

高等学校教材

电工与电子技术

(下 册)

王 鸿 明



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

全商客内

4 全商客内

张王张王王

客内客内客内, 张王

王王王王王王王王

客内客内, 张王

王王王王王

本书是根据教育部审定的《中等职业学校电工、电子教学大纲》编写的。本书可作为中等职业学校电工、电子技术专业教材,也可供从事电工、电子技术工作的工程技术人员参考。本书共分两册,上册主要介绍电工技术,下册主要介绍电子技术。本书在编写过程中,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为中等职业学校电工、电子技术专业教材,也可供从事电工、电子技术工作的工程技术人员参考。本书共分两册,上册主要介绍电工技术,下册主要介绍电子技术。本书在编写过程中,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。

张王张王王

电工与电子技术

(下册)

王鸿明



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容简介

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。本教材特点是加强基础、增强应用,注意理论联系实际,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[序]控制器(PLC)、供电与安全用电和电工测量等。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、集成运算放大器、集成运放的应用、数字电路的基础知识、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲信号的产生与整形、大规模集成电路和电源等。

本书可作为高等学校工科非电类专业本、专科教学用教材或参考书,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. —北京: 高等教育出版社, 2005. 5

ISBN 7-04-016542-2

I. 电... II. 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. ① TM② TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 018799 号

策划编辑 全春英 责任编辑 欧阳舟 封面设计 于文燕 责任绘图 杜晓丹
版式设计 胡志萍 责任校对 殷 然 责任印制 杨 明

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 100011

总 机 010-58581000

经 销 北京蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×1092 1/16

印 张 23.25

字 数 570 000

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

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>

版 次 2005 年 5 月第 1 版

印 次 2005 年 5 月第 1 次印刷

定 价 26.70 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 16542-00

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提出批评和指正。

编 者

2004 年 9 月

目 录

第14章 半导体二极管、三极管	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	5
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	15
14.2.4 晶体管的等效电路(模型)	16
14.3 场效应晶体管	21
14.3.1 结型场效应晶体管	21
14.3.2 绝缘栅型场效应晶体管	24
习题	27
第15章 基本放大电路	31
15.1 共发射极放大电路	31
15.1.1 阻容耦合共发射极放大电路 组成与元件作用	31
15.1.2 工作分析	32
15.1.3 放大电路的性能指标	38
15.2 差分放大电路	41
15.2.1 直接耦合放大电路	41
15.2.2 差分放大电路	42
15.2.3 差分放大电路的输入、输出方式	47
15.2.4 性能改善的差分放大电路	48
15.3 共集电极放大电路——射极 输出器	50
15.3.1 阻容耦合射极输出电路	50
15.3.2 直接耦合射极输出电路	54
15.4 功率放大电路	57
15.4.1 互补对称功率放大电路	57
15.4.2 其他型式的互补对称功率放大 电路	60
15.5 多级放大电路	61
15.5.1 阻容耦合多级放大电路	61
15.5.2 直接耦合多级放大电路	64
习题	67
第16章 集成运算放大器	73
16.1 概述	73
16.1.1 集成运放电路的组成	73
16.1.2 集成运放的电路图符号和等效 电路	74
16.1.3 集成运放的主要参数	75
16.2 集成运放的工作区	75
16.2.1 理想集成运放的两个重要结论	75
16.2.2 开环电路与闭环电路	76
16.3 负反馈及其在放大电路中 的应用	78
16.3.1 反馈的基本概念	78
16.3.2 反馈性质的判断	79
16.3.3 反馈电路的组态与判定	81
16.3.4 负反馈对放大电路性能的影响	85
16.4 深度负反馈放大电路电压放大 倍数计算	87
习题	91
第17章 集成运放的应用	95
17.1 信号运算电路	95
17.1.1 反相放大电路	95
17.1.2 同相放大电路	98
17.1.3 加、减运算电路	99
17.1.4 积分和微分运算电路	103
17.1.5 对数和指数运算电路	106
17.2 有源滤波电路	109
17.2.1 一阶低通有源滤波器	109
17.2.2 二阶低通有源滤波器	110
17.2.3 高通、带通和带阻电路	111
17.3 电压比较器	112

