

电子电路 分析制作与调试

李伟英 李和平 ©主编

电子电路分析制作与调试

主编 李伟英 李和平

内 容 简 介

本教材共设计了8个项目:直流线性稳压电源的设计与调试、电压放大电路的设计与调试、功率放大电路的分析与调试、波形发生与转换电路的设计与装调、简单逻辑电路的设计与装调、组合逻辑电路的设计与装调、时序逻辑电路的设计与装调、温度检测电路的设计与装调以及18个实践项目训练。每个项目均以学习情境进入,围绕多个工作任务所对应的单元电路制作与调试过程,开发学生创新性思维模式,并以满足产品的功能实现为基本任务进行电子电路的分析、设计与制作,最后给出学生完成综合实践训练项目提示。教材中各工作任务技术指标的确定是以电子产品典型单元电路为载体,以典型且具有明显不同特征的电子技术基础知识领域为划分点。

本教材可作为高等院校电子信息工程、通信工程等专业的教材和技能实训参考书,也适合广大电子爱好者作为参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电子电路分析制作与调试/李伟英,李和平主编. —北京:北京理工大学出版社, 2016.8

ISBN 978-7-5682-1121-5

I. ①电… II. ①李…②李… III. ①电子电路-电路分析-高等学校-教材②电子电路-调试方法-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第195691号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/13.5

字 数/317千字

版 次/2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷

定 价/52.00元

责任编辑/王艳丽

文案编辑/王艳丽

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

Preface

本教材以理论讲解与实践操作相结合的方式进行,经过企业生产论证、各大教材体系对比,确立了本专业的工作任务与职业能力分析表,明确了课程实施的总体设计思路:以典型的电子电路设计、制作工作任务为中心,以多模块应用为切入点,引入对学生创新能力的培养,让学生在具体应用电路设计制作过程中开发创新思维,完成相应工作任务,并构建相关理论知识。

教材共设计了8个项目,每个项目均以学习情境进入,并围绕多个工作任务所对应的单元电路制作与调试过程,开发学生创新性思维模式,并以满足产品的功能实现为基本任务进行电子电路的分析、设计与制作,最后给出学生完成综合实践训练项目提示。教材中各工作任务技术指标的确定是以电子产品典型单元电路为载体,以典型且具有明显不同特征的电子技术基础知识领域为划分点。

教材在编写过程中,尽可能全面地介绍模拟电路和数字电路的经典电路,同时注重电路的分析过程和设计过程,让学生建立起对电子产品的立体感官效果。

本教材的编写有以下特点。

(1) 从应用实例中得出规律,以增强学生对概念的理解和记忆。

(2) 关注初学者的学习规律与特点,从元器件、芯片应用的角度引导学生学习,减少对内部繁杂原理的分析,从而为学生学习创建轻松的环境和提升学习的实在感。

(3) 通过案例分析、图解剖析、问题思考等环节的连贯学习,让学生能够置身其中,主动思考问题,解决问题。

(4) 面向企业需求,结合对各学习情境的学习,突出能力培养。

(5) 以典型电子产品为载体实施教学,增强学生的学习兴趣,教材选择了多路线性稳压电源、LED照明灯电路、功率放大音响电路、可燃气体报警器电路、举重裁判电路、水箱水位自动控制器电路、3位简易抢答器电路、叫号显示器电路、8位数显抢答器电路、音乐声控流水彩灯电路、温度检测电路等常见、易于接受、容易产生兴趣的电子产品作为设计分析对象,使学生很容易进入电路分析的氛围中,同时有利于学生形成个性化的设计方案。

(6) 学习情景、项目任务重点突出,能力培养有所侧重。项目任务依托了模拟电路和数字电路的各个关键知识点,教学任务的安排不仅考虑到了本课程在专业课程体系中的位置,同时以电路分析、设计能力、电路连接、制板能力以及技术指标分析编制能力为培养的主线,力求由浅入深逐步培养学生的全面技能。

