

新编电气与电子信息类本科规划教材·电子电气基础课程

电工学 (II)

曾令琴 赵胜会 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

新编电气与电子信息类本科规划教材·电子电气基础课程

电 工 学

(Ⅱ)

曾令琴 赵胜会 主编

電 子 工 業 出 版 社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电工学(Ⅱ)以培养学生分析问题、解决问题能力和实验动手能力为主导,将模拟电子技术、数字电子技术和计算机相关知识前后呼应并有机地融为一体,是技术性很强的一本通用教材,全书内容共分8章:第1章半导体及其常用器件,第2章基本放大电路,第3章集成运算放大电路,第4章直流稳压电源,第5章组合逻辑电路,第6章时序逻辑电路,第7章存储电路和第8章数/模转换器和模/数转换器。本书配有高质量的教学课件和章后能力检测题详细解析。全书行文流畅,内容先进,概念清楚,注重实际,目标明确,便于自学。不但可以作为普通本科院校的教材,也可供相关工程技术人员学习或作为电子技术爱好者的参考。

图书在版编目(CIP)数据

电工学. 2 / 曾令琴, 赵胜会主编. —北京: 电子工业出版社, 2010. 9

ISBN 978-7-121-11668-1

I. ①电… II. ①曾… ②赵… III. ①电工学—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 163459 号

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 北京京师印务有限公司
装 订:

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: 787×1 092 1/16 印张: 14 字数: 358 千字

印 次: 2010 年 9 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 28.00 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 zltz@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

电工学是高等学校机电类和其他非电类各专业的技术基础课程。作为汽车电子、仪表测量及控制、单片机及应用、微机原理及核电子学等众多课程的先修课程,在专业中占有相当重要的地位。

电工学(Ⅱ)是电工学的电子技术部分,书中内容大多为电子技术的传统内容,在继承的基础上保留了其经典成分,并根据电子技术的发展作了一定篇幅的补充和修改。第1章至第4章是模拟电子技术,其中第1章介绍了二极管、三极管、晶闸管的结构和特性;第2章介绍了几种基本放大电路及其工作原理与特点、用途;第3章是集成运算放大电路的内容,介绍了理想集成运放的概念及其特征、线性集成运放的几个典型应用、非线性集成运放的几个典型应用等;第4章是直流稳压电源,主要讨论了二极管整流电路、电容滤波电路、串联型稳压电源、开关型稳压电源的原理及集成稳压模块。

数字电子技术包括计算机相关知识也有4章。第5章组合逻辑电路介绍了逻辑函数的逻辑代数化简法和卡诺图化简法,集成TTL门电路和CMOS门电路,按照应用型人才培养要求把各种集成电路的外部引脚功能作为重点讨论对象;第6章时序逻辑电路在介绍触发器的基础上,剖析了由触发器构成的计数器和寄存器的原理,并重点讨论了计数器和寄存器电路的分析及实际工程应用;第7章存储电路讨论了各种只读存储器和随机存取存储器原理,在此基础上,介绍了各种集成存储器及存储电路的扩展方法,并着重介绍了PLD相关应用电路;第8章在讨论数/模转换器和模/数转换器原理的基础上,着重介绍了集成数/模转换器和集成模/数转换器的应用。

电工学(Ⅱ)课程实践性很强,学习时应注意理论联系实际,重视实际动手能力的训练。各校可在自身实验条件下尽量开设一些相应的实验课。而计算机仿真和虚拟仪器的应用可以弥补实验设备和实验课时的不足,是实现电工学课程研究型教学的良好手段。为此,我们编写了《Multisim 电路仿真的学习和实践》一书,详细地介绍了Multisim(可推广应用Multisim7.0以上版本)电路仿真软件的学习使用方法,对照电工学各章内容编排了相应的电路仿真实验和一些设计型仿真训练,建议在实际教学过程中把电路仿真穿插到各章内容中,注重训练学生对虚拟仪器的使用,这对提高学生的学习兴趣和自学能力十分有益。

本教材由曾令琴副教授、赵胜会副教授担任主编,向小民副教授、罗建学副教授参编。曾令琴编写了本书上册的第1章、第2章、第4章;赵胜会编写了第7章、第3章;向小民、罗建学共同编写了第5章、第6章和第8章。本书的编写力求文字简练、条理清晰,基本原理多用图形说明。编者还为本书配套了高质量的易于操作的教学用电子课件、章后检测题详