17.3.1 单限电压比较器	113	19.3.5 组合逻辑数字集成电路的应用 (举例)	197
17.3.2 迟滞比较器	114	习题	200
17.4 波形发生电路	119	第20章 时序逻辑电路	203
17.4.1 正弦波信号发生器	120	20.1 触发器	203
17.4.2 非正弦信号发生器	126	20.1.1 RS 触发器	203
*17.5 压控振荡器	131	20.1.2 D 触发器	207
17.6 集成功率放大器	133	20.1.3 JK 触发器	210
习题	135	20.1.4 T(T') 触发器	212
第18章 数字电路的基础知识	144	20.2 触发器的应用(一些常用时序 逻辑电路)	213
18.1 数字电路举例	144	20.2.1 寄存器	213
18.2 数制与编码	145	20.2.2 计数器	217
18.2.1 数制	145	20.3 时序电路分析	220
18.2.2 十进制数的二进制编码	146	20.3.1 时序电路的结构与类型	220
18.3 逻辑变量和逻辑函数	148	20.3.2 同步时序电路分析	221
18.3.1 逻辑变量	148	20.3.3 异步时序电路分析	226
18.3.2 逻辑函数	149	20.4 时序电路集成组件	228
18.4 逻辑运算	150	20.4.1 集成电路移位寄存器	228
18.4.1 基本逻辑运算	150	20.4.2 集成电路计数器	232
18.4.2 复合逻辑运算	152	习题	240
18.4.3 逻辑代数的基本定律和定理	155	第21章 脉冲信号的产生与整形	246
18.5 集成逻辑门电路	158	21.1 门电路构成的多谐振荡器、单 稳态触发器和施密特触发器	246
18.5.1 集成与非门	158	21.1.1 多谐振荡器	246
18.5.2 集成或非门	160	21.1.2 单稳态触发器	249
18.5.3 集成门电路逻辑功能扩展	161	21.1.3 施密特触发器(鉴幅器)	254
18.5.4 集成门电路的特性	165	21.2 555 定时器	256
习题	169	21.2.1 555 定时器的原理电路与功能 表	256
第19章 组合逻辑电路	172	21.2.2 555 定时器的应用	257
19.1 逻辑函数的标准形式与化简	172	*21.2.3 新型的定时器 GMT 1555/1557 ...	262
19.1.1 积之和与和之积	172	21.3 555 定时器应用举例	264
19.1.2 逻辑函数表示方法	174	习题	267
19.1.3 逻辑函数化简	178	第22章 大规模集成电路	272
19.2 组合逻辑电路的分析与设计	182	22.1 数字量与模拟量的相互转换	272
19.2.1 组合逻辑电路的分析	182	22.1.1 D/A 转换	272
19.2.2 组合逻辑电路的设计	183	22.1.2 A/D 转换	277
19.2.3 竞争与冒险	185	22.2 存储器和可编程逻辑器件	289
19.3 集成组合逻辑电路	186		
19.3.1 编码器	186		
19.3.2 译码器	188		
19.3.3 数据选择器	193		
19.3.4 加法器	195		

22.2.1 只读存储器	289	*23.2.4 脉宽调制技术(PWM)	330
22.2.2 可编程逻辑器件(PLD)	297	*23.3 开关电源和变频电源	333
习题	299	23.3.1 开关电源	333
第23章 电源	302	23.3.2 变频电源	335
23.1 直流稳压电源	302	习题	337
23.1.1 整流电路	302	附录	340
23.1.2 滤波和稳压电路	308	附录[一]	340
23.2 可控整流电路	315	附录[二]	347
23.2.1 晶闸管(SCR)	315	部分习题答案	357
23.2.2 晶闸管可控整流电路(主电路) ...	319	参考文献	362
23.2.3 晶闸管可控整流电路的控制电路 (触发电路)	326		

