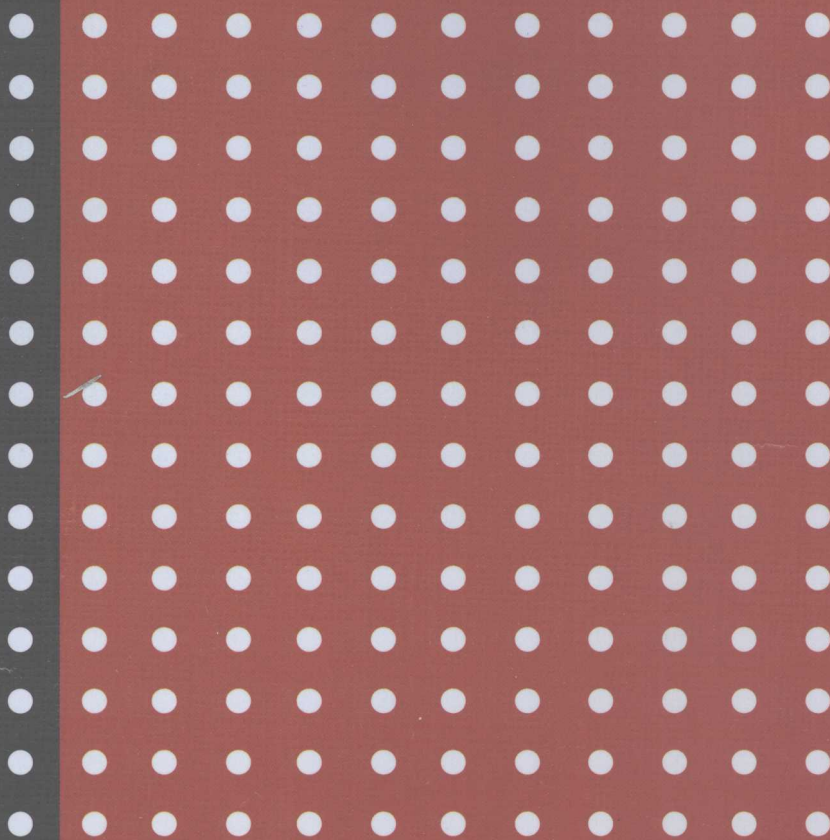


21世纪高等学校电子信息工程规划教材

模拟电子技术基础

徐晓夏 陈泉林 邹文潇 叶家骏 编著



清华大学出版社



内 容 简 介

本书作者根据多年来的教学实践,针对模拟电子技术课程的教学要求,以及学生在学习该课程过程中所遇到的困难,从增强学生实践动手能力出发,注重实际电路的分析、设计和应用,同时为满足课时数较少的特点,编写了这本教材。

本书的主要内容有半导体器件、基本电路、集成运算放大电路、负反馈放大器、放大器的频率响应、集成运算放大器及其应用、功率放大器及电源电路。每一章都配有适量的习题,结合实际应用,难易相结合,有助于各章内容的理解。

本书适合作为高等院校通信、电子、电气、信息、自动化、影视工程等专业的教科书和教学参考书,也可作为工程技术人员的参考书。

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

模拟电子技术基础/徐晓夏等编著. —北京:清华大学出版社,2008.6

(21世纪高等学校电子信息工程规划教材)

ISBN 978-7-302-16919-2

I. 模… II. 徐… 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(2008)第 009089 号

责任编辑:魏江江 李 晔

责任校对:梁 毅

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

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

印 刷 者:北京国马印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:17 字 数:410 千字

版 次:2008 年 6 月第 1 版 印 次:2008 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:26.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:021935-01

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践;不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使得电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合方法,使得产品性价比很高,如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新

能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程设计。

(5) 21 世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为唯一依托,而应该多为学生提供各类学习资料(如网络教材,CAI 课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,提高学生学习兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材编委会

联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

“模拟电子技术”是电气和电子信息类专业学生的主干基础课程。为了适应电子技术的发展和人才培养的需要,根据课程教学的要求,从增强学生实践动手能力出发,注重实际电路的分析、设计和应用,同时为满足课时数较少的特点,编写了这本教材。本教材在内容安排上循序渐进,具有系统性、启发性、开阔性,分析方法简洁,使初学者易于接受,容易自学。

