时存在着电子导电和空穴导电,这是半导体导电的最大特点。自由电子和空穴统称为载流子,电子带负电,空穴带正电,它们定向移动都能形成电流。

本征半导体中的自由电子和空穴总是成对出现,另一方面,自由电子在运动过程中如果与空穴相遇就会填补空穴,使两者同时消失,这种现象称为复合。在一定温度下,载流子的产生和复合达到动态平衡,于是半导体中的自由电子和空穴数目便维持在一定的数值。温度越高,载流子数目越多,半导体的导电性能也就越强。所以,温度对半导体器件性能的影响很大。

本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子,但由于数量极少,导电能力仍然很差。如果在其中掺入微量的杂质(某种元素),将使掺杂后的半导体(杂质半导体)的导电能力大大增强。

根据掺入杂质的不同,杂质半导体可分为两大类:N型半导体和P型半导体。

1.1.2 N型半导体

在硅或锗的晶体中掺入少量的五价元素(磷、砷、锑等),例如在硅晶体中掺入少量的磷,由于掺入的磷原子数比硅原子数少得多,因此整个晶体结构基本上不变,只是某些位置上的硅原子被磷原子取代。磷原子的最外层有5个价电子,它与周围4个硅原子组成共价键时只需4个价电子,多余的价电子不受共价键的束缚,而只受自身原子核的吸引,这种束缚力比较微弱,在室温下即可成为自由电子,如图1.1.4所示。因此,半导体中的自由电子数目大量增加,自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,故称它为电子型半导体或N型半导体。由于N型半导体中的自由电子数目的增多增加了和空穴复合的机会,空穴的数目比本征半导体空穴的数目少,所以,自由电子被称为多数载流子,简称多子,而空穴被称为少数载流子,简称少子。在N型半导体中,失去电子的磷原子固定在晶格上不能移动,并带有正电荷,称为正离子,以后用“ $\oplus$ ”表示。由于磷原子提供电子,所以称为施主原子。

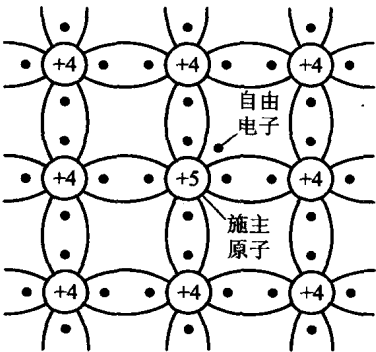


图 1.1.4 N型半导体的晶体结构

1.1.3 P型半导体

在硅或锗晶体中掺入少量的三价元素(硼、镓、铟等),例如在硅晶体中掺入少量的硼,由于硼原子数量比硅原子数量要少得多,因此整个晶体结构基本不变,只是某些位置上的硅原子被硼原子所代替。硼原子最外层只有3个价电子,它与周围硅原子组成共价键时将缺少一个价电子,在常温下很容易从其他位置的共价键中夺取一个电子,使硼原子对外呈现为负电荷,形成负离子,以后用“ $\ominus$ ”表示。同时其他地方产生一个空穴,如图1.1.5所示。这种半导体的空穴数远大于自由电子数,称之为P型半导体或空穴半导体。显然在P型半导体中,空穴是多数载流子,而自由电子是少数载流子。由于硼原子起着接受电子的作用,所以称为受主原子。

