

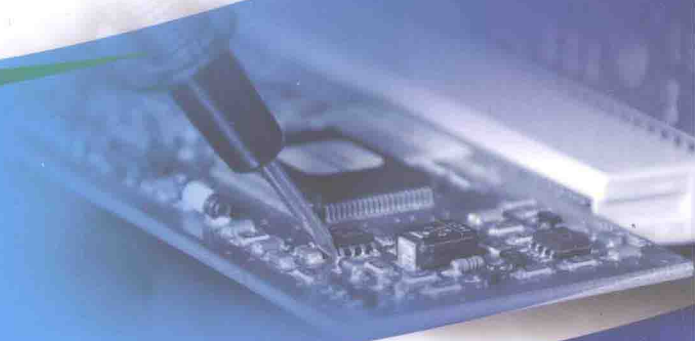
» 普通高等教育“十三五”规划教材

第2版

电工电子技术

下册 *Electrical and Electronic Technology*

◎ 主编 肖志红



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

电工电子技术

下 册

第2版

主 编 肖志红

副主编 苏 娟 郭立芝 田亚娟

参 编 韦 敏



机械工业出版社

本教材分上下两册,共15章。编写的指导思想是:精选内容,注重基础,突出内容的先进性,同时注重应用,突出工程背景。

本书是下册,共7章,内容包括:半导体二极管与整流电路、基本放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源与开关电源、数字电路基础、电力电子技术及其应用、数据采集系统。每章配有难度适中的练习与思考题、习题,并提供了部分习题参考答案。部分章节配有工程应用举例及 Multisim 仿真实例。

本书可作为高等院校工科非电类本科生、大专生及成人教育学生的教材或参考书,还可作为自学考试或相关工程技术人员参考用书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 yu57sh@163.com 索取。

图书在版编目(CIP)数据

电工电子技术. 下册/肖志红主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2016.9

普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-54520-0

I. ①电… II. ①肖… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM②TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第186994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:于苏华 责任编辑:于苏华 王 康 责任校对:张玉琴
封面设计:张 静 责任印制:常天培
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2016年11月第2版第1次印刷
184mm×260mm·15.75印张·382千字
标准书号:ISBN 978-7-111-54520-0
定价:34.00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

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第2版前言

自《电工电子技术》第1版出版至今，已经六年了。经过六年的教学实践，结合部分读者的反馈信息及电工电子技术的发展，对第1版进行了修订。

第2版在结构上基本沿用了第1版的体系，但内容上做了部分改动。其中对原书中某些内容进行调整，有的加以精简或压缩，有的适当展开或补充，叙述中加强了对重点和难点的处理，重编了部分例题、课后练习与思考题、习题，增加了工程应用举例以便于教学。第13章13.8节、13.9节用“555定时器”和“半导体存储器及可编程逻辑器件”替换了原有内容，在第15章增加了“抗干扰措施”和“虚拟仪器”两部分内容。

参加本书修订工作的有西安石油大学韦敏（第9章）、郭立芝（第10章、第12章）、田亚娟（第11章）、苏娟（第13章、第14章）和肖志红（第15章）。

由于作者水平有限，不妥和错误之处在所难免，敬请使用本书的教师、同学以及广大读者提出宝贵意见。

编 者

第1版前言

“电工电子技术”是普通高等学校理工科非电类专业的一门非常重要的技术基础课，是一门关于电学科的综合性、导论性、实践性的课程。本课程的中心任务是使非电类专业学生获得电工电子学科方面的基本理论、基本知识和基本技能，为学习后续课程及将来从事工程技术工作和科学研究工作打下基础。

本套教材是以教育部 2005 年颁发的《高等学校电工学基础课程教学基本要求》为依据，并充分考虑各院校新教学计划学时数及现代电工电子技术的发展趋势，结合编者多年的教学、科研经验编写的。全套教材分上下两册，共 15 章。

本教材编写的指导思想是：精选内容，注重基础，突出内容的先进性，同时注重应用，突出工程背景。对于非电类专业来说，电工电子技术基础内容多，学时少。因此，在编写教材时，我们注重基础内容的精选，突出电工电子技术的基本概念、基本理论、基本分析方法。在传统理论的基础上，本教材注重理论与实际的结合，大部分章节含有与之内容相适应的工程应用举例以及仿真实例，为理论和方法的学习奠定实际背景基础，同时充分利用软件仿真技术，最大化地提高教学效果。本书可作为普通高等学校理工科非电类专业教材，还可作为自学考试或相关工程技术人员的参考用书。

本教材下册由西安石油大学肖志红主编并统稿，苏娟、郭立芝为副主编，其中第 9 章由韦敏编写，第 10 章、第 12 章由郭立芝编写，第 11 章由田亚娟编写，第 13 章、第 14 章由苏娟编写，第 15 章由肖志红编写。中英文名词对照由田亚娟整理，部分习题参考答案由韦敏、田亚娟共同整理、编写。

西安石油大学沈金根教授在本书的编写过程中给予了大量的帮助，并提出了许多宝贵意见；西安石油大学电子工程学院各位领导以及电工电子技术教学组胡长岭副教授、严正国副教授、宋久旭老师也对本书给予了大力支持；同时在本书的编写过程中作者吸取了参考文献中多位专家、学者的经验，受益匪浅。在此，对帮助过我们的老师、参考资料的作者、机械工业出版社、西安石油大学教务处、电子工程学院一并致以衷心的感谢。