第14章 半导体二极管、三极管

半导体二极管(以下简称二极管)、三极管(以下简称晶体管)和电阻、电容元件是组成电子电路的基本元件。用单个的上述元件组成的电子电路称为分立元件电路。目前电子电路多由集成电路构成,所谓集成电路是将二极管、晶体管、电阻、电容及其相互间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,这种半导体器件称为集成电路。

在这一章里将对二极管、晶体管的工作原理、特性曲线、主要参数及等效电路(模型)作简要介绍,为学习电子电路知识作必要的准备。

14.1 二极管

二极管和晶体管的核心是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 $10^{-8} \Omega \cdot m$ 数量级)和绝缘体(电阻率为 $10^{14} \Omega \cdot m$ 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 $10^3 \Omega \cdot m$ 。

半导体器件通常是用硅或锗材料制造的。硅和锗都是四价元素。成晶体结构状的硅原子其外层的四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。

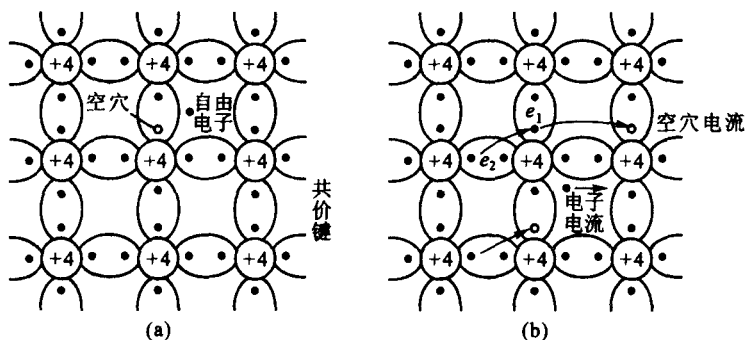


图 14.1.1 本征半导体

(a) 结构示意图; (b) 空穴运动示意图

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，电子的定向运动形成电子电流；由于空穴的存在，也会产生空穴电流。空穴电流是由处于共价键上的电子，在电场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，本征半导体内电势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四个价电子，五价的砷原子外层的第五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。

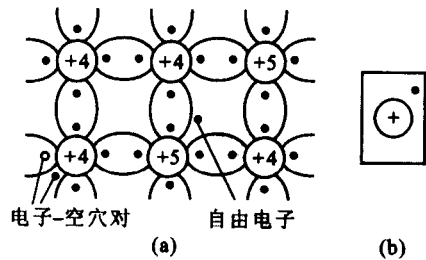


图 14.1.2 N 型半导体
(a) N 型半导体结构示意图；(b) N 型半导体符号

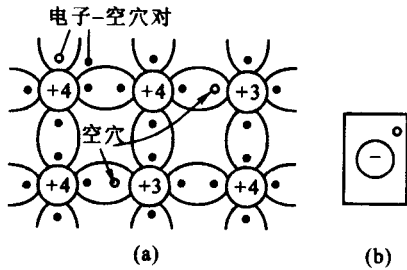


图 14.1.3 P 型半导体
(a) P 型半导体结构示意图；(b) P 型半导体符号

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，如图 14.1.4 所示。

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，因此，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、空穴扩散的结果

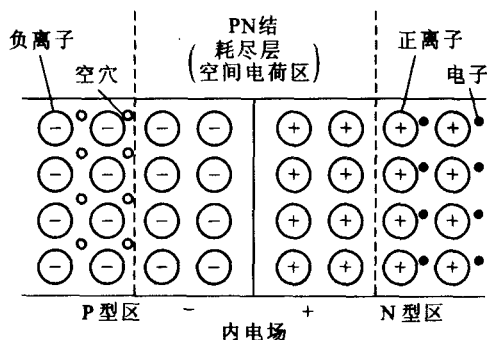


图 14.1.4 PN 结

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。

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时,当作用于二极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

