



21世纪 高等学校本科电子电气专业系列实用教材

模拟电子技术教程

余辉晴 主编
吴雪芬 王其红 副主编

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

21 世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

模拟电子技术教程

余辉晴 主编

吴雪芬 王其红 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从模拟电子技术的应用角度出发,系统地介绍半导体器件、基本放大电路、多级放大电路、集成运算放大电路、集成运算放大器的应用、负反馈放大电路、信号产生电路、功率放大电路和直流稳压电路等内容。

本书可作为高等院校“模拟电路”课程(60~80学时)的教材,适用于电子科学与技术、电子信息工程、电气工程与自动化、计算机科学与技术等电子信息类各专业,也可供其他相关专业选用和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术教程/余辉晴主编. —北京:电子工业出版社,2006.6

(21世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材)

ISBN 7-121-02602-3

I. 模… II. 余… III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 043927 号

责任编辑:张 剑

印 刷:北京市通州大中印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:371 千字

印 次:2006 年 6 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:19.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

编委会名单

主任委员：过 军

副主任委员：张建生 堵 俊 范剑波 吴晓渊 邬正义
潘 毅 华容茂

委 员：(以姓氏笔画为序)

万国庆 王其红 冯泽民 史建平 左全生
何一鸣 余辉晴 吴志祥 吴建国 吴 晓
吴雪芬 张立臣 杨 奕 羌予践 肖闽进
陆国平 陈丽兰 荣大龙 徐 维 蒋渭忠
鲍吉龙

序 言

随着世界经济一体化的进程,我国已成为世界最大的加工基地和制造基地,尤其是长江三角洲地区更为突出,已有近百家名列世界五百强的企业落户该地区,带动了该地区经济突飞猛进的发展,同时也为就业创造了广阔的前景。企事业单位对应用型本科人才的需求多了,但要求也提高了。这就对工程教育的发展提出了新的挑战,同时也提供了新的发展机遇。

在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养应用型本科人才为宗旨的高等院校,同时举办了多次“应用型本科人才培养模式研讨会”,对应用型本科教育的办学思想和发展定位进行初步探讨。并于2002年在全国高等院校教学研究中心立项,成立了21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践课题组,有十几所应用型本科院校参加了课题组的研究,取得了多项研究成果,并于2004年结题验收。我们就是在这种形势下,组织了多所应用型本科院校编写本系列教材,以适应国家对工程教育的新要求,满足培养素质高、能力强的应用型本科人才的需要。

工程强调知识的应用和综合,强调方案优缺点的比较并做出论证和合理应用。这就要求我们对应用型本科人才的培养需实施与之相配套的培养方案和培养模式,采用具有自身特点的教材。同时,避免重理论、轻实践、工程教育“学术化”的倾向;避免在工程实践能力的培养中,轻视学生个性及创新精神的培养;避免工程教育在实践中与社会经济、产业的发展脱节。为使我国应用型人才适应社会发展的新形势,我们必须开拓进取、努力改革。

组织编写本系列教材,有利于应用型人才所需要的、富有特色的本科教材的建设。本系列教材的编写原则如下。

1. 确保基础

在内容安排上,本系列教材确保学生掌握基本的理论基础,满足本科教学的基本要求。

2. 富有特色

围绕培养目标,以工程应用为背景,通过理论与实践相结合,构建应用型本科教育系列教材特色。在融会贯通本科教学内容的基础上,挑选最基本的内容、方法和典型应用,将有关技术进步的新成果、新应用纳入教学内容,妥善处理传统内容的继承与现代内容的引进;在保持本科教学基本体系的前提下,处理好与交叉学科的关系,并按新的教学系统重新组织;在注重理论与实践相结合的基础上,注入工程概念,包括质量、环境等诸多因素对工程的影响,突出特色、强化应用。

3. 精选编者,保证质量

参编院校根据编委会要求推荐了一批具有丰富工程实践经验和教学经验的教师参加编写工作。本系列教材的许多内容都是在优秀教案、讲义的基础上编写的,并由主编全文统稿,以确保教材质量。

本系列教材的编写得到了电子工业出版社的大力支持。他们为编好这套教材做了大量认真细致的工作,为教材的出版提供了许多有利条件,在此深表感谢!