(7) 在项目任务实施中,可促进学生的自主创新意识,并在相应的知识领域中引导学生进行自主性的电子产品单元电路设计、制作、调试。授课教师应把握学生设计思路和难易度、理论范围,充分挖掘学生的创新能力,丰富学生制作的多样化,提升学生设计制作的兴趣和积极性,加强学生的制作技能、团队合作精神和个体表达能力等。

本书由李伟英、李和平共同主编,其中项目1~4由李伟英编写,项目5~8由李和平编写。在编写过程中得到了湖南科瑞特智能电子有限公司朱林工程师的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

Contents

► 项目1 直流线性稳压电源的设计与调试	1
学习要求	1
项目分析	1
1.1 二极管的特性与应用	2
1.1.1 PN 结	2
1.1.2 二极管的特性	5
1.1.3 二极管的应用	7
1.2 二极管整流滤波电路的分析	9
1.2.1 单相桥式半波整流电路	9
1.2.2 变压器中心抽头式全波整流电路	10
1.2.3 单相桥式全波整流电路	11
1.2.4 半波整流电容滤波电路	14
1.2.5 桥式整流电容滤波电路	16
1.3 稳压电路的分析	17
1.3.1 三端集成稳压器	17
1.3.2 可调输出稳压电源	19
技能实践训练1 二极管特性的测试	22
技能实践训练2 LED 照明灯电路的设计与制作	23
思考与练习	25
► 项目2 电压放大电路的设计与调试	28
学习要求	28
项目分析	28
2.1 三极管的工作特性	29
2.2 单管放大电路的分析	33
2.2.1 共射极小信号电压放大电路的分析	33
2.2.2 分压式射极偏置放大电路的分析	37
2.2.3 共集电极放大电路的分析	40
2.2.4 开关信号放大——三极管的应用	42
2.3 差动放大电路的分析	42

2.4 集成运算放大器的线性应用	44
2.4.1 集成运算放大器的传输特性	44
2.4.2 反相比例放大器	45
2.4.3 同相比例放大器	47
2.4.4 反相求和电路	47
2.4.5 同相求和电路	49
2.4.6 减法运算电路	49
2.4.7 积分电路	50
2.4.8 集成运算放大器芯片的应用	51
技能实践训练3 三极管的检测	54
技能实践训练4 单管放大电路的分析与测试	56
技能实践训练5 用运放构成的比例放大器和加法电路	56
思考与练习	57
► 项目3 功率放大电路的分析与调试	61
学习要求	61
项目分析	61
3.1 功率放大电路的特性	62
3.2 分立元器件功率放大电路的分析	63
3.2.1 乙类双电源互补对称功率放大电路	63
3.2.2 甲乙类互补对称功率放大电路	65
3.2.3 无输出变压器的甲乙类互补对称功率放大电路	66
3.3 集成功率放大器的分析	68
3.3.1 LM386 集成功率放大器及其应用	68
3.3.2 TDA2822 集成功率放大器及其应用	70
3.3.3 TDA2030 集成功率放大器及其应用	71
技能实践训练6 分立元器件的功率放大电路分析与测试	72
技能实践训练7 集成功率放大电路分析与测试	73
思考与练习	74
► 项目4 波形发生与转换电路的设计与装调	76
学习要求	76
项目分析	76
4.1 运算放大器的非线性应用	77
4.1.1 运放非线性应用的条件和特点	77
4.1.2 单值比较器的分析	77
4.1.3 滞回电压比较器	78
4.1.4 方波发生器	80

