



普通高等教育电气信息类规划教材



免费电子教案下载

www.cmpedu.com

电子技术

主 编 赵 莹 曲萍萍

副主编 孟 祥 曲丽萍 于 雷



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育电气信息类规划教材

电子技术

主 编 赵 莹 曲萍萍
副主编 孟 祥 曲丽萍 于 雷
参 编 危厚琴 宋在勇 赵谢秋
姚旭影 谭晓晶



机械工业出版社

本书共9章,分别是半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、门电路与组合逻辑电路、双稳态触发器和时序逻辑电路、D-A转换器和A-D转换器、半导体存储器和可编程逻辑器件、电子电路仿真软件Multisim11及其应用。每章后面配有小结、练习与思考和习题,书后有习题答案。

本书编排了大量的应用实例,使理论和实践联系更加紧密;增加了电子电路仿真软件Multisim11及其应用的介绍,每章最后小节安排了Multisim11仿真实例,使读者能够加深对理论知识的理解。

本书可作为高等学校非电类专业本科教材,也可作为高职高专教育、成人教育、电大等相关专业的教学用书,同时可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/赵莹,曲萍萍主编. —北京:机械工业出版社,2014.11
普通高等教育电气信息类规划教材
ISBN 978-7-111-48706-7

I. ①电… II. ①赵…②曲… 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(2014)第279996号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:时静 责任编辑:时静 韩静

版式设计:霍永明 责任校对:薛娜

责任印制:刘岚

涿州市京南印刷厂印刷

2015年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·19印张·459千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-48706-7

定价:43.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

电子技术是电工电子学的重要组成部分,应用广泛,是本科工科非电类专业学生必须学习和掌握的技术基础课程。为了适应应用型本科高等学校培养实用型高级人才的需要,使电子技术课程的教学内容和教学体系不断完善,并能及时反映日新月异的电子新技术、新器件、新应用,编者结合多年的实践教学经验,编写了本书。

本书的理论教学为60~80课时,实验教学在20学时左右,各专业可根据专业需求合理安排讲授内容,书中打“*”号的章节为选讲内容。

本书在编写过程中注意了以下几点:

1) 侧重基本概念、基本理论、基本分析方法的论述,内容安排尽可能由浅入深,循序渐进,通俗易懂,便于自学。

2) 叙述尽可能做到概念准确、深入浅出、行文流畅。

3) 在理论阐述的基础上,编排了一定数量的应用实例,把课程与工程实际联系起来,以便提高学生的学习兴趣和电路识图能力。

4) 内容取舍上兼顾了经典电子技术理论与最新现代电子技术的结合,增加了电子电路仿真软件 Multisim11 及其应用的介绍,每章最后小节安排了 Multisim11 仿真实例,使读者能够加深对理论知识的理解。

5) 对集成电路器件则侧重讲述了其外部特性,体现重在应用。

6) 每章后面配有小结、练习与思考和习题,帮助读者消理解所学内容。

为了方便阅读,本书仿真电路中的元器件符号均采用与仿真软件一致的形式,不再改为国标符号。常用逻辑符号新旧对照表参见附录B。

本书由北华大学和闽南理工学院教师编写完成,北华大学赵莹编写第2、7章,曲萍萍编写第1、4章,曲丽萍、孟祥编写第5章、习题答案,宋在勇编写第8章,危厚琴、赵谢秋编写第6章,闽南理工学院于雷编写第9章、附录,姚旭影、谭晓晶编写第3章,最后由赵莹统稿。

