

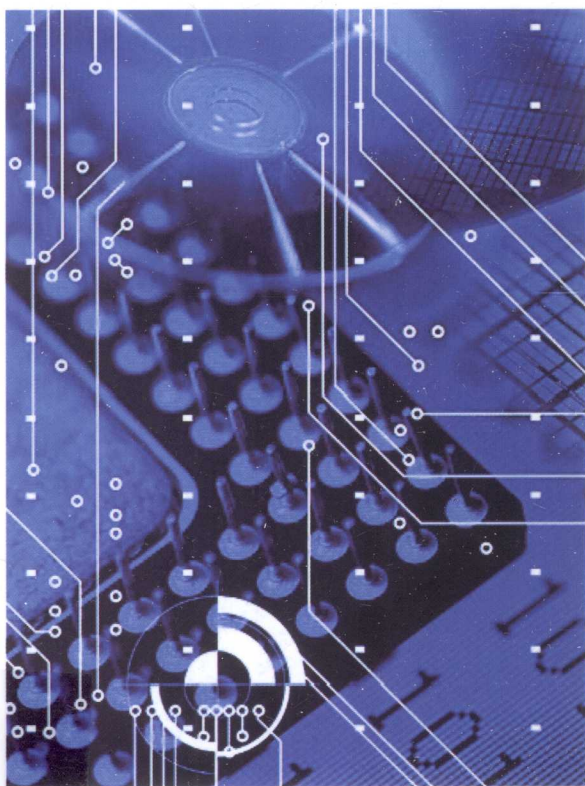
模拟电子技术

- ◆ 半导体器件基础
- ◆ 放大电路基础
- ◆ 集成运算放大电路
- ◆ 放大电路中的反馈
- ◆ 信号的运算与处理
- ◆ 波形发生电路
- ◆ 直流稳压电源
- ◆ 模拟电路应用实例

武汉工业学院图书馆



01388242



立南 张明 吴琼 刘洋 编著



清华大学出版社

模拟电子技术

范立南 张明 吴琼 刘洋 编著



清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以模拟电子技术的基本知识、基本理论为主线,将模拟电子技术的基本理论与各种新技术有机地结合在一起精心编排和设计安排章节。本书共分8章,内容包括半导体二极管及其应用、半导体三极管及放大电路基础、场效应管及其放大电路、集成运算放大器、反馈和负反馈放大电路、集成运放组成的运算电路、信号检测与处理电路、信号发生器、功率放大器、直流稳压电源等。各章末均有小结和阅读材料,并配有难易程度和数量都比较适当的思考题和习题。

本书可作为高等院校电气信息类专业(含自动化、电气技术、电子信息工程、电子信息科学与技术、生物医学工程、通信、计算机、测控和机电一体化等)及相关专业的本科教材,还可供从事电子技术研究和开发的工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/范立南 等编著. —北京:清华大学出版社, 2013.1

ISBN 978-7-302-29997-4

I. ①模… II. ①范… III. ①模拟电路—电子技术 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 210517 号

责任编辑:王 军

装帧设计:牛静敏

责任校对:邱晓玉

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62794504

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:20.75

字 数:491 千字

版 次:2013 年 1 月第 1 版

印 次:2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:35.00 元

产品编号:042965-01

前 言

模拟电子技术是电子类及相关专业的重要专业基础课,对人才培养有着至关重要的作用。模拟电子技术涉及的内容也浩如烟海,知识点多、理论性强、难度大。为了更好地适应学生的学习需要,本教材设定的目标是通过教学,培养学生具有清晰、准确、系统的理论知识脉络,并具有较强的模拟电子技术实际应用能力。本书以“讲透基本原理,打好电路基础,面向集成电路”为宗旨,在若干知识点的阐述上,有自己的个性特色,并在内容取舍、编排以及文字表达等方面都期望解决初学者入门难的问题。本教材内容体系完整,较全面地讲述了模拟电子技术的知识,以基本概念和基本应用为主,着重于电路功能的描述、分析和典型应用,强调电路特性和电路的应用,淡化电路的内部结构,重点突出,便于自学。

本书主要内容包括:半导体器件基础、放大电路基础、集成运算放大电路、负反馈放大电路、模拟信号的运算与处理、波形发生电路、直流稳压电源和模拟电路应用实例等。全书共分8章。第1章介绍了半导体器件;第2章对基本放大电路、多级放大电路、场效应管放大电路进行了阐述;第3章对功率放大电路进行了阐述;第4章对集成运算放大电路进行了阐述;第5章对负反馈放大电路进行了阐述分析;第6章对信号运算电路进行了阐述;第7章对信号发生和波形转换电路进行了阐述;第8章对直流电源电路进行了阐述分析。各章末均有小结和阅读材料,并配有难易程度和数量都比较适当的思考题和习题。

在每章的最后,都有对本章知识进行汇总的实际电路分析的内容。这些内容以案例教学的方式加强学生对电路整体理解,进而加深对所学理论知识的理解,达到理论知识的学习与实践能力的培养相互促进的目的,为后续课程的学习以及考研都打下了良好的基础。