由于作者水平有限，不妥和错误之处在所难免，敬请使用本书的教师、同学以及广大读者提出宝贵意见。

编 者

目录

第2版前言

第1版前言

第9章 半导体二极管与整流电路 1

9.1 半导体的导电特性 1

9.2 PN结 3

9.3 半导体二极管 4

9.4 特殊二极管 7

9.5 二极管整流电路 10

习题 12

第10章 基本放大电路 14

10.1 晶体管 14

10.2 基本放大电路的组成及其工作原理 21

10.3 基本放大电路的分析方法 24

10.4 多级放大电路 39

10.5 差动放大电路与功率放大电路 42

10.6 场效应晶体管及其放大电路 50

10.7 工程应用举例 56

10.8 Multisim 仿真 58

习题 60

第11章 集成运算放大器及其应用 65

11.1 集成运算放大器的基本概念 65

11.2 运算放大器中的反馈 70

11.3 信号的运算电路 74

11.4 信号处理电路 86

11.5 信号产生电路 93

11.6 集成运算放大器应用中应注意的几个问题 97

11.7 工程应用举例 99

11.8 集成运算放大器电路的 Multisim 仿真 102

习题 106

第12章 直流稳压电源与开关电源 111

12.1 直流稳压电源 111

12.2 开关电源 119

习题 121

第13章 数字电路基础 123

13.1 数字电路概述 123

13.2 数字电路中的数制与码制 124

13.3 逻辑代数 126

13.4 逻辑门电路 137

13.5 组合逻辑电路的分析与综合 141

13.6 双稳态触发器 155

13.7 寄存器与计数器 161

13.8 555 定时器 166

13.9 半导体存储器及可编程逻辑器件 168

13.10 工程应用举例 171

13.11 数字电路的仿真 173

习题 175

第14章 电力电子技术及其应用 180

14.1 电力电子器件 180

14.2 单相可控整流电路 192

14.3 交流调压器与直流斩波器 194

14.4 逆变电路 194

14.5 工程应用举例 195

第15章 数据采集系统 197

15.1 传感器 198

15.2 信号调理电路 208

15.3 模拟多路开关 213

15.4 采样/保持器 215

15.5 模/数转换器 216

15.6 数据采集系统设计 222

15.7 抗干扰措施 224

15.8 虚拟仪器 231

15.9 工程应用举例 233

中英文名词对照 236

部分习题参考答案 240

参考文献 244

第 9 章

半导体二极管与整流电路

半导体二极管是由一个 PN 结构成的半导体器件，在电子电路中具有广泛的应用。本章先讨论半导体的基本知识，再介绍二极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数以及二极管基本电路及其分析方法。

9.1 半导体的导电特性

导电性能介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体 (Semiconductor)，如硅、锗、硒、砷化镓以及大多数金属氧化物和硫化物等。

半导体除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外，还具有其他一些特点。例如，当半导体受到外界光和热的激发时，其导电能力变得很强；在纯净的半导体中掺入微量的杂质后，其导电能力会显著增强。这些特点表明，半导体的导电机理不同于其他物质。为此，必须了解半导体的结构及其导电机理。

9.1.1 本征半导体

纯净的四价元素硅和锗等以共价键形式构成结晶结构，称为晶体 (Crystal)。本征半导体 (Intrinsic Semiconductor) 就是完全纯净的具有晶体结构的半导体。以硅晶体为例，它们的原子排列很有规律，并且每两个相邻原子以共价键结构共有一对价电子，如图 9-1 所示。

本征半导体在环境温度升高或受到光照时产生本征激发，形成自由电子和空穴。电子带负电，空穴带正电，在外电场作用下自由电子移动，相邻的价电子填补空穴而形成空穴移动，它们都能导电，称为载流子，如图 9-2 所示。本征激发产生的自由电子和空穴成对出现，数量取决于环境温度高低，所以本征半导体的性能受温度影响。

9.1.2 杂质半导体

本征半导体虽然同时存在自由电子和空穴两种载流子，但数量极少，电阻率很大，导电能力很差。如果在本征半导体中掺入微量的杂质元素，其导电性可大大提高，这种掺入杂质的半导体，称为杂质半导体 (Doped Semiconductor)。根据掺入杂质的不同，杂质半导体可分为两类，即 N 型半导体 (电子型半导体) 和 P 型半导体 (空穴型半导体)。

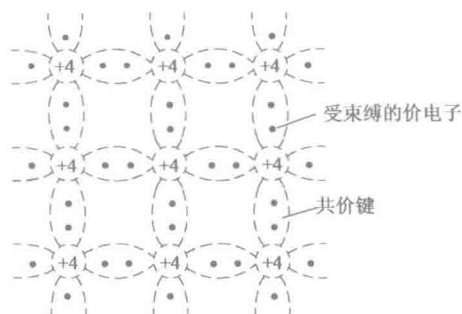


图 9-1 硅晶体的共价键结构

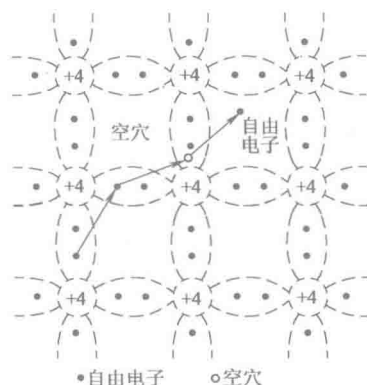


图 9-2 本征激发产生电子空穴对其移动

1. N 型半导体

在本征硅（或锗）中掺入少量的五价元素，如磷、砷、锑等，就得到 N 型半导体。这时，杂质原子替代了晶格中的某些硅原子，它的四个价电子和周围四个硅原子组成共价键，而多出一个价电子，它不受共价键束缚，只要获得很少的能量就能挣脱磷原子核的吸引而成为自由电子，同时杂质磷原子变成带正电荷的离子，如图 9-3 所示。虽然掺入的磷原子数目不多，但在室温下，每掺入一个磷原子便产生一个自由电子。另外还有少数的电子—空穴对，所以，当掺入五价元素时，自由电子是多子，空穴是少子。因为这种半导体的导电主要依靠电子，所以称为 N 型半导体（N-type Semiconductor）或电子型半导体。