全书在机械工业出版社指导下完成,在编写过程中还借鉴了许多参考资料,在此对机械工业出版社各位编辑及参考资料的作者一并表示感谢。

限于经验和水平,书中错误与疏漏在所难免,恳请广大读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

前言

第1篇 模拟电子技术

第1章 半导体器件 1

1.1 半导体 1

1.1.1 本征半导体 1

1.1.2 杂质半导体 2

1.2 PN结 3

1.2.1 PN结的形成 3

1.2.2 PN结的单向导电性 4

1.3 半导体二极管 5

1.3.1 二极管的结构 5

1.3.2 二极管的伏安特性 5

1.3.3 二极管的主要参数 6

1.3.4 二极管的应用 7

1.3.5 稳压二极管 8

1.4 双极型晶体管 10

1.4.1 双极型晶体管的结构 10

1.4.2 晶体管的电流分配与放大原理 11

1.4.3 晶体管的特性曲线 13

1.4.4 晶体管的主要参数 14

1.5 场效应晶体管 15

1.5.1 绝缘栅型场效应晶体管 16

1.5.2 场效应晶体管的主要参数 18

1.6 半导体光电器件 19

1.6.1 发光二极管 19

1.6.2 光敏二极管 20

1.6.3 光敏晶体管 21

1.6.4 光耦合器 21

1.7 Multisim11 软件仿真举例 22

本章小结 23

练习与思考 23

习题 24

第2章 基本放大电路 27

2.1 基本放大电路概述 27

2.1.1 基本放大电路的组成 27

2.1.2 放大电路的性能指标 28

2.2 放大电路的静态分析 30

2.2.1 直流通路法 30

2.2.2 图解法 31

2.3 放大电路的动态分析 32

2.3.1 微变等效电路法 32

2.3.2 图解法 36

2.3.3 放大电路的非线性失真 37

2.4 放大电路静态工作点的稳定 38

2.4.1 温度对静态工作点的影响 38

2.4.2 分压式偏置放大电路 39

2.5 共集电极放大电路 42

2.5.1 静态分析 43

2.5.2 动态分析 43

*2.6 放大电路的频率特性 45

2.7 多级放大电路 46

2.7.1 阻容耦合 47

2.7.2 直接耦合 47

2.8 差分放大电路 49

2.8.1 基本差分放大电路 49

2.8.2 静态分析 51

2.8.3 动态分析 52

*2.9 功率放大电路 55

2.9.1 对功率放大电路的基本要求 55

2.9.2 提高功率放大电路效率的

主要途径 55

2.9.3 互补对称功率放大电路 56

2.9.4 集成功率放大电路 58

*2.10 场效应晶体管放大电路 59

2.10.1 静态分析 59

2.10.2 动态分析 61

2.11 放大电路中的负反馈 63

2.11.1 反馈的基本概念 64

2.11.2 反馈类型的判断 65

2.11.3 负反馈对放大电路性能的

影响 68

2.12 Multisim11 软件仿真举例 69

本章小结 71

练习与思考	72
习题	73
第3章 集成运算放大器	77
3.1 集成运算放大器概述	77
3.1.1 集成运算放大器电路的构成	77
3.1.2 集成运算放大器的电压传输特性	78
3.1.3 主要参数	79
3.1.4 理想运算放大器	79
3.2 运算放大器在信号运算方面的应用	81
3.2.1 比例运算	81
3.2.2 加法运算	83
3.2.3 减法运算	84
3.2.4 积分运算	86
3.2.5 微分运算	87
3.3 运算放大器在信号处理方面的应用	88
3.3.1 有源滤波器	88
3.3.2 电压比较器	90
3.4 集成运算放大器的选择和使用	92
3.4.1 集成运算放大器的选择	92
3.4.2 集成运算放大器的使用	93
3.5 集成运算放大器应用举例	94
3.5.1 三角波发生器	94
3.5.2 火灾报警电路	94
3.5.3 自动增益控制电路	94
3.6 Multisim11 软件仿真举例	95
本章小结	97
练习与思考	98
习题	98
第4章 直流稳压电源	102
4.1 整流电路	102
4.1.1 单相半波整流电路	102
4.1.2 单相桥式整流电路	104
*4.1.3 三相桥式整流电路	105
4.2 滤波电路	108
4.2.1 电容滤波电路	108
4.2.2 电感滤波电路	110
4.2.3 π 形复合滤波电路	110
4.3 直流稳压电源	111
4.3.1 稳压管稳压电路	111
4.3.2 串联型稳压电路	112
4.3.3 集成稳压电源	113
4.4 Multisim11 软件仿真举例	115

本章小结	115
练习与思考	116
习题	116

第2篇 数字电子技术

第5章 门电路与组合逻辑电路	118
5.1 数字电路概述	118
5.1.1 数字技术的发展及其应用	118
5.1.2 数字信号和编码	118
5.1.3 脉冲信号	120
5.1.4 数字电路的特点和分类	121
5.2 基本门电路	122
5.2.1 分立元件基本逻辑门电路	122
5.2.2 TTL 集成门电路	125
5.2.3 CMOS 门电路	128
5.3 逻辑代数	132
5.3.1 逻辑代数的基本定律和恒等式	132
5.3.2 逻辑代数的基本规则	133
5.4 逻辑函数的表示方法	134
5.5 逻辑代数的化简	137
5.5.1 代数法化简	137
5.5.2 卡诺图法化简	139
5.6 组合逻辑电路	140
5.6.1 组合逻辑电路的分析	140
5.6.2 组合逻辑电路的设计	141
5.7 加法器	144
5.7.1 半加器	144
5.7.2 全加器	145
5.8 编码器和译码器	146
5.8.1 编码器	146
5.8.2 译码器	150
5.9 数据分配器和数据选择器	155
5.9.1 数据分配器	156
5.9.2 数据选择器	156
5.10 应用举例	159
5.10.1 足球评委会判罚电路	159
5.10.2 智力竞赛抢答电路	159
5.10.3 水位检测电路	160
5.11 Multisim11 软件仿真举例	161
本章小结	163
练习与思考	164
习题	164

第6章 双稳态触发器和时序

逻辑电路	170
6.1 双稳态触发器	170
6.1.1 RS 触发器	170
6.1.2 JK 触发器	173
6.1.3 D 触发器	174
6.1.4 触发器逻辑功能的转换	176
6.2 时序逻辑电路的分析	177
6.3 寄存器	180
6.3.1 数码寄存器	180
6.3.2 移位寄存器	180
6.4 计数器	183
6.4.1 二进制计数器	183
6.4.2 十进制计数器	187
6.4.3 任意进制计数器的设计	190
6.5 集成 555 定时器和单稳态触发器	193
6.5.1 集成 555 定时器	193
6.5.2 集成 555 定时器的工作原理	193
6.5.3 单稳态触发器	194
6.6 施密特触发器和多谐振荡器	197
6.6.1 施密特触发器	197
6.6.2 多谐振荡器	199
6.7 应用举例	201
6.8 Multisim11 软件仿真举例	205
本章小结	207
练习与思考	208
习题	208

第7章 D-A 转换器和 A-D 转换器

7.1 概述	214
7.2 D-A 转换器	214
7.2.1 权电阻网络 D-A 转换器	215
7.2.2 倒 T 形电阻网络 D-A 转换器	215
7.2.3 D-A 转换器的主要性能指标	217
7.2.4 集成 D-A 转换器及其应用	218
7.3 A-D 转换器	221
7.3.1 A-D 转换的基本原理	221
7.3.2 并行比较型 A-D 转换器	223
7.3.3 逐次比较型 A-D 转换器	225
7.3.4 A-D 转换器的主要性能指标	226
7.3.5 集成 A-D 转换器及其应用	227
7.4 Multisim11 软件仿真举例	229