本书是在应用于教学多年并且取得较好效果的教材基础上进行完善写作的。第1、2章由张明编写,第3、5章由吴琼编写,第4、6、7章由刘洋编写,第8章由范立南编写,全书由范立南统稿。

本书可作为高等院校电气信息类专业(含自动化、电气技术、电子信息工程、电子信息科学与技术、生物医学工程、通信、计算机、测控和机电一体化等)及相关专业的本科教材,还可供从事电子技术研究和开发的工程技术人员参考。

由于作者水平有限、时间仓促,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2012年1月

目 录

第 1 章 常用半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体	2
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 PN 结	4
1.1.4 PN 结的单向导电性	6
1.1.5 PN 结的电容效应	7
1.2 半导体二极管	8
1.2.1 二极管的结构	8
1.2.2 伏安特性	9
1.2.3 主要参数	11
1.2.4 等效电路	13
1.2.5 其他二极管	14
1.3 晶体三极管	19
1.3.1 晶体三极管的结构	19
1.3.2 内部载流子运动规律	20
1.3.3 晶体三极管放大作用	22
1.3.4 晶体三极管的特性曲线	25
1.3.5 晶体三极管的主要参数	27
1.4 场效应管	31
1.4.1 结型场效应管	31
1.4.2 绝缘栅型场效应管	35
1.4.3 场效应管的主要参数	39
1.4.4 场效应管与晶体管的比较	40
1.5 其他常用器件	41
1.5.1 晶闸管	41
1.5.2 集成电路中的元件	49
1.6 实例电路分析： 路灯控制电路	53
1.7 MultiSIM 应用举例	53

本章小结	55
阅读材料：晶体管的六十年	57
习题	58

第 2 章 基本放大电路	62
2.1 基本共射放大电路	63
2.1.1 基本共射放大电路组成 及工作原理	63
2.1.2 基本共射放大电路的 静态工作点	64
2.2 基本共射放大电路的 分析方法	67
2.2.1 图解法	67
2.2.2 微变等效分析法	68
2.3 静态工作点的稳定	75
2.3.1 设置静态工作点的必要性	75
2.3.2 影响静态工作点的 主要因素	75
2.3.3 稳定静态工作点的电路	76
2.3.4 稳定静态工作点的 其他措施	81
2.4 三种基本接法	83
2.4.1 基本放大电路的共集接法	83
2.4.2 基本放大电路的共基接法	87
2.4.3 三种接法的比较	88
2.5 场效应管放大电路	89
2.5.1 场效应管放大电路的 三种接法	89
2.5.2 场效应管放大电路静态 工作点的设置方法及其 分析估算	90

2.5.3 场效应管放大电路的 动态分析·····	93	3.4.3 甲乙类功率放大电路 的特点·····	131
2.5.4 场效应管放大电路的特点·····	96	3.5 变压器耦合推挽式功率 放大器·····	131
2.6 多级放大电路·····	97	3.5.1 双端推挽功率放大器·····	131
2.6.1 直接耦合·····	97	3.5.2 单端推挽功率放大器·····	133
2.6.2 阻容耦合·····	98	3.5.3 变压器耦合推挽功 放器的特点·····	134
2.6.3 变压器耦合·····	99	3.6 集成功率放大器·····	135
2.6.4 多级放大电路的 动态分析·····	100	3.7 实例电路分析:“随身听” 功率接续器电路·····	136
2.7 单管放大电路的频率响应·····	101	3.8 MultiSIM 应用举例·····	137
2.7.1 频率响应概述·····	101	本章小结·····	139
2.7.2 RC 耦合放大器的 频率特性·····	103	阅读材料:音频功率放大器的 发展·····	139
2.8 实例电路分析·····	107	习题·····	141
2.8.1 声控闪光电路·····	107	第4章 集成运算放大电路·····	145
2.8.2 手提式晶体管扩音器·····	108	4.1 集成运算放大电路概述·····	146
2.9 MultiSIM 应用举例·····	109	4.1.1 集成运算放大器的特点·····	146
本章小结·····	111	4.1.2 集成运放的组成·····	146
阅读材料:功率放大器·····	113	4.2 差动放大电路·····	147
习题·····	115	4.2.1 零点漂移现象·····	147
第3章 功率放大电路·····	118	4.2.2 基本差分放大电路·····	148
3.1 功率放大电路概述·····	119	4.2.3 长尾式差分放大电路·····	151
3.1.1 功率放大电路的 一般要求·····	119	4.3 基本恒流源电路·····	155
3.1.2 低频功率放大电路 的分类·····	120	4.3.1 镜像恒流源电路·····	155
3.2 甲类功率放大电路·····	121	4.3.2 比例恒流源电路·····	157
3.3 乙类互补对称功率 放大电路·····	125	4.3.3 微电流源电路·····	158
3.4 甲乙类互补对称功率 放大器·····	128	4.3.4 多路输出恒流源电路·····	159
3.4.1 甲乙类双电源互补 对称电路·····	129	4.3.5 改进型恒流源电路·····	160
3.4.2 甲乙类单电源互补 对称电路·····	130	4.3.6 恒流源与有源负载·····	161
		4.4 集成运放的典型电路 与参数·····	161
		4.4.1 集成运放 F007 简介·····	162
		4.4.2 双极性集成运算放大器·····	163