细解析。

本书虽然精心编排,但也难免会出现一些不妥和错漏之处,敬请广大读者及时批评指正,以利修改。

编者
2010年6月

目 录

第 1 章 半导体及其常用器件	1
1.1 半导体的基本知识	2
1.1.1 半导体的独特性能	2
1.1.2 本征半导体与杂质半导体	2
1.1.3 PN 结	5
1.1.4 PN 结的单向导电性	6
1.2 半导体二极管	7
1.2.1 二极管的结构和类型	7
1.2.2 二极管的伏安特性	8
1.2.3 二极管的主要参数	9
1.2.4 二极管的应用举例	9
1.3 特殊二极管	10
1.3.1 稳压管	11
1.3.2 发光二极管	11
1.3.3 光电二极管	12
1.4 双极型三极管	13
1.4.1 双极型晶体管的基本结构和类型	13
1.4.2 晶体管的电流分配与放大作用	14
1.4.3 晶体管的特性曲线	15
1.4.4 晶体管的主要参数	17
1.5 单极型三极管	19
1.5.1 MOS 管的基本结构	19
1.5.2 工作原理	19
1.5.3 MOS 管使用注意事项	20
1.6 晶闸管(SCR)	21
1.6.1 晶闸管的结构组成	21
1.6.2 晶闸管的工作原理	22
1.6.3 晶闸管的伏安特性	23
1.6.4 晶闸管的主要技术参数	24
1.6.5 晶闸管的使用注意事项	25
本章小结	26
检测题一	27
第 2 章 基本放大电路	32
2.1 基本放大电路的概念及工作原理	33
2.1.1 放大电路的组成原则	33

2.1.2	共发射极放大电路的组成及各部分作用	34
2.1.3	共发射极放大电路的工作原理	35
2.2	基本放大电路的静态分析	36
2.2.1	放大电路静态分析的估算法	36
2.2.2	用图解法确定静态工作点	37
2.2.3	分压式共发射极放大电路静态工作点的估算	39
2.3	基本放大电路的动态分析	40
2.3.1	共发射极放大电路的动态分析	40
2.3.2	微变等效电路法	40
2.4	共集电极放大电路	43
2.4.1	电路的组成	43
2.4.2	动态分析	44
2.4.3	电路特点和应用实例	45
2.5	功率放大器和差动放大电路简介	47
2.5.1	功率放大器的分类	47
2.5.2	功率放大器的特点及技术要求	47
2.5.3	功放电路中的交越失真	48
2.5.4	差动放大电路	49
2.6	放大电路中的负反馈	50
2.6.1	反馈的基本概念	50
2.6.2	负反馈的基本类型及其判别	51
2.6.3	负反馈对放大电路性能的影响	52
	本章小结	52
	检测题二	53
第3章	集成运算放大电路	58
3.1	集成运算放大器	59
3.1.1	集成运算放大器概述	59
3.1.2	集成运放芯片引脚功能及元器件特点	60
3.1.3	集成运算放大器的主要技术指标	61
3.1.4	理想集成运放及其传输特性	62
3.2	集成运放的线性应用	63
3.2.1	反相比例运算电路	63
3.2.2	同相比例运算电路	64
3.2.3	双端输入运算电路	65
3.2.4	微分运算电路	65
3.2.5	积分运算电路	66
3.2.6	集成运放线性应用实例	66
3.3	集成运放的非线性应用	67
3.3.1	集成运放应用在非线性的特点	67
3.3.2	电压比较器	68