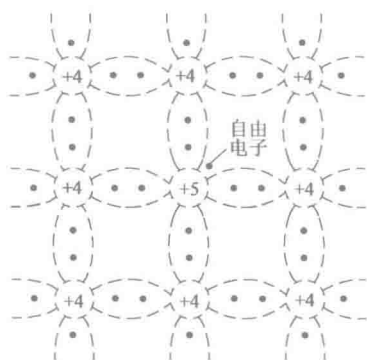


图 9-3 N 型半导体结构

2. P 型半导体

在本征硅（或锗）中掺入少量的三价元素，如硼、铝、镓等，就得到 P 型半导体。这时杂质原子替代了晶格中的某些硅原子，它的三个价电子和相邻的四个硅原子组成共价键时，只有三个共价键是完整的，第四个共价键因缺少一个价电子而出现一个空位，在室温下它很容易吸引邻近硅原子的价电子来填充，于是杂质原子变为带负电荷的离子，而邻近硅原子的共价键因缺少一个电子，出现了一个空穴，如图 9-4 所示。这样每个杂质原子都会提供一个空穴，从而使空穴载流子的数目大大增加。同样，在 P 型半导体中存在着少数电子—空穴对，当掺入三价元素时，空穴是多子，自由电子是少子，故这种杂质半导体叫做 P 型半导体（P-type Semiconductor）或空穴型半导体。

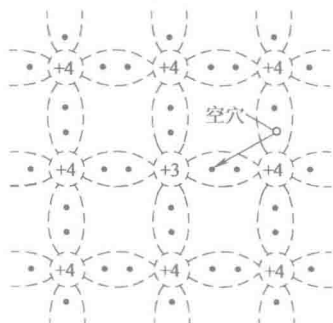


图 9-4 P 型半导体结构

综上所述，杂质半导体中，多子的浓度取决于所掺杂质的浓度，尽管掺入的杂质浓度很小，但通常由杂质原子提供的载流子数却远大于本征载流子数，所以杂质半导体的导电能力比本征半导体要大得多。而少子是由本征激发产生的，故它的浓度与温度或光照密切相关。杂质半导体中正负电荷数量相等，因此仍然保持电中性。

练习与思考题

9-1-1 电子导电和空穴导电有什么区别？空穴电流是不是由自由电子递补空穴形成的？

9-1-2 N型半导体中的自由电子多于空穴，而P型半导体中的空穴多于自由电子，那么N型半导体带负电，P型半导体带正电？

9.2 PN 结

N型半导体和P型半导体并不单独直接用来制造半导体器件，而是通过一定的工艺，使一块P型半导体和一块N型半导体结合在一起，在它们的交界处形成一个特殊区域，称为PN结（PN Junction）。PN结是构成各种半导体器件的基础。

9.2.1 PN 结的形成

在图9-5所示的一块晶体中，两边分别掺入杂质形成P型半导体和N型半导体。图中， $\ominus$ 代表得到一个电子的三价杂质离子，带负电； $\oplus$ 代表失去一个电子的五价杂质离子，带正电。由于P型半导体有大量的空穴和少量的电子，N型半导体有大量的电子和少量的空穴，P型半导体和N型半导体交界面两侧的电子和空穴浓度相差很大。因此空穴要向N区扩散，自由电子要向P区扩散（所谓扩散就是物质从浓度大的地方向浓度小的地方运动），如图9-5a所示。扩散的结果在P区中靠近交界面的一边出现一层带负电荷的离子区，在N区中靠近交界面的一边出现一层带正电荷的离子区。于是在交界面附近形成一个空间电荷区，这个空间电荷区就是PN结，如图9-5b所示。

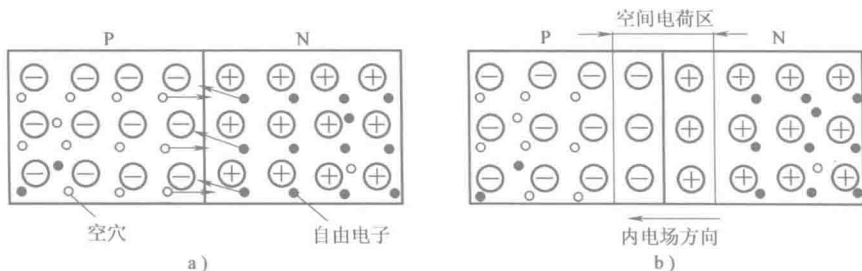


图 9-5 PN 结的形成

正负电荷在交界面两侧形成一个内电场，方向由N区指向P区。内电场对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，但又可以推动少数载流子（P区的自由电子和N区的空穴）越过空间电荷区进入到另一侧。这种少数载流子在内电场作用下的运动称为少数载流子的漂移运动。扩散和漂移既相互联系又相互矛盾。开始时，扩散运动强，此时空间电荷区变宽，内电场变强。在一定条件下（例如温度一定）随着内电场的增强，多数载流子的扩散运动将被削弱，而少数载流子的漂移运动将逐步加强。最后漂移和扩散运动将达到动态平衡，空间电荷区的宽度亦相对稳定，PN结就趋于稳定，如图9-6所示。

