

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANGONGXUE

电工学

(下册)

电子技术

张文生 主编
孟祥 曲萍萍 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANGONGXUE

电 工 学

(下册)

电 子 技 术

分册名称



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Electrical Engineering

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本套书分为上、下册，上册为电工技术，下册为电子技术，本书为下册，共分为十章，其内容主要包括半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、电力电子技术、门电路与组合逻辑电路、双稳态触发器和时序逻辑电路、模拟量和数字量的转换、存储器和可编程逻辑器件、电子电路仿真软件 EWB 及其应用。

本书主要作为高等院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，同时可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电工学. 下册/张文生主编. —北京: 中国电力出版社, 2010
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 5083 - 9937 - 9

I. ①电… II. ①张… III. ①电工学—高等学校—教材
IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 240571 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 5 月第一版 2010 年 5 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 433 千字
定价 28.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

电子电气基础课程教材编审委员会

主任委员 王志功 东南大学

副主任委员 张晓林 北京航空航天大学

王泽忠 华北电力大学

马西奎 西安交通大学

孟 桥 东南大学

胡敏强 东南大学

戈宝军 哈尔滨理工大学

刘新元 北京大学

秘书长 李兆春 中国电力出版社

委员 (按姓氏笔画排列)

于守谦 北京航空航天大学

王 殊 华中科技大学

王小海 浙江大学

王松林 西安电子科技大学

付家才 黑龙江科技学院

刘耀年 东北电力大学

宋建成 太原理工大学

张彦斌 西安交通大学

李 青 中国计量学院

李守成 北京交通大学

李哲英 北京联合大学

李晶皎 东北大学

陈后金 北京交通大学

陈意军 湖南工程学院

宗 伟 华北电力大学

段哲民 西北工业大学

胡虔生 东南大学

赵荣祥 浙江大学

徐淑华 青岛大学

郭陈江 西北工业大学

崔 翔 华北电力大学

曾孝平 重庆大学

韩 璞 华北电力大学

雷银照 北京航空航天大学

公茂法 山东科技大学

王万良 浙江工业大学

王建华 西安交通大学

邓建国 西安交通大学

刘润华 中国石油大学 (华东)

朱承高 上海交通大学

张正平 贵州大学

李 承 华中科技大学

李 琳 华北电力大学

李国丽 合肥工业大学

李晓明 太原理工大学

杨 平 上海电力学院

陈庆伟 南京理工大学

陈新华 山东科技大学

范蟠果 西北工业大学

段渝龙 贵州大学

赵旦峰 哈尔滨工程大学

唐庆玉 清华大学

袁建生 清华大学

高会生 华北电力大学

梁贵书 华北电力大学

曾建唐 北京石油化工学院

韩学军 东北电力大学

序

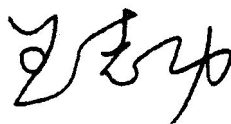
进入 21 世纪,“985 工程”和“211 工程”的实施,推动了高水平大学和重点学科的建设,在高校中汇聚了一大批高层次人才,产生了一批具有国际先进水平的学术和科学技术研究成果。然而高校规模的超高速增长,导致不少学校的专业设置、师资队伍、教材资源和教学实验条件不能迅速适应发展需要,教学质量问题日益突现。高校教材,作为教学改革成果和教学经验的结晶,其质量问题自然备受关注。

需要指出的是,很多高等学校教材经过多年的教学实践检验,已经成为广泛使用的精品教材。同时,我们也应该看到,现用的教材中有不少内容陈旧、未能反映当前科技发展的最新成果,不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要。这就要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进、开拓创新,在内容质量和出版质量上均有新的突破。

根据教育部教高司 2003 年 8 月 28 日发出的 [2003] 141 号文件,在教育部组织下,历经数年,2006~2010 年教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会按照教育部的要求,致力于制定专业规范或教学质量标准,组织师资培训、教学研讨和信息交流等工作,并且重视与出版社合作,编著、审核和推荐高水平电子电气基础课程教材。