4.4.3 COMS 集成运算放大器	164
4.4.4 集成运放的主要参数	165
4.4.5 集成运放的使用及 注意事项	167
4.5 理想运放及其特性	168
4.6 实例电路分析: 火灾报警电路	169
4.7 MultiSIM 应用举例	171
本章小结	175
阅读材料: 集成电路的发展史	176
习题	178
第 5 章 放大电路中的反馈	183
5.1 反馈的基本概念	183
5.1.1 反馈的基本概念	183
5.1.2 反馈放大电路的方框图	184
5.1.3 反馈的表达式	185
5.2 反馈的类型及其判断方法	185
5.2.1 直流反馈和交流反馈	186
5.2.2 正反馈和负反馈	186
5.3 交流负反馈的四种基本 类型	187
5.3.1 负反馈放大器的四种 组态及判断方法	187
5.3.2 由集成运放组成的四种 负反馈基本电路	189
5.3.3 负反馈放大电路的一般 表达式	196
5.4 负反馈对放大器性能的 影响	197
5.4.1 稳定放大倍数	197
5.4.2 改变输入和输出电阻	198
5.4.3 展宽频带	202
5.4.4 减小非线性失真	202
5.5 负反馈放大电路的分析 计算	203
5.5.1 利用关系式 $\dot{A}_f \approx \frac{1}{F}$ 估算 闭环电压放大倍数	203
5.5.2 利用关系式 $X_f \approx X_i$ 估算 闭环电压放大倍数	204
5.6 负反馈放大电路的稳定性	209
5.6.1 自激振荡现象	209
5.6.2 稳定工作条件及消除 自激振荡方法	210
5.7 实例电路分析: 温度报警器电路	211
5.8 MultiSIM 应用举例	212
本章小结	214
阅读材料: 电路中的反馈	214
习题	216
第 6 章 信号的运算和处理	220
6.1 信号的运算	220
6.1.1 比例运算电路	221
6.1.2 加减运算电路	223
6.1.3 微积分运算电路	226
6.1.4 模拟乘法器运算电路	228
6.2 有源滤波电路	229
6.2.1 滤波电路概述	229
6.2.2 低频滤波器	231
6.2.3 其他滤波电路	234
6.3 信号的预处理电路	239
6.3.1 仪表放大器	239
6.3.2 电荷放大器	240
6.3.3 自动增益控制器	241
6.4 实例电路分析: 电压监控报警电路	242
6.5 MultiSIM 应用举例	243
本章小结	246
阅读材料: 信号运算和处理模块 的发展历史及未来 发展趋势	247

习题	248	8.1.1 直流电源的组成	293
第 7 章 信号的发生和波形的转换	253	8.1.2 直流电源的主要 技术指标	293
7.1 正弦波振荡器	254	8.2 单向整流电路	294
7.1.1 正弦波振荡电路概述	254	8.2.1 单向半波整流电路	294
7.1.2 LC 正弦波振荡电路	256	8.2.2 单向全波整流电路	297
7.1.3 RC 正弦波振荡电路	262	8.2.3 单向桥式整流电路	298
7.1.4 石英晶体振荡器	265	8.3 滤波电路	302
7.2 电压比较器	267	8.3.1 电容滤波电路	302
7.2.1 单限比较器	267	8.3.2 电感滤波电路	304
7.2.2 滞回比较器	269	8.4 稳压电路	305
7.2.3 窗口比较器	271	8.4.1 硅稳压管稳压电路	305
7.3 非正弦波发生电路	271	8.4.2 串联型稳压电路	307
7.3.1 矩形波发生电路	272	8.4.3 集成稳压器的介绍	307
7.3.2 三角波发生电路	274	8.5 开关型稳压电路	309
7.3.3 锯齿波发生电路	276	8.5.1 开关型电源的基本原理	310
7.3.4 波形变换电路	277	8.5.2 调宽型开关电源的 电路结构	310
7.4 实例电路分析: 函数信号发生器的设计	281	8.5.3 开关型稳压电路实例	311
7.5 MultiSIM 应用举例	283	8.6 实例电路分析: 小型直流稳压电源的设计	313
本章小结	285	8.7 MultiSIM 应用举例—— 串联型晶体管稳压电路	314
阅读材料: Lab Windows/CVI 在 虚拟信号发生器设计 中的应用	286	本章小结	316
习题	287	阅读材料: 爱迪生与特斯拉的 电流大战	316
第 8 章 直流电源	292	习题	319
8.1 直流电源的组成	293		

第1章 常用半导体器件

教学提示

半导体器件是现代电子电路的重要组成部分。目前使用最广泛的半导体器件,有半导体二极管、稳压管、半导体三极管、绝缘栅场效应管等。本章介绍半导体器件的结构、工作原理、伏安特性、主要参数及简单应用。

学习目标

- 了解 PN 结及其单向导电性。
- 掌握二极管的伏安特性及其主要参数。
- 理解稳压二极管的稳压特性。
- 了解发光二极管、光电二极管、变容二极管。
- 掌握半导体三极管的伏安特性及其主要参数。
- 了解绝缘栅场效应管的伏安特性及其主要参数。

