

高等学校工程创新型“十二五”规划教材

电子技术基础

◎ 李小珉 潘 强 叶晓慧 编著



Engineering
Innovation



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

高等学校工程创新型“十二五”规划教材

电子技术基础

李小珉 潘 强 叶晓慧 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

为配合教育部“卓越工程师教育培养计划”及军队院校教育改革,突出工程教育的特点,教材编写时淡化繁琐的数学推导及内部电路分析,强调器件参数、外特性的应用和基本电路的分析,并按照先“模拟”后“数字”的顺序展开。主要内容包括:半导体器件、放大器基础、反馈电路、集成运算放大器的应用、直流稳压电源、逻辑门电路、组合逻辑电路、时序逻辑电路、中规模信号产生与变换电路、可编程逻辑器件等。

本书从实际工程出发,贯彻由浅入深,由特殊到一般的原则,知识点讲述有详、有略,分析方法浅显、易懂,同时还配套出版《电子技术基础实验与学习指导》辅助教材,帮助学生理解知识,提高动手能力。

本书可作为工科学校本科各专业的电子技术基础性教材,或高职高专学校电子信息与电气专业教材,参考学时为 80 学时。

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

电子技术基础 / 李小珉, 潘强, 叶晓慧编著. —北京: 电子工业出版社, 2013. 2

ISBN 978-7-121-19467-2

I. ①电… II. ①李… ②潘… ③叶… III. ①电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 014542 号

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订: 北京市李史山胶印厂

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

开 本: 787×1092 1/16 印张: 16.25 字数: 436 千字

印 次: 2013 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

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。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着军队信息化建设的推进,电子系统装备在军事装备中所占比重逐渐增大,电子技术本身已经成为战斗力的重要构成要素,对电子信息系统的全面掌控能力成为新型军事人才的必备素质。目前,军队院校教育已从一般工程技术人才的培养转变为初级指挥军官的合训培养,为了适应军校的转型,培养宽口径的人才,我们对人才培养方案做了全面调整和精心定位。

当今社会是信息社会,对人才的信息素质有了更多的要求。基于这种理念,将“电子技术基础”课程定位为全校统一的平台课程,淡化传统的电子技术教学内容在电类和非电类专业的区别和要求,强调信息基础的构建和培养。

在教材编写中,总结了多年来的教学研究成果和实践经验,注意吸收国内外先进的教学理论。配合教育部“卓越工程师教育培养计划”及军队院校教育改革,针对合训专业学员以及工科学校学生的特点,突出了集成技术和数字技术及其应用,删减了器件内部电路的分析、繁琐的数学推导,强调器件参数、外特性的应用和基本电路的分析。在内容的安排上,贯彻了从实际出发,由浅入深、由特殊到一般的原则,知识点的把握上有详有略,分析方法浅显易懂。力图通过课程教学,使学生掌握电子技术的基本理论、基本电路、基本分析方法,具有一定的分析问题和解决问题的能力,获得一定的电路设计基本技能,为今后的学习及工作打下良好的基础。

本教材共 10 章,分为上下两篇:模拟电子技术和数字电子技术,按照先“模拟”后“数字”的顺序展开。模拟部分通过各种半导体器件及其电路来阐明电子技术中的基本概念、基本原理和分析方法。数字部分从基本的逻辑代数和逻辑门出发,阐述数字电路的基本性能和特点,着重于 MSI 集成电路的分析和设计。为了加深学生对课堂知识的理解,本书列举了若干电路实例和一定数量的例题、思考题和练习题,并同步出版了学习、实验辅导书《电子技术实验与学习指导》。本书开发了多媒体教学课件,需求的老师可在华信教育资源网上注册、索取(<http://www.hxedu.com.cn>)。

教材是按 80 学时(不含实验)编写的,大致分为:模拟电子技术 45 学时,数字电子技术 35 学时,可根据具体的教学情况进行调整。如果学时较少,可以适当删减部分内容。

本书模拟电子技术部分由李小珉负责并编写了第 1、2 章,董俊宏编写了第 3、4 章,尹明编写了第 5 章,数字电子技术部分由潘强负责并编写了第 7、8 章,朱旭芳编写了第 6 章,潘红兵编写了第 9 章,王红霞编写了第 10 章。叶晓慧提出了许多宝贵意见。

本书是面向工科学校各专业的电子技术基础性教材,也可作为从事电子技术的工程人员和大专和本科学生的教学参考书。

电子技术是应用十分广泛、发展最为迅速的工程技术之一,由于编者的水平所限,加之时间仓促,书中不当甚至错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2013 年元月于海军工程大学

