



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工与电子技术

(第二版) (下册)

■ 王鸿明 段玉生 王艳丹



高等教育出版社
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电工与电子技术

(第二版) (下册)

王鸿明 段玉生 王艳丹



高等教育出版社
Higher Education Press



内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书是为工科非电类专业编写的,用于讲授电工技术、电子技术课程使用的教材。编写时按通用教材要求考虑,因而内容丰富、适用面广。本书的特点是加强基础、增强应用,注重理论联系实际,力求达到学以致用。本书上册为电工技术部分,主要内容有电路元件与电路定律、电路分析方法、正弦交流电路、周期性非正弦电流电路、电路中的谐振与电路的频率响应、三相交流电路、电路的暂态过程、磁路、交流铁心线圈与变压器、电动机、继电器控制、可编程控制器(PLC)、电工测量、电路仿真软件 TINA 及应用。本书下册为电子技术部分,主要内容有二极管、晶体管,基本放大电路,差分放大、功率放大和集成运放,放大电路中的负反馈,集成运放的应用,电源逻辑代数,组合逻辑电路,时序逻辑电路,脉冲信号的产生与整形,大规模集成电路等内容。

本书可作为高等学校工科非电类专业本科、专科教材或参考书,对相关的工程技术人员亦有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电工与电子技术. 下册/王鸿明,段玉生,王艳丹.

—2 版. —北京:高等教育出版社,2009.12

ISBN 978-7-04-028058-6

I. 电… II. ①王…②段…③王… III. ①电工技术-高等学校-教材②电子技术-高等学校-教材 IV. TM TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 171606 号

策划编辑 金春英 责任编辑 王莉莉 封面设计 于文燕 责任绘图 尹莉
版式设计 张岚 责任校对 王效珍 责任印制 张泽业

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京地质印刷厂

开本 787×1092 1/16
印张 23.75
字数 580 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2005 年 4 月第 1 版
2009 年 12 月第 2 版
印次 2009 年 12 月第 1 次印刷
定价 28.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28058-00



第二版前言

本书《电工与电子技术》(第二版)是以国家电工课程教学指导委员会制订的“电工学教学基本要求(草案)”为依据,并根据本教材第一版使用时的教学实践及近年来电工、电子技术发展和应用的情况,对第一版教材进行了适当的修改和增删后完成的。

修改情况如下:

1. 对第一版教材中一些较深、较难的内容,如复杂正弦交流电路的分析、磁路分析、继电器控制电路设计、放大电路综合等内容进行了删减。此外,还对一些次要内容进行了精简,降低难度,从而使第二版教材能为更多的院校接受,适用面将会更广。

2. 对部分内容进行了优化组合,目的是使读者能具有较好的理论基础和分析问题的能力。例如,将第一版教材的第15章基本放大电路、第16章集成运算放大器,重新组合成4章内容。即,第15章基本放大电路,第16章差分放大、功率放大和集成运放,第17章放大电路中的负反馈,第18章集成运放的应用。进行重新组合后,基本概念更清晰,问题分析更明确,使读者能更好地理解各种放大电路的工作特点,为理解和应用集成运放电路打下良好的基础。

3. 节能环保是世界的一件“大事”,本书第二版中凡涉及电能应用之处,编者均强调了这一概念,并从节能环保的角度介绍了可再生能源应用和节能灯等常识。增加这些内容的目的是让每个人在工作和生活中都树立节能的意识。

4. 考虑到目前业界可编程控制器(PLC)产品的市场占有率和应用情况,对可编程控制器一章进行了重新编写。采用西门子S7-200系列PLC作为学习PLC的典型机型,并增加了利用顺序功能图编程的方法。

5. 增加了电子设计自动化(Electronics Design Automation, EDA)的内容。随着电工电子技术的飞速发展,掌握和应用EDA技术,已经成为每位工程技术人员必备的技能。

EDA技术以计算机为工作平台,以硬件描述语言为电路和器件设计的基础,结合相应的开发软件,使电子系统的设计产生了质的飞跃。在EDA技术中,最为基础的硬件描述语言是SPICE(Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis,即:针对IC设计的仿真程序)。SPICE是20世纪70年代由Berkeley大学开始设计的,目前已经发展到SPICE 3F5版本。商业化的电路仿真软件都是基于SPICE的扩充,如TINA、Multisim、PSpice等。其功能从最初的只能进行数模混合电路仿真,扩充到了可以进行VHDL仿真、单片机(MCU)仿真、PCB设计等功能。除此之外,每种仿真软件都有自己的特点。

本书在电工技术及模拟电路中采用TINA进行电路仿真。TINA是完全汉化的电路仿真软件,除具有电路图输入、SPICE仿真功能、VHDL仿真、MCU仿真、PCB设计等这些电路仿真软件共有的功能外,还具有符号分析、输出相量图、三维实况仿真等特有功能,其功能强

大、容易入门、运行流畅、模型正确的特点,很适合电工电子技术的教学使用。

TINA 的功能十分强大,而本书只利用了其中很基本的功能。它不但适合教学使用,也适合于电子系统的设计使用,相信读者利用其在线帮助经过练习,可以熟练使用 TINA 的各种功能。

硬件描述语言(VHDL)是目前应用可编程逻辑器件设计数字系统的基本语言,但是鉴于本书的应用范围和教学学时,只对可编程逻辑器件的原理、硬件描述语言(VHDL)及其使用环境进行了简要介绍。