知识结构

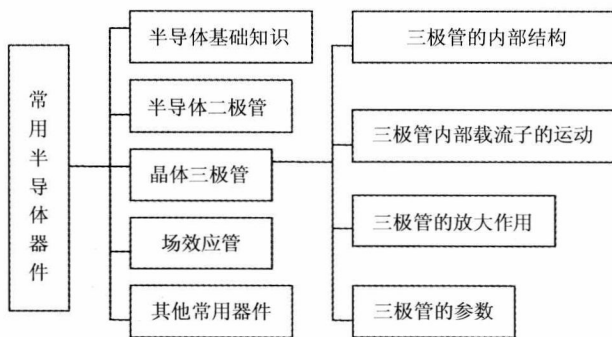


图 1-1 本章知识结构图

1.1 半导体基础知识

导体、绝缘体和半导体是根据物体导电能力(电阻率)的不同划分的。导电性能介于导体与绝缘体之间的材料,称为半导体。在电子器件中,常用的半导体材料有:元素半导体,如硅(Si)、锗(Ge)等;化合物半导体,如砷化镓(GaAs)等;以及掺杂或制成其他化合物半导体材料,如硼(B)、磷(P)、镓(In)和锑(Sb)等。其中,硅是最常用的一种半导体材料。半导体之所

以引起人们的注意并得到了广泛的应用,其主要原因在于,它的电阻率在各种因素(温度、光照、掺杂等)作用下将出现非常大的差别。

1.1.1 本征半导体

本征半导体是一种完全纯净、结构完整的半导体晶体。半导体的重要物理特性是它的电导率,电导率与材料内单位体积中所含电荷载流子的数目有关。下面就从原子结构的规律出发,分析本征半导体硅和锗材料的导电特征。

在电子器件中,用得最多的半导体材料是硅和锗,它们的简化原子模型如图 1-2 所示。硅和锗都是四价元素,在其最外层原子轨道上具有 4 个电子,称为价电子。由于原子呈中性,故在图中原子核用带圆圈的+4 符号表示。半导体与金属和许多绝缘体一样,均具有晶体结构,它们的原子在空间形成排列整齐的点阵,称为晶格。邻近原子之间由共价键联结,其晶体结构如图 1-3 所示。图中表示的是晶体的二维结构,实际上半导体晶体结构是三维的。

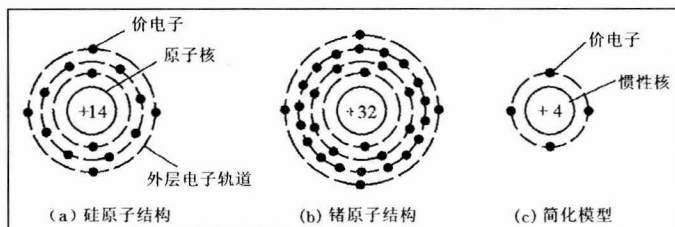


图 1-2 本征硅、锗原子结构及简化模型

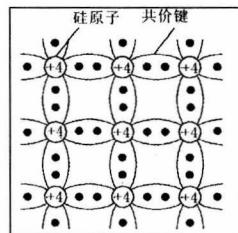


图 1-3 共价键结构

由共价键结构示意图可以看出,通常情况下,晶体结构中的价电子受共价键的束缚,不易挣脱成为自由电子,故它的导电能力较差。但这并非一成不变,它是随着温度(受热或光照)的变化而变化的。例如,在温度为 0K 条件下,本征半导体中,几乎没有价电子挣脱共价键的束缚而成为能导电的自由电子,半导体类似绝缘体难于导电。如果温度升高,价电子接受外界赋予的能量,其中部分价电子便可挣脱共价键的束缚成为自由电子,使其导电性能发生变化。实验证明:室温下,硅价电子获得 1.1eV 的能量、锗价电子获得 0.72eV 的能量即可成为自由电子,自由电子的数目随温度的升高而增加,温度越高(或光照越强),这种变化越显著。

值得注意的是,当价电子获得足够的能量挣脱共价键的束缚成为自由电子时,在价电子原有的位置上留下了相同数量的“空位”,或称之为“空穴”,如图 1-4 所示。空穴的出现使其相邻近的共价键中的价电子受到吸引,在外电场或其他能源作用下较易挣脱共价键的束缚而去填补这一空穴,从而使空穴转移到相对应的位置上去。而后,新的空穴又被其相邻的价电子所填补,在效果上这相当于空穴在做与价电子运动方向相反的运动。因而,空穴可以被看做是一种运载正电荷的粒子,称为空穴载流子。同时可看出,本征半导体中的自由电子载流子和空穴载流子是共生共灭、相依而存的,在一定条件下,它们的数目相等。当达到热运动平衡状态时,它们被称为“电子-空穴对”。本征半导体这种受激(温度或光照)而相伴产生“电子-空穴对”的现象称为“本征激发”,而自由电子补填空穴,这种与激发相反的过程叫做“复合”。由此可见,本征半导体导电机理区别于其他物质的是:自由电子和空穴两种载流子同时参与导电,其导电性能取决于电子-空穴对数目的多少和速度。温度越高,其导电