编 委 会

前 言

电子技术是高等学校电子信息类专业的一门重要专业基础课,是学习其他相关课程的基础,模拟电路是电子技术的重要组成部分。为了适应电子技术的发展和应用型本科教学要求,2005年4月,电子工业出版社在江苏省常州市召开了电子信息类专业教材编写工作会议,长江三角洲地区部分高校相关院系的负责人出席了会议。与会人员认真讨论了模拟电路教材编写要求,确定了教材在内容安排上要符合学科特点,体现学科特色,突出应用特色,能适应应用型本科教学的需要。

本书在内容安排上特别考虑了以下几点:

- (1) 将二极管、三极管、场效应管集中起来单独设一章;
- (2) 将集成电路的应用部分单独组成一章,增加了集成电路在书中的比重;
- (3) 将频率响应的内容分放在基本放大电路和多级放大电路中,重点加强频率失真和频率响应的概念,减少一些分析计算。

在教材编写过程中,我们注意精选内容,突出重点,加强了基本概念、基本原理、基本分析方法的论述,本教材有如下特点:

- (1) 为了便于教学,编写时强调从物理概念上把问题讲清楚;
- (2) 以分立元件电路为基础,以集成电路为重点;
- (3) 把基本概念、基本原理和基本分析方法讲深讲透。

本教材是按60~80学时数编写的,根据教学需要可增删部分章节。模拟电路是在学完电路和高等数学后开设的一门专业基础课程,具有很强的实践性,为了加深对理论知识的理解,还必须开设一定的实验课,作为必要的补充。

本书由余辉晴担任主编,由吴雪芬、王其红担任副主编。第1~3章由吴雪芬编写,第4~5章由王其红编写,第6章由薛苏云编写,第7~9章由余辉晴编写,徐达文也参加了部分内容的编写工作。全书由余辉晴统稿。华容茂教授审阅了全部书稿并提出了宝贵的修改意见。在本书的编写过程中,得到了宁波工程学院和常州工学院领导与老师的大力支持和帮助,同时参考了大量有关教材和资料,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体及杂质半导体	1
1.1.2 PN 结	3
1.2 半导体二极管	5
1.2.1 二极管的结构	5
1.2.2 二极管的伏安特性	6
1.2.3 二极管的参数	9
1.3 半导体三极管	9
1.3.1 三极管的结构	10
1.3.2 三极管的工作原理	10
1.3.3 三极管的特性曲线	13
1.3.4 三极管的主要参数	14
1.4 场效应管	17
1.4.1 结型场效应管的结构和工作原理	17
1.4.2 结型场效应管的特性曲线和参数	18
1.4.3 增强型绝缘栅场效应管的结构和工作原理	20
1.4.4 增强型绝缘栅场效应管的特性曲线和参数	21
1.4.5 耗尽型绝缘栅场效应管的工作特点	23
本章小结	24
习题	25
第 2 章 基本放大电路	29
2.1 共发射极放大电路	29
2.1.1 电路组成和工作原理	29
2.1.2 工作点稳定的共发射极放大电路	31
2.2 放大电路的图解分析法	33
2.2.1 放大电路的静态图解分析	33
2.2.2 放大电路的动态图解分析	34
2.3 放大电路的微变等效电路分析法	38
2.3.1 三极管的微变等效电路	39
2.3.2 放大电路的微变等效电路	41
2.3.3 用微变等效电路法分析放大电路	41
2.4 共集电路和共基电路	44
2.4.1 共集电极电路	44
2.4.2 共基极电路	47

2.5 场效应管放大电路	48
2.5.1 场效应管静态工作点分析	49
2.5.2 场效应管放大器的微变等效电路分析法	50
2.5.3 三种基本放大电路性能比较	54
2.6 放大电路的频率响应	54
2.6.1 RC 电路的频率响应	55
2.6.2 放大电路的低频响应	58
2.6.3 放大电路的高频响应	59
本章小结	65
习题	65
第3章 多级放大电路	75
3.1 多级放大电路的级间耦合方式	75
3.2 多级放大电路的分析方法	78
3.3 多级放大电路的频率特性	81
3.3.1 多级放大电路的低频特性	81
3.3.2 多级放大电路的高频特性	82
本章小结	83
习题	83
第4章 集成运算放大电路	88
4.1 直接耦合放大器	88
4.1.1 直接耦合放大器的特点	88
4.1.2 零点漂移	90
4.2 差动放大电路	91
4.2.1 基本差动放大电路	91
4.2.2 长尾式差动放大电路	94
4.2.3 恒流源式差动放大电路	99
4.2.4 差动放大电路传输特性	100
4.3 集成运算放大器	102
4.3.1 集成电路概述	102
4.3.2 通用型集成运算放大器简介	108
本章小结	110
习题	110
第5章 集成运算放大器的应用	112
5.1 基本运算电路	112
5.1.1 比例运算电路	113
5.1.2 求和运算电路	115
5.1.3 积分与微分电路	118
5.1.4 对数运算电路	120
5.2 有源滤波电路	121
5.2.1 低通滤波电路	122