本书由王鸿明、段玉生和王艳丹共同完成,段玉生负责编写本书上册的第 11 章和第 13 章,王艳丹负责编写下册的第 24 章,其余各章及附录由王鸿明编写。段玉生编写了与本书配套的电子教案,王艳丹编写了《电工与电子技术学习指导与习题解答》一书。通过这些与本书配套的教材,将能帮助读者更深入地理解和掌握本书的核心知识点,并为进一步学习有关内容提供有力帮助。

本书(上、下册)仍由北京理工大学刘蕴陶教授主审,刘蕴陶教授在长达一年的时间里,以严谨的科学态度和高度认真负责的精神,仔细审阅了书稿,提出了许多修改意见和建议。这些意见和建议为提高本书的质量起到了很好的作用,在此表示衷心的感谢。

由于书中引入新内容较多,而编者的学识和水平有限,书中必然会存在问题和不足,请使用本书的读者提出您的宝贵意见。

编者

2008 年 12 月 20 日

第一版前言

本书是为工科非电类专业本、专科生,学习电工技术、电子技术课程而编写的教材。书中内容以教育部 1995 年颁发的电工技术、电子技术课程教学基本要求为依据,并在此基础上有扩展和加深,目的是使教材能更好地适应现代宽口径人才培养的需要和工科非电类专业对电工技术、电子技术课程教学的要求。为达此目的,编写时作者对书中内容遵循如下两个原则:

1. 考虑到电工技术、电子技术是一门技术基础课程,课程的这个性质决定了课程的内容应具有基础性和普遍适用性,特别是近年来许多非电类专业的专业技术与电工技术、电子技术和计算机技术结合得日益紧密,为了能给专业用电打下良好基础,本教材在编写时力求将基本概念、基本理论、基本知识和分析方法的讲述作为各章、节的重点,以便使读者能具有较扎实的理论基础和分析问题的能力,使读者能在电工技术、电子技术方面具有继续学习的能力,为此,本书中所讨论的问题均本着道理应讲清楚、原因应说明白,事件的过程应有一个清楚的交代。叙述过程要力求做到简明、易懂,准确无误。

2. 由于电工技术、电子技术课程又是一门应用类型的课程,因此,加强应用知识的介绍,学以致用是本教材编写时着重考虑的另一个问题。为了使读者能更好地理解基本概念、基本理论和能运用基本知识与分析方法去解决一些问题,本教材中根据不同的章、节,不同的要求引入了一些“案例”、即“阅读电路图”;“选择电气元件”;“分析电路原理或功能”;“设计电路”等。安排这样一些内容的目的是使读者能够将所学的一个个知识点,汇集成一个知识链,从而能建立起完整的系统(或工程)的概念,有利于提高分析问题和综合问题的能力。

教材内容较教育部颁发的课程教学基本要求有扩展和加深,对于这部分内容标有*号,可按需要选讲。

本教材(上、下册)由北京理工大学刘蕴陶教授审稿。刘蕴陶教授对本书进行了详细的审阅,提出了宝贵的意见和修改建议,并与作者还就一些问题进行了讨论。作者对刘蕴陶教授的工作表示衷心的感谢。

本书使用的一些文字符号前、后章节不尽统一,主要是考虑教学的习惯性和连续性。

由于电工技术、电子技术的内容广泛,作者学识有限,因而在理解和掌握上定有认识不足和理解错误之处,期盼使用本书的教师和读者批评和指正。

编者

2004 年 9 月

目 录

第 14 章 半导体二极管、晶体管	1
14.1 二极管	1
14.1.1 PN 结	1
14.1.2 二极管	3
14.1.3 二极管的主要参数	6
14.1.4 含二极管电路分析	6
14.1.5 一些特殊二极管	9
14.2 双极型晶体三极管	12
14.2.1 晶体管的电流控制作用	12
14.2.2 晶体管共射组态特性曲线	14
14.2.3 晶体管的主要参数	16
14.3 场效应晶体管(场效应管)	17
14.3.1 增强型 N 沟道场效应管(NMOS) ..	18
14.3.2 增强型 P 沟道场效应管(PMOS) ..	20
14.3.3 VMOS	20
14.3.4 MOS 管的参数	21
习题	23
第 15 章 基本放大电路	26
15.1 共发射极电压放大电路	26
15.1.1 阻容耦合共发射极放大电路 中各元件的作用	27
15.1.2 静态分析	28
15.1.3 动态分析	30
15.1.4 工作点稳定的共发射极放大电路 ..	37
15.2 共集电极放大电路——射极 输出器	40
15.2.1 静态分析	41
15.2.2 动态分析	41
15.3 场效应管放大电路	45
15.3.1 阻容耦合场效应管共源极放大 电路	45
15.3.2 阻容耦合场效应管共漏极放大电路 (源极输出器)	48
15.4 多级放大电路	48
15.4.1 阻容耦合多级共发射极放大 电路	48
15.4.2 阻容耦合、共射与共集组合多级 放大电路	51
习题	53
第 16 章 差分放大、功率放大和集成 运放	58
16.1 差分放大电路	59
16.1.1 简单的直接耦合电路存在的 问题	59
16.1.2 差分放大电路的工作原理与 分析	60
16.1.3 差分放大电路的输入、输出方式 ..	65
16.1.4 性能改差的差分放大电路	66
16.2 功率放大	68
16.2.1 直接耦合射极输出电路	68
16.2.2 互补对称功率放大电路	71
16.2.3 集成电路功率放大器	75
16.3 集成运算放大器	76
16.3.1 集成运放的图形符号和等效 电路	76
16.3.2 集成运放的主要参数	77
16.3.3 集成运放的工作区	78
习题	80
第 17 章 放大电路中的负反馈	84
17.1 反馈的基本概念	84
17.1.1 反馈性质的判断	85
17.1.2 反馈电路的组态与判定	88
17.1.3 反馈放大电路的一般关系式	93
17.2 深度负反馈放大电路电压放大 倍数计算	94
17.3 负反馈对放大电路性能的影响 ..	99
习题	101
第 18 章 集成运放的应用	105
18.1 信号运算电路	105
18.1.1 反相放大电路	105