本章小结	230
练习与思考	231
习题	231

*第8章 半导体存储器和可编程

逻辑器件	232
8.1 概述	232
8.2 只读存储器	232
8.2.1 固定 ROM	232
8.2.2 可编程 ROM (PROM)	235
8.2.3 可擦除可编程 ROM (EPROM)	236
8.3 随机存取存储器	237
8.3.1 静态随机存储器 (SRAM)	237
8.3.2 动态随机存储器 (DRAM)	238
8.3.3 存储容量的扩展方法	238
8.4 可编程逻辑器件	240
8.4.1 PLD 基本电路的结构、功能与习惯表示法	240
8.4.2 可编程逻辑阵列	241
8.4.3 可编程阵列逻辑	242
8.4.4 通用阵列逻辑	245
8.4.5 在系统可编程逻辑器件	247
8.4.6 复杂可编程逻辑器件	250
8.5 用存储器实现组合逻辑函数	250
本章小结	254
练习与思考	255
习题	256

*第9章 电子电路仿真软件 Multisim11

及其应用	258
9.1 Multisim11 的主界面窗口	258
9.2 工具栏和元器件库栏	261
9.3 仪器库	267
9.3.1 调用和放置虚拟仪器	267
9.3.2 虚拟仪器仿真	268
9.3.3 常用虚拟仪器的使用	268
9.4 Multisim11 应用举例	272
习题	277
附录	278
附录 A 习题答案	278
附录 B 常用逻辑符号新旧对照表	293
参考文献	295

第1篇 模拟电子技术

第1章 半导体器件

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,用半导体材料制成的电子器件称为半导体器件 (Semiconductor Device)。半导体器件是构成电子电路的基本元件,由于它具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛的应用。PN结则是构成各种半导体器件的共同基础,本章将从论述半导体的导电机理出发,阐述PN结的特性,在此基础上,将分别介绍二极管、双极型晶体管、场效应晶体管和光电器件等常用的半导体器件。

1.1 半导体

自然界中的物质按照导电性能可分为导体、绝缘体和半导体。半导体的导电性能介于导体和绝缘体之间,常见的半导体有硅 (Si)、锗 (Ge)、硒 (Se) 和砷化镓 (GaAs) 及其他金属氧化物和硫化物。

物质的导电能力可以用电阻率 ρ 衡量,物质的导电能力越强,电阻率越小。金属导体的电阻率一般在 $0.01 \sim 1 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,绝缘体的电阻率一般大于 $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$,半导体的电阻率在 $10 \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$ 之间。就导电性能而言,导体和绝缘体相对比较稳定,而半导体则不同,其导电性能在不同条件下有很大差别。有些半导体对温度的变化非常敏感,环境温度升高时,电阻率下降,导电能力显著提高,利用这种特性可制成各种热敏电阻;又有些半导体受到光照时,导电能力提高,利用这种特性可制成各种光敏电阻。另外,如果在纯净的半导体中加入微量的某种杂质,其导电能力将增加几十万甚至几百万倍,利用这种特性可制成各种半导体器件,如二极管、双极型晶体管、场效应晶体管和晶闸管等。

物质导电性能存在差异的根本原因在于物质内部结构的不同。以下将从论述半导体的内部结构开始,简单介绍半导体的导电机理。

1.1.1 本征半导体

最常用的半导体是硅和锗,图1-1是硅和锗的原子结构图,它们最外层轨道上均有四个价电子,都是四价元素。硅和锗的单晶体原子排列非常整齐,硅晶体的平面结构示意图如图1-2所示。

本征半导体 (Intrinsic Semiconductor) 是一种完全纯净的、晶体结构排列整齐的半导体晶体。

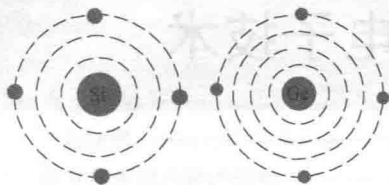


图 1-1 硅 (Si) 和锗 (Ge) 的原子结构图

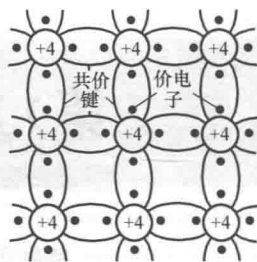


图 1-2 硅原子单晶体的共价键结构

当把硅半导体材料制成晶体时，每一个原子与相邻的四个原子结合，每一原子的一个价电子与另一原子的一个价电子组成一个电子对，这对价电子被两个相邻的原子共用，形成了所谓的共价键 (Covalent Bond) 结构，每个原子都和周围的四个原子通过共价键的形式紧密联系在一起 (见图 1-2)。

虽然在共价键结构中，硅原子最外层共有八个电子，处于较稳定的状态，但不像绝缘体中的价电子所受束缚那样紧，如果从外界获得一定的能量 (如光照、升温、电磁场激发等)，共价键结构中的一些价电子就可能挣脱原子核的束缚而成为自由电子 (Free Electron)，这种物理现象称为本征激发 (见图 1-3)。

当电子受激发挣脱共价键中的束缚成为自由电子后，在共价键中便留下了一个空位，称为“空穴” (Hole)。当空穴出现时，相邻原子的价电子比较容易离开它所在的共价键而填补到这个空穴中来，使该价电子原来所在共价键中出现一个新的空穴，这个空穴又可能被相邻原子的价电子填补，再出现新的空穴。价电子填补空穴的运动相当于带正电荷的空穴在运动，其运动方向与价电子运动方向相反，这种运动称为空穴运动，通常把空穴看成是一种带正电荷的载流子 (Carrier)。