5.2.2 高通滤波电路	123
5.2.3 带通和带阻滤波电路	125
5.3 电压比较器	126
5.3.1 过零比较器	126
5.3.2 电压比较器	127
5.3.3 施密特触发器	127
本章小结	130
习题	130
第6章 负反馈放大电路	135
6.1 反馈的基本概念与分类	135
6.1.1 反馈的基本概念	135
6.1.2 反馈的分类	136
6.2 负反馈放大器的框图及一般表达式	141
6.2.1 负反馈放大器的框图	141
6.2.2 负反馈放大器的一般表达式	141
6.3 负反馈对放大器性能的影响	142
6.3.1 负反馈对放大倍数的影响	142
6.3.2 负反馈对通频带和失真的影响	144
6.3.3 负反馈对噪声的影响	147
6.3.4 负反馈对输入、输出电阻的影响	148
6.4 负反馈放大器的4种组态	152
6.4.1 电压串联负反馈	152
6.4.2 电压并联负反馈	153
6.4.3 电流串联负反馈	154
6.4.4 电流并联负反馈	155
6.5 深度负反馈对放大电路的近似计算	159
6.5.1 利用关系式 $A_f \approx \frac{1}{F}$ 估算闭环电压放大倍数	159
6.5.2 利用关系式 $\dot{X}_f \approx \dot{X}_i$ 估算闭环电压放大倍数	160
6.6 负反馈放大器的自激振荡及消除方法	163
6.6.1 产生自激振荡的原因及条件	163
6.6.2 消除自激振荡的方法	165
本章小结	167
习题	168
第7章 信号产生电路	173
7.1 正弦波振荡电路	173
7.1.1 正弦波振荡产生的条件	173
7.1.2 RC正弦波振荡器	174
7.1.3 LC正弦波振荡器	175
7.1.4 石英晶体正弦波振荡器	178

7.2 非正弦波产生电路	180
7.2.1 矩形波产生电路	180
7.2.2 三角波产生电路	182
7.2.3 锯齿波产生电路	183
本章小结	184
习题	185
第8章 功率放大电路	187
8.1 功率放大电路的特点	187
8.2 甲类功率放大器	188
8.2.1 甲类功率放大电路组成	188
8.2.2 甲类功率放大电路分析	189
8.2.3 甲类功率放大电路功率和效率计算	190
8.3 乙类互补对称功率放大电路	190
8.3.1 乙类互补功率放大电路组成	191
8.3.2 乙类互补功率放大电路工作原理	191
8.3.3 乙类互补功率放大电路分析计算	191
8.4 甲乙类互补对称功率放大电路	195
8.4.1 甲乙类双电源互补对称功率放大电路	195
8.4.2 甲乙类单电源互补对称功率放大电路	197
8.4.3 具有自举功能的乙类功率放大电路	198
本章小结	198
习题	199
第9章 直流稳压电路	200
9.1 整流电路	200
9.1.1 半波整流电路	200
9.1.2 单相全波整流电路	202
9.1.3 单相桥式整流电路	203
9.2 滤波电路	205
9.2.1 电容滤波电路	205
9.2.2 其他滤波电路	207
9.3 稳压电路	208
9.3.1 稳压管	208
9.3.2 并联型稳压电路	208
9.3.3 串联型稳压电路	210
本章小结	212
习题	212
参考文献	215
部分习题答案	217

第 1 章 半导体器件

半导体器件是近代电子学的重要组成部分,它是构成电子电路的基本元件。本章首先介绍半导体的特性,阐明 PN 结的单向导电性,然后介绍半导体二极管、三极管及场效应管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体基础知识

按导电性能的不同,自然界的物质可分为导体、绝缘体和半导体。目前用来制造电子器件的材料主要是半导体,其导电能力介于导体和绝缘体之间,常用的半导体有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。

1.1.1 本征半导体及杂质半导体

1. 本征半导体的结构

本征半导体就是完全纯净(不含任何杂质)且具有完整晶体结构的半导体。硅和锗是四价元素,在原子最外层轨道上的 4 个电子称为价电子,它们分别与周围的 4 个原子的价电子形成共价键,共价键中的价电子为这些原子所共有,并为它们所束缚,在空间形成排列有序的晶体。简化的原子结构模型如图 1-1 所示。共价键的结构示意图如图 1-2