目 录

第一篇 模拟电子技术基础

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 PN 结	3
1.2 半导体二极管	5
1.2.1 二极管特性与参数	5
1.2.2 二极管的电路模型	7
1.2.3 二极管应用举例	7
1.2.4 特殊二极管	8
1.3 半导体三极管	10
1.3.1 三极管的基本结构	10
1.3.2 三极管的电流分配与放大作用	10
1.3.3 三极管的特性曲线	12
1.3.4 三极管的主要参数	14
1.4 场效应晶体管	15
1.4.1 N 沟道增强型 MOSFET	15
1.4.2 N 沟道耗尽型 MOSFET	17
1.4.3 场效应管的特性与参数	18
1.5 光电耦合器	19
本章小结	20
思考题与习题	20
第 2 章 放大器基础	24
2.1 放大电路的主要指标	24
2.2 共发射极单管交流电压放大器	27
2.2.1 放大器的组成	27
2.2.2 放大器的静态工作点	28
2.2.3 放大器的放大作用	29
2.3 放大器的分析方法	31
2.3.1 估算法	31
2.3.2 图解分析法	32
2.3.3 微变等效电路分析法	35
2.4 静态工作点的稳定问题	39
2.5 共集电极电路和共基极电路	41
2.5.1 共集电极放大电路	41
2.5.2 共基极放大电路	43
2.5.3 放大电路三种组态的比较	43

2.6	场效应管放大器	45
2.6.1	场效应管放大器的直流分析	45
2.6.2	场效应管放大器的交流分析	47
2.7	多级放大电路	49
2.7.1	级间耦合方式	49
2.7.2	多级放大电路分析	50
2.7.3	放大电路的频率响应	51
2.8	差动放大器	53
2.8.1	差动放大器结构特点	53
2.8.2	差动放大器性能特点	54
2.8.3	差动放大器主要技术指标的计算	55
2.9	功率放大器	57
2.9.1	概述	57
2.9.2	互补对称功率放大器	58
2.10	集成运算放大器	62
2.10.1	概述	62
2.10.2	集成运算放大器的结构特点	63
2.10.3	电流源电路	63
2.10.4	集成运算放大器的主要参数	65
本章小结		66
思考题与习题		66
第3章	反馈电路	73
3.1	负反馈放大器	73
3.1.1	负反馈放大器的组成框图	73
3.1.2	反馈的分类	74
3.1.3	深度负反馈放大器的估算	77
3.1.4	负反馈对放大器性能的影响	79
3.2	正弦波振荡器	81
3.2.1	正弦波振荡器的基本概念与原理	81
3.2.2	RC 正弦波振荡器	82
3.2.3	LC 正弦波振荡器	83
3.2.4	石英晶体振荡器	84
本章小结		86
思考题与习题		87
第4章	集成运算放大器的应用	91
4.1	集成运算放大器的运算电路	92
4.1.1	基本线性运算电路	92
4.1.2	加减运算电路	95
4.1.3	积分和微分电路	97
4.2	有源滤波器	98
4.2.1	低通滤波器	99
4.2.2	高通滤波器	100

4.2.3 带通滤波器	101
4.2.4 带阻滤波器	101
4.3 电压比较器	102
4.3.1 单门限电压比较器	102
4.3.2 迟滞比较器	103
本章小结	105
思考题与习题	105
第5章 直流稳压电源	109
5.1 整流和滤波电路	109
5.1.1 整流电路	109
5.1.2 电容滤波电路	111
5.2 稳压电路	113
5.2.1 并联型稳压电路	113
5.2.2 串联型稳压电路	114
5.2.3 集成稳压器及其应用	115
本章小结	119
思考题与习题	119

第二篇 数字电子技术基础

第6章 数字逻辑电路基础	124
6.1 逻辑门电路的基本概念	124
6.2 常用逻辑门电路	124
6.2.1 基本逻辑门电路	124
6.2.2 复合逻辑门	127
6.3 TTL 集成逻辑门	128
6.3.1 TTL 集成逻辑门电路与工作原理	129
6.3.2 TTL 集成逻辑门的电压传输特性曲线	129
6.3.3 TTL 集成逻辑门的主要参数	130
6.3.4 特殊逻辑门	131
6.3.5 TTL 集成逻辑门的使用常识	133
6.3.6 TTL 集成逻辑门电路外接负载问题	134
6.4 CMOS 门电路	134
6.5 各种门电路的接口问题	136
6.6 数制及编码	137
6.6.1 数制	137
6.6.2 编码	139
6.7 逻辑代数	142
6.7.1 逻辑代数的概念	142
6.7.2 逻辑代数的基本定律、恒等式及常用公式	142
6.8 逻辑函数的变换与化简	144
6.8.1 逻辑函数的表达式	144
6.8.2 逻辑函数的公式法化简	145