“电工学”、“电路”、“信号系统”、“电子线路”、“电磁场”、“自动控制原理”、“电机学”等电子电气基础课程是许多理工院校的先修课程,也是电子科学与技术、电气工程及其自动化等专业学科的基石,在科学研究领域和产业应用中发挥着极其重要的作用。此类教材的编写,应提倡新颖的立意,“适用、先进”的编写原则和“通俗、精炼”的编写风格,以百花齐放的形式和较高的编写质量来满足不同学科、不同层次的师生的教学要求。

本电子电气基础课程教材编审委员会即是基于此目的而设立的,希望能够鼓励更多的优秀教师参与其中,为高质量教材的编写和出版贡献出聪明才智和知识经验。



2009 年 10 月于东南大学

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

电工学(下册,电子技术)是与张文生主编的电工学(上册,电工技术)的配套教材。

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。随着科学技术的飞速发展,电子科学技术也发生了巨大的变化,为了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,特编写了本教材。

本教材教学时数在70~90课时左右,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。

根据非电类工科专业学生的不同特点,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,增加了实用电路介绍,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,增加了对光电器件、晶闸管、MOS管、D/A转换器、A/D转换器、存储器和可编程逻辑部件等的介绍,对集成电路器件则侧重了讲述了其外部特性,目的体现重在应用。

(5) 为配合实验教学,加深对所学理论的消化和理解,特增加了“电子电路仿真软件EWB及其应用”一章,如果学时有限,本章可以安排学生自学。

本书主要由东北电力大学和北华大学合作编写,华北电力大学和上海电力学院参与。由张文生任主编,孟祥、曲萍萍任副主编。第十二、十三、二十一章由张文生编写,第十四、十九章及第十三章的第十一节由杜艳丽编写、第十五、十六章由曲萍萍编写,第十七、十八章由孟祥编写,第二十章及附录由赵莹编写,丁巧林、王鲁杨参加了部分章节的修改和校核,最后由张文生统稿。

全书由原北京电工研究会理事长、全国成教研究会电工学科委员会主任、北京交通大学李守成教授主审,他认真审阅后提出了宝贵的意见,在此表示感谢。

由于时间仓促及编者水平有限,书中错误与疏漏在所难免,恳请广大读者提出宝贵意见,以便修改。

编者

2010.1

目 录

序

前言

第 12 章 半导体器件	1
12.1 半导体	1
12.2 PN 结	4
12.3 半导体二极管	5
12.4 双极型三极管	11
12.5 场效应管	17
12.6 半导体光电器件	21
习题	24
第 13 章 基本放大电路	27
13.1 基本放大电路概述	27
13.2 放大电路的静态分析	30
13.3 放大电路的动态分析	32
13.4 放大电路静态工作点的稳定	37
13.5 射极输出器	41
* 13.6 放大电路的频率特性	44
13.7 多级放大电路	46
13.8 差分放大电路	51
* 13.9 功率放大电路	55
13.10 场效应管放大电路	59
13.11 放大电路中的负反馈	63
习题	68
第 14 章 集成运算放大器	73
14.1 集成运算放大器概述	73
14.2 运算放大器在信号运算方面的应用	77
14.3 运算放大器在信号处理方面的应用	83
14.4 集成运算放大器的选择和使用	86
习题	87
第 15 章 直流稳压电源	92
15.1 整流电路	92
15.2 滤波电路	98
15.3 直流稳压电源	102
习题	108
第 16 章 电力电子技术	110
16.1 电力电子器件	110

16.2	单相可控整流电路	115
16.3	单结晶体管触发电路	118
	习题	122
第 17 章	门电路与组合逻辑电路	123
17.1	数字电路概述	123
17.2	基本门电路	125
17.3	逻辑代数	136
17.4	逻辑函数的表示方法	138
17.5	逻辑函数化简	141
17.6	组合逻辑电路	143
17.7	加法器	147
17.8	编码器和译码器	148
17.9	数据分配器和数据选择器	157
17.10	应用举例	160
	习题	162
第 18 章	双稳态触发器和时序逻辑电路	169
18.1	双稳态触发器	169
18.2	时序逻辑电路的分析	174
18.3	寄存器	177
18.4	计数器	180
18.5	集成 555 定时器和单稳态触发器	189
18.6	施密特触发器和多谐振荡器	193
18.7	应用举例	198
	习题	201
第 19 章	模拟量和数字量的转换	206
19.1	D/A 转换器	206
19.2	A/D 转换器	209
	习题	215
第 20 章	存储器 and 可编程逻辑器件	216
20.1	只读存储器	216
20.2	随机存取存储器	223
20.3	可编程逻辑器件	226
	习题	239
* 第 21 章	电子电路仿真软件 EWB 及其应用	242
21.1	EWB 主界面窗口	242
21.2	工具栏和元器件库栏	246
21.3	仪器库	253
21.4	电路仿真实例	259
	习题	266
附录	习题参考答案	267
	参考文献	275