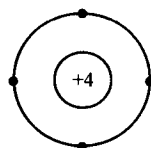


图 1-1 简化的原子结构模型

2. 电子空穴对

由于晶体中共价键结合力很强,当半导体处于 0 K 温度(相当于 -273°C)时,价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚,晶体中没有自由电子,半导体不能导电,如同绝缘体一样。当温度升高或受到光照时,价电子能量增高,有的价电子可以挣脱原子核的束缚,而成为自由电子,在其原来的共价键中就出现了空位,原子的电中性被破坏,呈现出正电性,其正电量与自由电子的负电量相等,人们常称呈现正电性的这个空位为空穴,这一现象称为本征激发(也称热激发),如图 1-3 所示。本征半导体中因热激发而出现两种载流子,即自由电子和空穴。它们是成对出现的,故称为电子空穴对。受热激发而生成的自由电子,可以在晶格间运动,当电子和空穴在运动过程中相遇时,电子填入空位成为价电子,同时释放出相应的能量,从而消失一对电子、空穴,这一过程称为复合。本征激发和复合在一定温度下最终会达到动态平衡,使本征半导体中载流子的浓度一定,而整个半导体仍呈现为中性。理论分析表明,本征载流子的浓度为

$$n_i = p_i = K_1 T^{3/2} e^{-E_{G0}/2kT} \quad (1-1)$$

式中, n_i , p_i 分别为自由电子和空穴的浓度(cm^{-3}); T 为热力学温度(K); E_{G0} 为 $T=0\text{ K}$ 时的禁带宽度(硅为 1.2 eV , 锗为 0.78 eV); k 为玻耳兹曼常数($8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$); K_1 是与半导体

材料有关的常量(硅为 $3.87 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$, 锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$)。总之,本征半导体的导电性能很差,且与环境温度有关。温度升高,载流子浓度增加,导电性能较好,利用半导体材料对温度的敏感性,可以制作热敏器件,但也造成半导体器件温度稳定性差。

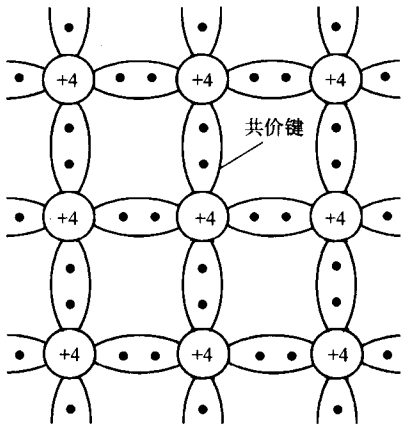


图 1-2 本征半导体共价键晶体结构示意图

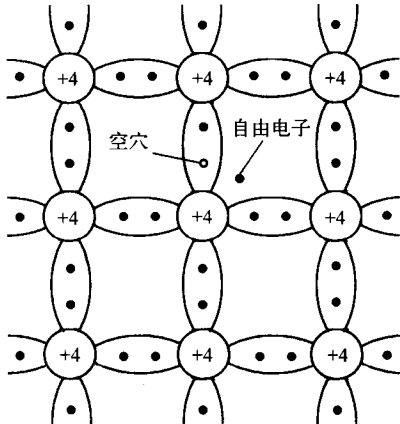


图 1-3 本征激发产生自由电子和空穴

3. 杂质半导体

在本征半导体中有选择地掺入某些微量元素作为杂质,可使半导体的导电性能发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素,掺入杂质的半导体称为杂质半导体,根据掺入的杂质不同,分为 N 型半导体和 P 型半导体两种。

1) N 型半导体 在本征半导体中掺入少量五价元素,如磷、砷、锑等,则可形成 N 型半导体,也称电子型半导体。

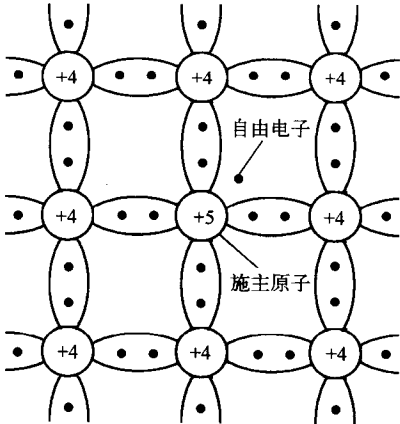


图 1-4 N 型半导体的结构示意图

因五价杂质原子中只有 4 个价电子能与周围 4 个半导体原子中的价电子形成共价键,而多余的 1 个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子,于是半导体中自由电子的数量急剧增加,使得自由电子的数目远远多于空穴的数目。因此,在 N 型半导体中自由电子是多数载流子,空穴是少数载流子,主要依靠电子导电,所以称为电子型半导体。

提供自由电子的五价杂质原子因带正电荷而成为正离子,因此五价杂质原子也称为施主原子。N 型半导体的结构示意图如图 1-4 所示。

2) P 型半导体 在本征半导体中掺入少量三价元素,如硼、镓、铟等,则可形成了 P 型半导体,也称为空穴型半导体。

因三价杂质原子在与相邻 4 个硅原子组成共价键时,缺少 1 个价电子而在共价键中留下 1 个空穴。在这种杂质半导体中,空穴的浓度比电子的浓度高得多,是多数载流子,电子是少数载流子,它主要依靠空穴导电,所以称为空穴型半导体或 P 型半导体。多数载流子空穴主要由掺杂形成,而少数载流子电子由热激发形成。空穴很容易俘获电子,使杂质原子成为负离