4.1.5 三角波发生器	81
4.2 振荡电路的设计	83
4.2.1 正弦波振荡电路的振荡条件	83
4.2.2 文氏电桥正弦波振荡电路	84
4.3 发光二极管驱动电路	85
技能实践训练8 传感器特性的测试	86
技能实践训练9 可燃性气体报警器的制作与调试	88
思考与练习	90
► 项目5 简单逻辑电路的设计与装调	92
学习要求	92
项目分析	92
5.1 数字电路的二值逻辑	93
5.1.1 数制	94
5.1.2 码制	95
5.2 基本逻辑门和复合逻辑门	97
5.2.1 与门	97
5.2.2 或门	99
5.2.3 非门	100
5.2.4 与非门	101
5.2.5 或非门	102
5.2.6 其他常用复合逻辑门	103
5.3 逻辑函数的几种表示方法	106
实践项目训练10 举重裁判电路的设计与调试	109
实践项目训练11 水箱水位自动控制器电路的设计分析与制作	110
实践项目训练12 3位简易抢答器电路的分析与调试	112
思考与练习	114
► 项目6 组合逻辑电路的设计与装调	116
学习要求	116
项目分析	116
6.1 组合逻辑电路的分析	117
6.2 组合逻辑电路的设计	118
6.3 常见集成组合逻辑器件及应用	121
6.3.1 编码器及其应用	121
6.3.2 二进制译码器及其应用	125
6.3.3 显示译码器	127
实践项目训练13 叫号显示器电路的设计、制作与调试	131

实践项目训练 14 3 位加法器电路的设计与调试	131
思考与练习	134
► 项目 7 时序逻辑电路的设计与装调	136
学习要求	136
项目分析	136
7.1 基本 RS 触发器的应用	138
7.1.1 水箱水位控制电路	138
7.1.2 无抖动开关	141
7.1.3 8 位数显报警抢答器电路	142
7.2 同步触发器功能分析	144
7.3 边沿触发的 JK 触发器应用	147
7.4 T 触发器和 T' 触发器的实现	151
7.5 寄存器和移位寄存器的应用	153
7.6 时序逻辑电路的分析	156
7.7 计数器的分析与设计	161
7.7.1 3 位异步二进制减法计数器的设计	161
7.7.2 异步十进制加法计数器的设计	162
7.7.3 同步二进制加法计数器的设计	164
7.7.4 同步二进制减法计数器的设计	165
7.7.5 周期性特殊时序电路的设计	165
7.7.6 集成异步计数器的应用——百进制计数器的设计	167
7.7.7 可预置同步二进制加法计数器的应用——十二进制加法计数器设计	169
7.7.8 可预置同步十进制计数器的应用——六十进制加法计数器设计	171
7.8 基准脉冲发生器的设计	174
7.8.1 基于 555 定时器的秒脉冲发生器	174
7.8.2 基于施密特触发器的多谐振荡器	177
7.8.3 基于石英晶体振荡器的秒脉冲信号发生电路	179
实践项目训练 15 8 位抢答器电路的制作与调试	180
实践项目训练 16 音乐声控流水彩灯电路的制作与调试	181
思考与练习	183
► 项目 8 温度检测电路的设计与装调	187
学习要求	187
项目分析	187
8.1 A/D 转换	187
8.1.1 A/D 转换器	188
8.1.2 典型芯片 ADC0832 介绍	188

8.1.3 温度检测电路	189
8.2 D/A 转换	191
8.2.1 D/A 转换器	191
8.2.2 DAC0832 转换器的应用	192
实践项目训练 17 温度检测电路的制作与调试	194
思考与练习	197
► 综合项目训练 小型电子产品的设计与调试	199
► 附录 单片机温度检测项目参考程序	201
► 参考文献	205

项目 1

直流线性稳压电源的设计与调试

学习要求

知识要求	(1) 掌握二极管的工作特性 (2) 理解整流、滤波、整流电路的工作特性 (3) 直流线性稳压电源各环节工作参数的分析方法
技能要求	(1) 熟悉二极管性能的检测方法 (2) 熟练掌握整流、滤波、稳压各环节的参数计算和元器件的选择 (3) 能正确使用仪器仪表进行直流线性稳压电源各级工作环节参数的测量

项目分析

任何电子产品中总少不了电源电路，当设计中的芯片需要 5V 电源时，在实验室可以从实训平台的端子上引来电源或从台式直流电源上取电，但如果在家里，没有那些设备，面对交流 220V 的插座，怎么办？现在基本每个人都有一部手机，而手机充电器就是一个很好的电源，仔细观察充电器上的标注参数，就会发现上面写着输入 110 ~ 240V/AC50 ~ 60Hz，输出 5VDC@1A 等字样。这些信息说明，这个充电器可以将交流电压转换为直流电压。