3.3.3 文氏桥正弦波振荡器	70
3.4 集成运算放大器的选择、使用和保护	73
3.4.1 集成运算放大器的选择	73
3.4.2 集成运算放大器的使用要点	73
3.4.3 集成运算放大器的保护	75
本章小结	75
检测题三	76
第4章 直流稳压电源	81
4.1 小功率整流滤波电路	82
4.1.1 整流电路	82
4.1.2 滤波电路	85
4.2 稳压电路	87
4.2.1 直流稳压电源的主要性能指标	88
4.2.2 串联型稳压电路	88
4.2.3 并联型稳压电路	89
4.2.4 开关稳压电路	90
4.2.5 调整管的选择	91
4.2.6 稳压电路的过载保护	92
4.3 集成稳压器	93
4.3.1 固定输出三端集成稳压器	93
4.3.2 可调输出三端集成稳压器	96
4.3.3 使用三端集成稳压器时应注意的事项	98
本章小结	99
检测题四	100
第5章 组合逻辑电路	103
5.1 门电路	104
5.1.1 模拟电路和数字电路的区别	104
5.1.2 基本逻辑门	105
5.1.3 复合逻辑门	109
5.1.4 集成逻辑门	110
5.1.5 门电路使用注意事项	116
5.2 组合逻辑电路的分析基础	118
5.2.1 计数制与代码	118
5.2.2 逻辑函数的化简	122
5.2.3 组合逻辑电路的分析与设计	126
5.3 常用组合逻辑电路	129
5.3.1 编码器	129
5.3.2 译码器	132
5.3.3 数值比较器	136
5.3.4 数据选择器	137

本章小结	138
检测题五	140
第 6 章 时序逻辑电路	145
6.1 触发器	146
6.1.1 RS 触发器	146
6.1.2 JK 触发器	150
6.1.3 D 触发器	152
6.1.4 T 触发器和 T' 触发器	153
6.2 计数器	154
6.2.1 时序逻辑电路的分析	154
6.2.2 电路的三种工作状态	156
6.2.3 集成计数器及其应用	161
6.3 寄存器	166
6.3.1 寄存器概述	166
6.3.2 数码寄存器	166
6.3.3 移位寄存器	167
6.3.4 移位寄存器的应用	168
6.4 555 定时器	171
6.4.1 555 定时器电路及其功能	171
6.4.2 555 定时器应用举例	173
本章小结	175
检测题六	176
第 7 章 存储电路	183
7.1 存储器概述	183
7.1.1 存储器的定义与分类	184
7.1.2 存储器的主要性能指标	184
7.1.3 存储器的发展趋势	185
7.2 随机存取存储器(RAM)	187
7.2.1 RAM 的功能及结构	187
7.2.2 RAM 的存储单元电路	188
7.2.3 RAM 的容量扩展	190
7.3 可编程逻辑器件	190
7.3.1 只读存储器 ROM 的基本概念	190
7.3.2 可编程逻辑器件的存储单元	191
7.3.3 可编程逻辑器件	192
本章小结	196
检测题七	197
第 8 章 数/模转换器和模/数转换器	200
8.1 数/模转换器(DAC)	200
8.1.1 DAC 的基本概念	200

8.1.2	DAC 的工作原理	202
8.1.3	集成数/模转换器—DAC0832	204
8.2	模/数转换器(ADC)	206
8.2.1	ADC 的基本概念	206
8.2.2	ADC 电路的形式和工作原理	208
8.2.3	集成 ADC0809 简介	209
本章小结		210
检测题八		211
参考文献		214

第1章 半导体及其常用器件

半导体器件是20世纪50年代初发展起来的电子器件,具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等优点。现代化的电子设备都是以半导体器件和集成电路为基础的,因此半导体器件是近代电子学的重要组成部分。半导体器件中,二极管、晶体管和场效应管是构成集成电路的基本单元,被广泛应用在各种电子电路中。近年来,集成电路特别是大规模和超大规模集成电路的出现,使各种工业自动控制设备和电子设备在微型化、可靠性等方面大步前进。为了正确和有效地运用半导体器件,相关工程技术人员必须首先对半导体器件及其工作原理和性能有一个基本的认识。



工程背景

半导体单晶材料硅和锗的发明及二极管、晶体管等半导体器件的问世,导致了电子工业革命。目前,硅单晶的年产量已达19250吨以上,8~12英寸的硅单晶已运用于工业生产;18英寸的硅单晶已研制成功;8英寸硅片已广泛用于大规模集成电路的生产;12英寸65nm工艺也已投入工业生产,预计2013年为32nm,2016年为22nm,2022年为10nm。

伴随着半导体技术的飞速发展,半导体器件越来越广泛地应用于家电、通信、网络、工业制造、航空、航天和国防等各个领域。实际的需要必将极大地推动器件的不断创新。微电子学中的超大规模集成电路技术将在电子器件的制作中得到更广泛的应用;具有高载流子迁移率、强的热电传导性及宽带隙的新型半导体材料,如砷化镓、碳化硅、人造金刚石等的运用将有助于开发新一代高结温、高频率、高动态参数的器件。从结构看,器件将复合型、模块化;从性能看,发展方向将是提高容量和工作频率、降低通态压降、减小驱动功率、改善动态参数和多功能化;从应用看,MPS电力整流管、MOSFET、IGBT、MCT是最有发展前景的电子器件。