6.8.3 逻辑函数的图形法化简	146
本章小结	151
思考题与习题	152
第7章 组合逻辑电路	155
7.1 组合逻辑电路的分析和设计	155
7.1.1 组合逻辑电路的概念	155
7.1.2 组合逻辑电路的分析	155
7.1.3 组合逻辑电路的设计	156
7.2 常用组合逻辑电路	158
7.2.1 加法器	158
7.2.2 比较器	160
7.2.3 编码器	162
7.2.4 译码器	164
7.2.5 数据选择器	170
7.3 中规模组合逻辑器件应用举例	173
7.4 组合电路中的竞争与冒险	176
7.4.1 冒险的识别	177
7.4.2 冒险的消除	177
本章小结	178
思考题与习题	179
第8章 时序逻辑电路	182
8.1 触发器	182
8.1.1 RS 触发器	182
8.1.2 D 触发器	186
8.1.3 JK 触发器	187
8.1.4 T 与 T' 触发器	188
8.2 时序电路的分析与设计方法	189
8.2.1 时序电路的分析	189
8.2.2 时序电路的设计	191
8.3 计数器	191
8.3.1 一般概念	191
8.3.2 触发器组成计数器	192
8.3.3 集成计数器	195
8.4 移位寄存器	203
8.4.1 单向移位寄存器	203
8.4.2 双向移位寄存器	205
8.5 中规模时序逻辑器件综合应用	207
本章小结	211
思考题与习题	211
第9章 中规模信号产生与变换电路	216
9.1 555 集成定时器	216
9.1.1 555 定时器电路	216

9.1.2	555 定时器的功能	217
9.1.3	555 定时器的应用	217
9.2	数/模(D/A)和模/数(A/D)转换器	222
9.2.1	数/模转换器	222
9.2.2	模/数转换器	226
	本章小结	233
	思考题与习题	233
第 10 章	可编程逻辑器件	236
10.1	半导体存储器	236
10.1.1	随机存取存储器(RAM)	236
10.1.2	只读存储器(ROM)	237
10.2	可编程逻辑器件(PLD)	239
10.2.1	PLD 的基本结构	239
10.2.2	PLD 的电路表示法	239
10.2.3	常用 PLD 器件	240
10.3	编程器简介	247
	本章小结	248
	思考题与习题	248
参考文献		250

第一篇 模拟电子技术基础

电子技术是应用电子元器件或电子设备达到某种特定目的或完成某项特定任务的技术。电子技术研究的对象是电子元器件和由电子元器件构成的各种基本功能的电路,以及用某些基本功能电路组成的具有专门用途的装置或系统。电子技术按照其处理信号的不同,分为模拟电子技术和数字电子技术两部分。模拟电子技术是研究平滑的、连续变化的电压或电流,即模拟信号下工作的电子电路及其技术;数字电子技术是研究在离散的、断续变化的电压或电流,即数字信号下工作的电子电路及其技术。

“电子技术基础”课程是工程类专业入门性质的技术基础课。它的任务是使学生获得电子技术的基本理论、基本知识和基本技能,培养学生分析问题和解决问题的能力,为以后深入学习电子技术知识和在专业中的应用打好基础。基本理论主要是指电子电路的分析方法;基本知识是指基本的电子元器件和电子电路的功能、性能及应用,基本技能是指电子测试技术及电子电路的识图、运算和应用能力。

电子技术基础尤其是模拟部分,内容庞杂繁多,具有不同于“物理”、“电路”等课程的特殊概念及独特的分析方法,即定性分析、定量估算、实验调整。初学者普遍感到不好理解、知识点零散、变化多,学了心中无底。这是课程本身特点所致,在学习的过程中要注意适应并掌握这个特点。更为重要的是要循序渐进,勤奋学习,刻苦钻研,突出基本概念、分析思路和理论联系实际。通过教学双方的共同努力开拓学习知识的兴趣、广度和深度,圆满完成本课程的学习任务。

第1章 半导体器件

半导体器件是构成各种电子系统的基本元件。学习电子技术,必须首先学习常用半导体器件的基本结构、工作原理和特性参数。本章主要介绍的半导体器件有二极管、三极管、场效应管等。

1.1 半导体的基础知识

各种半导体器件都是以半导体材料为芯片,其导电机理和特性参数都与半导体材料的导电特性密切有关,因此,在学习半导体器件前应对半导体、PN结的基本性能有一定的了解。

1.1.1 本征半导体

半导体是一种具有晶体结构,导电能力介于导体和绝缘体之间的固体材料。经过高度提纯,几乎不含有任何杂质的半导体称为本征半导体。本征半导体的原子在空间按一定规律整齐排列,又称为晶体,所以半导体管也称为晶体管。属于半导体的物质很多,用于制作半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等,其中硅的应用最广泛。它们的共同特点是:导电能力随温度、光照和掺杂的变化而显著变化,有热敏特性、光敏特性和掺杂特性。

(1) 热敏特性: 半导体对温度很敏感, 其电阻率随温度升高而显著减小。该特性对半导体器件的工作性能有不利影响, 但利用这一特性可制成自动控制中有用的热敏元件, 如热敏电阻等。