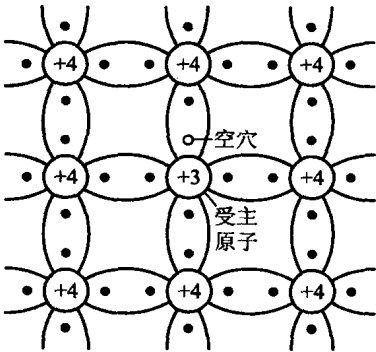


图 1.1.5 P型半导体的晶体结构

应注意,不论是N型半导体还是P型半导体,虽然它们都有一种载流子占多数,但是整个晶体仍然是不带电的。

【练习与思考】

1.1.1 什么是本征半导体？什么是杂质半导体？

1.1.2 为什么称空穴是载流子？空穴电流是自由电子递补空穴形成的吗？

1.1.3 在本征半导体中，自由电子和空穴在数量上有什么关系？自由电子导电和空穴导电有什么区别？

1.1.4 N 型半导体的多数载流子是自由电子，P 型半导体的多数载流子是空穴，是否 N 型半导体带负电，P 型半导体带正电？

1.1.5 杂质半导体少数载流子的浓度与本征半导体载流子的浓度一样吗？为什么？

1.2 PN结的形成及特性

1.2.1 PN 结的形成

在一块本征半导体上，一侧掺入三价元素，使其变为 P 型半导体，另一侧掺入五价元素，使其变为 N 型半导体，由于 P 区有大量的空穴（浓度大），而 N 区的空穴极少（浓度小），因此空穴要从浓度大的 P 区向浓度小的 N 区扩散。同样，N 区的自由电子要向 P 区扩散。随着扩散的进行，在交界面附近的 P 区留下一些带负电的不能移动的离子，形成负空间电荷区，在交界面附近的 N 区留下带正电的不能移动的离子，形成正空间电荷区。这样，在 P 型半导体和 N 型半导体交界面的两侧就形成了一个空间电荷区，从而形成了内电场，其方向从 N 区指向 P 区，空间电荷区的内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，但内电场可推动少数载流子（P 区的自由电子和 N 区的空穴）越过空间电荷区，进入对方。少数载流子在内电场的作用下有规则的运动称为漂移运动。

扩散和漂移是互相联系的，也是互相矛盾的。在开始形成空间电荷区时，多数载流子的扩散运动占优势。但在扩散运动进行过程中，空间电荷区逐渐加宽，内电场逐步加强，在一定条件下，多数载流子的扩散运动逐渐减弱，而少数载流子的漂移运动则逐渐增强，最后，扩散运动和漂移运动达到动态平衡，也就是 P 区的空穴（多数载流子）向 N 区扩散的数量与 N 区的空穴（少数载流子）向 P 区漂移的数量相等，对自由电子来讲也是这样。达到动态平衡后，空间电荷区的宽度基本上稳定下来，PN 结就处于相对稳定的状态。空间电荷区的宽度约为几微米至几十微米，这个空间电荷区就是 PN 结，如图 1.2.1 所示。

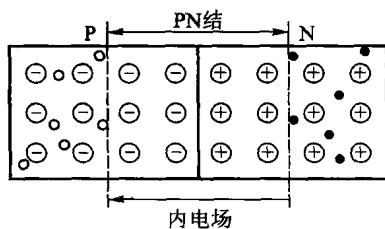


图 1.2.1 PN 结的形成

形成空间电荷区的正、负离子虽然带电，但是它们不能移动，不参与导电，而在这个区域内，载流子极少，所以空间电荷区的电阻率很高，因此空间电荷区也称为高阻区。此外，该区域多数载流子已扩散到对方并复合掉了，故空间电荷区也称为耗尽层。

正、负空间电荷在交界面两侧形成的内电场，其方向从带正电的 N 区指向带负电的 P 区，由 P 区向 N 区扩散的多数载流子空穴在空间电荷区将受到内电场的阻力，而由 N 区向 P 区扩散的

多数载流子自由电子也将受到内电场的阻力,即内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用,所以空间电荷区又称为阻挡层。

1.2.2 PN 结的单向导电性

上面讨论的是 PN 结在没有外加电压时的情况,下面讨论在 PN 结上加外部电压的情况。

1. PN 结上加正向电压

当电源的正极接 P 区,负极接 N 区,称为 PN 结加正向电压,也称 PN 结正向偏置(简称正偏),如图 1.2.2 所示。可见,外电场与内电场方向相反,因此扩散与漂移运动的平衡被破坏。

外电场的作用将使 P 区的空穴向右移动,与空间电荷区内的一部分负离子中和;使 N 区的自由电子向左移动,与空间电荷区的一部分正离子中和,于是,整个空间电荷区变窄,内电场被削弱,多数载流子的扩散运动加强,漂移运动减弱。由于外加电源的作用,扩散运动将源源不断地进行,从而形成正向电流,方向是从 P 区流向 N 区。至于漂移运动,本来就是少数载流子的运动形成的,数量很少,故对总电流的影响可以忽略。所以正向接法的 PN 结处于导通状态,呈现的电阻很低,正向偏置时,只要在 PN 结上加较小的电压,即可得到较大的正向电流,因而应在其所在的回路中串联一个电阻,以限制回路的电流,防止 PN 结因正向电流过大而损坏。