本书涉及很多实际电路,具有实用价值。全书共分为7章,第1章半导体器件,将PN结、二极管、晶体三极管、场效应管归于一章,使读者对基本的器件有一个总体的概念。第2章基本电路,由浅入深,介绍很多典型电路,增强学生的实践知识。第3章集成运算放大电路,由外向内介绍其基本组成电路及其分析。第4章负反馈放大器,采用简单明了的方法进行分析和计算,并将负反馈与集成运算放大器结合在一起,更趋于实际应用。第5章放大器的频率响应,重点介绍放大器的高频响应以及负反馈放大器的频率响应。第6章集成运算放大器及其应用,重点介绍集成运算放大器在各种电子技术领域中的应用设计,涉及很多实用电路。第7章功率放大器及电源电路,重点介绍各类低频功率放大电路、常用的集成功率放大电路,以及各种电源电路,内容丰富,实际应用广泛。

本书教学参考课时为50学时左右。教学过程中实行理论教学、实践教学互相渗透的教学模式。注重基础,强调能力,以知识、能力、素质协调发展为目标。在理论教学的基础上,更重视实践教学。

本书第1~4章由徐晓夏老师编写,第5章和第6章由陈泉林老师编写,第7章由邹文潇老师编写;第1章~4章的习题、第5章的部分习题和第7章的习题由叶家骏老师编写。

尽管我们已尽力,但鉴于时间和水平所限,书中的错误和不足在所难免,敬请同行、专家和读者批评指正。

编者

2008年1月于上海

目 录

第 1 章 半导体器件	1
1.1 PN 结及二极管	1
1.1.1 半导体材料及其特性	1
1.1.2 PN 结的形成及特性	3
1.1.3 晶体二极管	6
1.2 晶体三极管	9
1.2.1 晶体三极管的工作原理	9
1.2.2 晶体三极管的特性曲线	12
1.2.3 晶体三极管的主要参数	14
1.2.4 晶体三极管小信号交流等效电路	15
1.3 场效应管	17
1.3.1 结型场效应管的工作原理	18
1.3.2 绝缘栅场效应管	22
1.3.3 场效应管的主要参数	25
1.3.4 场效应管的小信号交流等效电路	26
本章小结	27
习题	28
第 2 章 基本电路	31
2.1 晶体二极管电路	31
2.1.1 基本应用电路	31
2.1.2 特殊二极管及其电路	34
2.2 晶体三极管放大电路	40
2.2.1 基本放大电路	40
2.2.2 图解分析法	46
2.2.3 微变等效电路分析法	48
2.2.4 多级放大器的分析	57
2.3 晶体管电路的分析及设计	64
2.4 场效应管放大器	67
2.4.1 场效应管的直流偏置电路及静态工作点 Q	67
2.4.2 共源、共漏、共栅放大电路分析	70

2.5 实际应用电路举例	75
2.5.1 高输入阻抗、低噪声、宽带前置放大器	75
2.5.2 晶体管耳机放大器	76
本章小结	76
习题	77
第3章 集成运算放大电路	85
3.1 集成运算放大器的特点及原理图	85
3.1.1 集成运算放大器的特点	85
3.1.2 集成运算放大器的组成及电路符号	86
3.2 电流源电路	87
3.3 差动放大器	91
3.3.1 差动放大器的工作原理	91
3.3.2 差动放大器的传输特性	99
3.4 输出级电路	103
3.4.1 互补推挽输出电路	103
3.4.2 克服交叉失真的互补推挽输出电路	104
3.4.3 具有过载保护的互补推挽输出电路	104
3.5 通用型集成运算放大器内部电路分析	105
3.6 集成运算放大器的主要参数	108
3.7 集成运算放大器使用中的注意事项	109
3.8 专用型集成运算放大器简介	110
本章小结	111
习题	111
第4章 负反馈放大器	116
4.1 反馈的基本概念	116
4.1.1 反馈及实现框图	116
4.1.2 反馈放大电路的基本方程	117
4.1.3 反馈放大电路的判别	118
4.2 负反馈对放大器性能的影响	124
4.2.1 提高放大倍数的稳定性	124
4.2.2 扩展通频带	125
4.2.3 减小非线性失真	126
4.2.4 改变输入输出电阻	126
4.3 引入负反馈的一般原则	127
4.4 深度负反馈放大倍数的分析	128
4.4.1 深度负反馈的定义及近似估算法	128
4.4.2 4种负反馈电路的估算	128