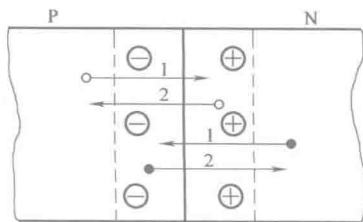


图 9-6 漂移和扩散达到相对平衡

- 1—多数载流子扩散运动的方向
- 2—少数载流子漂移运动的方向

PN 结的内电场的电位差约为零点几伏，宽度一般为几微米到几十微米。

9.2.2 PN 结的单向导电性

当 PN 结上加正向电压时，如图 9-7 所示，P 区接外电源的正极，N 区接外电源的负极。由图可知，内电场和外电场的方向相反，在外电场的作用下，多数载流子将被推向空间电荷区，结果是空间电荷区变窄，内电场被削弱，漂移和扩散的平衡被破坏，这将有利于多数载流子的扩散运动（漂移运动更难进行），形成正向扩散电流，此时称为 PN 结导通，PN 结呈现低电阻。在一定范围内，电场越强，正向电流越大。正向电流包括空穴电流和自由电子电流两部分，外电源不断提供电荷，使其电流得以维持。

当在 PN 结上加反向电压时，如图 9-8 所示，即外电源的正极接 N 区，负极接 P 区（称 PN 结反向偏置）。由图可见，外电场方向与内电场方向一致，它将 N 区的多子（电子）从 PN 结附近拉走，将 P 区的多子（空穴）从 PN 结附近拉走，使 PN 结变厚，内电场增强，多数载流子的扩散运动更难进行，但使少数载流子的漂移运动增强。由于少数载流子的浓度很小，因而反向电流也很小，近于反向截止，即 PN 结呈现的反向电阻很高。又因为少数载流子的浓度受温度影响很大，所以温度对反向电流的影响很大。

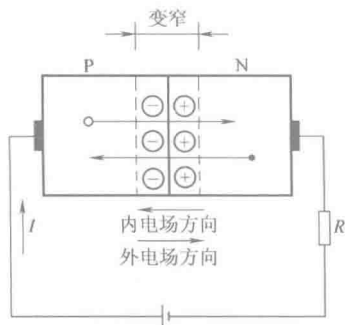


图 9-7 PN 结加正向电压

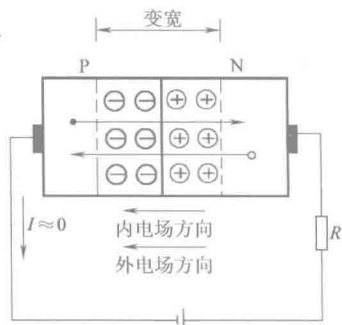


图 9-8 PN 结加反向电压

综上所述，PN 结正向偏置时，正向电流很大，PN 结反向偏置时，反向电流很小，这就是 PN 结的单向导电性。理想情况下，可认为 PN 结正向偏置时，电阻为零，PN 结正向导通；PN 结反向偏置时，电阻为无穷大，PN 结反向截止。

练习与思考题

- 9-2-1 空间电荷区是怎样形成的？
- 9-2-2 为什么 PN 结的反向电流很小？

9.3 半导体二极管

9.3.1 结构和类型

半导体二极管（Diode）是由 PN 结两端接上电极引线并用管壳封装构成的。由 P 区引出的电极称为阳极，N 区引出的电极称为阴极。由于 PN 结的单向导电性，二极管导通时电

流方向是由阳极流向阴极。

二极管的种类很多,按材料来分,最常用的有硅管、锗管两种;按结构来分,有点接触型、面接触型几种;按用途来分,有普通二极管、整流二极管、稳压二极管等多种。二极管的图形符号如图 9-9a 所示。二极管的外形示意图如图 9-9d 所示。

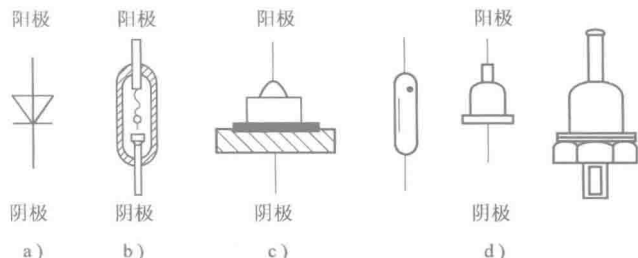


图 9-9 二极管的图形符号、结构和外形示意图

a) 图形符号 b) 点接触型 c) 面接触型 d) 外形示意图

从结构来看,点接触型二极管(一般为锗管)如图 9-9b 所示,其特点是 PN 结面积小,结电容小,允许通过的电流较小,可以在高频下工作,常用于高频检波,也可用作数字电路里的开关器件;面接触型二极管(一般为硅管)如图 9-9c 所示,其特点是 PN 结面积大,结电容大,允许通过的电流较大,只能在较低的频率下工作,常用作整流。