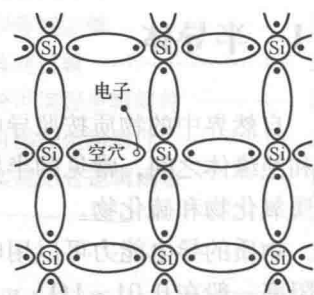


图 1-3 空穴和自由电子的形成

在本征半导体内部，自由电子与空穴总是成对出现的，因此将它们称为电子-空穴对。当自由电子在运动过程中遇到空穴时可能会填充进去从而恢复一个共价键，与此同时，消失一个“电子-空穴对”，这一过程称为复合。

在一定温度条件下，产生的“电子-空穴对”和复合的“电子-空穴对”数量相等时，形成相对平衡，这种相对平衡属于动态平衡，达到动态平衡时，“电子-空穴对”维持一定的数目。

可见，在半导体两端加上外电压时，半导体中将出现两种电流：一是自由电子定向运动所形成的电子电流，二是自由电子递补空穴所形成的空穴电流，自由电子和空穴两种载流子同时参与导电，这是半导体导电方式的最大特点。而金属导体中只有自由电子这一种载流子参与导电，这是半导体与金属导体的不同之处。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体的导电能力很差，但是在其中掺入微量杂质后，它的导电能力会增强。在纯净半导体中掺入微量杂质所形成的半导体，称为杂质半导体 (Doped Semiconductor)。

根据掺入杂质元素的不同，杂质半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体两种。

1. N 型半导体 (N-type Semiconductor)

在本征半导体中掺入五价元素磷, 可形成 N 型半导体。磷原子的最外层有五个价电子, 其中只有四个价电子能与周围四个半导体原子中的价电子形成共价键, 多余的一个价电子因无共价键束缚形成自由电子, 在本征硅中掺入磷的原子结构如图 1-4a 所示。

每掺入一个磷原子, 就多了一个自由电子, 那么掺入的磷原子越多, 自由电子个数越多, 结果, 使自由电子的数量大大增加, 于是在 N 型半导体中自由电子成为多数载流子, 简称多子 (Majority Carrier), 而空穴成为少数载流子, 简称少子 (Minority Carrier)。自由电子导电是这种半导体的主要方式, 以自由电子为导电主体的半导体称为 N 型半导体或电子型半导体。

2. P 型半导体 (P-type Semiconductor)

如果在本征半导体中掺入三价元素硼, 就形成了 P 型半导体。硼原子的最外层有三个价电子, 在与周围四个原子中的价电子形成共价键时, 因缺少一个价电子而在共价键中留下一个空穴 (在本征硅中掺入硼的原子结构见图 1-4b), 每一个硼原子都能提供一个空穴, 掺入的硼原子越多, 产生的空穴越多, 空穴是多数载流子, 而自由电子成为少数载流子, 导电的主体是空穴, 以空穴为导电主体的半导体称为 P 型半导体或空穴型半导体。

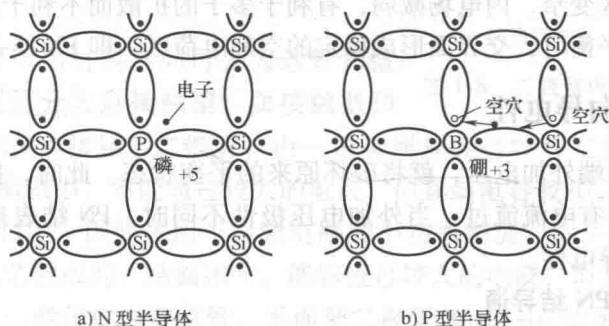


图 1-4 掺杂半导体共价键的结构示意图

注意, 无论是 N 型半导体还是 P 型半导体, 尽管都有一种载流子占多数, 但整个晶体仍然是电中性的。

1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的形成

虽然 P 型半导体和 N 型半导体的导电能力比本征半导体增强了许多, 但并不能直接用来制造半导体器件。当用适当的工艺将 P 型半导体和 N 型半导体结合在同一基片上时, 在交界面处就形成了 PN 结 (PN Junction), PN 结是构成各种半导体器件的基础。

由于交界面处存在载流子浓度的差异, N 区中的电子要向 P 区扩散 (载流子从浓度高的地方向浓度低的地方运动称为扩散), P 区中的空穴要向 N 区扩散。扩散的结果破坏了 P 区和 N 区中原来的电中性。P 区一侧因失去空穴而留下不能移动的负离子, N 区一侧因失去电子而留下不能移动的正离子, 如图 1-5 所示。这些不能移动的带电粒子通常称为空间电荷, 它们集中在 P 区和 N 区交界面附近, 形成了一个很薄的空间电荷区 (Space-charge Layer, 也称耗

尽层)，这就是 PN 结。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了，因此空间电荷区也称为耗尽层，它的电阻率很高。扩散越强，空间电荷区越宽。

P 区一侧呈现负电荷，N 区一侧呈现正电荷，因此空间电荷区出现了方向由 N 区指向 P 区的电场，称为内电场（见图 1-6）。在内电场的作用下将使 P 区和 N 区的少子漂移到对方，使空间电荷区变窄，少数载流子在内电场的作用下有规则的运动称为漂移运动。