本章小结	136
习题	136
第 5 章 放大器的频率响应	141
5.1 概述	141
5.2 失真概念	141
5.3 放大器的高频响应	143
5.3.1 通频带定义	143
5.3.2 单级晶体管放大器的高频响应	143
5.3.3 场效应放大器及差动放大器的频率响应	149
5.4 级联放大器的频率响应	149
5.4.1 共射-共基放大器的频率响应	149
5.4.2 多级放大器的频率响应	153
5.4.3 放大器瞬态响应	154
5.5 放大器的低频响应	155
5.6 负反馈放大器频率响应	156
5.6.1 复频域中负反馈放大器传递函数	156
5.6.2 反馈网络为纯电阻的负反馈放大器	156
5.6.3 负反馈放大器的稳定性	158
本章小结	163
习题	163
第 6 章 集成运算放大器应用	166
6.1 集成运算放大器的基本特性	166
6.1.1 理想集成运算放大器	166
6.1.2 非理想运算放大器	167
6.2 集成运算放大器的基本运算电路	169
6.2.1 加减法运算	169
6.2.2 乘除法运算	175
6.2.3 微积分运算	177
6.3 集成运算放大器构成有源滤波器	179
6.3.1 有源 RC 滤波器	180
6.3.2 双积分回路滤波器	184
6.3.3 开关电容滤波器	186
6.3.4 滤波器中等效电抗电路	188
6.3.5 基于电流传输器的 RC 滤波器	192
6.3.6 基于跨导放大器的电容滤波器	196
6.4 集成运算放大器构成精密检测器	199
6.4.1 半波检波器	199

6.4.2	峰值检波器	200
6.4.3	有效值检波器	201
6.4.4	取样保持电路	202
6.5	集成运算放大器构成波形变换和波形产生电路	204
6.5.1	波形变换电路	204
6.5.2	波形产生电路	205
	本章小结	210
	习题	210
第7章	功率放大器及电源电路	213
7.1	功率放大器	213
7.1.1	功率放大器的特殊性和分类	213
7.1.2	甲类(A类)功率放大器	215
7.1.3	有输出变压器乙类(B类)功率放大器	217
7.1.4	无输出变压器乙类(B类)功率放大器	221
7.1.5	开关型丁类(D类)功率放大器	225
7.1.6	集成功率放大器	229
7.2	整流电路和直流稳压电源	232
7.2.1	整流滤波电路	232
7.2.2	线性稳压电源	236
7.2.3	开关型稳压电源	242
7.2.4	集成高精度基准电压源	246
	本章小结	249
	习题	250
附录	常用符号说明	256
参考文献		258

第 1 章 半导体器件

本章主要介绍半导体的基础知识。在此基础上重点讨论 PN 结的形成及特性,晶体二极管、晶体三极管和场效应管的工作原理、特性曲线和主要参数,以及晶体三极管、场效应管的交流等效电路。

【教学要求及知识点】

- 半导体的基础知识。
- 晶体二极管的基本特性、电路模型与主要参数,二极管的伏安特性、开关特性。
- 晶体三极管的基本特性、电路模型与主要参数,三极管的伏安特性、开关特性。
- 场效应管的主要参数及电路模型。

1.1 PN 结及二极管

1.1.1 半导体材料及其特性

自然界中物质按其导电能力可分为导体、绝缘体和半导体。导体是指很容易传导电流的物质,如铜、银、铝等;绝缘体是指几乎不能传导电流的物质,如橡皮、陶瓷、石英、塑料等;而半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间。在电子器件中,常用的半导体材料是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。

半导体之所以得到广泛重视,是因为它具有不同于导体和绝缘体的独特的性质。如当半导体受外界光照增强时,它的导电能力显著增强(称光敏性),利用它的光敏性可以做成各种光敏元件。又如当半导体随着温度的升高,它的导电能力明显增强(称热敏性),利用它的热敏性可以制作热敏电阻或对温度敏感的传感器。再如在纯净的半导体中掺入微量的杂质,其导电能力也会显著增强(称掺杂性),这是半导体最显著,最突出的优点,利用这独特性质可以制作出不同性能、不同用途的多种多样的半导体器件,促进了电子技术的飞速发展。

1. 本征半导体

所谓本征半导体就是经过一定的工艺制成的单晶体,它是纯净的、不含杂质的半导体。常用的半导体材料是硅和锗,它们都是 4 价元素,最外层有 4 个电子,称价电子。原子在空间排列成很有规律的空间点阵(称晶格),如图 1-1 所示。此时价电子不仅受到自身原子核的吸引,而且还受到相邻原子核的吸引,使每一个价电子为两个相邻原子所共有,形成共价键。因为共价键具有很强的结合