子,三价杂质因而也称为受主杂质。P 型半导体的结构示意图如图 1-5 所示。

由以上分析可知,本征半导体通过掺杂,可以大大改变半导体内载流子的浓度,并使一种载流子增多,而另一种载流子减少。对于多数载流子,其浓度可通过掺杂浓度可严格控制,而温度变化对其影响很小;对于少数载流子,主要由本征激发决定,当温度变化时,少数载流子浓度有明显变化。因此杂质半导体中,多数载流子的浓度主要取决于掺入的杂质浓度;而少数载流子的浓度主要取决于温度。对于杂质半导体来说,无论 N 型半导体还是 P 型半导体,从总体上看,仍然保持着电中性。

杂质半导体的应用非常广泛,实用的半导体器件都是由杂质半导体构成的。杂质半导体的导电能力与本征半导体的导电能力相比大大提高了,它们的导电性能取决于掺杂浓度,如在四价硅中掺入百万分之一的杂质硼后,导电能力将提高几十万倍。当然,提高导电能力不是最终目的,杂质半导体之所以具有很大的用途是因为掺入不同性质、不同浓度的杂质,并使 P 型半导体和 N 型半导体采用不同的方式组合,就可以制造出品种繁多、用途各异的半导体器件。

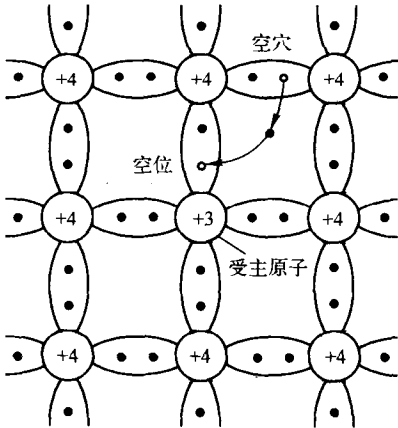


图 1-5 P 型半导体的结构示意图

1.1.2 PN 结

将一块 P 型半导体与一块 N 型半导体通过特殊的工艺结合在一起时,在它们的交界面处就会形成一个很薄的特殊物理层,称其为 PN 结。PN 结具有单一型半导体所没有的特性,利用该特性可以制造出各种半导体器件。下面来介绍 PN 结的特性。

1. PN 结的形成

PN 结形成的过程包含两种运动。当 P 型半导体和 N 型半导体有机地结合在一起时,将在结合面上形成如下物理过程:由于交界处两侧载流子存在浓度差,导致 P 型区的多子(多数载流子)——空穴,向 N 型区扩散,N 型区的多子——电子,向 P 型区扩散,这种因浓度差而产生的定向运动称为多数载流子的扩散运动,简化表示如图 1-6 所示。

这样在 P 区和 N 区分别留下了不能移动的受主负离子和施主正离子,结果在交界面的两侧形成了由等量正、负离子组成的空间电荷区,也称为 PN 结,如图 1-7 所示。空间电荷区将存在一个内电场,其方向由 N 区指向 P 区。因此内电场能阻止 P 区的空穴向 N 区扩散和 N 区的电子向 P 区扩散,即阻止多数载流子的扩散运动。同时,内电场将推动 P 区的自由电子流向 N 区和 N 区的空穴流向 P 区。少数载流子在内电场作用下产生的这种运动称为少数载流子的漂移运动。

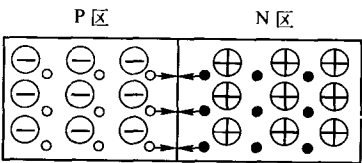


图 1-6 多数载流子的扩散运动

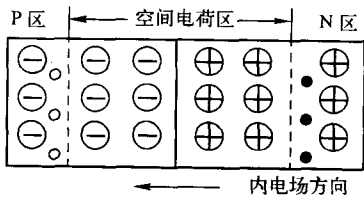


图 1-7 PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体开始结合在一起时,扩散运动占优势,随着扩散运动的不断进行,交界面两侧显露出的正、负离子逐渐增多,空间电荷区展宽,使内电场不断增强,于是漂移运动随之增强,而扩散运动相对减弱,最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡。这时,虽然扩散和漂移仍在不断进行,但通过界面的净载流子数为零。平衡时,空间电荷区的宽度一定。在空间电荷区,由于缺少多子,所以也称耗尽层,又因为空间电荷区的内电场对扩散有阻挡作用,好像壁垒一样,所以又称它为阻挡区或势垒区。