半导体器件已经进入当今社会生活的方方面面,在我们的各行各业,发挥着难以想象的作用。小到收音机,大到飞机、舰船,很多零部件都得使用半导体。如果没有半导体器件,我们将失去信息化和电气化的绝大多数成就。

可以预见,电子器件的发展将会日新月异,电子器件的未来将充满生机。为了正确和有效地运用各种各样的半导体产品,相关工程技术人员须对半导体的特殊性能、PN结的形成及其单向导电性有一定的了解和认识,并对晶体二极管、晶体三极管、晶闸管这些半导体器件的结构原理与电压、电流关系及其性能等有一个认识。而这些认识需要我们去了解和掌握一定的半导体基本知识。



自学提示

半导体器件是电子电路中的核心元件,电路的功能和性能与所有器件的特性密切相关。通过本章学习,要求了解半导体的导电特性。理解PN结及其单向导电性。熟悉半导体二极管的伏安特性及主要参数。了解稳压管的工作原理、伏安特性及主要参数。深刻理解晶体管的电流放大原理,熟悉其输入和输出特性及主要参数。了解场效应管的工作原理及主要参数。理解晶闸管的工作原理,熟悉晶闸管的应用。初步掌握工程技术人员必须具备的分析电子电

路的基本理论、基本知识和基本技能。

1.1 半导体的基本知识



学习指南

理解本征半导体的光敏性、热敏性和掺杂性；了解空穴、电子、载流子等名词的含义；熟悉 P 型和 N 型两类半导体及其特点；掌握 PN 结的单向导电特性。

1.1.1 半导体的独特性能

在《电工学》(I)一书中已经提到,自然界的物质根据导电性能的不同,一般可分成导体、绝缘体和半导体三大类。其中半导体的导电能力虽然介于导体和绝缘体之间,但在不同条件下,半导体的导电能力有着明显的差异。例如,有些半导体对温度的反应特别灵敏,环境温度增高时,它的导电能力要增强很多,利用这种特性通常可做成各种热敏元件。还有些半导体,当受到光照时,其导电能力变得很强,当无光照时,又变得像绝缘体那样不导电,利用这种特性又可制成各种光电元件。半导体还有一个更显著的特点,就是在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质元素后,其导电能力可增加至几十万倍乃至几百万倍。例如,在单晶硅中掺入百万分之一的硼后,其电阻率就可由 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右。人们正是利用半导体的这些独特性能,制成了半导体二极管、稳压管、晶体三极管、场效应管及晶闸管等不同的电子器件。

1.1.2 本征半导体与杂质半导体

半导体之所以有如此多的独特性能,取决于半导体内部结构和导电机理。

1. 本征半导体

在半导体物质中,目前用得最多的是硅和锗,它们都是四价元素,其原子核最外层有 4 个价电子,因此称为四价元素(即原子结构中最外层有 4 个价电子),如图 1.1 所示。

天然的硅和锗材料是不纯净的,但经过提纯工艺后,它们不再含有杂质且无晶格缺陷,只由同一种原子构成“单晶体”,我们就把这种晶格结构完全对称的纯净半导体称为本征半导体。

图 1.2 所示的本征晶体硅中,每个硅原子都被邻近的 4 个硅原子所包围,组成共价键结构(图中表示的是二维结构,实际上半导体晶体结构是三维的)。

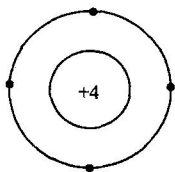


图 1.1 硅和锗原子的简化模型

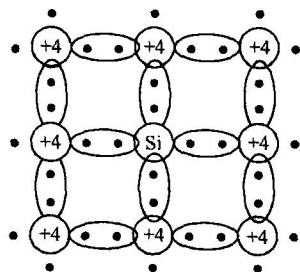


图 1.2 单晶硅的共价键结构示意图

单晶硅的共价键结构虽然具有 8 个价电子而处于相对稳定状态,但这 8 个价电子并不像绝缘体中的价电子被原子核束缚得很紧。当本征半导体受到光照或是温度升高的影响时,共价键中的部分价电子就会挣脱束缚进入能量较高的空间,成为可以导电的自由电子载流子,同时,共价键中由于缺少一个电子而形成带正电的空位,称为空穴。显然,游离到空间的自由电子和共价键中的空穴总是一一对应的,称为电子—空穴对。