性能越强。实验表明,在室温附近,温度每升高 10°C ,本征半导体导电性能就增大 1 倍。尽管如此,本征激发出来的电子-空穴对数量有限,它距良好的导电性能要求还相差甚远,且它的热稳定性很差,故本征半导体不宜直接用来制作半导体器件。

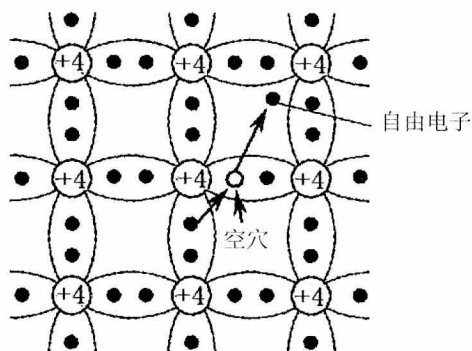


图 1-4 电子-空穴对

1.1.2 杂质半导体

杂质半导体可分为空穴(P)型半导体和电子(N)型半导体两大类。

1. N 型半导体

在纯净的硅晶体中掺入 5 价元素磷(或锑、砷),使之取代晶格中硅原子的位置,就形成了 N 型半导体。由于杂质原子的最外层有 5 个价电子,所以除了与周围硅原子形成共价键外,还多出 1 个电子。如图 1-5 所示。多出的电子不受共价键的束缚,只需获得很少的能量,就成为自由电子。在常温下,通过热激发,就可使它们成为自由电子。而杂质原子因在晶格上,且又缺少电子,故变为不能移动的正离子。N 型半导体中,自由电子的浓度大于空穴的浓度,故称自由电子为多数载流子,空穴为少数载流子,前者简称为多子,后者简称为少子。由于杂质原子可以提供电子,故称之为施主原子。N 型半导体主要靠自由电子导电,掺入的杂质越多,多子(自由电子)的浓度就越高,导电性能也就越强。

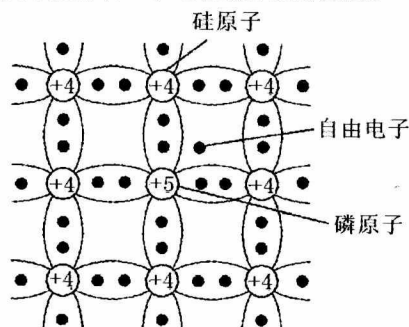


图 1-5 N 型半导体

这种杂质半导体主要依靠自由电子导电,故称为电子型半导体,也称为 N(Negative)型半导体。N 型半导体也要受热激发形成电子-空穴对。但是由于掺杂,自由电子数目增多,空穴

遇自由电子被复合的几率增大, 故掺杂半导体中空穴的浓度要远小于同温度下本征半导体空穴的浓度。

2. P 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中, 掺入微量的 3 价元素硼(或铝、镓)等, 同样可以使杂质半导体中空穴的数目增多, 且可由掺杂的多少来控制, 如图 1-6 所示。在这种杂质半导体中, 空穴是多数载流子(多子), 电子是少数载流子(少子), 主要依靠空穴导电, 故称之为空穴半导体, 也称为 P(Positive)型半导体。由以上分析可见, 不管是 N 型半导体, 还是 P 型半导体, 其主要载流子的数目可由掺杂的多少来控制。在同样温度条件下, 杂质半导体的载流子的数目要比本征半导体多很多倍, 杂质半导体导电能力较强, 掺杂是提高半导体导电性能的有效途径。需要指出的是, 在掺入 5 价杂质形成 N 型半导体之后, 再掺入更高浓度的 3 价杂质元素, 则又可形成 P 型半导体, 这在工艺上叫做“杂质补偿”, 它是制造半导体器件的基本原理。

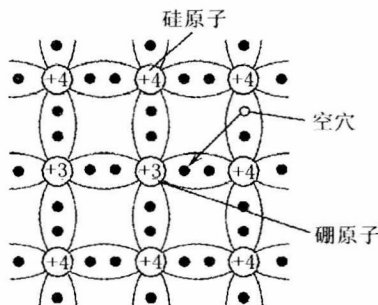


图 1-6 P 型半导体

3. 杂质对半导体导电性的影响

掺入杂质对本征半导体的导电性有很大的影响, 一些典型的数据如下。

- $T=300\text{ K}$ 室温下, 本征硅的电子和空穴浓度: $n = p = 1.4 \times 10^{10}/\text{cm}^3$;
- 掺杂后, N 型半导体中的自由电子浓度: $n = 5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$;
- 本征硅的原子浓度: $4.96 \times 10^{22}/\text{cm}^3$;
- 以上三个浓度基本上依次相差 $10^6/\text{cm}^3$ 。

1.1.3 PN 结

在一块本征硅(或锗)片上, 利用掺杂工艺使其一边形成 N 型半导体、另一边形成 P 型半导体, 则在两种不同类型半导体的交界面附近就形成了一个特殊的导电薄层, 被称为 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、三极管、可控硅、固体组件等各种类型半导体器件的基础。

P 型半导体和 N 型半导体未“接触”之前, P 型半导体中存有大量的空穴和极少数的电子; 而 N 型半导体中存有大量的自由电子和极少数的空穴。P 型半导体的空穴浓度要远远大于 N 型半导体空穴浓度, N 型半导体中的电子浓度远远大于 P 型半导体中的电子浓度, 如图 1-7(a)所示。