18.1.2 同相放大电路	107	第 21 章 组合逻辑电路	200
18.1.3 加、减运算电路	109	21.1 集成逻辑门电路	200
18.1.4 积分和微分运算电路	113	21.1.1 集成与非门	201
18.2 有源滤波电路	116	21.1.2 集成或非门	203
18.2.1 一阶低通有源滤波器	116	21.1.3 集成门电路逻辑功能扩展	204
18.2.2 高通、带通和带阻电路	117	21.1.4 集成门电路的特性	207
18.3 电压比较器	118	21.2 组合逻辑电路的分析与设计	211
18.3.1 单限比较器	118	21.2.1 组合逻辑电路的分析	211
18.3.2 迟滞比较器	119	21.2.2 组合逻辑电路的设计	213
18.4 波形发生电路	123	21.2.3 竞争与冒险	214
18.4.1 正弦信号发生器	124	21.3 集成组合逻辑电路	215
18.4.2 非正弦信号发生器	129	21.3.1 编码器	216
习题	134	21.3.2 译码器	219
第 19 章 电源	142	21.3.3 数据选择器	223
19.1 直流稳压电源	142	21.3.4 加法器	226
19.1.1 整流电路	142	21.3.5 数值比较器	227
19.1.2 滤波和稳压电路	148	21.3.6 组合逻辑数字集成电路的 应用(举例)	229
19.2 可控整流电路	154	习题	232
19.2.1 晶闸管(SCR)	155	第 22 章 时序逻辑电路	235
19.2.2 晶闸管可控整流电路(主电路)	158	22.1 触发器	235
19.2.3 可控整流电路的控制电 路(触发电路)	165	22.1.1 RS 触发器	235
* 19.2.4 脉宽调制技术(PWM)	169	22.1.2 D 触发器	239
* 19.3 开关电源和变频电源	171	22.1.3 JK 触发器	241
19.3.1 开关电源	171	22.1.4 T(T') 触发器	243
19.3.2 变频电源	172	22.2 触发器的应用(一些常用时序 逻辑电路)	245
习题	174	22.2.1 寄存器	245
第 20 章 逻辑代数	177	22.2.2 计数器	247
20.1 逻辑变量和逻辑函数	178	22.3 时序电路分析	252
20.1.1 逻辑变量	178	22.3.1 同步时序电路分析	252
20.1.2 逻辑函数	179	22.3.2 异步时序电路分析	256
20.2 逻辑运算	180	22.4 集成时序电路组件	259
20.2.1 基本逻辑运算	180	22.4.1 集成电路移位寄存器	259
20.2.2 复合逻辑运算	183	22.4.2 集成电路计数器	262
20.2.3 逻辑代数的基本公式和定理	185	习题	271
20.3 逻辑函数的标准形式与化简	188	第 23 章 脉冲信号的产生与整形	277
20.3.1 积之和与和之积	188	23.1 门电路构成的多谐振荡器、单稳 态触发器和施密特触发器	277
20.3.2 逻辑函数表示方法	190	23.1.1 多谐振荡器	277
20.3.3 逻辑函数化简	194		
习题	197		

23.1.2 单稳态触发器	280	24.2.3 存储器容量的扩展	325
23.1.3 施密特触发器(鉴幅器)	284	24.3 可编程逻辑器件(PLD)	326
23.2 555 定时器	286	24.3.1 PLD 的逻辑图表示方法	327
23.2.1 555 定时器的原理电路与功 能表	287	24.3.2 PAL(可编程阵列逻辑)/GAL (通用阵列逻辑)	329
23.2.2 555 定时器构成的多谐、单稳和 施密特触发器	288	24.3.3 CPLD/FPGA	335
23.2.3 555 定时器应用举例	293	24.3.4 PLD 的编程方法	337
习题	296	24.3.5 VHDL 简介	339
第 24 章 大规模集成电路	300	习题	345
24.1 数字量和模拟量的相互转换	300	附录	350
24.1.1 D/A 转换器(DAC)	300	附录[一]	350
24.1.2 A/D 转换器(ADC)	305	附录[二]	356
24.2 半导体存储器	315	部分习题答案	365
24.2.1 只读存储器(ROM)	315	参考文献	369
24.2.2 随机存储器(RAM)	322		

14.1 二极管

半导体二极管的核心是一个 PN 结。

14.1.1 PN 结

1. 本征半导体和掺杂半导体

物质按导电能力的不同分为导体(电阻率为 $10^{-9} \sim 10^{-8} \Omega \cdot m$ 数量级)和绝缘体(电阻率为 $10^{10} \sim 10^{14} \Omega \cdot m$ 数量级或更高),导电能力介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体,如用于制造半导体器件的材料——硅,电阻率为 $10^3 \sim 10^5 \Omega \cdot m$ 。