9.3.2 伏安特性

二极管的电流与电压的关系曲线 $I=f(V)$,称为二极管的伏安特性,如图 9-10 所示。二极管的核心是一个 PN 结,具有单向导电性。由图 9-10 可见,二极管的伏安特性曲线是非线性的,可分为两部分:正向特性、反向特性。

1. 正向特性

在外加正向电压较小时,外电场不足以克服内电场对多数载流子扩散运动所造成的阻力,电路中的正向电流几乎为零。当正向电压超过一定数值时,才有明显的正向电流,伏安特性的这个范围称为死区,相应的电压称为死区电压。通常硅管的死区电压约为 0.5V,锗管的死区电压约为 0.1V。而在正向电压大于死区电压后,正向电流迅速增长,曲线近似上升的直线,电流迅速增加,二极管的正向压降变化却很小。在伏安特性的这一区域,硅管正向压降约为 0.6~0.8V,锗管的正向压降约为 0.2~0.3V。二极管的伏安特性对温度很敏感,如图 9-10 所示,温度升高时,正向特性曲线向左移,这说明,对应同样大小的正向电流,正向压降随温升而减小。研究表明,温度每升高 10℃,正向压降减小 2mV。

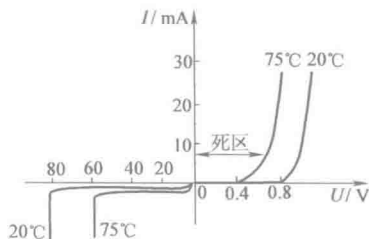


图 9-10 二极管的伏安特性

2. 反向特性

在反向电压作用下,少数载流子漂移形成的反向电流很小,在反向电压不超过某一范围时,反向电流基本恒定,通常称之为反向饱和电流。一般小功率锗管的反向电流约为几十到几百微安,而小功率硅管的反向电流要小得多,一般在 0.1μA 以下。当温度升高时,少数载流子数目增加,使反向电流增大,特性曲线下移。研究表明,温度每升高 100℃,反向电

流近似增大一倍。当反向电压继续增加到某一电压时,反向电流剧增,二极管失去单向导电性,称为反向击穿,该电压称为反向击穿电压。二极管正常工作时,不允许出现这种情况。

9.3.3 主要参数

二极管的特性除用伏安特性曲线表示外,参数同样能反映出二极管的电性能,器件的参数是正确选择和使用器件的依据。半导体二极管的主要参数有以下几个:

1) 最大整流电流 I_{OM} 。 I_{OM} 指的是二极管长期工作时,允许通过的最大的正向平均电流。在使用时,若电流超过这个数值,将使PN结过热而把管子烧坏。

2) 反向工作峰值电压 U_{RWM} 。 U_{RWM} 是指管子不被击穿所允许的最大反向电压。一般这个参数是二极管反向击穿电压的一半,若反向电压超过这个数值,管子将会有击穿的危险。

3) 反向峰值电流 I_{RM} 。 I_{RM} 是指二极管加反向电压 U_{RWM} 时的反向电流值, I_{RM} 越小,二极管的单向导电性越好。 I_{RM} 受温度影响很大,使用时要加以注意。硅管的反向电流较小,一般在几微安以下,锗管的反向电流较大,为硅管的几十到几百倍。

4) 最高工作频率 f_M 。由于PN结的电容效应,二极管在外加高频交流电压时,单向导电作用变差。 f_M 是二极管单向导电作用开始明显退化时交流信号的频率。

半导体二极管应用十分广泛,利用其单向导电特性,可实现整流、限幅、钳位、保护、开关等功能。下面介绍两种基本应用电路。

1. 限幅电路

例 9-1 如图 9-11 所示,已知 $u_i = 10\sin\omega t\text{V}$, $E = 5\text{V}$,试分析工作原理,并作出输出电压 u_o 的波形。

解: (1) 二极管导通的条件是 $u_i > E$,由于 VD 为理想二极管,VD 一旦导通,管压降为零,此时 $u_o = E$ 。

(2) 当 $u_i \leq E$ 时,二极管截止,该支路断开, R 中无电流,其压降为零,所以 $u_o = u_i$ 。

(3) 根据以上分析,可作出 u_o 的波形,如图 9-12 所示(作图时, u_o 和 u_i 的波形在时间轴上要对应)。由图可见,输出电压的正向幅度被限制在 5V 。

2. 钳位电路

例 9-2 在图 9-13 中,输入端 A 的电位 $V_A = 4\text{V}$,B 的电位 $V_B = 0\text{V}$,求输出端 F 的电位 V_F 。电阻 R 接负电源 -10V 。

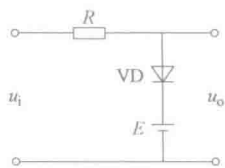


图 9-11 例 9-1 图

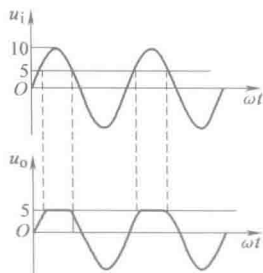


图 9-12 例 9-1 u_o 的波形

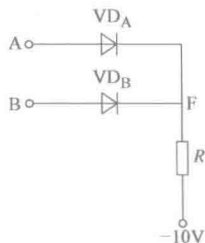


图 9-13 例 9-2 图

解: 因为 A 端电位比 B 端电位高,所以 VD_A 优先导通。若二极管的正向电压为 0.3V ,

则 $V_F = V_A - 0.3\text{V} = 3.7\text{V}$, 当 VD_A 导通后, VD_B 上加的是反向电压, 因而截止。在这里, VD_A 起钳位作用, 把 F 端的电位钳在 3.7V ; VD_B 起隔离作用, 把输入端 B 和输出端 F 隔离开来。

练习与思考题

9-3-1 什么是死区电压? 产生死区电压的原因是什么? 硅管和锗管的死区电压的典型值约为多少?