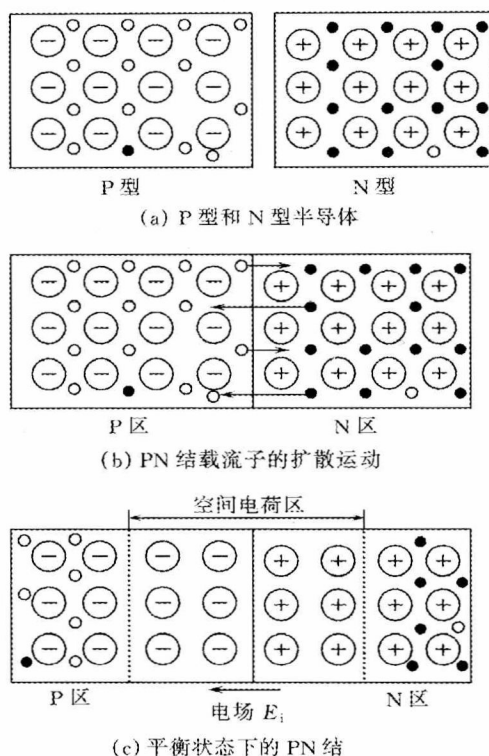


图 1-7 PN 结的形成

两种类型半导体“接触”之后，在交界面附近，由于空穴和自由电子浓度差的存在，使得 P 区的多子(空穴)和 N 区的多子(自由电子)分别向对方区域运动。这种因浓度差而引起载流子运动的现象叫扩散运动，而相应产生的电流叫扩散电流。扩散电流的方向是由 P 区指向 N 区的，与图 1-7(b)所示的空穴运动方向一致。

在扩散的过程中，自由电子与空穴相遇而复合掉，这样在交界面附近各自的区域留下了不能移动的负、正离子。其中，界面的 P 区处留下了不能移动的受主负离子，界面的 N 区处剩下的是不能移动的受主正离子，如图 1-7(c)所示。由图看出，交界面附近形成了不能移动的正、负离子组成的区域(空间电荷区)，其电荷量相等、极性相反，于是形成了由 N 区指向 P 区的内电场 E_i 。内电场的形成使载流子的运动状态发生了变化，一方面它阻碍了多子的扩散运动，另一方面又有利于界面两侧的少子运动。在内电场的作用下少子的运动叫做漂移运动，相应产生的电流称为漂移电流。漂移运动与扩散运动的方向恰好相反。

P 型半导体和 N 型半导体开始接触时，扩散运动占有优势，随着扩散运动的进行，空间电荷区不断扩大，内电场建立并不断增强，反过来又阻碍了多子的扩散，并促使少子作漂移运动，漂移运动又使空间电荷区减弱，反过来又阻碍了少子漂移、促进多子扩散，当多子的扩散运动与少子的漂移运动达到动态平衡时，空间电荷区域便相对稳定下来。这种动态平衡下的空间电荷区，叫做 PN 结。

应该指出，空间电荷区域内只是没有移动的电荷，但该区区内还存在着不能移动的正、负离子，只不过是载流子被消耗尽了。所以，空间电荷区又称之为耗尽层。由于内电场的形成

使得N区的电势高于P区的电势,对多子的扩散起阻碍作用,如同势垒一样,故空间电荷区又称之为阻挡层或势垒区。PN结很薄,一般约为 $0.5\mu\text{m}$ 左右。

1.1.4 PN结的单向导电性

PN结的主要特性是,在外部电源的作用下所反映出来的单向导电特性。

1. PN结外加正向电压呈现导通状态

给PN结外加正向电压,即P区接电源正极、N区接电源负极,如图1-8(a)所示。这种连接方法也叫正向偏置,简称为“正偏”,所加电压为正偏电压,用 U_F 表示。在正偏条件下,从PN结的内部看,外电场 E_F 与PN结内电场 E_i 的方向相反,有利于多子的扩散运动,而不利少子的漂移运动,运动的结果使空间电荷区变窄、内电场被减弱、动态平衡被破坏,从而更加速了多子的扩散。从PN结的外部来看,多子的扩散电流在回路中形成正向电流 I_F ,并由电源不断提供正、负电荷,使 I_F 得以持续,这时的PN结呈现出导通状态。PN结在正偏条件下可认为处在导通状态,其内电阻很小,且正向电流 I_F 在一定范围内随正偏电压的增大而增大。