本项目主要通过“二极管桥式整流集成稳压电源”、“LED 照明灯电路的设计与制作”等任务，来学习直流线性稳压电源的设计与调试方法。

首先来了解整流电路中的关键器件——二极管。

1.1 二极管的特性与应用

1.1.1 PN 结

1. 半导体的基础知识

图 1-1 表示的是由二极管、灯泡、限流电阻、开关及电源等组成的简单电路。

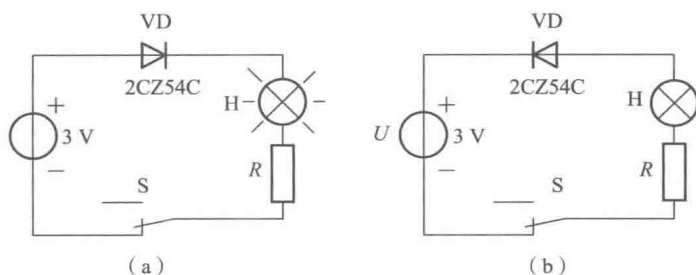


图 1-1 半导体二极管导电性能的实验

电路演示如下。

按图 1-1 (a) 所示, 闭合开关 S, 灯泡发光, 说明电路导通。若将二极管管脚调换位置, 如图 1-1 (b) 所示, 闭合开关 S, 灯泡不发光。由以上演示结果可知, 二极管具有单向导电性。

1) 半导体的特性

自然界中的各种物质, 按导电能力可划分为导体、绝缘体、半导体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。它具有光敏性、热敏性和掺杂性。利用光敏性可制成光电二极管和光电三极管及光敏电阻; 利用热敏性可制成各种热敏电阻; 利用掺杂性可制成各种不同性能、不同用途的半导体器件, 如二极管、三极管、场效应晶体管等。

2) 半导体的共价键结构

在电子器件中, 用得最多的材料是硅和锗, 硅和锗都是 4 价元素, 原子最外层轨道上具有 4 个电子, 称为价电子。每个原子的 4 个价电子不仅受自身原子核的束缚, 而且还与周围相邻的 4 个原子发生联系, 这些价电子一方面围绕自身的原子核运动, 另一方面也时常出现在相邻原子所属的轨道上。这样, 相邻的原子就被共有的价电子联系在一起, 称为共价键结构, 如图 1-2 所示。

当温度升高或受光照时, 由于半导体共价键中的价电子并不像绝缘体中束缚得那样紧, 价电子从外界获得一定的能量, 少数价电子会挣脱共价键的束缚, 成为自由电子, 同时在原来共价键的相应位置上留下一个空位, 这个空位称为空穴, 如图 1-3 所示。

自由电子和空穴是成对出现的, 所以称它们为电子—空穴对。在本征半导体中, 电子与空穴的数量总是相等的。把在热或光的作用下本征半导体中产生电子—空穴对的现象, 称为本征激发, 又称为热激发。