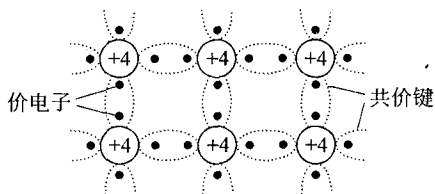


图 1-1 硅和锗的二维晶格结构图

力,在绝对零度(-273.16°C)和没有外界激发时,晶体中没有自由电子,所有价电子都被束缚在共价键中,所以半导体不能导电。

而当温度升高或在光线照射下,少数价电子因受激发而获得足够的能量,挣脱共价键的束缚成为自由电子,同时原来的共价键中留下了一个空位称为空穴,这种现象称为本征激发,如图 1-2 所示。在本征半导体中电子和空穴是成对出现的,本征半导体随外界光和热的增强,电子-空穴对也增多,其导电能力增强,所以半导体的导电能力与温度和光照有关。

由于共价键中出现了空穴,此时加上一定的外电场则有电子移动产生的电流,方向为 $X_3 \rightarrow X_2 \rightarrow X_1$,称电子电流;以及有空穴移动产生的电流,方向为 $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$,称空穴电流。它们的方向相反,如图 1-3 所示。

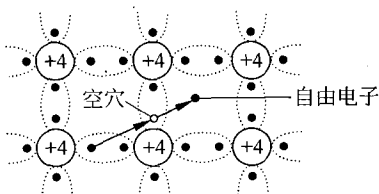


图 1-2 在光和热的激发下产生电子-空穴对

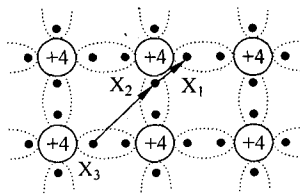


图 1-3 电子与空穴流

2. 杂质半导体

本征半导体中掺入微量的杂质使其导电能力产生明显变化。根据掺入不同性质的杂质,杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

1) N 型半导体

在本征半导体硅或锗的晶体内掺入微量的 5 价元素,如磷、砷、锑等,由于杂质原子提供自由电子故称施主原子,其结构如图 1-4(a) 所示。

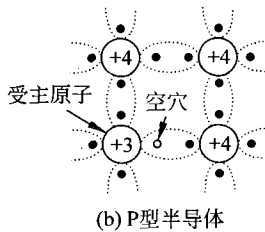
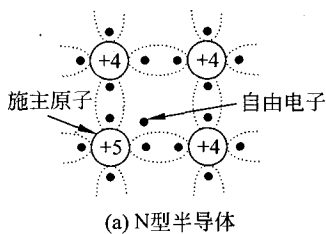


图 1-4 杂质半导体共价键结构图

磷原子外围的 5 个价电子中有 4 个与相邻硅原子的价电子形成共价键,还有一个价电子在共价键之外,只受磷原子的微弱束缚,所以在室温下很容易脱离磷原子而成为自由电子。因此在 N 型半导体中多数载流子(简称多子)是电子,少数载流子(简称少子)是空穴。虽然在 N 型半导体中自由电子数远大于空穴,但由于正离子(施主原子)的存在,使正负电荷数相等,所以使半导体仍保持中性。

2) P 型半导体

与 N 型半导体类似,在本征半导体中掺入微量的 3 价元素如硼、铅等,由于硼原子只有 3 个价电子,所以它只能和相邻的 4 个硅原子中的 3 个硅原子构成完整的共价键,而在第 4

个共价键上留下一个空穴,此时相邻共价键上的电子只要得到很小的激发而获得能量时就能填补硼原子上的空位,使硼原子成为不能移动的负离子。因此其多数载流子是空穴,少数载流子是电子。由于杂质原子吸收电子而称为受主原子,如图 1-4(b)所示。

综上所述,若在本征半导体中加入杂质后,半导体中的电子(N型半导体)或空穴(P型半导体)的浓度比在同一温度下本征半导体由于本征激发而产生的电子或空穴的浓度要大得多,加强了半导体的导电能力,所以在杂质半导体中,多子浓度由掺杂浓度决定,少子浓度由温度决定。

1.1.2 PN 结的形成及特性

1. PN 结的形成

在一块硅片上用不同的掺杂工艺,使其一边形成 N 型半导体,另一边形成 P 型半导体,则在其交界面附近形成了 PN 结。P 型、N 型半导体结合在一起时,由于交界面两侧多子与少子的浓度不同,P 区中的多子(空穴)向 N 区运动,N 区中的多子(电子)向 P 区运动。这种因浓度差异而引起的运动称扩散运动,形成扩散电流,如图 1-5 所示。