(2) 光敏特性: 半导体对光照很敏感, 受光照时, 其电阻率会显著减小。利用这一特性可制成光电二极管、光敏电阻等。

(3) 掺杂特性: 半导体对掺入其内的杂质很敏感, 在半导体里掺入微量杂质, 其电阻率会显著减小。如在半导体硅中只要掺入亿分之一的硼, 电阻率就会下降到原来的几万分之一。正因为半导体具有这种特性, 于是人们就用控制掺杂方法制造出多种不同性能、不同用途的半导体器件。

半导体之所以具有上述独特导电特性的根本原因在于半导体的特殊结构。

硅和锗都是Ⅳ价元素, 每个原子的最外层具有 4 个价电子(为 4 价元素), 属于不稳定结构。当硅(或锗)原子结合成晶体时, 它们靠互相共用价电子而连接在一起实现稳定结构。共用价电子使两个相邻原子间产生一种束缚力, 使之不能分开。相邻原子共用价电子形成的束缚作用称为共价键。每个硅(或锗)原子有 4 个价电子, 要分别与 4 个与其相邻原子的价电子组成 4 个共价键。此时, 硅(或锗)原子最外层具有 8 个电子处于较为稳定的状态, 晶体的共价键结构示意图如图 1.1.1 所示。

晶体中的共价键具有较强的结合力, 若无外界能量的激发, 在热力学温度零度(-273°C)时, 价电子无力挣脱共价键的束缚, 晶体中不存在自由电子, 其导电能力相当于绝缘体。

在室温或光的照射下, 因热或光的激发, 少数价电子可以获得足够的能量而挣脱共价键的束缚成为自由电子, 同时在原来共价键上, 留下相同数量的空穴, 这种现象称为本征激发。在本征半导体中, 每激发出来一个自由电子, 就必然在共价键上留下一个空穴。可见, 自由电子和空穴总是相伴而生, 成对出现, 称为自由电子—空穴对, 如图 1.1.2 所示。自由电子带负电荷, 空穴因原子失去电子而产生, 故带正电荷。由于它们都是携带电荷的粒子, 又称为载流子。在没有外加电场作用时, 自由电子和空穴的运动是杂乱无章的, 不会形成电流。

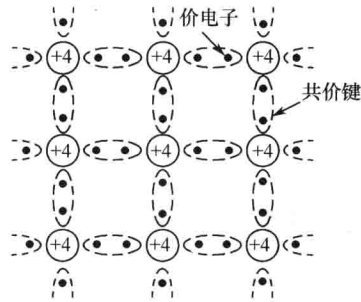


图 1.1.1 硅或锗晶体的共价键结构

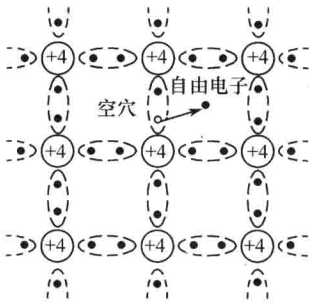


图 1.1.2 本征激发产生自由电子—空穴对

当半导体两端加上外电场时, 半导体中的载流子将产生定向运动, 称为漂移运动。其内部将出现两部分电流: 一部分是自由电子在外电场作用下逆电场方向运动形成的电子电流; 另一部分是空穴在外电场作用下顺电场方向运动形成的空穴电流。由于自由电子和空穴所带的电荷极性相反, 它们的运动方向也是相反的, 而形成的电流方向则是一致的, 即流过外电路的电流等于两者之和。温度越高, 本征激发产生的自由电子—空穴对越多, 即载流子数目越多, 产生的电流越大。

在半导体中,同时存在着电子导电和空穴导电,这是半导体导电方式的最大特点。

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中,由于载流子数量极少,导电能力很弱,故其实用价值不大。如果在其中掺入某些微量杂质元素,就可以大大提高其导电能力,这种掺入了杂质元素的半导体称为杂质半导体。按掺入的杂质不同,杂质半导体可分为两类:N型半导体和P型半导体。

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量V价元素(如磷、砷、锑等),就形成了N型半导体。其结构示意图如图1.1.3(a)所示。杂质原子有5个价电子,其中4个将分别与相邻硅(或锗)原子的价电子组成共价键,多余一个价电子因只受原子的吸引作用,所以很容易挣脱杂质原子而成为自由电子,杂质原子则成为带正电荷的离子,由于这个多余的价电子不在共价键中,因此,在成为自由电子时不会同时产生空穴。在室温下,杂质原子都处于这种电离状态,每个杂质原子产生一个自由电子,致使N型半导体中自由电子的数目显著增加,例如:在本征硅中掺入百万分之一的磷原子,在硅晶体中则会产生 $5 \times 10^{22} \times 10^{-6} = 5 \times 10^{16}$ 个/ cm^{-3} 个自由电子(硅的原子密度为 5×10^{22} 个/ cm^{-3}),而同时由本征激发产生的载流子浓度仅为 1.5×10^{10} 个/ cm^{-3} 。于是半导体中的自由电子数目多于空穴的数目,自由电子成为多数载流子,简称多子;空穴成为少数载流子,简称少子。这种主要靠自由电子导电的半导体称为电子型半导体或N型半导体。