9-3-2 二极管的反向饱和电流与外加反向电压及环境温度的关系?

9.4 特殊二极管

上面介绍了普通二极管, 下面再介绍一些特殊二极管, 如稳压二极管 (Zener Diode)、发光二极管 (Light Emitting Diode)、光电二极管 (Photodiode)。

9.4.1 稳压二极管

稳压二极管 (简称稳压管) 是一种特殊的面接触型半导体硅二极管, 具有稳定电压的作用。稳压管在电路中的正确连接方法如图 9-14 所示; 图 9-15a 和 b 为稳压管的伏安特性及图形符号。由图可见, 其正向特性和普通二极管相同, 反向电压较小时, 反向电流很小, 反向电压较大时, 稳压管击穿, 反向电流急剧增加, 但管子两端的电压几乎不变, 近似于恒压特性。稳压管正常工作时就是工作在反向击穿区, 用它来提供稳定的电压。从稳压管的反向特性曲线可以看出, 当反向电压较小时, 反向电流几乎为零, 当反向电压增高到击穿电压 U_Z (也是稳压管的工作电压) 时, 反向电流 I_Z (稳压管的工作电流) 会急剧增加, 稳压管反向击穿。在特性曲线 ab 段, 当 I_Z 在较大范围内变化时, 稳压管两端电压 U_Z 基本不变, 具有恒压特性, 利用这一特性可以起到稳定电压的作用。

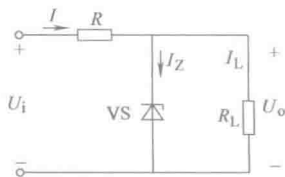


图 9-14 稳压管的电路

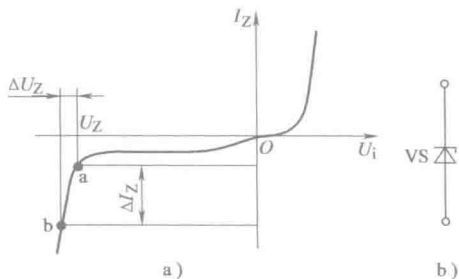


图 9-15 稳压管的伏安特性及图形符号

稳压管与一般二极管不一样, 它的反向击穿是可逆的, 只要反向电流不超过稳压管的允许范围, PN 结就不会过热损坏, 当外加反向电压去除后, 稳压管恢复原性能, 所以稳压管具有良好的重复击穿特性。

1. 稳压管的主要参数

1) 稳定电压 U_Z 。稳定电压 U_Z 指稳压管正常工作时, 管子两端的电压。由于制造工艺的原因, 稳压值也有一定的分散性, 如 2DW7A 型稳压管, 在工作电流为 10mA 时, U_Z 在

5.8 ~ 6.6V 之间。但就某一只稳压管而言,其稳定电压 U_Z 的值是固定的,所以在实际使用中,要对管子进行测试和挑选。

2) 动态电阻 r_Z 。动态电阻是指稳压管正常工作时,其电压的变化量与相应的电流的变化量的比值

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (9-1)$$

稳压管的反向特性越陡, r_Z 越小,稳压性能就越好。

3) 稳定电流 I_Z 。稳定电流是指当稳压管两端的电压等于稳定电压时,稳压管中通过的反向电流。只有 $I \geq I_Z$,才能保证稳压电路有较好的稳压效果。

4) 最大稳定电流 I_{ZM} 。允许通过的最大反向电流, $I > I_{ZM}$ 时管子会因过热而损坏。

5) 最大允许功耗 P_{ZM} 。最大允许耗散功率是指稳压管的 PN 结不至于由于结温过高而损坏的最大功率。它与稳压管的材料、结构及工艺有关,它等于稳定电压 U_Z 和最大稳定电流 I_{ZM} 的乘积。如 2CW15 型稳压管的最大允许耗散功率为 250mW。

6) 电压温度系数 α_V 。温度变化 10℃ 时,稳定电压变化的百分数定义为电压温度系数。电压温度系数越小,温度稳定性越好,通常硅稳压管在 U_Z 低于 4V 时具有负温度系数,高于 6V 时具有正温度系数, U_Z 在 4 ~ 6V 之间,温度系数很小。

2. 稳压管稳压原理

稳压管正常工作的条件有两点:一是工作在反向击穿状态;二是稳压管中的电流要在稳定电流和最大允许电流之间。当稳压管正偏时,它相当于一个普通二极管。图 9-14 所示为最常用的稳压电路,其中, U_i 为未经稳定的直流输入电压, R 为限流电阻, R_L 为负载电阻, U_o 为稳压电路的输出电压。当 U_i 或 R_L 变化时,稳压管中的电流发生变化,但在一定范围内其端电压变化很小,因此起到稳定输出电压的作用。