在本征半导体中,由于温度的影响而产生电子—空穴对的现象称为**本征激发**,如图 1.3 所示。

由本征激发产生的自由电子载流子在外电场作用下可以产生定向运动而形成宏观电流,通常称为电子导电。在本征激发现象出现的同时,受温度的影响,共价键中的另外一些价电子在获得足够能量后也会挣脱束缚,但它们不是游离到晶体的空间成为自由电子,而是“跳进”相邻原子由本征激发而出现的空穴中。当这些价电子填补空穴的同时,它们也会留下一些新的空穴,而这些新的空穴又会被邻近共价键中的另外一些价电子来填补上,这些填补空穴的价电子又会留下新的空位由相邻价电子来填补……如此就会形成一个价电子定向连续的填补运动,如图 1.4 所示。

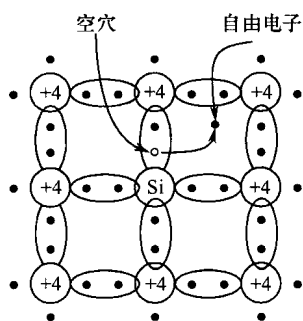


图 1.3 本征激发产生的电子空穴对

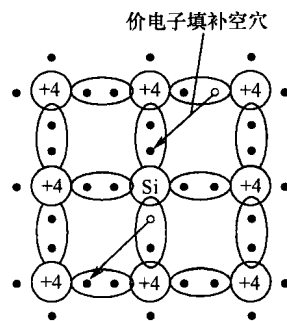


图 1.4 复合现象形成的空穴载流子

本征半导体内部的这种复合运动不同于本征激发运动,本征激发的主要导电方式是完全脱离了共价键的自由电子载流子逆着电场方向而形成的定向迁移,而复合运动的导电方式是空穴载流子的定向迁移,空穴载流子带正电,沿着电场方向定向运动形成电流。虽然填补空穴的价电子也是逆着电场力的方向做定向迁移,但它们填补空穴的运动始终在共价键中进行。为区别于本征激发下自由电子载流子的运动,我们把价电子填补空穴看成是空穴着电场方向而形成的定向迁移。

注意:由于运动具有相对性,共价键中价电子依次“跳进”空穴进行填补,也可看作空穴依次反方向移动,所以人们虚拟出了沿电场方向定向迁移的空穴载流子运动,实际上空穴本身是不能移动的。这就好比电影院有位子的人依次向前挪动,但看起来就像空座位依次向后移动,实际上座位并没有挪动一样。

复合时产生的能量以电磁辐射或晶格热振动的形式释放。在一定温度下,电子—空穴对的产生和复合同时存在并达到动态平衡,此时本征半导体具有一定的载流子浓度,从而具有一定的电导率。

显然,加热或光照会使半导体发生本征激发或光激发,从而产生更多的电子—空穴对,使得载流子浓度增加,电导率增加。半导体热敏电阻和光敏电阻等半导体器件就是根据此原理制成的。但常温下本征半导体的电导率仍是比较小的,而且两种载流子的浓度对温度变化敏感,所以工程实际中很难对其进行控制,因此本征半导体的直接实际应用并不多。

归纳:本征半导体的特点是电子浓度=空穴浓度;缺点是载流子少,导电性差,温度稳定性差!

2. 半导体的导电机理

金属导体中存在大量的自由电子,这些自由电子在电场作用下可以定向移动形成电流,这就是金属导体的导电机理。即金属导体中只有自由电子一种载流子参与导电。半导体的导电机理则不同于金属导体。由上述分析可知,半导体中同时存在两种载流子,一种是带负电的自由电子载流子,另一种是带正电的空穴载流子。所以当半导体在电场作用下,半导体中就会同时有两种载流子参与导电,这一点正是半导体区别于金属导体导电机理的本质差别,也是半导体导电方式的独特之处。