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量III价元素(如硼、铝、镓),就形成了P型半导体。其结构示意图如图1.1.3(b)所示。在组成共价键时,每个杂质原子产生一个空穴。在室温下,空穴能吸引邻近的价电子来填补,杂质原子获得电子变成了带负电荷的离子。由于每个杂质原子都可向晶体提供一个空穴,但同时不会产生自由电子,于是半导体中的空穴数目多于自由电子的数目,空穴成为多数载流子,自由电子为少子。这种主要靠空穴导电的半导体称为空穴型半导体或P型半导体。

应该指出,在杂质半导体中,本征激发所产生的载流子浓度远小于掺杂所带来的载流子浓度。但是掺杂并没有破坏半导体内正、负电荷的平衡状态,它既没有失去电子,也没有获得电子,仍呈电中性,对外是不带电的。

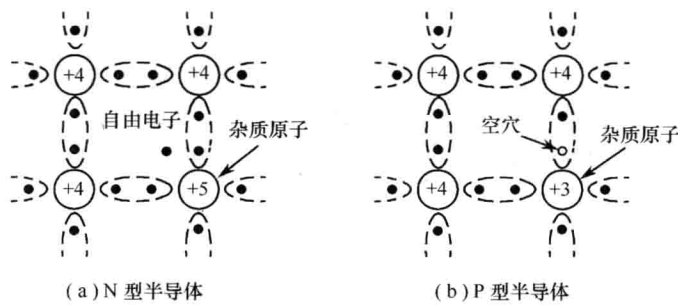


图 1.1.3 杂质半导体结构示意图

1.1.3 PN结

在已形成的N型或P型半导体基片上,再掺入相反类型的杂质原子,且浓度超过原基片杂质原子的浓度,则原N型或P型半导体就会转变为P型或N型半导体,这种转换杂质半

体类型的方法称为杂质补偿。采用这种方法,将 N 型(或 P 型)半导体基片上的一部分转变为 P 型(或 N 型),这两部分半导体分别称为 P 区和 N 区,它们的交界面将形成一个特殊的带电薄层,称为 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、三极管、集成电路等多种半导体器件的基础。

1. PN 结的形成过程

为了便于分析,将 N 区和 P 区简画成如图 1.1.4(a)所示,交界面两侧两种载流子浓度有很大的差异,N 区中电子很多而空穴很少,P 区则相反,空穴很多而电子很少。这样,电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。因此,一些电子要从 N 区向 P 区扩散;也有一些空穴要从 P 区向 N 区扩散。当 P 区中空穴扩散到 N 区后,便会与该区自由电子复合,并在交界面附近的 P 区留下一些带负电的杂质离子。同样,当 N 区中自由电子扩散到 P 区后,便会与该区空穴复合,而在交界面附近的 N 区留下一些带正电的杂质离子。结果是在交界面两侧形成一个带异性电荷的薄层,称为空间电荷区。这个空间电荷区中的正、负离子形成一个空间电场,称它为内电场,如图 1.1.4(b)所示。

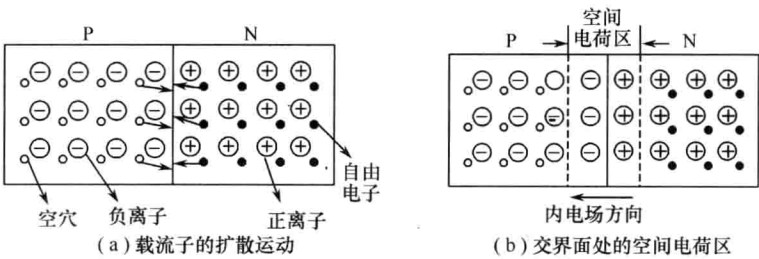


图 1.1.4 PN 结的形成

内电场形成后,一方面其电场会阻碍多数载流子的扩散运动,把 P 区向 N 区扩散的空穴推回 P 区,把 N 区向 P 区扩散的自由电子推回 N 区。另一方面,其电场将推动 P 区少数载流子自由电子向 N 区漂移,推动 N 区少数载流子空穴向 P 区漂移,漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。

由上面分析知道,内电场有两个作用:阻碍多数载流子的扩散运动;有利于少数载流子的漂移运动。

扩散运动和漂移运动是互相联系,又互相矛盾的。在开始形成空间电荷区时,多数载流子的扩散运动占优势,随着扩散运动的进行,空间电荷区逐渐加宽,内电场逐步加强,多数载流子的扩散运动逐渐减弱,少数载流子的漂移运动则逐渐增强;而漂移使空间电荷区变窄,电场减弱,又使扩散容易。而当漂移运动和扩散运动处于动态平衡状态时,空间电荷区宽度、内电场强度不再变化,PN 结形成。