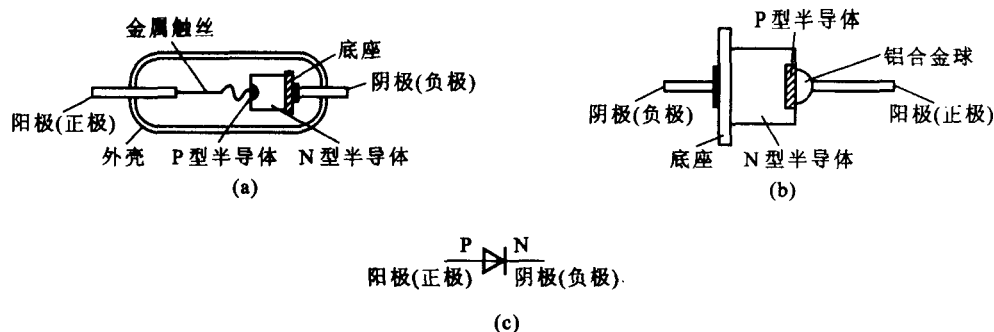


图 14.1.5 二极管的结构与符号
(a) 点接触型; (b) 面接触型; (c) 符号

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。

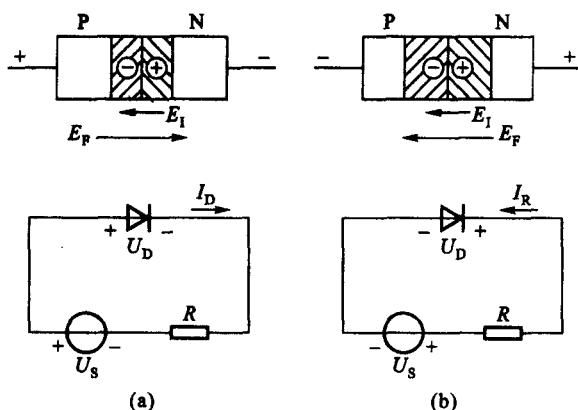


图 14.1.6 二极管正向接法与反向接法
(a) 正向; (b) 反向

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。

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

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

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

$$I_D (= -I_R) = -I_S \quad (14.1.3)$$

根据式(14.1.1)作出的 PN 结的伏安特性曲线如图 14.1.7 中曲线①所示, 而二极管的伏安特性曲线如图 14.1.7 中曲线②所示, 两条曲线略有差别的原因是: 当二极管正向工作并作用有电压 U_D 时, 在 PN 结以外 P 区和 N 区的半导体电阻和电极引线电阻将会使 PN 结电压减小一些, 故电流有所减少。此外, 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 中曲线②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。

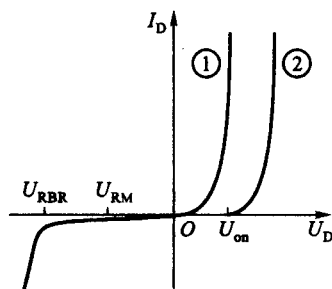


图 14.1.7 二极管的伏 - 安特性曲线

① 理论曲线; ② 二极管实测曲线

二极管在反向接法下, 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能加以限制, 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须装有散热片, 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(静态)电压、电流时,可以用图解法或估算法进行;若要求出二极管在某一正向电压作用下,因电压微小改变而引起的电流变化量时,可通过二极管的动态(微变)电阻进行计算。