由于共价键中出现了空位, 在外电场或其他能源的作用下, 邻近的价电子就可填补到这

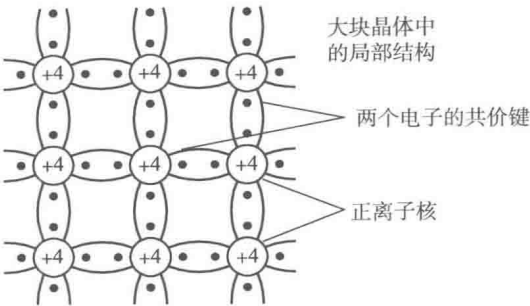


图 1-2 硅和锗的共价键结构

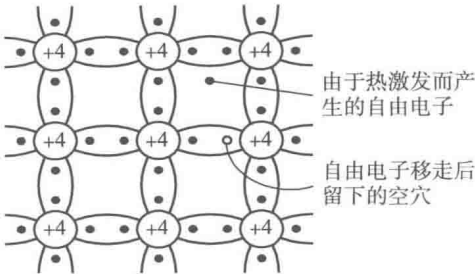


图 1-3 本征激发产生电子—空穴对示意图

个空穴上，而在这个价电子原来的位置上又留下新的空位，以后其他价电子又可转移到这个新的空位上，如图 1-4 所示。为了区别于自由电子的运动，把这种价电子的填补运动称为空穴运动。通常认为空穴是一种带正电荷的载流子，它所带电荷数和电子数相等，符号相反。由此可见，本征半导体中存在两种载流子：电子和空穴。而金属导体中只有一种载流子——电子。本征半导体在外电场作用下，两种载流子的运动方向相反，而形成的电流方向相同，如图 1-5 所示。

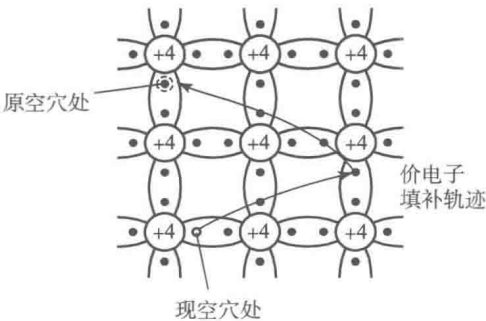


图 1-4 电子与空穴的移动

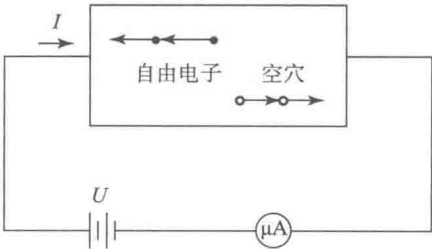


图 1-5 两种载流子在电场中的运动

3) 杂质半导体

(1) N 型半导体。在纯净的半导体硅（或锗）中掺入微量 5 价元素（如磷）后，就可成为 N 型半导体，如图 1-6（a）所示。在这种半导体中，自由电子数远大于空穴数，导电以电子为主，故此类半导体亦称为电子型半导体。

(2) P 型半导体。在硅（或锗）的晶体内掺入少量 3 价元素杂质（如硼或铟等）。硼原子只有 3 个价电子，它与周围硅原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生一个空穴。这个空穴与本征激发产生的空穴都是载流子，具有导电性能。P 型半导体共价键结构如图 1-6（b）所示。在 P 型半导体中，空穴数远远大于自由电子数，空穴为多数载流子（简称为“多子”），自由电子为少数载流子（简称为“少子”）。导电以空穴为主，故此类半导体又称为空穴型半导体。

2. PN 结及其单向导电特性

1) PN 结的形成

单纯的一块 P 型半导体或 N 型半导体，只能作为一个电阻元件。但是如果把 P 型半导

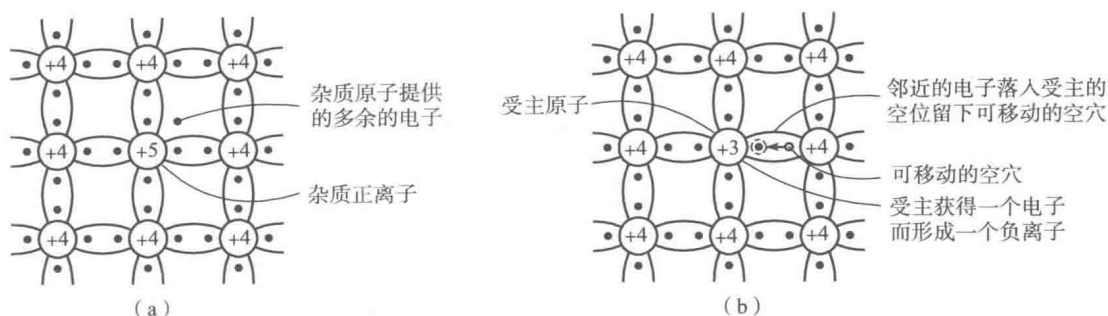


图 1-6 掺杂质后的半导体
(a) N 型半导体; (b) P 型半导体

体和 N 型半导体通过一定方法结合起来就形成了 PN 结。PN 结是构成半导体二极管、半导体晶体管、晶闸管、集成运算放大器等众多半导体器件的基础。

PN 结形成的物理过程如下：



最后，多子的扩散和少子的漂移达到动态平衡。在 P 型半导体和 N 型半导体结合面，离子薄层形成的空间电荷区称为 PN 结。在空间电荷区，由于缺少多子，所以也称为耗尽层。