2. PN 结的特性

在 PN 结两端外加电压,称为给 PN 结以偏置,如果使 P 区接电源正极,N 区接电源负极,称为加正向电压,也称为正向偏置,简称正偏,如图 1.1.5(a)所示。这时外加电压对 PN 结产生的电场,称为外电场,其方向与内电场方向相反,从而使空间电荷区变窄、内电场减弱,破坏了扩散运动与漂移运动的动态平衡,扩散运动占了优势,电路中产生了由多数载流子扩散运动形成的较大电流,称为扩散电流或正向电流 I_F ,这时 PN 结呈现的电阻很低,呈导通状态。

如果使 P 区接电源负极,N 区接电源正极,称为加反向电压,也称为反向偏置,简称反偏,如图 1.1.5(b)所示。这时外加电压对 PN 结产生的外电场与内电场方向相同,从而使空间电

荷区变宽,内电场加强,破坏了扩散运动与漂移运动的动态平衡,漂移运动占了优势,电路中产生了由少数载流子漂移运动形成的极小电流,称为漂移电流或反向电流 I_R ,这时 PN 结的电阻很高,呈截止状态。

PN 结加正向电压时导通,产生较大正向电流;加反向电压时截止,产生极小反向电流(可忽略不计)。这就是 PN 结的单向导电性。

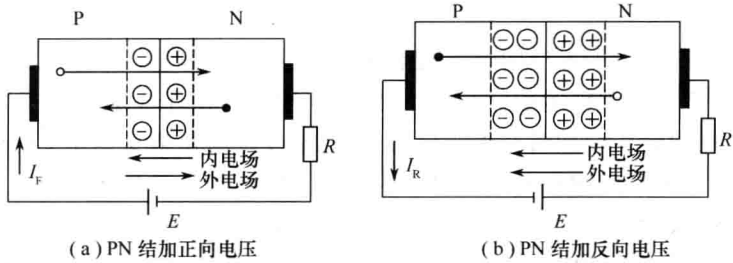


图 1.1.5 外加电压时的 PN 结特性

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管特性与参数

半导体二极管也称为晶体二极管,简称二极管。其内部就是一个 PN 结,其中 P 型半导体引出的电极为阳极,N 型半导体引出的电极为阴极。电路符号如图 1.2.1 所示。箭头方向表示单向导电时,正向电流流动的方向。

常用二极管可按以下几种方式分类:按材料分为硅二极管和锗二极管;按 PN 结面积大小分为点接触型、面接触型;按功能分为整流、稳压、发光、光电、检波、激光和变容二极管等。

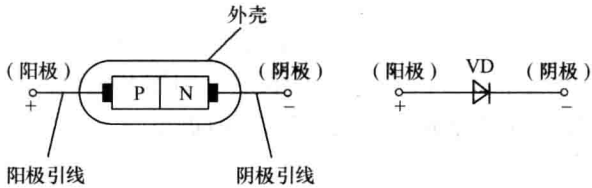


图 1.2.1 二极管的电路符号

1. 二极管的伏安特性

二极管既然是一个 PN 结,它当然具有单向导电性。其导电性能常用伏安特性来表征。

加在二极管两极间的电压 V 和流过二极管的电流 I 之间的关系称为二极管的伏安特性,用于定量描述这两者关系的曲线称为伏安特性曲线。二极管典型伏安特性曲线如图 1.2.2 所示。现分析如下:

(1) 正向特性

正向特性是指二极管加上正向电压时电流与电压之间的关系。当外加正向电压很低时,外电场不足以克服

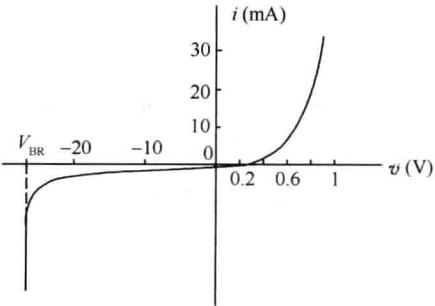


图 1.2.2 二极管伏安特性曲线

内电场对多数载流子扩散运动的阻力,产生的正向电流极小,当正向电压增加到一定值时,随着外加正向电压的增大,内电场被大大削弱,使正向电流迅速增大,二极管处于正向导通状态,其值称为导通电压,用 $V_{D(on)}$ 表示。在正常使用条件下,二极管正向电流在相当大的范围内变化时,二极管两端电压基本上等于导通电压,硅管约为 0.7V,锗管约为 0.2V。此经验数据常作为小功率二极管正向工作时两端直流电压降的估算值。