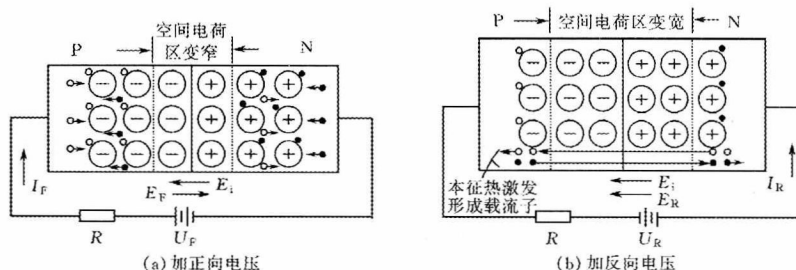


图 1-8 PN 结的单向导电性

进一步分析,电子和空穴带等量异号电荷,且空穴扩散电流 I_{FP} 和电子扩散电流 I_{FN} 的方向相同,都是由P区指向N区,所以总的扩散电流 I_F 应为这两者之和,即

$$I_F = I_{FP} + I_{FN} \quad (1-1)$$

2. PN结外加反向电压呈现的截止现象

给PN结外加反向电压,即P区接电源负极、N区接电源正极,如图1-8(b)所示。这种情况称为PN结的反向偏置(反偏), U_R 称为反偏电压。在反偏条件下,外电场 E_R 的方向与内电场的方向相同,有利于少子的漂移而不利多子的扩散运动,结果使空间电荷区变宽、内电场加强,从而加速了少子的运动。由于少子的数量有限,故少子的漂移运动在回路中形成很小的反向电流 I_R ,这时可以认为PN结的内阻非常大,在反偏条件下PN结可视为截止状态。应该指出,空穴漂移形成的电流 I_{RF} 和电子漂移电流 I_{RN} 的方向一致,都是由N区指向P区,所以总的漂移电流应为这两者之和,即

$$I_R = I_{RF} + I_{RN} \quad (1-2)$$

反向电流具有以下特点。

(1) 在一定温度条件下,少子数量有限,故反向电流 I_R 很小,即使外加电场足够强,使

全部少子作漂移运动, I_R 也有限, 故 I_R 几乎不随外加电压的增大而变化, 因而常称此状态下的反向电流为反向饱和电流, 用 $I_R(\text{sat})$ 来表示。

(2) 反向电流是由少子漂移运动形成的, $U_{O(AV)}$ 的大小与少子的数量多少有关, 温度越高, 本征激发的载流子数目越多, 形成的反向电流越大。反向电流是温度的函数, 它将随温度的升高而变大, 故应用时必须考虑温度对 I_R 的影响。

综上所述, PN 结在正偏电压作用下, 结电阻很小, 形成的正向电流很大, 呈现出导通状态; 而在反偏电压作用下, 结电阻很大, 形成的反向电流却很小, 呈现出截止状态。PN 结的这一性质称为单向导电特性。

3. PN 结的反向击穿

当 PN 结的反向电压增加到一定数值时, 反向电流突然快速增加, 此现象称为 PN 结的反向击穿。反向击穿分为电击穿和热击穿。电击穿包括雪崩击穿和齐纳击穿; PN 结热击穿后电流很大, 电压又很高, 消耗在结上的功率很大, 容易使 PN 结发热, 把 PN 结烧毁。

注意: 热击穿——不可逆; 电击穿——可逆。

当 PN 结反向电压增加时, 空间电荷区中的电场随着增强。这样, 通过空间电荷区的电子和空穴, 就会将在电场作用下获得的能量增大, 在晶体中运动的电子和空穴将不断地与晶体原子又发生碰撞, 当电子和空穴的能量足够大时, 通过这样的碰撞可使共价键中的电子激发形成自由电子-空穴对。新产生的电子和空穴也向相反的方向运动, 重新获得能量, 又可通过碰撞, 再产生电子-空穴对, 这就是载流子的倍增效应。当反向电压增大到某一数值后, 载流子的倍增情况就像在陡峻的积雪山坡上发生雪崩一样, 载流子增加得多而快, 这样, 反向电流剧增, PN 结就发生雪崩击穿。

在加有较高的反向电压下, PN 结空间电荷区中存在一个强电场, 它能够破坏共价键, 将束缚电子分离出来造成电子-空穴对, 形成较大的反向电流。发生齐纳击穿需要的电场强度约为 $2 \times 10^5 \text{V/cm}$, 这只有在杂质浓度特别大的 PN 结中才能达到, 因为杂质浓度大, 空间电荷区内电荷密度(即杂质离子)也大, 因而空间电荷区很窄, 电场强度可能很高。

电击穿可被利用(如稳压管), 而热击穿须尽量避免。

1.1.5 PN 结的电容效应

由以上分析可知, PN 结内电荷的存储与外加电压有关, 且存储量是随电压变化而变化的, 这表明 PN 结具有电容的性质。

1. 势垒电容 C_T

PN 结的内部有不能移动的正、负离子, 相当于存储了空间电荷; 结内缺少载流子, 导电率很低, 相当于介质; 结两侧的 N 区和 P 区相对来说, 导电率很高, 相当于金属板。从结构上来看, PN 结相当于一个电容器。例如: PN 结外加反偏电压时, PN 结变宽, 空间电荷量增多, 相当于电容充电; 而 PN 结加正偏电压时, 结的宽度变窄, 空间电荷量减少, 相当于放电。PN 结的这种电容效应, 称之为势垒电容, 用 C_T 表示。