2) PN 结的单向导电特性

(1) PN 结加正向偏置电压。P 区接电源正极，N 区接电源负极，这种接法叫正向偏置，形成正向电流。当外加正向偏置电压稍微增加，则正向电流便迅速上升，PN 结呈现的电阻很小，表现为导通状态，如图 1-7 (a) 所示。

(2) PN 结加反向偏置电压。P 区接电源负极，N 区接电源正极，这种接法叫反向偏置，形成反向电流。由于反向电流的值很小，可以忽略，呈现的电阻很大，表现为截止状态，如图 1-7 (b) 所示。

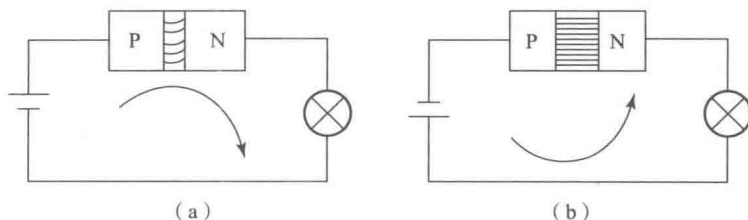


图 1-7 PN 结的单向导电性
(a) P 区接高电位 (灯亮); (b) P 区接低电位 (灯灭)

结论 PN 结正偏时导通；PN 结反偏时截止。PN 结具有单向导电性。

1.1.2 二极管的特性

1. 二极管的结构和符号

以 PN 结为管芯，在 P 区和 N 区均接上电极引线，并以外壳封装，就制成了半导体二极管，简称二极管，其内部结构如图 1-8 (a) 所示，图 1-8 (b) 是二极管的电气符号，图 1-8 (c) 是常见二极管的实物外形。二极管的结构按 PN 结形成的制造工艺方式可分为点接触型、面接触型和平面型等。