(2) 反向特性

反向特性是指二极管加上反向电压时电流与电压之间的关系。外加反向电压加强了内电场,有利于少数载流子的漂移运动,形成很小的反向电流。由于少数载流子数量的限制,这种反向电流在外加反向电压增加时并无明显增大,通常硅管为几微安到几十微安;锗管为几十微安到几百微安,故又称反向饱和电流。对应的这个区域称为反向截止区。

当反向电压增大到一定值时,反向电流急剧增大,特性曲线接近于陡峭直线,这种现象称为二极管的反向击穿。之所以产生反向击穿是因为过高的反向电压将产生很强的外电场,可以把价电子直接从共价键中拉出来,使其成为载流子。处于强电场中的载流子能获得足够的动能,又去撞击其他原子,把更多的价电子从共价键中撞击出来,如此形成连锁反应,使载流子的数目急剧上升,反向电流越来越大,最后使二极管反向击穿。发生反向击穿时,二极管两端加的反向电压称为反向击穿电压,用 V_{BR} 表示。二极管反向击穿后,如果反向电流和反向电压的乘积超过容许的耗散功率,将导致二极管热击穿而损坏。

(3) 二极管的伏安特性表达式

在二极管两端施加正、反向电压时,通过管子的电流如图 1.2.2 所示,根据理论分析,该特性曲线可表达为

$$i_D = I_S(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中, i_D 为流过二极管的电流; v_D 为二极管两端电压; V_T 为温度电压当量,且 $V_T = \frac{kT}{q}$, 其中 k 为玻耳兹曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, q 为电子电荷, $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, T 为热力学温度,即绝对温度,室温下(300K) $V_T = 26 \text{ mV}$; I_S 为二极管的反向饱和电流,对于分立器件,其典型值的范围为 $10^{-8} \sim 10^{-14} \text{ A}$,在集成电路中的二极管,其值更小。

① 当二极管正偏时,电压 v_D 为正值,当 v_D 比 V_T 大几倍时,式(1.2.1)中的 $e^{\frac{v_D}{V_T}}$ 远大于 1,括号中的 1 可以忽略。这样二极管的电流 i_D 与电压成指数关系,如图 1.2.2 中横轴右半部分所示。

② 当二极管反偏时,电压 v_D 为负值,若 $|v_D|$ 比 V_T 大几倍时,指数项趋向于 0, $i_D = -I_S$, 如图 1.2.2 中横轴左半部分所示。可见当温度一定时,反向饱和电流是个常数 I_S ,不随外加反向电压的大小而变化。

从二极管伏安特性曲线可以看出,二极管的电压与电流变化不是线性关系,其内阻不是常数,所以二极管属于非线性器件。

2. 二极管的主要参数

二极管的参数,是定量描述二极管性能优劣的质量指标。是设计电路时选择器件的依据。二极管参数较多,均可从手册中查得。现列举几个主要参数。

(1) 最大整流电流(I_F)

最大整流电流是指二极管长时间工作时,允许通过的最大正向平均电流。使用二极管时,

应注意流过二极管的电流不能超过这个数值,否则可能导致二极管损坏。

(2) 最高反向工作电压(V_{RM})

最高反向工作电压是指二极管正常使用时允许加的最高反向电压。数值通常为二极管反向击穿电压 V_{BR} 值的一半。使用中不要超过此值,否则二极管有被击穿的危险。

(3) 反向电流(I_R)

在室温下,管子未被击穿时的反向电流值。其大小是温度的函数,其值越小,管子的单向导电性越好。

1.2.2 二极管的电路模型

当二极管两端所加电压变化很大时,称其为大信号工作状态。这时,可将二极管伏安特性近似地以两条折线表示如图 1.2.3(a)所示,折线在导通电压 $V_{D(on)}$ 处转折,直线斜率的倒数 R_D 称为二极管的导通电阻,显然

$$R_D = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

R_D 表示大信号工作下二极管呈现的电阻值,因二极管正向特性曲线很陡,其导通电阻极小。若把图 1.2.3(b)曲线定义为理想二极管特性,即正向偏置时二极管压降为 0,反向偏置时二极管电流为 0,便可将二极管用图 1.2.3(c)所示电路等效。通常,可将阻值很小的导通电阻 R_D 忽略,则二极管等效电路如图 1.2.3(d)所示。