半导体中的自由电子和空穴总是成对出现的,即半导体中的电子浓度等于空穴浓度。但值得注意的是:常温($T=300\text{K}$)下,本征半导体硅和锗中的载流子数目相对金属导体中的载流子数量而言很少,但半导体的载流子浓度与温度有着密切的关系。实验证明:大约温度每升高 8°C ,硅晶体中电子的浓度约增加一倍;温度每升高 12°C ,锗晶体中的电子浓度约增加一倍。即温度是影响半导体性能的一个重要因素。也就是说,在一定温度下,半导体中的载流子总是维持一定的数目。温度越高,载流子数目越多,导电性能也就越好。实际上,在外因影响下而激发产生的电子-空穴对浓度还是不高,常温下一般为每立方米硅的总电子数的 10^{13} 分之一。因此受温度影响,半导体的导电性能虽然大大提高,但与金属导体相比,本征半导体的导电能力还是很差的。

3. 杂质半导体

在本征半导体中掺入某些微量元素作为杂质,可使本征半导体的导电性能发生显著变化。掺入的杂质主要是三价元素或五价元素。掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。通常杂质是按百万分之一数量级的比例在本征半导体中掺杂的。

例如,在纯净硅中掺入微量的五价元素磷,由于掺入的数量极少,所以本征半导体的共价键结构基本不变,只是共价键结构中某些位置上的硅原子被磷原子取代,当这些磷原子与相邻的4个硅原子组成共价键时,就会多出一个电子,这个多出的电子若得到外界能量时,比其他共价键上的电子更容易挣脱共价键的束缚而成为自由电子。所以在这种半导体中使得共价键结构中的电子数目大大增多,由此导电能力显著提高。当这些多余电子挣脱原子核束缚而成为自由电子后,在它们的位置上不能形成空穴,因此空穴数量相对很少。我们把这种多电子的掺杂质半导体称为电子型半导体,电子型半导体中的电子因其数量多而称为多数载流子,空穴数量少称为少数载流子,而多余电子移走后的少电子杂质原子成为了不能移动的带正电离子。电子型半导体又称为N型半导体。其共价键结构如图1.5所示。

若在本征硅中掺入微量的三价元素杂质,如硼(或镓)等,这些硼原子与硅原子组成共价键时,因缺少一个电子,在晶体中自动产生一个空位。当相邻共价键上的价电子受到热激发或在其他外部能量作用下,极易“跳入填补”这些空位,使得这些三价的杂质原子由于多电子而成为不能移动的带负电离子,我们把这些接受电子的三价杂质原子称为受主杂质。而从共价键结构中跑掉价电子的硅原子由于少电子而形成空穴,如图1.6所示。

因此,这种杂质半导体中的空穴数量大大增加。空穴由于数量很多而称为多数载流子,由本征激发而产生的自由电子数量极少而称为少数载流子。这种掺杂质的半导体由于空穴数量

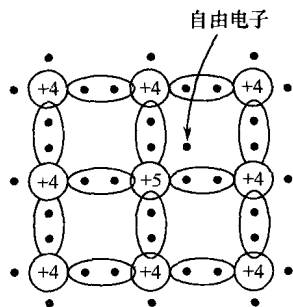


图 1.5 N 型半导体

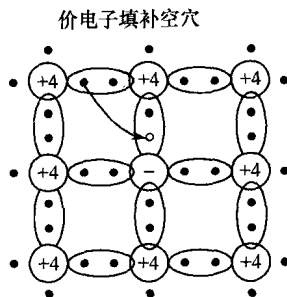


图 1.6 P 型半导体

大于自由电子数量而被称为**空穴型半导体**，在电子技术中空穴半导体也称为**P型半导体**。

无论是 N 型半导体还是 P 型半导体，其导电能力取决于掺入的杂质元素的浓度。显然，掺杂质浓度越多，杂质半导体的导电能力提高越多。例如，在室温情况下，当本征硅中的杂质浓度等于 10^{-6} 数量级时，多数载流子的数目将增加几十万倍。

1.1.3 PN 结

杂质型半导体的导电能力虽然比本征半导体大大增强，但它们还不能称为电子技术中常用的**半导体器件**。在电子技术中，PN 结是一切半导体器件的“元概念”和技术起始点，其形成过程如下：