由于载流子的扩散运动,N 区电子扩散到 P 区,则在接触面附近的 N 区留下不能移动的正离子;同样,P 区空穴扩散到 N 区,在接触面附近的 P 区留下不能移动的负离子。所以在交界面附近形成了由不能移动的带电离子构成的空间电荷区,即 PN 结,如图 1-6 所示。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并复合掉了,即消耗尽了,故又称耗尽层。扩散越强,空间电荷区越宽。

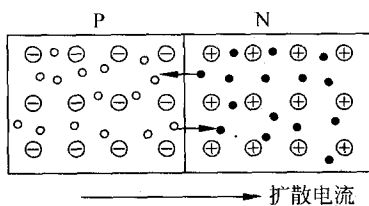


图 1-5 多数载流子的扩散运动

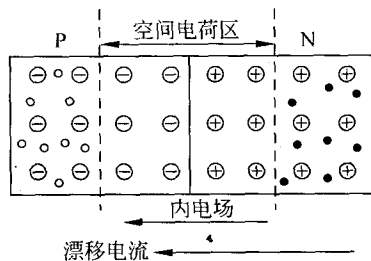


图 1-6 PN 结的形成

随着扩散运动的进行,使空间电荷区增宽,则在空间电荷区会形成一个由 N 指向 P 的电场,称内电场。这个电场反过来会阻止上述扩散运动的进行。在这个内电场的作用下,N 区中的少子(空穴)移向 P 区,P 区中的少子(电子)移向 N 区,这种由内电场引起的运动称为漂移运动,从而形成漂移电流,它的方向是由 N 区流向 P 区,如图 1-6 所示。

可见扩散运动使空间电荷区加宽,内电场加深,而内电场又阻止扩散的进行,使空间电荷区变窄,内电场减弱,随着扩散运动和漂移运动的不断进行最后达到动态平衡。此时通过 PN 结的净电流为零。

2. PN 结的单向导电性

PN 结在没有外加电压时是处于平衡状态的,而在外加电压作用下它具有一个很重要

的特性,即单向导电性。

1) PN 结外加正向电压

在图 1-7 中,PN 结外加电压用 U 表示,使 P 接“+”端,N 接“-”端,称 PN 结外加正向电压(或简称 PN 结正偏)。在外电场的作用下 PN 结的平衡状态被打破,使 P 区中的空穴和 N 区中的电子都向 PN 结移动,即多子被推向耗尽层,使耗尽层变窄,内电场削弱。这时扩散运动将大于漂移运动,从而在外电路中出现一个较大的电流,称正向电流 I 。在正常工作范围内,PN 结外加电压稍有变化,就能引起电流的显著变化,所以 I 随 U 的增加急剧上升,此时 PN 结呈现出一个很小的电阻,即 PN 结的正向电阻小。

2) PN 结外加反向电压

在图 1-8 中,PN 结外加电压用 U 表示,使 P 接“-”端,N 接“+”端,称 PN 结外加反向电压(或简称 PN 结反偏)。此时在外电场的作用下,多子被推离耗尽层,使耗尽层变宽,内电场增强,PN 结呈现出很大的阻值,即 PN 结的反向电阻很大。此时漂移运动增强,而漂移运动是少子的运动,所以漂移电流很小,从而在外电路中呈现出一个微弱的电流 I_s ,称为反向电流,一般硅管为 nA 级,锗管为 μA 级。

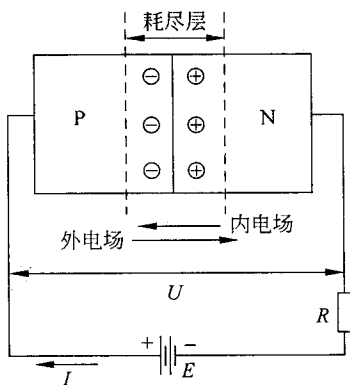


图 1-7 正向偏置的 PN 结

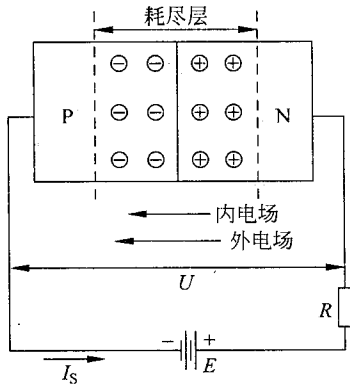


图 1-8 反向偏置的 PN 结

这里要注意的是,内电场增强使漂移运动增强,而漂移运动是少子的运动,因为少子是本征激发产生,所以随着温度的升高反向电流会随温度的升高而成倍增长。另外,反向电流不仅很小,而且在反向电压作用下,少子供应有限,它基本不随外加电压的增大而增加,所以称为反向饱和电流,用 I_s 表示。