2. PN 结的单向导电特性

PN 结的单向导电性是指 PN 结在正向电压作用下导通,在反向电压作用下截止。

当 PN 结上外加正向电压时,即 P 型半导体接高电位, N 型半导体接低电位,此时 PN 结呈低阻性,流过 PN 结的电流较大,处在这种连接方式下的 PN 结称为正向偏置,简称正偏。

当 PN 结上外加反向电压时,即 P 型半导体接低电位, N 型半导体接高电位,此时 PN 结呈高阻性,流过 PN 结的电流很小,处在这种连接方式下的 PN 结称为反向偏置,简称反偏。

1) PN 结外加正向电压 PN 结外加正向电压或正向偏置的导电情况如图 1-8(a)所示。此时外加电压形成的外电场与内电场方向相反,削弱了内电场,使阻挡层变窄。显然,扩散作用大于漂移作用,在电源作用下,多数载流子向对方区域扩散形成正向电流,其方向由电源正极通过 P 区、N 区到达电源负极。此时,PN 结处于导通状态,它所呈现出的电阻为正向电阻,其阻值很小。正向电压愈大,正向电流愈大。

2) PN 结外加反向电压 PN 结外加反向电压的情况如图 1-8(b)所示。外加的反向电压有一部分降落在 PN 结上,方向与 PN 结内电场方向相同,加强了内电场。内电场的加强阻碍了多数载流子扩散运动,而对少数载流子的漂移运动却有利,少数载流子的漂移运动所形成的电流称为 PN 结的反向电流。由于少数载流子的数目有限,在一定范围内,反向电流极微小,所以反向偏置时的 PN 结呈高阻性。在一定的温度条件下,由本征激发决定的少数子浓度是一定的,故少数子形成的漂移电流是恒定的,基本上与所加反向电压的大小无关,这个电流也称为反向饱和电流。

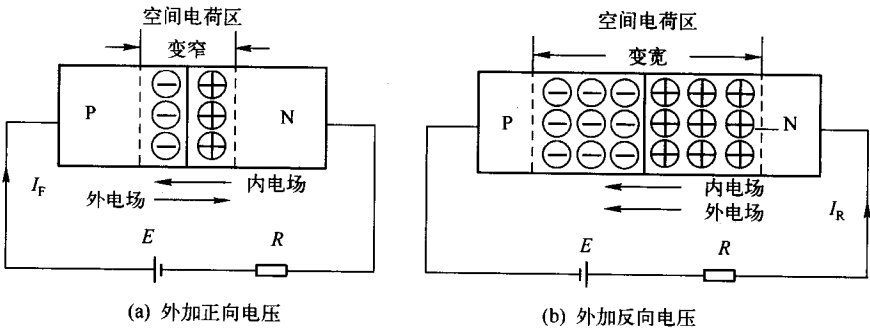


图 1-8 PN 结单向导电特性

总之,PN 结外加正向电压时,正向电阻减小,正向电流较大,处于导通状态;PN 结外加反向电压时,反向电阻很大,反向电流很小,处于截止状态。PN 结的这种特性称为单向导电性,它是 PN 结最重要的特性。

3. PN 结的电容效应

PN 结具有一定的电容效应,称为结电容(C_J),数值较小,在中低频时可视为开路,但在高频下它的影响不可忽视,它可造成反向漏电,破坏单向导电性。

结电容由两种电容组成,一是势垒电容 C_B ,二是扩散电容 C_D , $C_J = C_B + C_D$ 。

1) 势垒电容 C_B 势垒电容是由空间电荷区的离子薄层形成的。当外加电压使 PN 结上压降发生变化时,离子薄层的厚度也相应地随之改变,这时 PN 结中存储的电荷量也随之变化。PN 结变薄时存储的电荷量减少,PN 结变厚时存储的电荷量增加,这种现象与电容的充放电类似。空间电荷区厚薄变化所等效的电容称为势垒电容 C_B ,其数值约为几皮法至一二百皮法。

2) 扩散电容 C_D 扩散电容是由多子作扩散运动时的积累所造成的电容效应。正偏时,由 P 区扩散到 N 区的空穴(多子)不可能同时与电子全部复合,还未来得及复合的空穴与 P 区中的少子(电子)、N 区中的部分多子(电子)分别组成点电容,所有点电容的集合称为扩散电容。 C_D 的数值约为十几皮法至数千皮法。

PN 结正偏时,主要是扩散运动,所以结电容主要由 C_D 决定;而反偏时,阻挡层变厚,结电容主要由 C_B 决定。

1.2 半导体二极管

半导体二极管的用途非常广泛,根据用途可分为整流管、检波管和开关管等,它们的工作原理基本上是相同的,都是基于 PN 结的单向导电性。

1.2.1 二极管的结构

由一个 PN 结上加上电极引线和管壳封装,就构成一个半导体二极管。二极管有两根电极引线,即由 P 区引出的电极为阳极(或正极)和由 N 区引出的电极为阴极(或负极),常见的外形如图 1-9 所示。