第 12 章 半 导 体 器 件

用半导体材料制成的电子器件,称为半导体器件(semiconductor device)。半导体器件是近代电子学的重要组成部分,是组成各种电子电路最基本的单元。PN结(PN junction)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、双极型三极管、场效应管和光敏器件等常用的半导体器件。

12.1 半 导 体

导电性能良好的金属材料(如金、银、铜、铝、铁、锡等)称为导体(conductor),导电性能很差或几乎不导电的物质(如陶瓷、橡胶、玻璃、塑料等)称为绝缘体(insulator),而导电性能介于两者之间的物质就称为半导体(semiconductor)。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。金属导体的电阻率很小,一般在 $0.01\sim 1\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ 之间,绝缘体的电阻率大于 $10^{14}\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$,半导体的电阻率在 $10\sim 10^{13}\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ 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,其导电性能要受温度、光照和掺杂的影响,分述如下:

1. 热敏特性

金属的导电率随温度的变化很小,例如,温度每升高 1°C ,铜的电阻率增加 0.4% 左右,而某些半导体对温度的变化很敏感,电阻率随温度的提高而显著降低,实验证明,纯锗在温度从 20°C 升高到 30°C 时,电阻率将降低一半左右,利用这种特性做成了各种热敏电阻。

2. 光敏特性

金属的电阻率基本和光照无关,但某些半导体对光照很敏感,受到光辐射时,它们的电阻率急剧降低,能像导体那样导电;无光照时,电阻率增加,又变得像绝缘体那样不导电,利用这种特性做成了各种光敏器件。

3. 掺杂特性

在纯净的半导体中掺入少量杂质,其电阻率会大大降低,其导电能力可增加几十万倍甚至几百万倍。例如,纯净的半导体单晶硅电阻率约为 $21\times 10^8\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$,若按百分之一的比例在单晶硅中掺入少量硼后,其电阻率将急剧减小为 $4\times 10^3\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$,其导电能力将大大增强。掺杂特性是半导体最显著的特征,人们利用半导体的这种特性,制造出了二极管、三极管、场效应管、晶闸管等多种半导体器件。

热敏特性、光敏特性、掺杂特性被称为半导体的三大特性。

物质导电性能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。

12.1.1 本征半导体

最常用的半导体是硅和锗，图 12-1 是硅和锗的原子结构图，它们最外层均有四个价电子 (valence electron)，都是四价元素。锗和硅的单晶体原子排列非常整齐，硅晶体的平面示意图如图 12-2 所示，半导体一般都具有这种晶体结构，故半导体也称为晶体，二极管或三极管也称为晶体二极管或晶体三极管。

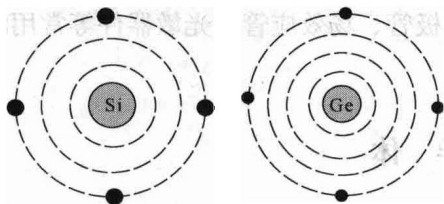


图 12-1 硅和锗的原子结构图

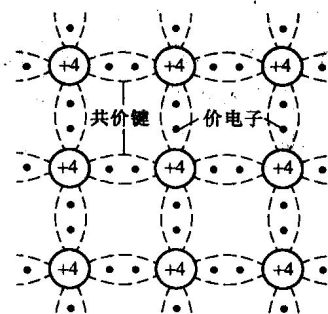


图 12-2 硅原子单晶体的共价键结构

纯净、不含任何杂质、晶体结构排列整齐的半导体叫做本征半导体 (intrinsic semiconductor)。

1. 本征半导体的原子结构

当把硅半导体材料制成晶体时，相邻两个原子的一对最外层价电子成为共有电子，这对共有电子围绕自身的原子核不断运动，同时又出现在相邻的原子核所属的轨道上，价电子不仅受自身原子核的束缚，还受相邻原子核的作用，这样两个相邻的原子共享用一对价电子，形成了所谓的共价键 (covalent bond) 结构，每个原子都和周围的 4 个原子通过共价键的形式紧密联系在一起 (见图 12-2)。