由上述分析可见,PN 结正向偏置时,PN 结呈现的阻值很小,正向电流很大,相当于 PN 结导通;而 PN 结反向偏置时,PN 结呈现的阻值很大,反向电流很小,相当于 PN 结截止,体现了 PN 结的单向导电性。

3. PN 结的伏安特性

根据半导体物理的理论分析可知,流过 PN 结的电流 i 与外加电压 u 之间的关系为

$$i = I_s(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

式中 I_s 为反向饱和电流, $U_T = kT/q$ 称为温度的电压当量(其中 q 为电子的电量, k 为玻耳兹曼常数)。室温下,即 $T = 300\text{K}$ 时, $U_T \approx 26\text{mV}$ 。

当PN结正向偏置时,即当 $u>0$,且满足 $e^{u/U_T} \gg 1$ 时, $i \approx I_S e^{u/U_T}$,电流与电压成指数关系,称PN结的正向特性,即PN结处于正向导通状态。

当PN结反向偏置时,即当 $u<0$,且满足 $e^{u/U_T} \ll 1$ 时, $i \approx -I_S$,称PN结的反向特性,即PN结处于反向截止状态。

当反向电压加到一定程度时,PN结产生反向击穿,即电压几乎没有变化而反向电流急剧增加,称PN结的反向击穿特性,如图1-9所示。

从图1-9中可以看到,当正向电压较小时,不足以影响内电场,所以载流子扩散运动尚未明显增加,正向电流几乎为零,PN结呈现一个大电阻,相当于PN结截止。只有当正向电压达到一定数值时才有明显的正向电流,称PN结的正向特性,我们把这个电压称为导通电压。对于硅材料,其导通电压为 $0.6 \sim 0.8\text{V}$,锗材料的导通电压为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。

4. PN结的击穿特性

当PN结处于反向偏置时,在一定范围内的反向电压作用下,流过PN结的电流是很小的反向饱和电流。但当反向电压超过某一数值后,反向电流会急剧增加,称PN结的击穿。把反向电流开始明显增大时所对应的反向电压称为击穿电压,用 U_{BR} 表示。如图1-9所示,PN结一旦被击穿后,可认为反向电压几乎不变,近似等于 U_{BR} 。

只要限制流过PN结的电流,击穿并不损坏PN结。稳压二极管正是利用PN结的反向击穿特性制成的。

击穿可以分为雪崩击穿和齐纳击穿两类。雪崩击穿轻掺杂、耗尽区宽,当PN结反向电压增加时,使少子加速,撞出区内中性原子的电子,形成新的电子-空穴对,再加速撞出更多,这种连锁反应形成雪崩现象,使反向电流激增,于是PN结发生雪崩击穿。齐纳击穿重掺杂、耗尽区窄,在反向电压下形成大的耗尽区电场,将区内中性原子的价电子拉出共价键,引起电子-空穴对激增,使反向电流激增。雪崩击穿的击穿电压高于齐纳击穿,对于硅材料的PN结, $U_{BR} > 7\text{V}$ 时为雪崩击穿; $U_{BR} < 5\text{V}$ 时为齐纳击穿; U_{BR} 介于 $5 \sim 7\text{V}$ 时,两种击穿都有。发生雪崩击穿时一般PN结就损坏了。

5. 温度对伏安特性的影响

温度变化时,PN结的反向饱和电流、导通电压和击穿电压都会随之变化。如图1-10所示,当环境温度升高时,二极管的正向特性曲线将左移,反向特性曲线下移,即反向电流明显增大,其关系是

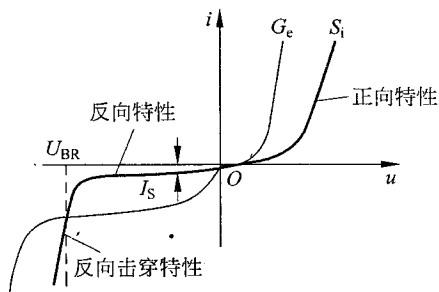


图1-9 PN结的伏安特性

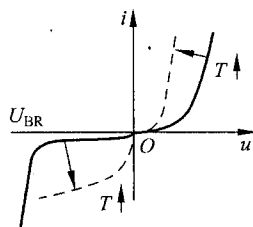


图1-10 温度对伏安特性的影响

$$I_S(t_2) = I_S(t_1) 2^{\frac{t_2 - t_1}{10}} \quad (1-2)$$

式(1-2)说明温度每升高 10°C , I_S 将增加一倍。但当温度升高到一定程度时, 就会使本征激发产生的少数浓度超过原来杂质电离产生的多子浓度, 使杂质半导体与本征半导体一样了, PN 结将不再存在。所以为保证 PN 结正常工作, 它的工作温度不能太高。其最高温度的限制与掺杂浓度有关。