1. 图解法求二极管的正向直流电压、电流

图 14.1.8(a) 所示含二极管电路,若图 14.1.8(a) 中的二极管的伏安特性曲线,如图 14.1.8(b) 中的曲线①所示。

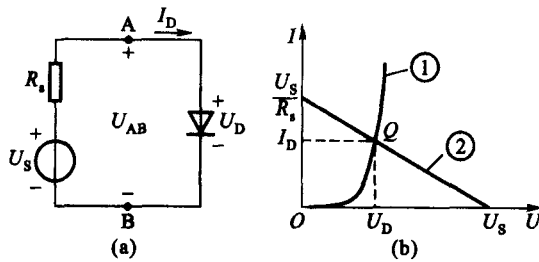


图 14.1.8 图解法求二极管静态电压与电流

(a) 电路; (b) 图解法定 Q 点

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. 静态电阻 R_D 、动态电阻 r_D 与等效电路

(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

$$R_D = \left. \frac{U_D}{I_D} \right|_Q \quad (14.1.5)$$

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 ,即

$$r_D = \left. \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} \right|_Q \quad (14.1.6)$$

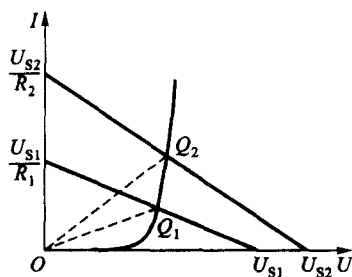


图 14.1.9 静态电阻与工作点的关系
($U_{S2} > U_{S1}$; $R_1 > R_2$)

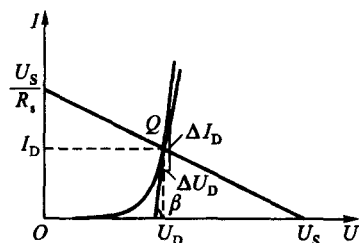


图 14.1.10 动态电阻

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

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

由式(14.1.2)可知,若二极管正向电压 $U_D \gg U_T$ 时,二极管电流 $I_D \approx I_S e^{\frac{U_D}{U_T}}$ 。将 I_D 式代入式(14.1.7),得

$$\begin{aligned} r_D &= \frac{dU_D}{d(I_S e^{\frac{U_D}{U_T}})} \\ &= \frac{dU_D}{\frac{1}{U_T} (I_S e^{\frac{U_D}{U_T}}) \cdot dU_D} \\ &= \left. \frac{U_T}{I_D} \right|_Q \end{aligned} \quad (14.1.8)$$

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

$$r_D = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} \quad (14.1.9)$$

(3) 等效电路。图 14.1.8(a) 所示电路,若电源电压 U_s 在工作时有微小的 $\pm \Delta U_s$ 变动,其效果相当于电源电压在直流分量 U_s 的基础上,叠加了一个变化分量 $\pm \Delta U_s$,如图 14.1.11(a) 所示。

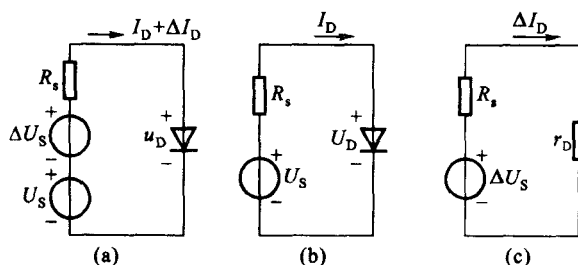


图 14.1.11 交、直流共存的含二极管电路
(a) 全量电路; (b) 直流通路; (c) 交流通路

图 14.1.11(a) 所示电路,可视为一个交、直流共存的电路,由于限定电源电压的变动值很小,因而这一变动仅引起二极管上的电压、电流在它静态工作点处有微小变化,所以该电路二极管的动态电阻 r_D 可视为定值。这样,对图 14.1.11(a) 进行分析时可用叠加方法进行,即二极管的静态电流由图 14.1.11(b) 确定;二极管内的变化电流由图 14.1.11(c) 决定。图 14.1.11(c) 所示电路的电流变化量又称为二极管的动态电流,即

$$\Delta I_D = \frac{\pm \Delta U_s}{R_s + r_D} \quad (14.1.10)$$

计算动态电流 ΔI_D 时,动态电阻 r_D 通过式 (14.1.9) 计算,为计算动态电阻所需要的静态电流(工作点处的电流) I_D ,可用估算法求出。

3. 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

使用硅二极管时,正向电流

$$I_D(I_F) = \frac{U_s - U_D}{R_s} \approx \frac{U_s - 0.7}{R_s} \quad (14.1.11)$$