半导体器件通常是用硅或锗材料制造的。硅和锗都是 4 价元素,成晶体结构状的硅原子其外层的 4 个价电子都与相邻的原子形成共价键结构,如图 14.1.1(a)所示。这种原子间的键称为共价键结构的半导体,称为本征半导体。

本征半导体内处于共价键上的某些价电子,接收外界能量,如受热或光照后可脱离共价键的束缚成为自由电子,当在本征半导体内出现自由电子后,在其价键处就会出现一个空位,这个空位称为空穴。电子带负电,而原子失去价电子后呈现正电,因此,分析时可以认为空穴是带正电的粒子。在本征半导体中,自由电子(以后简称电子)和空穴是成对出现的,两者带电量相等,但符号相反。电子和空穴都是载运电荷的粒子,称为载流子。在电场的作用下,电子和空穴均会产生定向运动,形成电流。空穴电流与电子电流的区别在于,空穴电流是由处于共价键上的电子,在电场

第 14 章

半导体二极管、晶体管

半导体二极管和晶体管是组成电子电路的基本元件。将二极管、晶体管和电阻、电容及其相互的连线,制作在一块半导体硅片上,使之成为一个完整的、具有一定功能的半导体器件,这种器件称为集成电路。

在这一章内,将对二极管、晶体管的工作原理、特性、主要参数进行简要介绍,为学习电子电路作必要的知识准备。

►14.1 二极管

半导体二极管的核心是一个 PN 结。

►►14.1.1 PN 结

1. 本征半导体和掺杂半导体

物质按导电能力的不同分为导体(电阻率为 $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 数量级)和绝缘体(电阻率为 $10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ 数量级或更高),导电能力介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体,如用于制造半导体器件的材料——硅,电阻率为 $10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 。

半导体器件通常是用硅或锗材料制造的。硅和锗都是 4 价元素。成晶体结构状的硅原子其外层的 4 个价电子都与相邻的原子形成共价键结构,如图 14.1.1(a) 所示。这种由单一的硅原子并呈共价键结构的半导体,称为本征半导体。

本征半导体内处于共价键上的某些价电子,接收外界能量,如受热或光照后可脱离共价键的束缚成为自由电子,本征半导体内出现自由电子后,在共价键处就会出现一个空位,这个空位称为空穴。电子带负电,而原子失去价电子后显现正电,因此,分析时可认为空穴是带正电的粒子。在本征半导体中,自由电子(以后简称电子)和空穴是成对出现的,两者带电荷量相等,但符号相反。电子和空穴都是载运电荷的粒子,称为载流子。在电场的作用下,电子和空穴均会产生定向运动,形成电流。空穴电流与电子电流的区别在于,空穴电流是由处于共价键上的电子,在电场

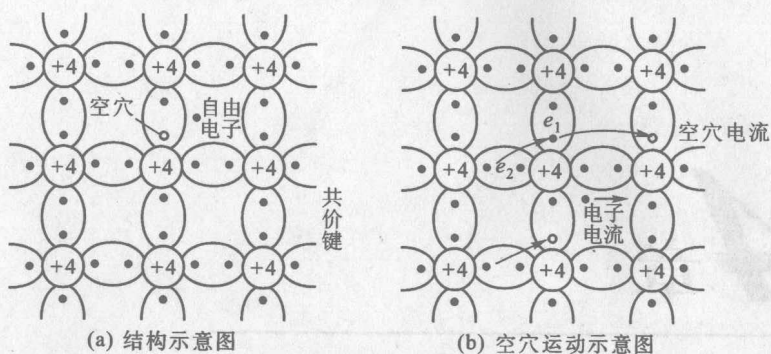


图 14.1.1 本征半导体

力的作用下填补空穴而形成的,如图 14.1.1(b)所示。共价键上的电子 e_1 在电场力作用下移至空穴处填补了空穴,但电子 e_1 移走后,在 e_1 的位置处将出现新的空穴(即相当于原先的空穴在电场力的作用下移至 e_1 处),这时电子 e_2 又会填补 e_1 移走后的空穴,……由于共价键上的电子填补空穴的运动可视为空穴在移动,从而形成的电流称为空穴电流。因此,本征半导体内电流是由电子电流和空穴电流共同形成的,这是半导体导电与导体导电的区别(导体只有自由电子导电,没有空穴导电)。

常温下,本征半导体内的载流子数目很少,为增强半导体的导电能力,在硅(或锗)单晶内掺入五价元素或三价元素后可使半导体内载流子数量增加,从而提高导电能力。在半导体硅中掺入五价的砷(或磷)元素后,砷原子取代某些硅原子的位置,并与其他硅原子结成共价键,与硅原子形成共价键时只需要 4 个价电子,五价的砷原子外层的第 5 个价电子很容易成为自由电子,如图 14.1.2(a)所示。失去一个外层电子的砷原子是固定在晶格上不能移动的正离子。

掺入五价元素的半导体,自由电子数量增多,载流子中自由电子占多数,空穴占少数,这种掺杂半导体称为 N 型半导体,其符号如图 14.1.2(b)所示。符号表示,每掺入一个五价的砷原子后,就会出现一个带正电的离子和一个自由电子。