采用不同的掺杂工艺，在一块完整的半导体硅片的两侧分别注入三价元素和五价元素，从而使单晶硅片的一侧形成 P 区，另一侧形成 N 区。由于 P 区的多数载流子是空穴，少数载流子是电子；N 区的多数载流子是电子，少数载流子是空穴，因此在交界面两侧明显地存在着两种载流子的浓度差。由于浓度上的差异，N 区的电子必然越过界面向 P 区扩散，并与 P 区界面附近的空穴复合而消失，于是在 N 区的一侧留下了一层不能移动的受主杂质的正离子；同样，P 区的空穴也会由于浓度差而越过界面向 N 区扩散，并与 N 区界面附近的电子复合而消失，在 P 区的一侧，也会留下一层不能移动的受主杂质负离子。这样，两区交界外就出现了由不能移动的带电杂质离子组成的**空间电荷区**，空间电荷区形成的**内电场**方向由 N 区指向 P 区。随着扩散的继续进行，空间电荷区不断加宽，内电场随之增强，内电场的增强不但对多数载流子的扩散起阻碍作用，同时促使了少数载流子的漂移。当扩散和漂移达到动态平衡时，空间电荷区的宽度不再发生变化，这个相对稳定的空间电荷区就称为**PN 结**，如图 1.7 所示。

在空间电荷区域内，多数载流子或已扩散到对方，或被对方复合掉了，即多数载流子被基本消耗尽了，因此也常把空间电荷区称为**耗尽层**。空间电荷区所构成的内电场是由不能移动的正、负带电离子构成的，这些带电离子由于不能移动而不会参与导电，因此空间电荷区的电阻率很高，显然这个高电阻仅对多数载流子扩散运动起阻碍作用，从这个意义上又把 PN 结称为对多数载流子扩散运动的**阻挡层**。

多数载流子的扩散运动和少数载流子的漂移运动既相互联系，又相互矛盾。在 PN 结形

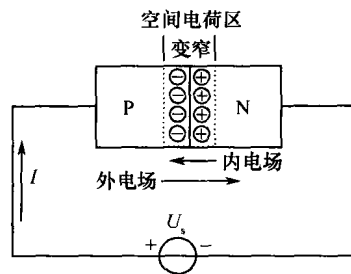


图 1.7 PN 结的形成示意图

成的初始阶段,扩散运动占优势。随着扩散运动的进行,PN 结不断加宽,内电场逐步加强;内电场的加强又阻碍了扩散运动,使得多子的扩散逐步减弱。扩散运动的减弱显然伴随着漂移运动的不断加强。最后,当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时,将形成一个稳定的空间电荷区,PN 结形成。

空间电荷区内基本不存在导电的载流子,因此导电率很低而相当于介质。在 PN 结两侧的 P 区和 N 区则导电率相对较高,所以相当于导体。可见,PN 结具有电容效应,这种效应称为 PN 结的结电容。

1.1.4 PN 结的单向导电性

PN 结在无外加电压的情况下,扩散运动和漂移运动处于动态平衡,动态平衡时通过 PN 结的电流为零。这时,让一个电源的正极与 P 区相连,负极与 N 区相接,由于 PN 结是高阻区,而 P 区和 N 区的电阻又很小,所以这个正向的外部电压可以认为几乎全部加在 PN 结两端。电源电压形成的外电场,其方向与 PN 结的内电场相反。在外电场推动下,N 区的电子要向 P 区交界处扩散,并与原来空间电荷区的正离子中和,使空间电荷区变窄。同样,P 区的空穴也要向 N 区扩散,并与原来空间电荷区的负离子中和,使空间电荷区变窄。外电场的这一作用结果显然削弱了内电场,PN 结原有的动态平衡被打破。于是,扩散运动超过了漂移运动,在外电场的作用下,扩散继续进行。与此同时,电源不断向 P 区补充正电荷,向 N 区补充负电荷,结果在电路中形成了较大的正向电流,而且正向电流是随着正向电压的增大而增大的。

把上述过程进行归纳:当 PN 结正向偏置时,外加电场与内电场方向相反,造成多数载流子在外电场的作用下进入空间电荷区与带电离子相复合使其数量减少,使 PN 结变窄、内电场被削弱。内电场被削弱的结果,显然有利于扩散运动的进行,因此多数载流子顺利通过 PN 结,形成较大的正向电流,即 PN 结对正向电流呈低电阻状态,这种情况在电子技术中称为 PN 结具有正向导通作用。