1) 负载电阻 R_L 变化。设负载电阻 R_L 减小,输出电压 U_o 将下降,由于稳压管并联在输出端,由稳压管伏安特性可见,电流 I_Z 将急剧减小,流过 R 上的电流 I_R 也减小,导致 R 上的压降 U_R 下降,以此来补偿 U_o 的下降,从而保证输出电压 U_o 基本不变。这一过程可表示如下:

$$\begin{array}{ccccccc} R_L \downarrow & \rightarrow & U_o \downarrow & \rightarrow & U_Z \downarrow & \rightarrow & I_Z \downarrow \rightarrow I \downarrow \rightarrow IR \downarrow \\ & & & & & & \uparrow \\ & & & & & & U_o \uparrow \leftarrow \end{array}$$

2) 输入电压 U_i 变化。设 U_i 增加,输出电压 U_o 也将增加,由稳压管伏安特性可见, I_Z 将急剧增大,则流过 R 上的电流 I_R 也增加,导致 R 上的压降增大,以此来抵消 U_i 的升高,从而使输出电压 U_o 基本保持不变,这一过程可表示如下:

$$\begin{array}{ccccccc} U_i \uparrow & \rightarrow & U_o \uparrow & \rightarrow & U_Z \uparrow & \rightarrow & I_Z \uparrow \rightarrow I \uparrow \rightarrow IR \uparrow \\ & & & & & & \uparrow \\ & & & & & & U_o \downarrow \leftarrow \end{array}$$

例 9-3 图 9-16 所示电路中,已知 $U_Z = 14V$, $I_{ZM} = 18mA$, $I_Z = 5mA$,负载电阻 $R_L = 2k\Omega$,当输入电压由正常值发生 $\pm 20\%$ 的波动时,要求负载两端电压基本不变,试确定输入电压 U_i 的正常值和限流电阻 R 的数值。

解: 负载两端电压 U_L 就是稳压管的端电压 U_Z ,当 U_i 发生波动时,必然使限流电阻 R

上的压降和 U_Z 发生变动,引起稳压管电流的变化,只要在 $I_{ZM} \sim I_Z$ 范围内变动,可以认为 U_Z 即 U_L 基本上未变动,这就是稳压管的稳压作用。

(1) 当 U_i 向上波动 20%, 即 $1.2U_i$ 时, 认为 $I_1 = I_{ZM} = 18\text{mA}$, 因此有

$$I = I_{ZM} + I_L = 18 + \frac{U_Z}{R_L} = \left(18 + \frac{14}{2}\right)\text{mA} = 25\text{mA}$$

由 KVL 得

$$1.2U_i = IR + U_L = 25 \times 10^{-3} \times R + 14$$

(2) 当 U_i 向下波动 20%, 即 $0.8U_i$ 时, 认为 $I_1 = 5\text{mA}$, 因此有

$$I = I_Z + I_L = 5 + \frac{U_Z}{R_L} = \left(5 + \frac{14}{2}\right)\text{mA} = 12\text{mA}$$

由 KVL 得

$$0.8U_i = IR + U_L = 12 \times 10^{-3} \times R + 14$$

联立方程组可得

$$U_i = 32.6\text{V}, R = 1001.8\Omega$$

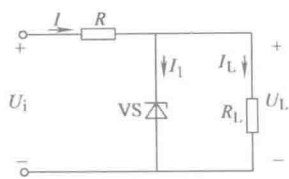


图 9-16 例 9-3 图

9.4.2 发光二极管

发光二极管通常用元素周期表中 III ~ V 族元素的化合物 (如砷化镓、磷化镓等) 制成。这种管子当通过正向电流时会发出可见光,这是由于电子与空穴直接复合释放出多余能量的结果。发光的颜色与所用的材料有关,有红、黄、绿等。发光二极管的图形符号如图 9-17 所示。发光二极管的死区电压比普通二极管高,正向电压约为 $1.5 \sim 2.5\text{V}$,发光强度与正向电流大小成正比,正向工作电流一般为几毫安到几十毫安。发光二极管常用作显示器件,除单个使用时,也常做成七段数码管或矩阵式大屏幕显示器。



图 9-17 发光二极管的图形符号

9.4.3 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管,是一种将光信号转换为电信号的特殊二极管 (受光器件)。与普通二极管一样,其基本结构也是一个 PN 结,它的管壳上开有一个嵌着玻璃的窗口,以便光线的射入。光电二极管的图形符号如图 9-18 所示。

当光电二极管工作在反向偏置下,无光照时,流过光电二极管的电流 (称暗电流) 很小;当光线照射于它的 PN 结时,可以成对地产生自由电子和空穴,使半导体中少数载流子的浓度提高。这些载流子在一定的反向偏置电压作用下可以产生漂移电流,使反向电流增加。如 2AU1B 光电二极管的暗电流小于 $10\mu\text{A}$,光电流达 $40\mu\text{A}$ 。利用光电二极管制成光电传感器,可以把非电信号转变为电信号,实现控制或测量等。如果把发光二极管和光电二极管组合并封装在一起,则构成二极管型光电耦合器。光电耦合器可以实现输入和输出电路的电气隔离和实现信号的单方向传递,它常用在数/模转换电路或计算机控制系统中作接口电路。



图 9-18 光电二极管的图形符号

光电二极管的主要参数如下：

- 1) 暗电流。指无光照时的反向饱和电流。一般小于 $1\mu\text{A}$ 。
- 2) 光电流。指在额定照度下的反向电流。一般为几十毫安。
- 3) 灵敏度。指在给定波长（如 $0.9\mu\text{m}$ ）的单位光功率时，光电二极管产生的光电流。一般不小于 $0.5\mu\text{A}/\mu\text{W}$ 。
- 4) 峰值波长。指使光电二极管具有最高响应灵敏度（光电流最大）的光波长。一般光电二极管的峰值波长在可见光和红外线范围内。
- 5) 响应时间。指加定量光照后，光电流达到稳定值的 63% 所需要的时间。一般为 $10 \sim 7\text{s}$ 。