本征半导体掺入三价元素的铝(或硼)后,铝原子取代某些硅原子的位置,如图 14.1.3(a)所示,每掺入一个铝原子就会出现一个空穴,掺入三价元素的半导体,多数载流子是空穴,自由电子是少数,这种半导体称为 P 型半导体,其符号如图 14.1.3(b)所示。符号表示,每掺入一个三价的原子,就会出现一个带负电的离子和一个空穴。

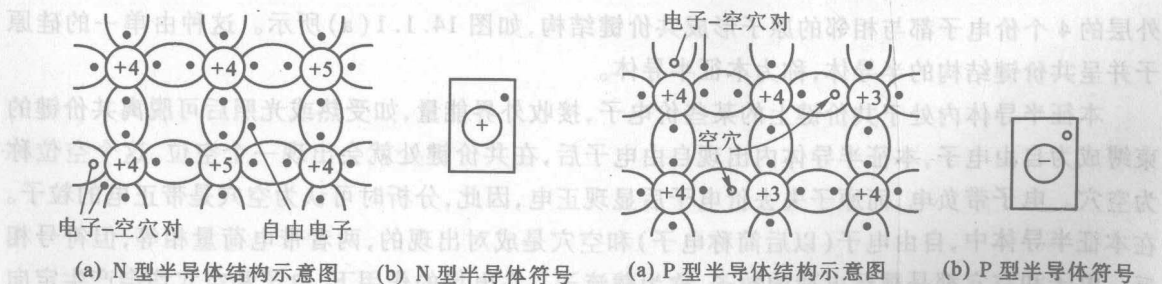


图 14.1.2 N 型半导体

图 14.1.3 P 型半导体

2. PN 结

将 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一硅片上,使之结为一体,因为 N 型半导体内有大量电子, P 型半导体内有大量空穴,当这样两种半导体结为一体后,因两边电子和空穴浓度不同而会产生电子和空穴的扩散,即 N 型区的电子向 P 型区扩散, P 型区的空穴向 N 型区扩散。扩散的结果是 N 型区的电子填补 P 型区半导体共价键上的空穴,从而使自由电子与空穴同时消失,这种现象称为复合。电子与空穴复合过程中得到电子的 P 型半导体带负电,而失去电子的 N 型半导体带正电。随着电子不断与空穴复合,在半导体内部出现了电荷区,如图 14.1.4 中所示,这个空间电荷区称为 PN 结。

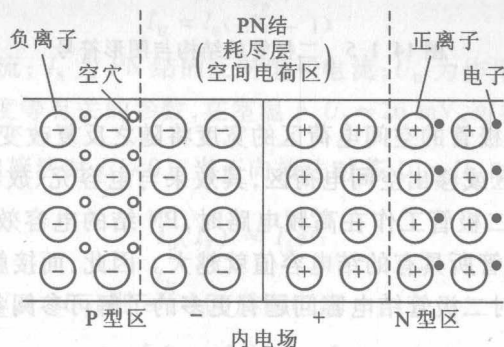


图 14.1.4 PN 结

空间电荷区的出现,使半导体内部产生了内电场,内电场的方向是从 N 型区指向 P 型区。内电场的出现又会使 P 型区的电子向 N 型区运动。电子在电场力作用下的运动称为漂移运动,因此,半导体内出现内电场后,电子、空穴的扩散运动与漂移运动同时存在。内电场随着扩散运动的增强而增强,内电场的增强又使漂移运动增强,最终电子、空穴的扩散与漂移运动达到动态平衡,即认为不再有载流子通过 PN 结,这时半导体内部的空间电荷区的宽度不再增加。

在分析 PN 结问题时,应当注意:半导体内部的空间电荷区(即 PN 结)虽然带电,但是在这个区域内的电子和空穴已全部复合,不存在自由电子和空穴了,因而空间电荷区又被称为耗尽层,即在这个区域内的自由电子已被完全耗尽了。空间电荷区内没有电子和空穴,因而与绝缘体相似。通过外加电压可以控制空间电荷区的宽度,从而使 PN 结具有单向导电的特性,利用这一特性可制成二极管。(有关 PN 结的更详细分析可参阅参考文献[1]、[2]等相关部分。)

▶▶14.1.2 二极管

1. 二极管的结构

二极管的核心部分是一个 PN 结,在 P 型与 N 型半导体的两端加上电极后就构成了一个二极管。与 P 型半导体相连的电极是二极管的阳极,与 N 型半导体相连的电极是二极管的阴极。

二极管有点接触和面接触等不同类型,如图 14.1.5 所示。

二极管所以有不同的结构类型,是因为工作需要的不同而产生的。面接触型二极管,PN 结面积大,允许通过较大的电流,这类结构的二极管主要用于整流电路。点接触型的二极管,PN 结面积小,只适用于小电流电路。PN 结面积大的二极管若工作于频率较高的电路,当作用于二极