如果把电源的正、负极位置换一下,则 PN 结处于反向偏置。反向电压产生的外加电场,其方向与内电场的方向相同。在外电场作用下,P 区的多子空穴和 N 区的多子自由电子被从 PN 结附近拉走,造成 PN 结加宽、内电场增强,使 PN 结内电阻增大,又打破了 PN 结原来的平衡。显然,反向偏置时的漂移运动大于扩散运动。这时通过 PN 结的电流,主要是少子形成的漂移电流,称为反向电流。由于在常温下,少数载流子的数量不多,故反向电流很小,而且当外加电压在一定范围内变化时,它几乎不随外加电压的变化而变化,因此反向电流又称为反向饱和电流。反向饱和电流由于很小一般可以忽略,因此可认为 PN 结处于截止状态。值得注意的是,由于本征激发随温度的升高而加剧,导致电子—空穴对增多,因而反向电流将随温度的升高而成倍增长。反向电流是造成电路噪声的主要原因之一,因此,在设计电路时,必须考虑温度补偿问题。

把上述过程进行归纳:当 PN 结反向偏置时,外加电场与内电场方向相同,PN 结反向偏置时同样破坏了扩散运动与漂移运动的动态平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,使得空间电荷区变窄、内电场增强。内电场增强的结果,使多数载流子的扩散运动更难以进行。但加强了少数载流子的漂移运动。由于少数载流子数量很少,且常温下数量基本不变,因此漂移运动形成的反向电流基本上是饱和的极小的电流,即 PN 结对反向电流呈高阻

状态,这种情况在电子技术中称为 PN 结具有反向阻断作用。

综上所述,PN 结正向偏置时,有较大的正向电流流过,相当于 PN 结导通;反向偏置时,通过的反向电流很小(工程上常常认为反向电流为零),相当于 PN 结截止。PN 结的这种“正向导通,反向阻断”特性称为单向导电性。



思考与练习

1. 半导体的导电机理和导体的导电机理有什么区别?
2. 杂质半导体中的多数载流子和少数载流子是怎样产生的?为什么 P 型半导体中的空穴多于电子?
3. 由于 N 型半导体中多数载流子是电子,因此说这种半导体是带负电的。这种说法正确吗?
4. 空间电荷区的电阻率为什么很高?
5. 试述半导体 PN 结的单向导电性。

1.2 半导体二极管



学习指南

了解半导体二极管的结构类型与适用场合;熟悉二极管的伏安特性、硅管和锗管的“死区电压”及正向导通压降的概念;了解二极管主要参数的意义。

1.2.1 二极管的结构和类型

半导体二极管是由 PN 结加上相应的电极引线,然后用管壳封装而成。二极管的电路符号如图 1.7(c)所示,P 区引出的电极为正极(阳极),N 区引出的电极为负极(阴极)。

半导体二极管有许多类型,按材料不同可分为硅二极管和锗二极管;按结构不同又可分为点接触型和面接触型两类,如图 1.8(a)、(b)所示。

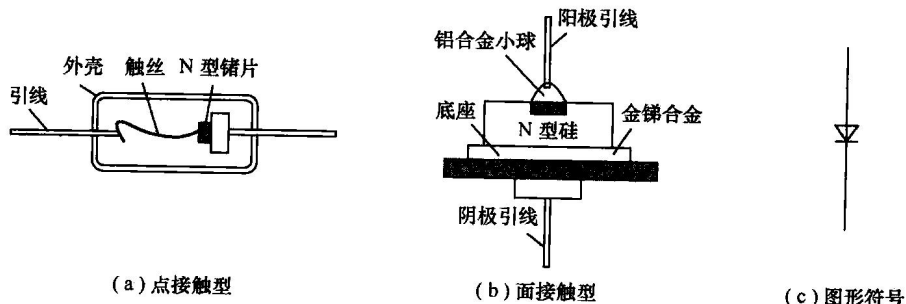


图 1.8 半导体二极管

点接触型二极管的特点是 PN 结的结面积非常小,因此结电容量较小,不能通过较大电流,但高频性能好,常常用于高频小功率场合,如检波、脉冲电路及计算机里的开关元件。面接触型二极管的主要特点是 PN 结的结面积很大,因此结电容量较大,允许通过的电流也大,适