6. PN 结的电容效应

PN 结具有电容效应, 分为势垒电容和扩散电容。势垒电容是由 PN 结的反向偏置引起的, 当外加反向电压增加时会使其结电容值下降, 所以可以通过外加反向电压来控制结电容的值, 利用这一特性可制成变容二极管。

扩散电容是由 PN 结的正向偏置引起的, 它的值随正向电压的增大而增大。

PN 结的结电容由势垒电容和扩散电容两部分组成, 由于势垒电容和扩散电容一般都很小, 在低频时呈现出很大的容抗, 所以其作用可以忽略, 但在高频时要考虑结电容的作用。

1.1.3 晶体二极管

二极管的符号如图 1-11(a)所示。按结构可分为点接触型和面接触型, 如图 1-11(b)和图 1-11(c)所示。

在点接触型二极管中, 因其结面积小, 所以它不能通过较大电流, 但由于它的结电容小, 所以适用于高频小电流的场合, 如高频检波或开关电路。而面接触型二极管结面积大, 结电容也大, 但工作频率低, 一般用于中、大功率整流电路, 而不能用于高频电路。

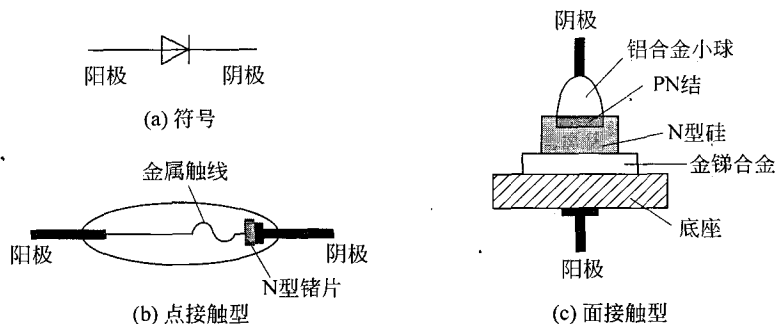


图 1-11 二极管符号及结构

1. 二极管的特性曲线

晶体二极管是由一个 PN 结加上两个电极引线构成的半导体器件, 所以 PN 结所具有的特性也是晶体二极管的特性。

2. 二极管的主要参数

二极管的参数是反映器件性能的质量指标, 同时也决定了器件的用途, 下面是晶体二极

管的主要参数。

1) 直流极限参数

(1) 最大整流电流 $I_{\max}$ 。是指允许通过的最大正向平均电流,实际使用时不能超过该值。

(2) 最大反向工作电压 $U_{\max}$ 。为避免二极管被击穿而失去单向导电性, $U_{\max}$ 通常为反向击穿电压的一半,即 $U_{\max} = U_{\text{BR}}/2$ 。

(3) 反向饱和电流 I_s 。是指二极管未击穿时的反向电流。 I_s 越小,则二极管的单向导电性越好。 I_s 与温度有关,所以在使用时要特别注意温度条件。

2) 二极管的直流、交流电阻

(1) 直流电阻 R_D 。

如图 1-12 所示,二极管的直流电阻是指曲线上某一点(Q点)的电压 U_D 和该点的电流 I_D 之比,即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-3)$$

(2) 交流电阻 r_D 。

交流电阻定义为某一点(Q点)附近的电压变化与电流变化之比,即 Q 点处切线斜率的倒数,如图 1-12 所示。

$$r_D = \left. \frac{du}{di} \right|_Q \approx \left. \frac{\Delta u}{\Delta i} \right|_Q \approx \left. \frac{U_T}{I_Q} = \frac{26\text{mV}}{I_Q} \right|_{\text{室温下}} \quad (1-4)$$

从上述定义可以看到,二极管的交、直流电阻都与某个点(即工作点 Q)有关,并且同一点的交、直流电阻具有不同的概念。另外,正向 r_D 的电阻为几欧至几十欧,而反向电阻可达几百千欧至几兆欧。

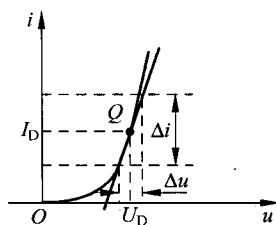


图 1-12 二极管电阻

3. 二极管等效电路

为简化二极管电路的分析,对于非线性器件二极管可以用如下模型来等效。

1) 理想二极管模型

理想二极管是一种最简单、最常用的等效电路,如图 1-13(a)所示。当二极管正向偏置时,管压降 $U_D = 0\text{V}$,相当于二极管短路;当二极管反向偏置时,流过二极管的电流 $I_D = 0\text{mA}$,相当于二极管开路。此模型一般适用于外加电压 $U \gg U_D$ 的情况。