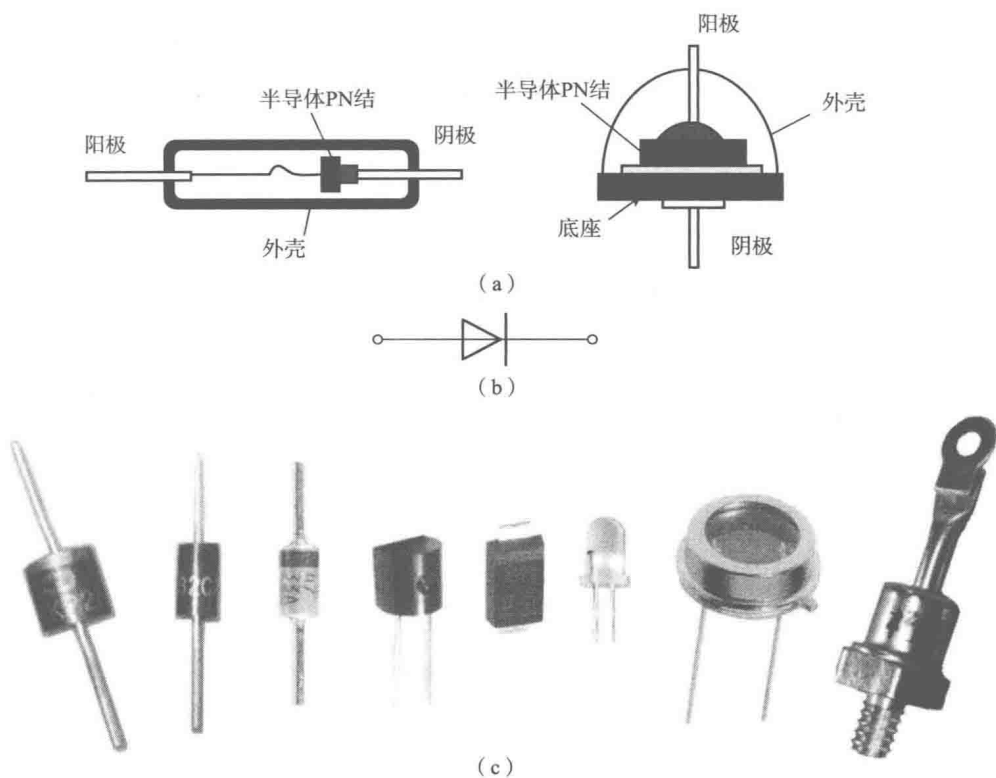


图 1-8 二极管结构、符号及实物

(a) 二极管的内部结构示意图；(b) 二极管符号；(c) 不同外形的二极管实物

2. 二极管的伏安特性

二极管具有单向导电性。二极管的单向导电性是指二极管正偏导通、反向截止的特性。当二极管的阳极电位高于阴极电位时，外电场与内电场的作用一旦完全抵消，可移动载流子将顺外电场方向运动，称二极管 (PN 结) 正向偏置，简称正偏；当二极管的阳极电位低于阴极电位时，在外电场的作用下，PN 结的厚度增大，进一步阻碍载流子运动，称二极管 (PN 结) 反向偏置，简称反偏。

二极管的单向导电性可用伏安特性来描述。伏安特性是指流过二极管的电流 I 与它两端电压 U 的关系。如图 1-9 所示是通过实验测定的二极管的伏安特性曲线。二极管的伏安特性可具体分为正向特性和反向特性。

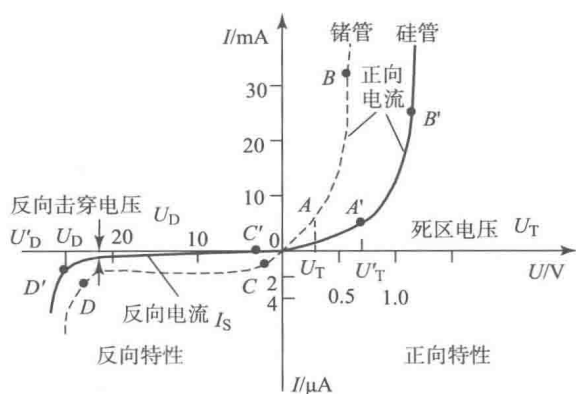


图 1-9 二极管的伏安特性曲线

1) 正向特性

由图 1-9 可知, 当二极管外加正向电压很低时, 正向电流很小, 几乎为零。当正向电压超过一定数值后, 电流增长很快, 这一特定数值的电压就称为死区电压 (U_{th}), 其大小与二极管制作材料及环境温度有关。通常硅管的死区电压约为 0.5V, 锗管约为 0.1V。当正向电压大于死区电压后, 二极管导通, 导通时的电压称正向压降 (或称管压降), 通常硅管为 0.6~0.8V, 锗管为 0.2~0.3V (不同类型二极管的死区电压和导通压降不尽相同, 使用时应查阅有关技术资料)。

2) 反向特性

当二极管外加反向电压, 在反向电压不超过某一范围时, 二极管有极微小电流通过, 且电流的大小基本恒定, 与反向电压的大小无关, 通常称其为反向饱和电流 I_S 。此时二极管处于截止状态, 呈现很高的反向电阻。在同样的温度下, 硅管的反向电流比锗管小得多, 锗管是 μA 级, 硅管是 nA 级。

当反向电压增大并超过某一值时, 反向电流急剧增大, 这一现象称为反向击穿。反向击穿时所加的电压叫反向击穿电压, 记为 U_{BR} 。反向击穿电流过大会使普通二极管烧坏, 称为击穿短路。因此, 除稳压二极管外, 加在二极管上的反向电压均不允许超过击穿电压。