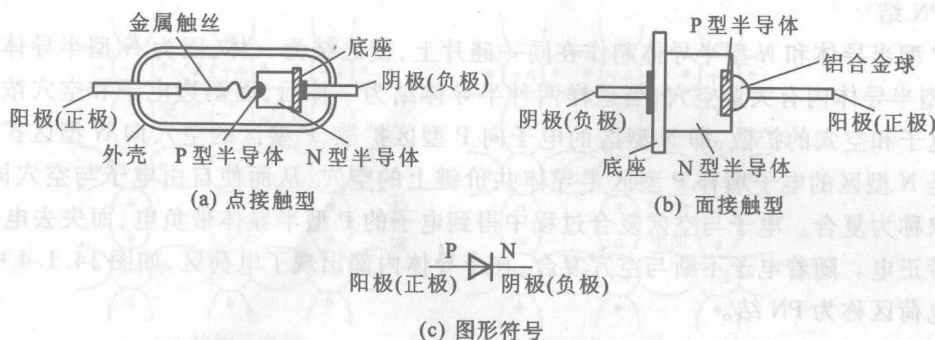


图 14.1.5 二极管的结构与图形符号

管上的电压反复交变时,二极管的空间电荷区的宽度将随之反复改变,空间电荷区宽度变化则意味着有电荷移入空间电荷区或移出空间电荷区,其效果与电容充、放电相似,即在交变电压作用下PN结具有电容效应,当二极管工作在高频电路时,PN结的电容效应将影响二极管的单向导电性,PN结面积越大,二极管所具有的结电容值就越大。因此,面接触型二极管的工作频率远低于点接触型的二极管。欲对二极管结电容问题有更多的了解可参阅参考文献[1]、[2]等相关内容。

2. 二极管的伏安特性

图 14.1.6(a) 所示二极管电路,二极管的阳极电位高于阴极电位,即 U_D 为正值,这种情况称为二极管两端作用着正向电压也称二极管正向接法。图 14.1.6(b) 所示情况,二极管两端作用着反向电压也称二极管反向接法。

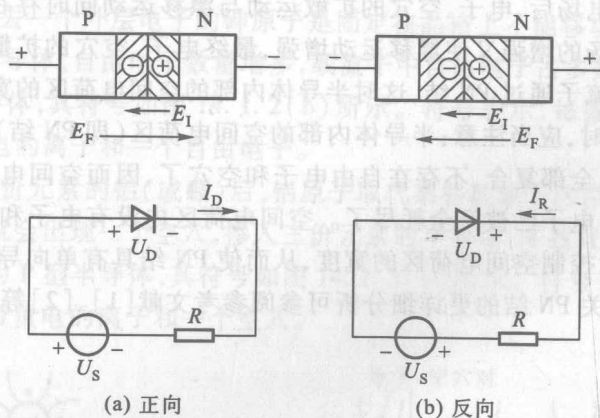


图 14.1.6 二极管正向接法与反向接法

二极管在正向电压作用下,外加电场 E_F 方向与内电场 E_I 方向相反,将会使半导体内部电场削弱,空间电荷区变窄,因而电子、空穴的扩散运动强于漂移运动,越过空间电荷区的电子和空穴在外电路电压作用下形成电流 I_D ,如图 14.1.6(a) 所示,这一电流通常称为二极管正向电流

(I_D)。若二极管上作用着反向电压,如图 14.1.6(b)所示,外加电场 E_F 方向与内电场 E_I 方向一致,从而使空间电荷区增宽,电子、空穴的扩散运动不能进行,只有 P 区的少数载流子(电子)和 N 区的少数载流子(空穴)在电场力的作用下产生漂移运动,形成二极管的反向电流(I_R)。

二极管的反向电流,是由少数载流子的漂移运动产生的,而少数载流子的数目与环境温度有关,当环境温度一定时,少数载流子的数目基本上也维持一定。因此,在一定的温度下,二极管的反向电流在一定的反向电压范围内,不会随着反向电压的增、减而发生变化。因此,二极管的反向电流又称为反向饱和电流,以字符 I_s 表示。通常情况下二极管的反向电流是很小的。

根据半导体物理的理论,通过 PN 结的电流与 PN 结两端电压之间有如下关系

$$I_D = I_s(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad (14.1.1)$$

式中: I_D 为通过 PN 结的电流; I_s 为 PN 结的反向饱和电流; U_D 为作用在 PN 结上的电压; U_T 称为温度电压当量,是个与温度等有关的参数,在室温下 $U_T \approx 26 \text{ mV}$,可视为常数。

正向接法时 $U_D > 0$,反向接法时 $U_D < 0$ 。当正向接法时若 $U_D \gg U_T$ 时,则 $e^{\frac{U_D}{U_T}} \gg 1$,正向电流

$$I_D(I_F) \approx I_s e^{\frac{U_D}{U_T}} \quad (14.1.2)$$

反向接法时 $U_D < 0$,若 $|U_D| \gg U_T$,则 $e^{\frac{U_D}{U_T}} \approx 0$,反向电流

$$I_D(= -I_R) \approx -I_s \quad (14.1.3)$$

根据式(14.1.1)作出的二极管的伏安特性曲线如图 14.1.7 中曲线①所示,而二极管的实测伏安特性曲线如图 14.1.7 中曲线②所示,两条曲线略有差别的原因是:实际二极管正向工作并作用有电压 U_D 时,只有外加电压 U_D 大于一定值后,能影响空间电荷区宽度时,二极管的电流才开始出现,此后电流随电压按指数规律增加。使二极管开始有电流的电压值称为二极管的开启电压 U_{on} ,如图 14.1.7 所示。

二极管的开启电压 U_{on} 值与制造二极管的材料有关,锗二极管的 U_{on} 值为 $0.1 \sim 0.2 \text{ V}$,硅二极管的 U_{on} 值为 0.5 V 左右。二极管正向导电后,电流 I_D 随 U_D 按指数关系增长,当 I_D 达到额定值时,二极管的电压较开启电压 U_{on} 值增大不多,小电流的锗二极管电流达额定值时,其电压 U_D 约为 0.3 V ,而硅二极管的电压 U_D 为 0.7 V 左右。