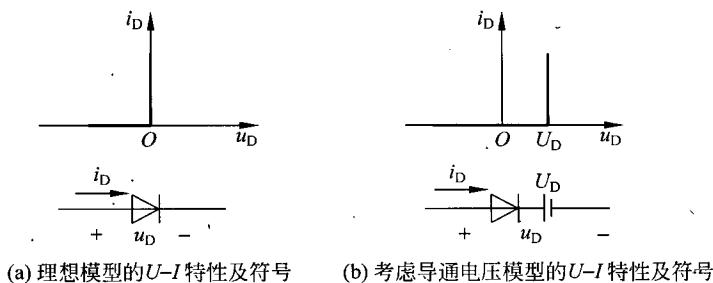


图 1-13 二极管伏安特性折线化的电路模型

2) 考虑导通电压的二极管模型

如图 1-13(b) 所示, 当正向电压未达到导通电压 U_D 时, 流过二极管的电流 $I_D = 0\text{mA}$; 当正向电压大于导通电压 U_D 后, 其管压降恒定, 不随电流而变。

通常硅管导通电压值为 $U_D = 0.7\text{V}$, 锗管导通电压值为 $U_D = 0.2\text{V}$ 。此模型一般适用于外加电压 $U \ll U_D$ 和稍大于 U_D 的情况。

例 1-1 设二极管为理想器件, 试分别求出图 1-14 各分图的输出电压 U_o 的值。

解: (a) 图, 由于二极管处于正向偏置, 即二极管导通。二极管相当于是闭合的开关, 所以 $U_o = -3\text{V}$ 。

(b) 图, 由于二极管处于反向偏置, 即二极管截止。二极管相当于是打开的开关, 所以 $U_o = -6\text{V}$ 。

(c) 图, 当回路中有多个二极管时, 可先假设某一个二极管的状态, 然后通过分析来验证原先的假设是否成立。

可先假设 D_1 导通 $\rightarrow D_2$ 截止 $\rightarrow$ 使 D_1 导通。假设成立, 即 D_1 导通, D_2 截止, 所以 $U_o = 0\text{V}$ 。

反之, 也可设 D_2 导通 $\rightarrow D_1$ 导通 $\rightarrow D_2$ 截止。所以 D_2 导通的假设不成立, 应该是 D_1 导通, D_2 截止, 则 $U_o = 0\text{V}$ 。

(d) 图, 同图(c)分析一样, 设 D_1 导通 $\rightarrow D_2$ 导通 $\rightarrow D_1$ 截止, 所以假设不成立, 应该是 D_1 截止, D_2 导通, 则 $U_o = -6\text{V}$ 。

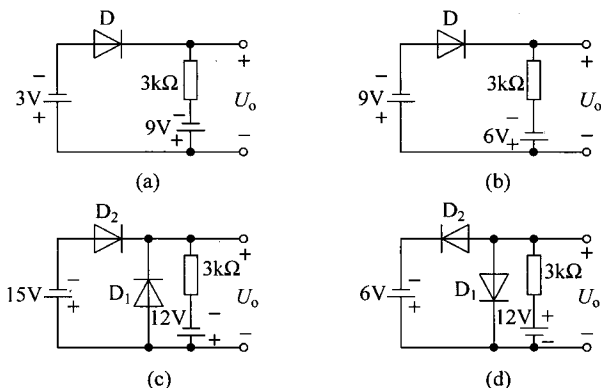


图 1-14 例 1-1 电路图

例 1-2 设二极管为理想器件, 分析图 1-15 中电流 I 的值。

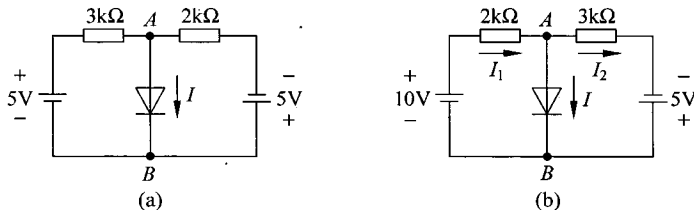


图 1-15 例 1-2 电路图

解: 分析电路时先假设二极管断开, 计算出在二极管断开时的 A 点与 B 点间的电压, 再判断假设是否成立。