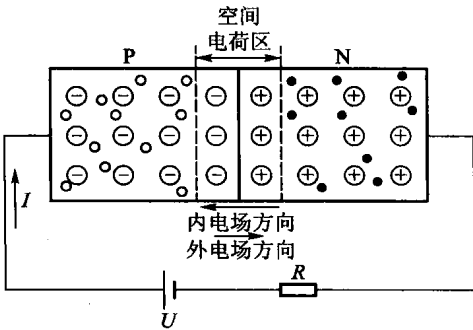


图 1.2.2 PN 结加正向电压

2. PN 结上加反向电压

电源正极接 N 区,负极接 P 区,如图 1.2.3 所示,称为 PN 结上加反向电压,或称 PN 结反向偏置。由于外电场与内电场方向一致,也破坏了扩散与漂移运动的平衡,外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,空间电荷区变宽,内电场增强,使多数载流子的扩散运动难于进行。但另一方面,内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动,在电路中形成了反向电流 I_s ,方向如图 1.2.3 所示。由于少数载流子数量很少,故反向电流很小,即 PN 结呈现的反向电阻很高。又因为少数载流子是由获得热能(热激发)的价电子挣脱共价键的束缚而产生的,环境温度愈高,少数载流子数量愈多,反向电流也就愈大。所以,温度对反向电流的影响很大。

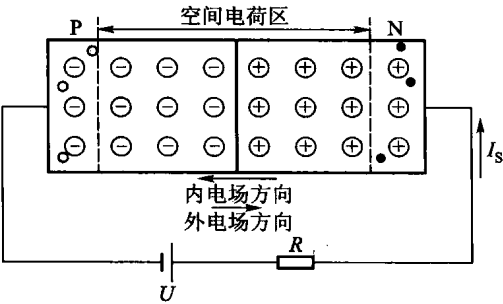


图 1.2.3 PN 结加反向电压

综上所述,PN 结具有单向导电性,即在 PN 结上加正向电压时,PN 结变窄,电阻很低,正向电流较大,PN 结处于导通状态;加反向电压时,PN 结变宽,电阻很高,反向电流很小(常被忽略不计),PN 结处于截止状态。可见,PN 结具有单向导电性。

1.2.3 PN 结的电容效应

PN 结具有一定的电容效应,根据产生原因的不同分为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。

1. 势垒电容 C_B

势垒电容是由阻挡层内空间电荷引起的。空间电荷区是由不能移动的正、负杂质离子组成的,均具有一定的电荷量,所以空间电荷区存储了一定的电荷。当外加电压使 PN 结上压降发生变化时,阻挡层的宽度也相应地随之改变,这相当于 PN 结中存储的电荷量也随之变化,犹如电容的充放电,势垒电容的示意图如图 1.2.4 所示。势垒电容 C_B 具有非线性,它与结面积、阻挡层宽度、半导体的介电常数及外加电压有关。势垒电容 C_B 与外加电压 U 的关系如图 1.2.5 所示。利用 PN 结加反向电压时势垒电容 C_B 与外加电压 U 变化的特性,可以制成各种变容二极管。