二极管在反向接法时,反向电流 $I_D = -I_R \approx -I_s$ 。在一定的反向电压值内,反向电流 $I_R \approx I_s$ 保持为一固定值,如图 14.1.7 中所示。当反向电压 U_R 增大而使电场力增强到一定程度后,可将共价键上的电子拉出,使载流子数目大大增加,从而使反向电流迅速增大。另外,反向电压增大,也会造成电子运动速度增大,高速运动的电子与原子核外层电子碰撞后,产生出新的电子-空穴对,并引起连锁反应,使载流子数目大大增加,造成反向电流迅速增大。二极管反向电压 U_R 超过一定数值后,造成反向电流迅速增加的现象,称为电击穿。使二极管出现电击穿的反向电压值,称为击穿电压 U_{RBR} 。二极管出现电击穿后,如果对击穿后的电流值不加以限制,将会造成 PN 结过热而损坏,从而使二极管丧失单向导

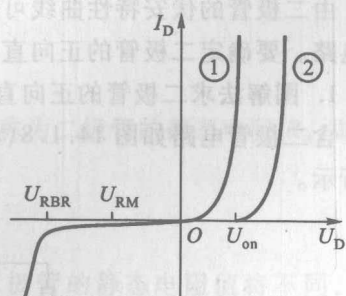


图 14.1.7 二极管的伏安特性曲线
①理论曲线;②二极管实测曲线

电能力。为防止电击穿,允许施加到二极管的最高反向电压值为 U_{RM} ,该值一般为击穿电压值的 $1/2$ 。

►►14.1.3 二极管的主要参数

为了表征半导体器件的性能和使用条件,每一种器件都有一系列相应的参数。二极管的主要参数有以下几个。

1. 最大整流电流 I_F

I_F 值是二极管长期运行时允许通过的正弦半波整流电流的平均值。 I_F 值由 PN 结的面积及二极管的散热条件决定(即大电流的二极管工作时需装有散热片,否则该二极管的使用电流不能用到额定值)。二极管的正向电流若长时间超过额定值,二极管将会因过热而损坏。

2. 最大反向工作电压 U_{RM}

U_{RM} 为二极管工作时,允许施加的最大反向电压值。超过此值后,二极管可能被击穿。

3. 反向电流 I_R

二极管的反向电流 $I_R = I_S$, I_S 为反向饱和电流, I_S 越小,表明二极管单向导电性越好。二极管的反向电流受温度影响,温度升高, I_R 增大。

4. 最高工作频率 f_M

二极管的 f_M 与结电容有关,不同类型二极管的 f_M 值不同。PN 结面积大,电容效应强,则工作频率低。二极管的实际工作频率大于 f_M 后,单向导电性变差。

二极管的类型和参数可以从半导体器件手册中查到。有关二极管的命名方法及一些二极管的参数情况,可参阅本书附录[1]。

►►14.1.4 含二极管电路分析

由二极管的伏安特性曲线可知,二极管是一个非线性元件,因而含二极管的电路是一个非线性电路。要确定二极管的正向直流(称为静态)电压、电流时,可以用图解法或估算法进行。

1. 图解法求二极管的正向直流电压、电流

含二极管电路如图 14.1.8(a) 所示,图中二极管的伏安特性曲线如图 14.1.8(b) 中的曲线 ① 所示。

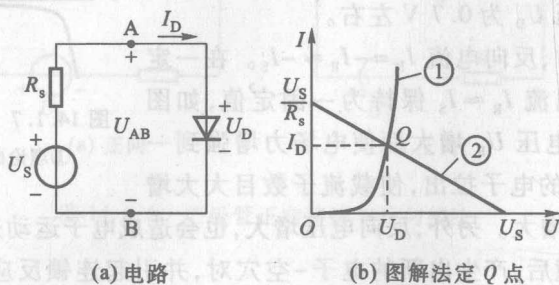


图 14.1.8 图解法确定二极管静态电压与电流

用图解法确定二极管的正向直流电压 U_D 、电流 I_D 时,首先根据图 14.1.8(a),将该电路划分

成为两部分:二极管作为一部分;二极管以外的电源与线性电阻所组成的电路作为另外一部分。二极管的电流 I_D 与电压 U_{AB} 间的关系由它的伏安特性曲线决定;线性电阻与电源组成的这部分电路,其电压 U_{AB} 与电流 I_D 间的关系根据图 14.1.8(a)可知,为

$$U_{AB} = U_s - R_s I_D \quad (14.1.4)$$

式(14.1.4)为一直线方程,根据这一方程作出的曲线如图 14.1.8(b)中的斜线②。斜线②称为二极管的负载线,负载线②与二极管伏安特性曲线有交点 Q , Q 点的坐标值,即所求电路中二极管的正向直流电压 U_D 和电流 I_D 值,该 U_D 和 I_D 值又称为二极管的静态电压、静态电流值,交点 Q 又称为二极管的静态工作点。