2. 本征激发

虽然在共价键结构中，硅原子最外层电子共有 8 个电子，处于较稳定的状态，但不像绝

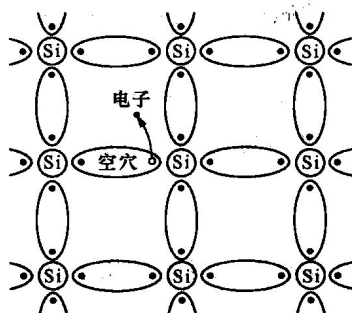


图 12-3 空穴和自由电子的形成

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共价键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 12-3)。温度越高，晶体中产生的自由电子就越多。

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，常把空穴看成是一种带正电荷的载流子 (carrier)。

在本征半导体内部，自由电子与空穴总是成对出现的，因此将它们称作电子—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，这一相反过程称为复合。

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，自由电子和空穴这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一种载流子参与导电，这是半导体与金属导体的不同之处。

12.1.2 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，它的导电能力可大大增加。在纯净半导体中掺入微量杂质（impurity）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 型半导体两类，以下分别加以介绍。

1. N 型半导体（N-type semiconductor）

在本征半导体中掺入五价元素，如磷，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 12-4（a）所示。

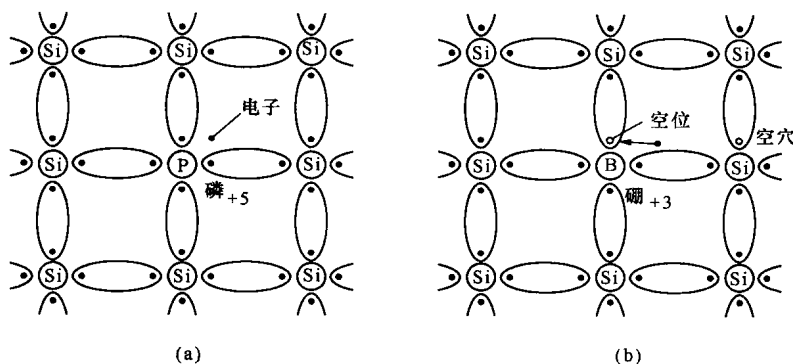


图 12-4 掺杂半导体共价键结构示意图

(a) N 型半导体；(b) P 型半导体

这样，每掺入一个磷原子，就多了一个自由电子，掺入的磷原子越多，自由电子越多，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，如硼，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 12-4（b）。

这样，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 型半导体或空穴半导体。

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。

【练习与思考】

1. 空穴是如何形成的？自由电子又是如何形成的？
2. 电子导电和空穴导电有什么不同？空穴电流是不是自由电子递补空穴形成的？
3. N 型半导体中的多数载流子是什么，少数载流子是什么？P 型半导体中的多数载流子是什么，少数载流子又是什么？
4. 有人说：“半导体具有热敏性、光敏性和掺杂性三个导电特征”，试解释其含义。

12.2 PN 结

12.2.1 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。那么，PN 结是怎样形成的呢？

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 12-5 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。

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（如图 12-6 所示）。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。

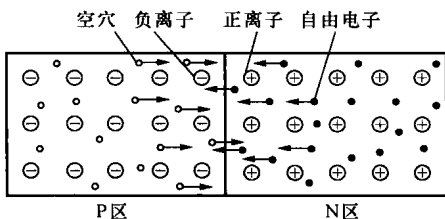


图 12-5 载流子的扩散运动

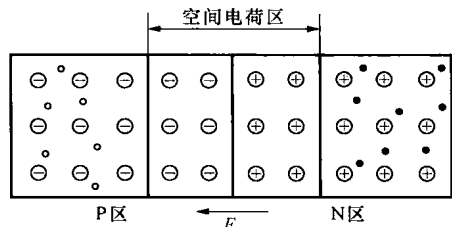


图 12-6 内电场的形成

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于多子的扩散；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于少子的漂移。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。