势垒电容 C_T 与普通电容器相比, 不同之处就在于其容量是随外加电压的变化而变化,

是非线性的。在电子设备中,经常把反向偏置的 PN 结作为压控可变电容器使用。

2. 扩散电容 C_D

扩散电容的形成与势垒电容不同,它是在多数载流子扩散的过程中,由电荷积累而成。PN 结在正偏时, N 区的电子向 P 区扩散,在 P 区内形成一定的电子浓度分布,靠近 PN 结一侧电子浓度大,远离 PN 结一侧的电子浓度逐渐变小,于是, P 区积累了电子。同样道理, N 区积累了空穴。当外加正偏电压增大时,扩散运动加强,使 P 区内电子、N 区内空穴积累增多,这相当于电容器充电;而正偏电压减小时,情况则相反,相当于电容器放电。这一充、放电效应,是由于载流子在扩散运动中电荷的积累引起的,故称之为扩散电容,用 C_D 来表示。 C_D 也是非线性电容。

PN 结的上述两种效应称为结电容效应,用 C_j 表示之,且有 $C_j = C_T + C_D$ 。 C_T 和 C_D 一般很小,约为几百皮法(pF)。

根据 P 区和 N 区两边掺杂的浓度是否相同,PN 结可分为对称结和不对称结。前面讨论的 PN 结均属于对称结,它的 P 区和 N 区的杂质浓度是相等的,故交界面两侧空间电荷区的宽度相等。实际使用的 PN 结往往都是两区杂质浓度相差很大的不对称结。例如: P 区杂质浓度大于 N 区杂质的浓度,记为 P^+N 结;反之,则记为 N^+P 结,如图 1-9 所示。

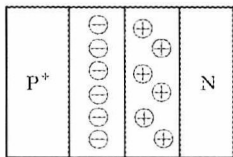


图 1-9 不对称 P^+N 结

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构

晶体二极管是由一个 PN 结加上接触电极、引出线和管壳封装而成的元件。二极管的结构示意图和它在电路中的符号如图 1-10 所示。其中,三角形表示 P 区,与 P 区相连的电极为“+”极,也称二极管的阳极;而短线表示 N 区,与 N 区相连的电极为“-”极,也称阴极。图中阳极与三角形构成的箭头指向为,PN 结正向偏置时所形成正向电流的方向。

二极管的类型有很多种。按材料分,最常用的有硅管和锗管两种;按结构工艺分,有点接触型、面结合型和平面型。点接触型二极管适用于工作电流小、频率较高的场合;面结合型适用于工作电流大、频率较低的场合;而平面型适合于工作电流大、频率低、功率大的场合。按用途分,有普通二极管、整流二极管、检波二极管、稳压二极管、开关二极管、变容二极管、发光二极管和光电二极管等。

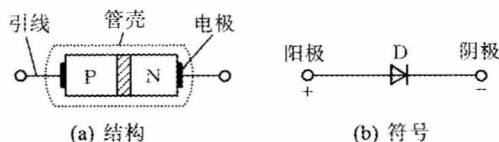


图 1-10 二极管结构及符号

1.2.2 伏安特性

二极管的伏安特性是指流过二极管的电流 i_D 与加在二极管两端的电压 u_D 之间的关系或曲线。伏安特性曲线可用实验的方法逐点测绘得出,也可用晶体管特性图示仪在荧光屏上观察出来。图 1-11 所示的是某硅二极管的伏安特性曲线示意图。

1. 正向特性

由图 1-11 可以看出,当给二极管两端加正向电压时,就会产生正向电流。当正向电压较小时,外电场还不足以克服 PN 结内电场对载流子扩散运动造成的阻力,故正向电流很小(几乎为零),二极管呈现出较大的电阻,如图中 OA 段所示,通常称这个区域为死区。当正向电压上升到一定值 U_{th} 以后,内电场逐渐减弱,正向电流才明显增加,体现出内电阻迅速减小,二极管处于导通状态。

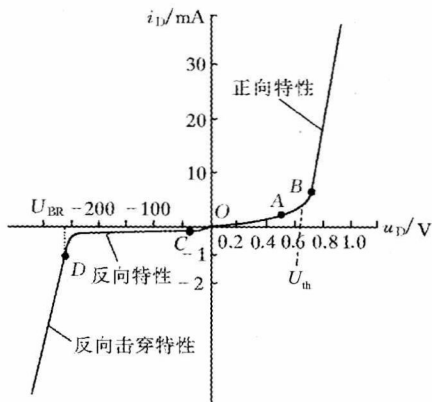


图 1-11 二极管的伏安特性

实际应用中,常把正向特性较直部分的反向延长线与横轴的交点的电压值定为 U_{th} 值,如图 1-11 虚线与 U_D 轴的交点。 U_{th} 值被称为二极管的门限电压或阈电压, U_{th} 值大小与二极管的材料和温度有关。常温下

$$U_{th} = \begin{cases} 0.5V (\text{硅管}) \\ 0.1V (\text{锗管}) \end{cases} \quad (1-3)$$

当正向电压增加,大于门限电压 U_{th} ,如图 1-11 中 B 点以上的部分,正向电流随着正向电压 U_F 增加几乎是线性增长的,此时的 U_F 被称为二极管的导通电压。通常

$$U_F = \begin{cases} 0.6 \sim 0.8V (\text{硅管}) \\ 0.1 \sim 0.3V (\text{锗管}) \end{cases} \quad (1-4)$$