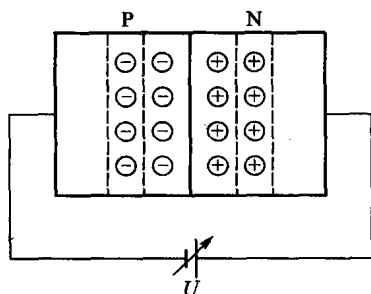


图 1.2.4 势垒电容的示意图

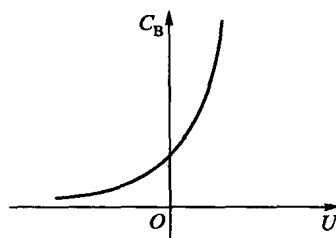


图 1.2.5 势垒电容与外加电压的关系

2. 扩散电容 C_D

扩散电容是 PN 结加正向电压时,多数载流子在扩散过程中引起电荷积累而产生的。PN 结加正向电压时,N 区的电子扩散到 P 区,同时 P 区的空穴也扩散到 N 区,在 PN 结的交界面处载流子的浓度最高。随着扩散的进行,离交界面越远,载流子的浓度越低。这些扩散的载流子,在扩散区积累了电荷,总的电荷量相当于图 1.2.6 (表示 P 区电子浓度 n_p 随离开交界面的距离 x 的分布)中曲线 1 以下的部分。当 PN 结正向电压增大时,则多数载流子扩散加强,电荷积累量由曲线 1 变为曲线 2,电荷量增加为 ΔQ 。反之,当 PN 结正向电压减小时,积累的电荷将减少。因为这种电荷量的变化是由载流子的扩散引起的,所以称为扩散电容。扩散电容 C_D 具有非线性,它与流过 PN 结的正向电流、温度的电压当量以及非平衡少数(当 PN 结正向偏置时,扩散到另一侧的多子称为非平衡少数)的寿命有关。

PN 结的结电容是势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 之和,当 PN 结正向偏置时,扩散电容起主要作用,当 PN 结反向偏置时,势垒电容起主要作用。势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 一般都很小,结面积小的为 1pF 左右,结面积大的为几十到几百皮法。PN 结的结电容对低频信号呈现出很大的容抗,其作用可以忽略不计,只有在信号频率较高时才考虑结电容的作用。

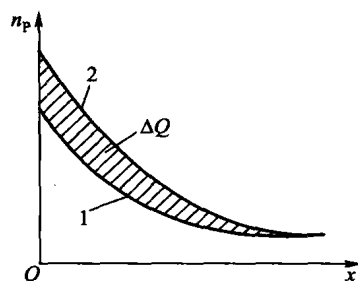


图 1.2.6 PN 结的扩散电容示意图

【练习与思考】

- 1.2.1 什么是扩散运动？什么是漂移运动？
- 1.2.2 PN 结是如何形成的？
- 1.2.3 为什么空间电荷区称为高阻区又称阻挡层？
- 1.2.4 如何理解 PN 结的单向导电性？
- 1.2.5 PN 结的正、反向电流是怎样产生的？这两个电流在数值上有什么差别？

1.3 二极管

1.3.1 二极管的基本结构

将 PN 结加上相应的电极引线和管壳,就成为半导体二极管。由 P 区引出的电极为阳极(也称正极),由 N 区引出的电极为阴极(也称负极)。常见的二极管外形和封装如图 1.3.1 所示。

二极管类型很多,按其制造材料可分为硅二极管和锗二极管等;按其结构可分为点接触型二极管、面接触型二极管和平面型二极管。点接触型二极管如图 1.3.2(a)所示,它的特点是 PN 结的面积小,因此管子中不允许通过较大的电流,但其高频性能好,适用于高频电路和小功率整流,也可作数字电路的开关元件。面接触型二极管如图 1.3.2(b)所示,由于其 PN 结结面积大,故允许流过较大的电流,但只能在较低频率下工作,可用于整流电路。平面型二极管如图 1.3.2(c)所示,结面积大的可用于大功率整流,结面积小的可作数字电路的开关元件。二极管的符号如图 1.3.2(d)所示。

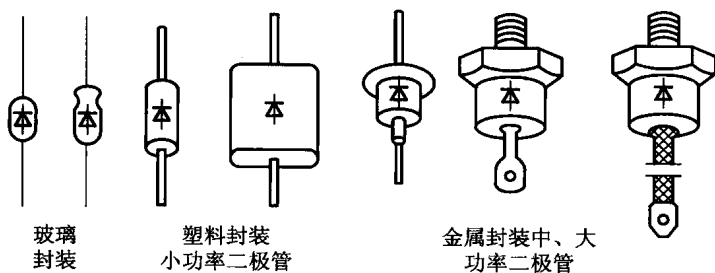


图 1.3.1 常见二极管的外形

1.3.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性是流过二极管的电流 i 与加在二极管两端的电压 u 之间的关系曲线,即 $i=f(u)$ 。硅二极管 2CP10 的伏安特性如图 1.3.3 所示,锗二极管 2AP15 的伏安特性如图 1.3.4 所示。通常把特性曲线分为三部分:正向特性、反向特性和反向击穿特性。