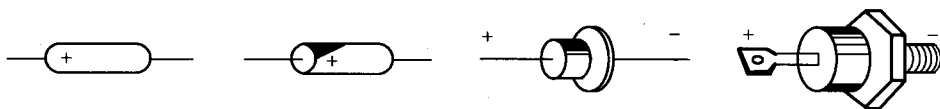


图 1-9 二极管的外形图

二极管按结构分为点接触型、面接触型两大类。它们的结构示意图如图 1-10 所示。

1) 点接触型二极管 这类二极管的 PN 结是用电形成法制造的,用 1 根很细的含有三价元素的金属触丝和 1 块 N 型半导体的表面接触,然后在正方向上通过很大的瞬时电流(大小有几安培),使触丝尖端被加热熔化,三价元素渗入到 N 型半导体中,触丝下面的那部分 N 型半导体变成 P 型,从而形成一个 PN 结。点接触型二极管的 PN 结面积很小,所以不能通过较大的电流;但结电容很小,所以适于做高频检波和脉冲数字电路里的开关元件。其结构示意图如图 1-10(a)所示。

2) 面接触型二极管 面接触型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法制成的,结构如图 1-10(b)所示。其 PN 结面积大,可承受较大的电流,适用于整流电路;但结电容也大,不宜用于高频电路。图 1-10(c)所示的是硅工艺平面型二极管的结构图,是集成电路中常见的一种

形式。二极管的电路代表符号如图 1-10(d)所示。

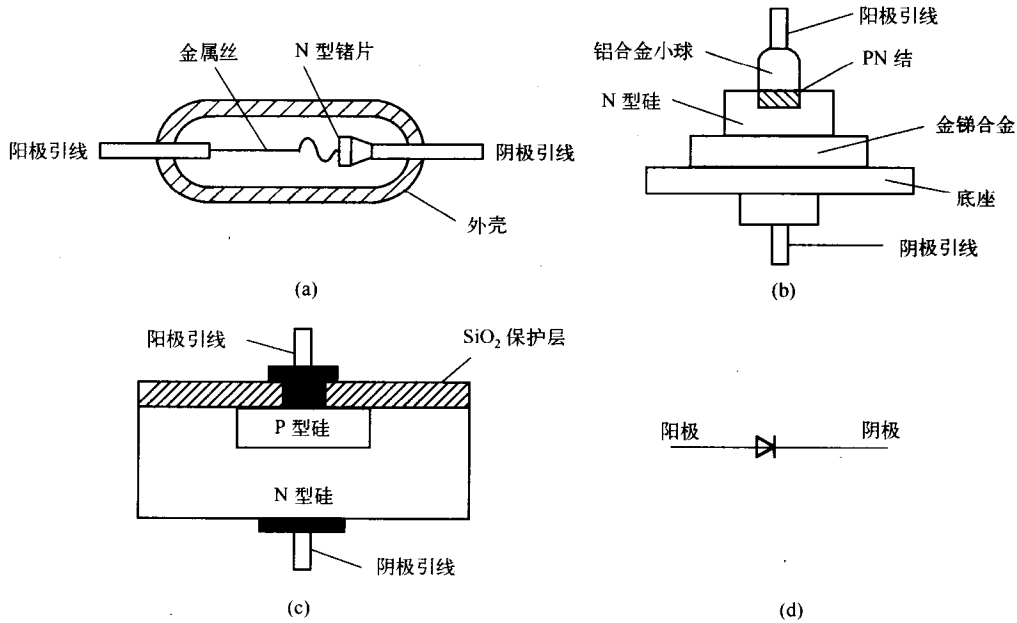


图 1-10 二极管的结构图

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性可用方程表示,也可用特性曲线表示。伏安特性曲线是指流过二极管的电流随外加电压(又称偏置电压)变化的关系曲线。

由理论分析可知,流过 PN 结的电流 i 与外加电压 u 之间的关系为

$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \quad (1-2)$$

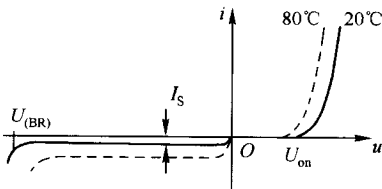


图 1-11 二极管的伏安特性曲线

式中, I_S 为反向饱和电流,其大小与 PN 结的材料、制作工艺、温度等有关; U_T 称为温度的电压当量,在 $T = 300 \text{ K}$ (室温)时, $U_T = 26 \text{ mV}$ 。上式称为二极管的电流方程式。