当使用锗二极管时,正向电流

$$I_D(I_F) = \frac{U_s - U_D}{R_s} \approx \frac{U_s - 0.3}{R_s} \quad (14.1.12)$$

4. 计算举例

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 14.1.12 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 具有 $\Delta U_s = \pm 0.1\text{ V}$ 的变动时, 求二极管电流 ΔI_D 之值。

解: (1) 根据式(14.1.4)作负载线, 如图 14.1.12 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 14.1.12 可知: $U_D = 0.67\text{ V}$, $I_D = 11.7\text{ mA}$ 。

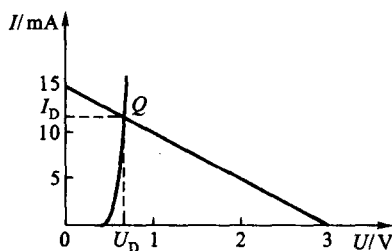


图 14.1.12 图解法求图 14.1.8(a) 电路二极管 U_D 和 I_D

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

$$I_D = \frac{U_s - 0.7}{R_s} = \frac{3 - 0.7}{200}\text{ A} = 11.5\text{ mA}$$

(3) 通过估算值计算静态电阻 R_D 和动态电阻 r_D

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} = \frac{0.7}{0.0115}\ \Omega \approx 60.9\ \Omega$$

(按图解法所得数值计算 $R_D = 0.67/0.0117\ \Omega \approx 57.3\ \Omega$, 相差 $3.6\ \Omega$, 相对误差为 6% 左右)。

$$r_D = \frac{26\text{ mV}}{I_D} = \frac{26}{11.5}\ \Omega \approx 2.26\ \Omega$$

(按图解法所得数值计算 $r_D = 26/11.7\ \Omega \approx 2.22\ \Omega$, 相差 $0.04\ \Omega$, 相对误差为 1.8% 左右)。

(4) 由式(14.1.10)可计算出 ΔI_D 之值, 即

$$\Delta I_D = \frac{\pm \Delta U_s}{R_s + r_D} = \frac{\pm 0.1}{200 + 2.26}\text{ A} \approx \pm 0.49\text{ mA}$$

14.1.5 一些特殊二极管

1. 稳压二极管

稳压二极管是一种特殊的二极管, 稳压二极管工作在反向击穿区, 它的伏-安特性曲线如图 14.1.13(a) 所示, 图 14.1.13(b) 为稳压二极管的电路符号。稳压二极管在反向击穿后如能将电流限制在一定数值之内时, 当反向电压减至低于击穿电压 U_Z (即该稳压管稳定电压) 值后, 仍可恢复到原来的阻断状态。

由图 14.1.13 所示稳压二极管特性曲线可看出, 稳压二极管击穿后, 稳压二极管电流有较大的改变时, 稳压二极管的电压值变化不多, 利用这一特性可以用稳压二极管构成一个稳压电源。

(1) 稳压二极管稳压电路工作原理: 由稳压二极管构成的稳压电路如图 14.1.14 所示, 电路主要由稳压二极管 D_Z 和限流电阻 R_Z 组成。负载电阻 R_L 与稳压二极管并联, 因此, $U_o = U_Z$ 这一稳压电路又称并联型稳压电路。