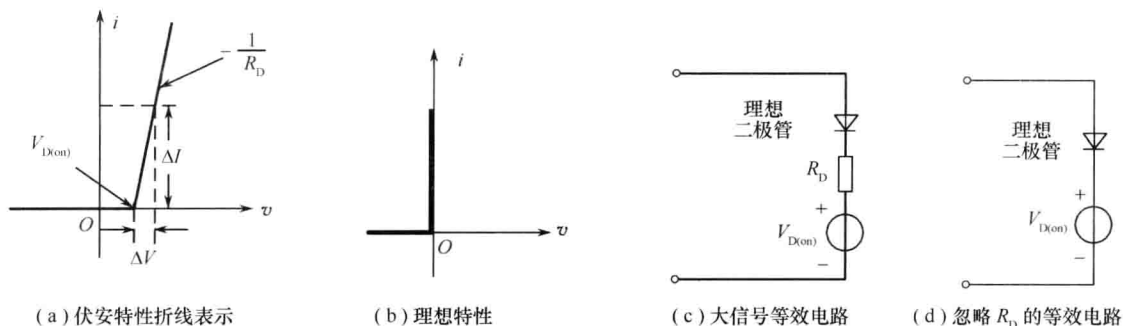


图 1.2.3 二极管大信号工作

1.2.3 二极管应用举例

二极管应用范围很广,利用其单向导电性,可以构成整流、检波、限幅和钳位等电路。

【例 1.2.1】二极管整流电路如图 1.2.4(a)所示,VD 为理想硅二极管,已知输入 v_i 为正弦波电压,试画出输出电压 v_o 的波形。

解:由于二极管是理想二极管,根据单向导电性,当 v_i 正半周时,VD 导通相当于短路线, $v_o = v_i$; v_i 负半周时,VD 截止相当于开路, $v_o = 0$ 。由此画出输出的波形如图 1.2.4(b)所示。此电路称为二极管半波整流电路。

【例 1.2.2】二极管限幅电路如图 1.2.5(a)所示,VD₁、VD₂的导通电压为 0.7V,试求在图示输入信号 v_i 作用下,输出电压 v_o 的波形。

解:在图示大信号输入作用下,将二极管以其相应的等效电路代替,得图 1.2.5(b)。由图可知, v_i 正半周电压小于二极管导通电压 0.7V 时,VD₁、VD₂均截止相当于开路, $v_o = v_i$; v_i 正

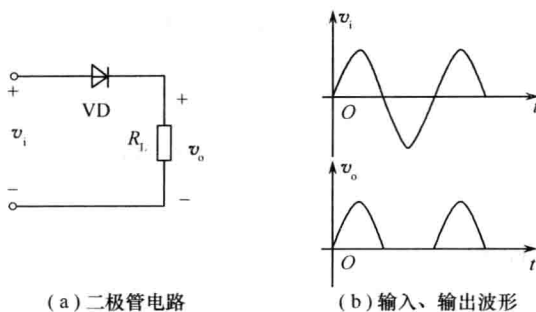


图 1.2.4 例 1.2.1 电路

半周超过导通电压 0.7V 时, VD_1 导通、 VD_2 截止开路, $v_o = 0.7\text{V}$; v_i 负半周时, 情况相反, VD_1 截止开路、 VD_2 导通 $v_o = -0.7\text{V}$ 。由此可得出输出波形如图 1.2.5(c) 所示。此电路称为双向限幅电路。

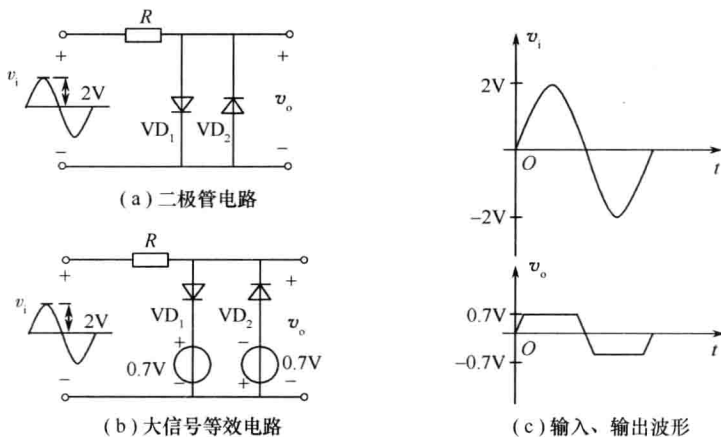


图 1.2.5 例 1.2.2 电路

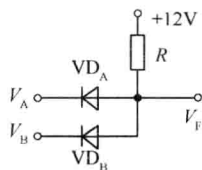


图 1.2.6 例 1.2.3 电路

【例 1.2.3】 电路如图 1.2.6 所示, VD_A 、 VD_B 的导通电压为 0.7V , 若 $V_A = 3\text{V}$ 、 $V_B = 0\text{V}$ 时, 求输出端的电压 V_F 。

解: 当两个二极管阳极连在一起时, 阴极电位较低的二极管优先导通。图中 $V_A > V_B$, 所以 VD_B 抢先导通, $V_F = 0.7\text{V}$ 。 VD_B 导通后, VD_A 反偏而截止。在这里 VD_B 起钳位作用, 把输出端的电位钳制在了 0.7V 上。

1.2.4 特殊二极管

二极管的基本特性是单向导电性, 除此之外, 还具有击穿特性、变容特性等, 利用这些特性工作的二极管统称为特殊二极管。

1. 稳压二极管

稳压管是一种特殊的晶体二极管, 是利用 PN 结的反向击穿特性来实现稳压作用的。在