二极管的伏安特性曲线如图 1-11 所示,可用实验实测得到,也可根据式(1-2)画出。

1. 正向特性

当二极管两端电压 $u > 0$ 时,即处于正向特性区域。正向特性又分为两段。

当 u 较小时,所加外电场不足以克服内电场的作用,正向电流几乎为零,此时二极管呈现高电阻值,基本上还是处在截止状态。

只有当 u 超过某一数值时,才有明显的正向电流,这一电压称为导通电压或开启电压,用 U_{on} 表示。开启电压与二极管的材料和工作温度有关,室温下,硅管的 $U_{on} = 0.5 \sim 0.6 \text{ V}$,锗管的 $U_{on} = 0.1 \sim 0.2 \text{ V}$ 。二极管导通后,二极管两端的导通压降很低,硅管为 $0.6 \sim 0.7 \text{ V}$,锗管

为 $0.2 \sim 0.3 \text{ V}$ 。

2. 反向特性

当 $u < 0$ 时,即处于反向特性区域。反向特性也分为两段。

当 $U_{(\text{BR})} < u < 0$ 时,反向电流很小,且基本不随反向电压的变化而变化,此时的反向电流称为反向饱和电流 I_S 。对于小功率二极管, I_S 很小,硅管一般小于 $0.1 \mu\text{A}$,锗管小于几十微安。

当 $u \geq U_{(\text{BR})}$ 时,反向电流急剧增加,这种现象称为 PN 结击穿, $U_{(\text{BR})}$ 称为反向击穿电压。PN 结发生反向击穿的机理可以分为两种。

1) 雪崩击穿 在轻掺杂的 PN 结中,当外加反向电压时,耗尽区较宽,少子漂移通过耗尽区时被加速,动能增大。当反向电压大到一定值时,在耗尽区内被加速而获得高能的少子,会与中性原子的价电子相碰撞,将其撞出共价键,产生电子、空穴对。新产生的电子、空穴被强电场加速后,又会撞出新的电子、空穴对,……这样雪崩般地产生载流子,反向电流急剧增大,使二极管变成导通状态。

2) 齐纳击穿 在重掺杂的 PN 结中,耗尽区很窄,所以不大的反向电压就能在耗尽区内形成很强的电场。当反向电压大到一定值时,强电场足以将耗尽区内中性原子的价电子直接拉出共价键,产生大量电子、空穴对,使反向电流急剧增大。这种击穿称为齐纳击穿或场致击穿。一般来说,对硅材料的 PN 结, $U_{(\text{BR})} > 7 \text{ V}$ 时为雪崩击穿; $U_{(\text{BR})} > 4 \text{ V}$ 时为齐纳击穿; $U_{(\text{BR})}$ 介于 $4 \sim 7 \text{ V}$ 时,两种击穿都有。

在反向区,硅二极管和锗二极管的特性有所不同。硅二极管的反向击穿特性比较陡,反向饱和电流也很小;锗二极管的反向击穿特性比较平滑,反向饱和电流较大。

3. 温度对二极管伏安特性曲线的影响

温度对二极管的性能有较大的影响。温度升高时,反向电流将增加,曲线向下平移;正向特性曲线向左平移,二极管的正向压降将减小,如图 1-11 中虚线所示。近似认为,温度每增加 10°C ,反向电流约增加一倍。温度每增加 1°C ,正向压降约减小 2 mV 。

4. 晶体二极管电路的分析

1) 二极管电阻

(1) 直流电阻 R_{VD} 。 R_{VD} 定义为二极管两端所加直流电压 U_{VD} 与流过它的直流电流 I_{VD} 之比,即

$$R_{\text{VD}} = \frac{U_{\text{VD}}}{I_{\text{VD}}} \quad (1-3)$$

R_{VD} 不是恒定值,正向的 R_{VD} 随工作电流增大而减小,反向的 R_{VD} 随反向电压增大而增大。 R_{VD} 的几何意义如图 1-12 所示,即 $Q(I_{\text{VD}}, U_{\text{VD}})$ 点到原点直线斜率的倒数。显然, Q 点越高,其直流电阻越小。

(2) 交流电阻 r_{vd} 。 r_{vd} 定义为二极管在其工作状态 $(I_{\text{VDQ}}, U_{\text{VDQ}})$ 处的电压微变量与电流微变量之比,即

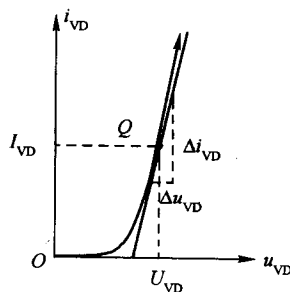


图 1-12 二极管电阻的几何意义