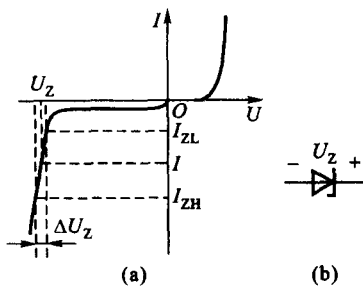


图 14.1.13 稳压二极管的伏-安特性曲线与符号

(a) 伏-安特性曲线; (b) 符号

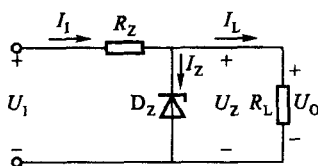


图 14.1.14 (并联型)稳压二极管稳压电路

图 14.1.14 电路,引起负载 R_L 的电压 U_0 波动的原因不外乎电路输入电压 U_1 变动或负载 R_L 值改变,图 14.1.14 电路在这两种情况下均可较好地保持电路输出电压 U_0 稳定。首先分析 R_L 一定而 U_1 有变化时的情况,如 U_1 上升则稳压二极管电压 U_Z 应随之增加。由稳压二极管特性可看出,若 U_Z 有稍许上升,电流 I_Z 随之会有较大的增长,该电路总电流 $I_1 = I_Z + I_L$ 也要有较大增长,而 I_1 的增加将使限流电阻 R_Z 的电压 ($R_Z I_1$) 增大许多,使输入电压 U_1 的增量绝大部分落在电阻 R_Z 上,而电压 U_0 增加不多,可以认为基本不变。相反,若 U_1 减小,稳压二极管电流 I_Z 减小,使限流电阻 R_Z 上的电压会随之减小,也可以使 U_0 基本不变,因而负载 R_L 电压 U_0 在 U_1 变动时可基本保持不变。

如果电路输入电压 U_1 保持不变,负载 R_L 有变化时。例如, R_L 的电阻值减小了,这时电流 I_L 增加,而 I_L 的增加使电流 $I_1 = I_Z + I_L$ 增加,电阻 R_Z 的电压增加,在 U_1 一定的情况下, $R_Z I_1$ 的增加将使电压 U_Z (即 U_0) 下降,而 U_Z (U_0) 的稍许下降就会引起电流 I_Z 有较大的减少,从而使 I_L 增加后,稳压二极管的电流 I_Z 下降,这样电流 I_1 可保持基本不变,因而使 $R_Z I_1$ 基本不变,从而可保持负载 R_L 上的电压 U_0 (即 U_Z) 在 R_L 减小后能保持基本不变。相反,若负载电阻 R_L 值增加后,电流 I_L 会减小,这将会引起电流 I_Z 增加,电流 $I_1 = I_Z + I_L$ 仍可维持不变,从而使输出电压 U_0 (U_Z) 保持基本不变,实现了输出电压在负载电阻 R_L 改变时,能保持负载电压 U_0 (U_Z) 稳定。

(2) 稳压二极管的主要参数。

① 稳定电压 U_Z 。稳压二极管反向击穿后,当通过稳压二极管中的电流值达到规定的电流 I_Z 时,稳压二极管上的电压值称为稳定电压 U_Z 。由于制造工艺方面的原因,同一型号的稳压二极管,稳定电压 U_Z 值允许有一定的差别。

② 稳定电流 I_Z 。为稳压二极管正常工作时的电流参考值。稳压二极管中的电流达到这一数值时,稳压二极管的稳压效果较好。

③ 动态电阻 r_z 。稳压二极管在稳定工作范围内,稳压二极管的电压变化量 ΔU_Z 与电流变化量 ΔI_Z 之比,即在稳压二极管反向击穿特性曲线上 $I = I_Z$ 处切线斜率的倒数。动态电阻 r_z 越小,说明稳压二极管的稳压作用越好。 r_z 随电流 I 值的不同而改变,电流 I 越大, r_z 越小。

④ 最大耗散功率 P_{ZM} 。稳压二极管工作时,PN 结的功率损耗为 $P_Z = U_Z I_Z$,损耗的功率将转化为热能,使 PN 结温度升高,温度过高将损坏 PN 结,因此,稳压二极管电流的最大值 $I_{Zm} = P_{Zm} / U_Z$ 。