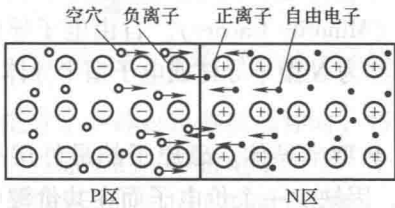


图 1-5 载流子的扩散运动

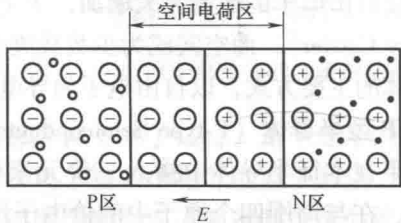


图 1-6 内电场的形成

扩散运动使空间电荷区加宽，内电场增强，有利于少子的漂移而不利多子的扩散，而漂移运动使空间电荷区变窄，内电场减弱，有利于多子的扩散而不利少子的漂移。当扩散运动和漂移运动达到平衡时，交界面形成稳定的空间电荷区，即 PN 结处于动态平衡。

1.2.2 PN 结的单向导电性

如果在 PN 结的两端外加电压，就将破坏原来的平衡状态。此时，扩散电流不再等于漂移电流，因而 PN 结将有电流流过。当外加电压极性不同时，PN 结表现出截然不同的导电性能，即呈现出单向导电性。

1. 外加正向电压 PN 结导通

在 PN 结两端加正向电压，即 P 区接电源正极，N 区接电源负极，称为加正向电压，简称正向偏置或正偏（Forward Bias），如图 1-7a 所示。此时耗尽层变窄，有利于扩散运动的进行。多数载流子在外加电压作用下将越过 PN 结形成较大的正向电流 I_F ，这时的 PN 结处于导通状态。

2. 外加反向电压 PN 结截止

在 PN 结两端加反向电压，即 P 区接电源负极、N 区接电源正极，称为加反向电压，简称反向偏置或反偏（Backward Bias）（见图 1-7b）。在反向电压的作用下耗尽层将变宽，阻

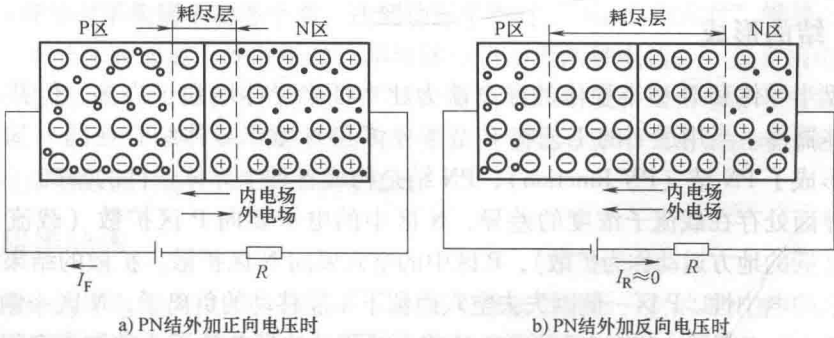


图 1-7 PN 结的单向导电性

碍多数载流子的扩散运动。少数载流子仅仅形成很微弱的反向电流 I_R ，由于电流很小，可忽略不计，此时称 PN 结处于截止状态。

综上所述，PN 结具有正向导通、反向截止的导电特性，这种特性称为 PN 结的单向导电性。

1.3 半导体二极管

1.3.1 二极管的结构

将 PN 结用外壳封装起来，并加上电极引线就构成了半导体二极管（Diode），简称二极管，其内部结构示意图如图 1-8a 所示。从 P 区接出的引线称为二极管的阳极（Anode），从 N 区接出的引线称为二极管的阴极（Cathode）。二极管电路符号如图 1-8b 所示，其中三角箭头表示二极管正向导通时电流的方向。

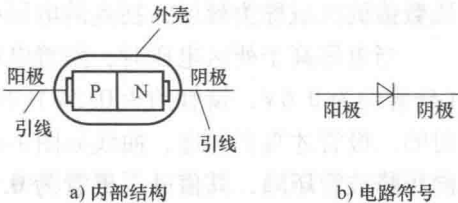


图 1-8 二极管内部结构示意图和电路符号

半导体二极管按所用材料不同可分为硅管和锗管，按制造工艺不同可分为点接触型、面接触型和平面型。图 1-9a 所示的点接触型二极管，由一根金属丝经过特殊工艺与半导体表面连接，形成 PN 结，因而结面积小，不能通过较大的电流，但其结电容较小，一般在 1pF 以下，工作频率可达 100MHz 以上，因此适用于高频电路和小功率整流。图 1-9b 所示的面接触型二极管是采用合金法工艺制成的，结面积大，能够流过较大的电流，但其结电容大，因而只能在较低频率下工作，一般仅作为整流管。平面型二极管如图 1-10 所示，它是采用先进的集成电路工艺制成的，不仅能通过较大的电流，而且性能稳定可靠，多用于开关、脉冲及高频电路中。

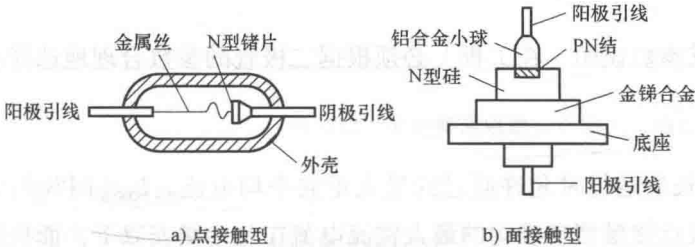


图 1-9 二极管的外部结构图

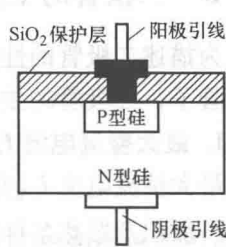


图 1-10 平面型二极管

1.3.2 二极管的伏安特性

电压和电流之间的关系曲线 $i_D = f(u_D)$ 称为伏安特性曲线（Volt-ampere Characteristics），半导体硅二极管的伏安特性如图 1-11 所示。