二极管的特性对温度也十分敏感, 当温度升高时, 二极管的正向特性曲线向左移动, 反向特性曲线向下移动。

3) 二极管的参数

二极管的参数是反映二极管性能质量的指标。必须根据二极管的参数来合理选用二极管。二极管的主要参数有以下 4 个。

(1) 最大整流电流 I_F 。 I_F 是指二极管长期工作时所通过的最大正向平均电流值, 由 PN 结的面积和散热条件所决定。工作时, 流过二极管的电流不应超过这个数值; 否则将导致二极管因过热而损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM} 。 U_{RM} 是指二极管不击穿所允许加的最高反向电压。超过此值, 二极管就有被反向击穿的危险。 U_{RM} 通常为反向击穿电压的 1/2, 以确保二极管安全工作。

(3) 最大反向电流 I_R 。 I_R 是指二极管在常温下承受最高反向工作电压 U_{RM} 时的反向漏

电流,一般很小,但其受温度影响较大。当温度升高时, I_R 显著增大。

(4) 最高工作频率 f_M 。 f_M 是指保持二极管单向导电性能时,外加电压允许的最高频率。二极管的工作频率与PN结的极间电容大小有关,电容容量越小,工作频率越高。当加在二极管上电压的频率高于 f_M 时,结电容的容抗变小,高频信号会直接从结电容穿过,从而会破坏二极管的单向导电性。二极管的参数很多,除上述参数外,还有结电容、正向压降等,实际应用时,可查阅半导体器件手册。

4) 常用二极管的类型

(1) 稳压管。稳压二极管是一种用特殊工艺制造的面接触型硅半导体二极管,其图形符号如图1-10所示。稳压二极管工作时的端电压从3V左右到150V左右能划分成许多等级。在功率方面,也有从200mW到100W以上的产品。它一般为2CW系列。若将两个互补二极管反向串接以减少温度系数,则为2DW系列。

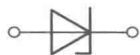


图 1-10 稳压二极管的电气符号

(2) 发光二极管。发光二极管(LED)是一种光发射器件,能把电能直接转化成光能。常用作微型计算机、电视机、音响设备、仪器仪表中的电源和信号的指示器,也可做成数字形状,用于显示数字。它具有体积小、省电、工作电压低、抗冲击振动、寿命长、单色性好、响应速度快等优点。

(3) 光敏二极管。光敏二极管是一种光接收器件,广泛应用于光的测量和光电自动控制系统,如光纤通信中的光接收机、电视机和家庭音响的遥控接收。另外,大面积的光敏二极管可用来作为能源即光电池,光能源是最有发展前途的绿色能源。近年来,科学家又研制出线性光电器件,通称为光电耦,可以实现光与电的线性转换,在信号传送和图形图像处理领域有广泛的应用。

(4) 变容二极管。变容二极管是利用PN结的电容效应工作的。它的电容量与反偏电压的大小有关。改变变容二极管的直流反偏电压,就可以改变其电容量,它广泛应用于谐振回路中,如电视机中高频头的调谐回路、高频电路中的变频器。

1.1.3 二极管的应用

1. 限幅

限幅就是无论电压多高,都被限制在预先设定的范围内。

图1-11所示是并联二极管上限幅电路,输入端送入的是幅值为 U_m 的交流信号, $U_m > E$ 。设二极管为理想二极管,即正向导通时压降为0V,反向截止时视为开路。

从电路图中可看到, $u_K = E$,因无法确定二极管是否导通,可以先假设二极管没有导通,此时电阻 R 上无压降, $u_A = u_i$,因此, $u_i > E$ 时,二极管导通,输出电压 $u_o = E$; $u_i \leq E$ 时,二极管截止,输出电压 $u_o = u_i$ 。工作波形如图1-12所示,3种输出波形分别对应 $E = 0V$ 、 $E > 0V$ 、 $E < 0V$ 的3种情况。

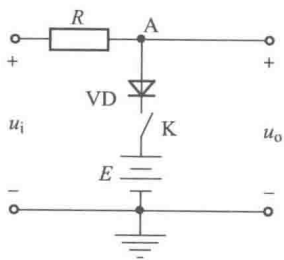


图 1-11 并联二极管上限幅电路