光电二极管作为光控元件可用于各种物体检测、光电控制、自动报警等方面。当制成大面积的光电二极管时，可当作一种能源而称为光电池。此时它不需要外加电源，能够直接将光能变成电能。

练习与思考题

9-4-1 为什么稳压管的动态电阻越小稳压效果越好？

9-4-2 光电二极管在使用时是正向连接还是反向连接？

9.5 二极管整流电路

大多数电路中，通常都需要电压稳定的直流电源供电。小功率稳压电源主要由电源变压器、整流、滤波和稳压电路四部分组成。下面主要介绍整流电路（Rectifier Circuit）。

整流电路的任务是将交流电变换成直流电。完成这一任务主要靠二极管的单向导电作用，因此二极管是构成整流电路的关键元件。为简单起见，下面分析整流电路时，把二极管当作理想元件来处理（正向导通电阻为零，反向电阻为无穷大）。

9.5.1 半波整流电路

图 9-19 所示为单相半波整流电路。图中，变压器二次电压 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin\omega t$ 。下面将 VD 看作理想元件，分析电路的工作原理。

当 u_2 为正半周时，a 点电位高于 b 点，VD 处于正向导通状态，所以

$$u_o = u_2, i_D = i_o = \frac{u_o}{R_L}$$

当 u_2 为负半周时，a 点电位低于 b 点，VD 处于反向截止状态，所以： $i_D = i_o = 0$ ， $u_o = i_o R_L = 0$ ， $u_D = u_2$ 。

根据以上分析，作出 u_2 、 u_D 、 i_D 、 u_o 、 i_o 的波形，如图 9-20 所示。

可见输出为单向脉动电压。通常，负载上的电压用一个周期的平均值来说明它的大小，单相半波整流输出平均电压为

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}U_2 \sin\omega t d\omega t = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45 U_2 \quad (9-2)$$

平均电流为

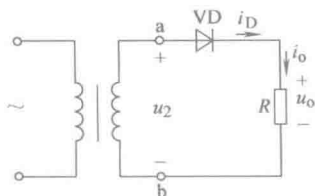


图 9-19 单相半波整流电路

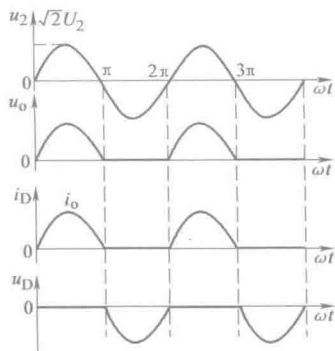


图 9-20 单相半波整流波形

$$I_o = \frac{0.45 U_2}{R_L} \quad (9-3)$$

单相半波整流电路中二极管的平均电流就是整流输出的电流，即

$$I_D = I_o \quad (9-4)$$

二极管截止时承受的最大反向电压可从图 9-20 看出。在 u_2 负半周时，VD 所承受到的最大反向电压为 u_2 的最大值，即

$$U_{\text{DRM}} = \sqrt{2} U_2 \quad (9-5)$$

9.5.2 桥式整流电路

单相桥式整流电路如图 9-21 所示。图中，T 为电源变压器，它的作用是将交流电网电压 u_1 变成整流电路要求的交流电压 $u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$ ， R_L 是要求直流供电的负载电阻，四只整流二极管 $\text{VD}_1 \sim \text{VD}_4$ 接成电桥的形式，故有桥式整流电路之称。图 9-22 是它的简化画法。

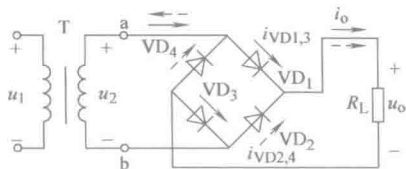


图 9-21 单相桥式整流电路

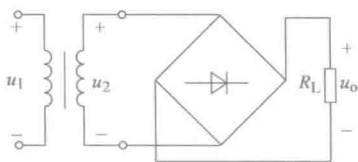


图 9-22 单相桥式整流电路简图

在电源电压 u_2 的正、负半周（设 a 端为正，b 端为负时是正半周）内电流通路分别用图 9-21 中实线和虚线箭头表示。负载 R_L 上的电压 u_o 的波形如图 9-23 所示。电流 i_o 的波形与 u_o 的波形相同。显然，它们都是单方向的全波脉动波形。

单相桥式整流电压的平均值为

$$U_o = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9 U_2 \quad (9-6)$$

直流电流为
$$I_o = \frac{0.9 U_2}{R_L} \quad (9-7)$$

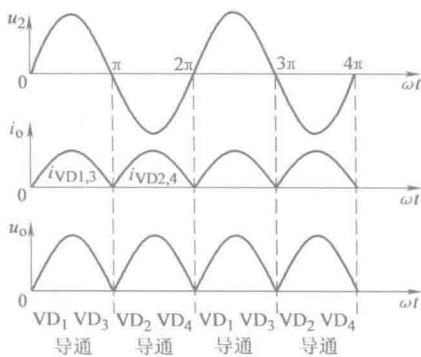


图 9-23 单相桥式整流电路波形