通过理论分析可知，PN 结两端所加电压与流过它的电流之间具有如下关系：

$$i_D = I_S (e^{u_D/U_T} - 1) \tag{1-1}$$

式中, I_s 为反向饱和电流, 对于分立器件, 其典型值在 $10^{-8} \sim 10^{-14} \text{ A}$ 范围内, 对于集成电路中的二极管 PN 结, 其值更小; U_T 为温度的电压当量, $U_T = kT/q$, 其中 k 为玻耳兹曼常量, T 为热力学温度, 当 $T = 300\text{K}$ 时, $U_T = 26\text{mV}$ 。

通过式 (1-1) 可以得出以下结论:

1) 当硅二极管处于正向偏置, 但电压 $u_D < 0.5\text{V}$ (若为锗管, $u_D < 0.1\text{V}$) 时, 由于外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力, 流过二极管的电流近似等于零, 二极管截止。小于这个电压数值的区域称为死区, 拐点的电压称为死区电压, 如图 1-11 中 OA 段所示。

当电压高于死区电压时, 随着电压的增加, 正向电流将逐渐增大。当电压达到导通电压 (硅管约为 0.6V , 锗管约为 0.2V) 时, 曲线陡直上升, 电压稍增大, 电流将显著增加, 这时的二极管才真正导通, 曲线如图 1-11 中 BC 段所示。BC 段所对应的电压称为二极管的正向压降或管压降, 其值硅二极管为 $0.6 \sim 0.7\text{V}$, 锗二极管为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。BC 段的特点是电流变化很快, 但电压基本保持恒定不变。

2) 反向偏置时, 二极管将有微小电流通过, 称为反向漏电流或反向饱和电流, 如图 1-11 中 OD 段所示。由图可见, 反向漏电流基本上不随反向电压的增加而变化。二极管呈现很高的反向电阻, 处于截止状态。

3) 在图 1-11 中, 当由 D 点继续增加反向电压时, 反向电流在 E 处急剧上升, 这种现象称为反向击穿 (Reverse Breakdown), 发生击穿时的电压称为反向击穿电压 $U_{(BR)}$ 。普通二极管不允许反向击穿的情况发生, 因为反向击穿发生后, 会产生很大的反向电流, 将导致二极管 PN 结过热而造成永久损坏。

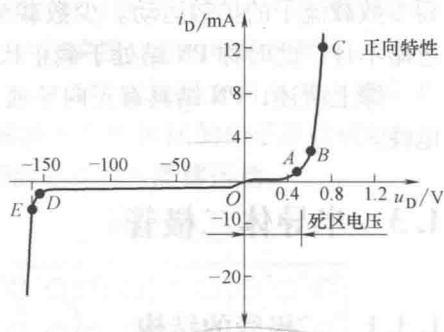


图 1-11 半导体硅二极管的伏安特性

1.3.3 二极管的主要参数

为描述二极管的性能, 常用其参数说明, 在工程上必须根据二极管的参数合理地选择和使用管子, 二极管的主要参数如下。

1. 最大整流电流 I_{OM}

最大整流电流 I_{OM} 是指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。 I_{OM} 与 PN 结的材料、面积及散热条件有关。一般点接触型二极管的最大整流电流在几十微安以下, 面接触型二极管的最大整流电流在数百安培以上, 有的甚至可以达到数千安培。大功率二极管使用时, 一般要外加散热片散热。使用时, 流过二极管的最大平均电流不应超过 I_{OM} , 否则二极管会因过热而损坏。

2. 反向工作峰值电压 U_{RWM}

U_{RWM} 是指二极管在使用时允许外加的最大反向峰值电压, 也称最高反向工作电压, 其值通常取二极管反向击穿电压的 $1/2$ 或 $2/3$ 左右。点接触型二极管的反向工作峰值电压一般为几十伏以下, 面接触型二极管可达数百伏。实际使用时, 二极管所承受的反向工作峰值电压值不应超过 U_{RWM} , 以免发生反向击穿。

3. 最大反向电流 I_{RM}

I_{RM} 是指给二极管加反向工作峰值电压时的反向电流值。反向电流越大,说明管子的单向导电性能越差。硅管的反向电流一般在几微安以下,锗管的反向电流较大,为硅管的几十倍到几百倍。

4. 最高工作频率 f_M

f_M 是二极管工作的上限频率。超过此值时,由于结电容的作用,二极管将不能很好地体现单向导电性。

应当指出,由于制造工艺所限,半导体器件参数具有分散性,同一型号管子的参数值会有相当大的差距,因而手册上往往给出的是参数的上限值、下限值或范围。此外,使用时应特别注意手册上每个参数的测试条件,当使用条件与测试条件不同时,参数也会发生变化。

其他参数,如二极管的最大整流电压下的管压降、反向恢复时间、结电容等,可在使用时查阅手册。

1.3.4 二极管的应用

半导体二极管应用十分广泛。在模拟电子电路中主要用于整流、检波、限幅、元器件保护和小电压稳压电路等,在数字电子电路中多用于开关电路。

1. 整流电路

利用二极管的单向导电性,可以将交流电加以整流变成脉动的直流,电路如图 1-12 所示。经变压器降压后的正弦电压 u_i 经二极管整流后,在负载 R 上得到了一个脉动的单方向变化的直流电压 u_o 。