2. 估算法计算二极管的正向电流

由二极管的伏安特性曲线可看出,二极管的正向电压高于管子的开启电压 U_{on} 之后,二极管的电流 I_D 随电压 U_D 按指数规律的关系增长。硅二极管开启电压为 0.5 V 左右,小功率硅二极管的正向电流达到额定值时,二极管的正向电压 U_D 约为 0.7 V。换句话说,硅二极管正向导电后,其电压 U_D 与 0.7 V 相差不会很多。同样,对于锗二极管而言,当正向电流达到额定值时,其电压为 0.3 V 左右。为了简化计算,只要二极管处于正向导电状态,就可认为:硅二极管的正向电压为 0.7 V;锗二极管的正向电压为 0.3 V。根据这一估算值,可以确定出图 14.1.8(a)电路中,二极管的正向电流值,即

当使用硅二极管时,正向电流

$$I_D(I_F) = \frac{U_s - U_D}{R_s} \approx \frac{U_s - 0.7}{R_s} \quad (14.1.5)$$

当使用锗二极管时,正向电流

$$I_D(I_F) = \frac{U_s - U_D}{R_s} \approx \frac{U_s - 0.3}{R_s} \quad (14.1.6)$$

3. 静态电阻 R_D 、动态电阻 r_D

(1) 静态电阻

二极管在某个静态工作点下的电压 U_D 与电流 I_D 的比值,称为二极管的静态电阻 R_D ,即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \Big|_Q$$

因为二极管是非线性元件,故在不同的静态工作点下,二极管的静态电阻值将不同,如图 14.1.9 所示,即二极管的静态电阻值不是常数。

(2) 动态电阻

二极管的动态电阻 r_D 的定义如下:二极管在某一静态工作点处,其电压 U_D 的增量 ΔU_D 与电流 I_D 的增量 ΔI_D 的比值,如图 14.1.10 所示,称为二极管的动态电阻 r_D 。

当电压增量 ΔU_D 和电流增量 ΔI_D 很小时,可以认为 $\Delta U_D \rightarrow dU_D$, $\Delta I_D \rightarrow dI_D$,因而,图 14.1.10 中, Q 点处的动态电阻

$$r_D = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} = \frac{dU_D}{dI_D} \Big|_Q \quad (14.1.7)$$

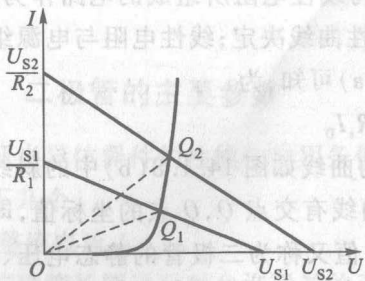


图 14.1.9 静态电阻与工作点的关系

$$(U_{S2} > U_{S1}; R_1 > R_2)$$

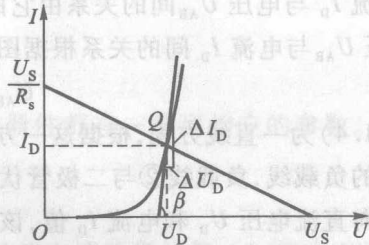


图 14.1.10 动态电阻

在二极管正向导电时,二极管的正向电压 $U_D \gg U_T$,这时二极管的正向电流 $I_D \approx I_S e^{U_D/U_T}$ 。将 I_D 式代入式(14.1.7),得

$$r_D = \frac{dU_D}{d(I_S e^{U_D/U_T})}$$

$$= \frac{1}{I_D} (I_S e^{U_D/U_T}) \cdot dU_D$$

$$= \frac{U_T}{I_D} \Big|_Q$$

$$(14.1.8)$$

式(14.1.8)中: I_D 为二极管在 Q 点的静态电流; U_T 为温度电压当量,室温下约为 26 mV。所以,二极管在工作点 Q 处的动态电阻 r_D 值可近似表示为

$$r_D = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$$

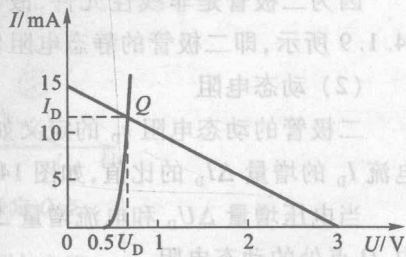
$$(14.1.9)$$

4. 计算举例

例 14.1.1 图 14.1.8(a) 所示电路中使用的硅二极管,其伏安特性曲线如图 14.1.11 所示,该电路中的电源电压 $U_S = 3 \text{ V}$,电阻 $R_S = 200 \Omega$ 。(1) 应用图解法求二极管的静态电压 U_D 和电流 I_D ;(2) 用估算法求该二极管的静态电流 I_D ;(3) 求二极管在上述工作点下的静态电阻 R_D 和动态电阻 r_D ;(4) 若电源电压 U_S 出现 $\pm \Delta U_S = 0.1 \text{ V}$ 的变化量时,求因 $\pm \Delta U_S$ 出现引起电流 I_D 的变化量 $\pm \Delta I_D$ 和电压 $\pm \Delta U_D$ 值。

解: (1) 根据式(14.1.4)作负载线,如图 14.1.11 中所示,负载线与二极管伏安特性曲线交于 Q 点, Q 点的坐标值,即静态 U_D 和 I_D 值,由图 14.1.11 可知: $U_D = 0.67 \text{ V}$, $I_D = 11.7 \text{ mA}$ 。

(2) 设 $U_D = 0.7 \text{ V}$,由式(14.1.10)可知

图 14.1.11 图解法求图 14.1.8(a) 电路二极管 U_D 和 I_D