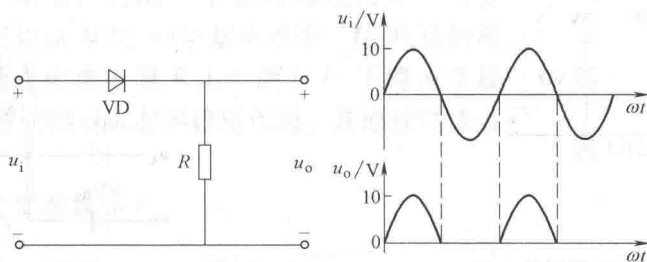


图 1-12 单向整流电路及其输入、输出电压波形

2. 限幅电路

在电子电路中,常用限幅电路对各种信号进行处理。它是让信号在预制的电平范围内,有选择地传输一部分。

【例 1-1】 单向限幅电路如图 1-13a 所示,图 1-13b 为输入电压 u_i 的波形。试画出输出电压 u_o 的波形(设 VD 为理想二极管)。

解: 根据二极管的单向导电性,二极管导通或截止取决于它是正向偏置还是反向偏置,因此可从分析二极管两端的电压着手。

- 1) 当 $u_i < U_S$ 时,二极管截止, U_S 所在支路相当于断开,电路中电流为零,电阻 R 上的压降 $u_R = 0$,输出随输入变化而变化, $u_o = u_i$ 。
- 2) 当 $u_i > U_S$ 时,二极管导通,理想二极管在导通时正向压降为零, $u_o = U_S$,输入电压

正半周大于 U_s 的部分降在电阻 R 上，即 $u_R = u_i - U_s$ ，输出电压 u_o 的波形如图 1-13c 所示。

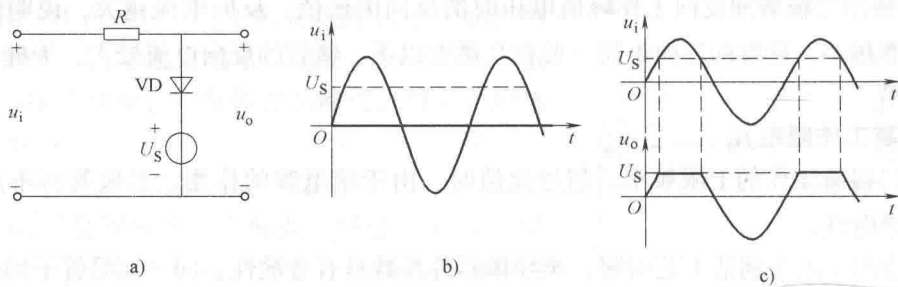


图 1-13 例 1-1 的电路图

该电路使输出电压上半周的幅值被限制在 U_s 值，称为上限幅电路。如果在 u_o 端再增加一个二极管和一个直流电源（二极管和直流电压源均反向），则可以构成双向限幅电路。

3. 钳位电路

钳位电路是利用二极管正向导通时正向压降相对稳定，且数值较小的特点来限制电路中某点的电位。在图 1-14 中，开关 S 断开时，二极管处于正偏导通，如果忽略管压降，则 U_o 将被钳制在 5V；当开关 S 合上时，二极管截止， $U_o = 0V$ 。

4. 开关电路

在开关电路中，利用二极管的单向导电性以接通或者断开电路，这在数字电路中得到广泛的应用。二极管与门开关电路如图 1-15 所示，设 VD_A 、 VD_B 均为理想二极管， u_A 和 u_B 可取 0V、5V 电压值，当 u_A 和 u_B 取不同组合的数值时，相应的输出见表 1-1。

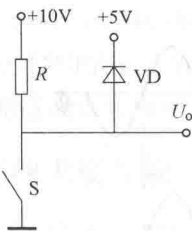


图 1-14 二极管钳位电路

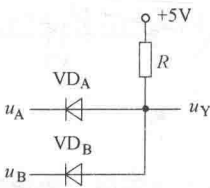


图 1-15 二极管与门开关电路

表 1-1 与门开关电路输入输出表

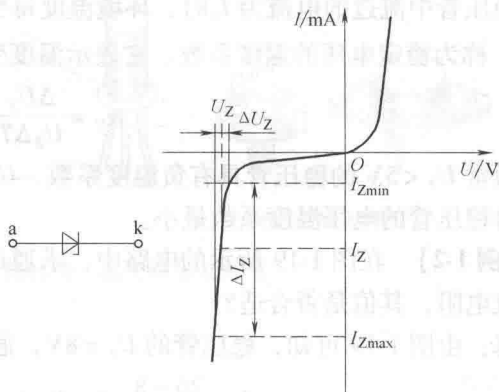
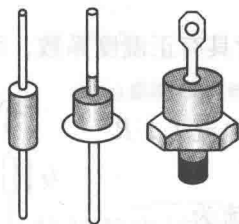
u_A/V	u_B/V	u_Y/V
0	0	0
0	5	0
5	0	0
5	5	5

1.3.5 稳压二极管

稳压二极管（Voltage Regulator Diode）简称稳压管，也称为齐纳二极管（Zener Diode），它是一种特殊的面接触型二极管。稳压管在反向击穿时，在一定的电流范围内（或者说在一定的功率损耗范围内），端电压几乎不变，表现出稳压特性，因而广泛用于稳压电源与限

幅电路中。

与普通二极管不一样,稳压管的反向击穿是可逆的,当去掉反向电压后,稳压管又可恢复正常。但是如果反向电流超过允许范围,稳压二极管会发生热击穿而损坏。常用稳压二极管的外形图如图 1-16 所示,它的电路符号和相应的伏安特性曲线如图 1-17 所示。



a) 电路符号

b) 伏安特性曲线

图 1-16 常用稳压二极管的外形图

图 1-17 稳压二极管的电路符号与伏安特性曲线

利用稳压管组成的简单稳压电路如图 1-18 所示, R 为限流电阻, 和稳压管 VZ 配合使用, 用以限制流过稳压管的电流。输出电压 $U_o = U_Z$, 电源电压 U_i 升高时, $U_o = U_Z$ 将随之升高, I_Z 显著增大, 流过电阻 R 的电流 ($I_o + I_Z$) 增加, 电阻 R 上的压降也增加。只要 $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$, 就可以认为 $U_o = U_Z$ 基本不变, U_i 升高的部分, 则几乎全部降落在限流电阻 R 上。而当 U_i 下降或负载 R_L 有变化时, 稳压管仍然可以起到稳压作用, 其原理请读者自行分析。

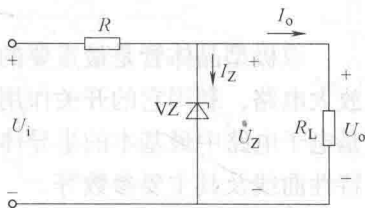


图 1-18 稳压管稳压电路

稳压二极管的主要参数如下。

1. 稳定电压 U_Z

稳定电压 U_Z 就是稳压管正常工作下管子两端的电压。手册中所列的都是在一定条件下的数值, 即使是同一型号的稳压管, 由于工艺和其他方面的原因, 稳压值也有一定的分散性。

2. 动态电阻 r_Z

r_Z 为稳压管在稳压范围内, 稳压管两端电压变化量 ΔU_Z 与对应电流变化量 ΔI_Z 之比, 即

$$r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z \quad (1-2)$$

稳压管的 r_Z 越小, 说明管子的反向击穿特性曲线越陡, 稳压性能越好。

3. 稳定电流 I_Z 和最大工作电流 I_{Zmax}

稳定电流 I_Z 是指工作在稳压状态下的电流, 由图 1-17 可知, I_Z 应该大于最小稳定电流 I_{Zmin} (即保证稳压管具有正常稳压性能的最小工作电流), 稳压管的工作电流低于此值时, 则稳压效果差或不能稳压。 I_Z 应该小于 I_{Zmax} , 否则管子将因温度过高而损坏, 稳压管一般需配合限流电阻使用。

4. 最大耗散功率 P_{ZM}

最大耗散功率为稳压管不致发生热击穿的最大功耗，即

$$P_{ZM} = U_Z I_{Z\max} \quad (1-3)$$

5. 电压温度系数 α_U

稳压管中流过的电流为 I_Z 时，环境温度每变化 1°C ，稳定电压的相对变化量（用百分数表示）称为稳定电压的温度系数。它表示温度变化对稳定电压 U_Z 的影响程度。

$$\alpha_U = \frac{\Delta U_Z}{U_Z \Delta T} \times 100\% \quad (1-4)$$

通常 $U_Z < 5\text{V}$ 的稳压管具有负温度系数， $U_Z > 8\text{V}$ 的稳压管具有正温度系数，而 U_Z 在 6V 左右时稳压管的电压温度系数最小。

【例 1-2】在图 1-19 所示的电路中，求通过稳压管 VZ 的电流 I_Z ， R 是限流电阻，其值是否合适？

解：由图 1-19 可知，稳压管的 $U_Z = 8\text{V}$ ，通过稳压管的电流为

$$I_Z = \frac{26 - 8}{6} \text{mA} = 3\text{mA}$$

故 $I_Z < I_{Z\max} = 10\text{mA}$ ，说明所选用的电阻 R 值合适。

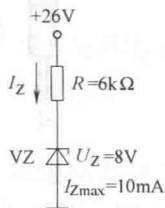


图 1-19 例 1-2 的图

1.4 双极型晶体管

双极型晶体管是最重要的一种半导体器件，利用它的电流放大作用可以组成各式各样的放大电路，利用它的开关作用可以组成各种门电路。因此，晶体管是电子电路的组成基础，是电子电路中最基本的半导体器件。本节将重点介绍晶体管的结构、电路符号、工作原理、特性曲线及其主要参数等。

1.4.1 双极型晶体管的结构

根据不同的掺杂方式在同一个硅片上制造出三个掺杂区域，并形成两个 PN 结，就构成晶体管。晶体管按其结构可分为 NPN 型和 PNP 型两种类型。无论哪种类型都有三个区、三个极、两个 PN 结。它们依次分别是集电区、基区和发射区；集电极 C、基极 B 和发射极 E，基区与发射区之间的 PN 结称为发射结，基区与集电区之间的 PN 结称为集电结。

晶体管的内部结构及图形符号如图 1-20a 所示，图形符号中的箭头方向表示发射结正偏时发射极电流的实际流向。晶体管在结构上的主要特点是：基区很薄且掺杂浓度低，发射区掺杂浓度高，集电区面积大。因此，在使用时晶体管的发射极 E 和集电极 C 不能互换。

晶体管的种类很多，分类方法各异。按结构可分为 NPN 型和 PNP 型，按工作频率可分为低频晶体管和射频晶体管；按功率可分为小功率晶体管、中功率晶体管和大功率晶体管；按所用半导体材料可分为硅管和锗管；按用途可分为放大管和开关管等。图 1-20b 为常见的几种晶体管的外形图。

NPN 型和 PNP 型晶体管的工作原理类似，只是使用时电源极性不同，各极电流方向不同，本书主要以 NPN 型晶体管为主分析讨论。