12.2.2 PN 结的单向导电性

PN 结具有单向导电性，若外加电压使电流从 P 区流到 N 区，PN 结将呈低阻性，电流

很大；反之，PN 结呈高阻性，电流很小。如果外加电压使 P 区的电位高于 N 区的电位，称为加正向电压，简称正向偏置或正偏（forward bias）；如果外加电压使 P 区的电位低于 N 区的电位称为加反向电压，简称反向偏置或反偏（backward bias）。

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，如图 12-7 (a) 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 (on) 状态。

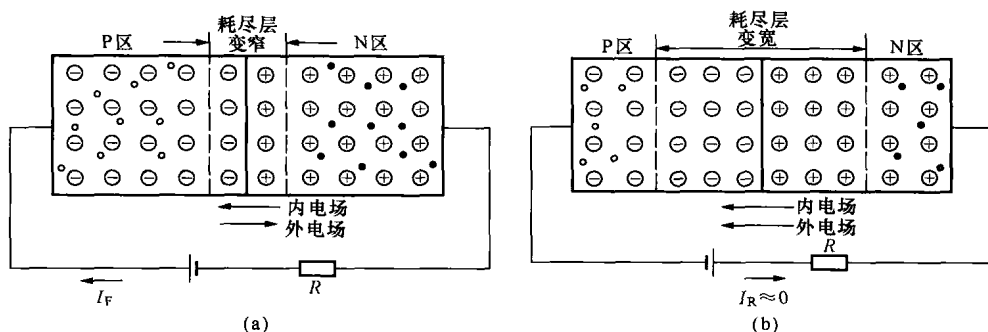


图 12-7 PN 结的单向导电性

(a) PN 结外加正向电压时；(b) PN 结外加反向电压时

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，如图 12-7 (b) 所示。在反向电压的作用下，耗尽层将变宽，阻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 (cut-off) 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。

【练习与思考】

1. 何谓载流子的扩散和漂移？产生扩散和漂移的原因是什么？为什么说扩散是多数载流子的运动，漂移是少数载流子的运动？
2. 当 PN 结正向偏置时，耗尽层变宽了还是变窄了？

12.3 半导体二极管

12.3.1 二极管的结构

半导体二极管 (diode) 是由一个 PN 结加上电极引线，并加以外壳封装做成的。其内部结构示意图如图 12-8 (a) 所示。从 P 区接出的引线称为二极管的阳极或正极 (anode)，从 N 区接出的引线称为二极管的阴极或负极 (cathode)。二极管电路符号如图 12-8 (b) 所示，其中三角箭头表示二极管正向导通时电流的方向。

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和面接触型。其外部结构如图 12-9 所示。

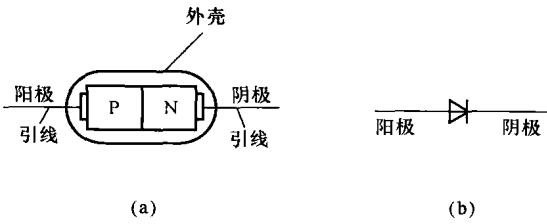


图 12-8 二极管内部结构示意图和电路符号
(a) 内部结构示意图; (b) 电路符号

1. 点接触型二极管

点接触型 (point-contact type) 二极管结构如图 12-9 (a) 所示, 它由一根很细的金属丝热压在 N 型锗片上制成。与金属丝相接的引出线为阳极, 与金属支架相接的引出线为阴极。点接触型二极管由于金属细丝与 N 型半导体接触面很小, 允许通过的电流也很小 (几十毫安以下), 适用于高频检

波、变频等场合。国产检波二极管 2AP 系列和开关二极管 2AK 系列都属于这一结构。

2. 面接触型二极管

用合金法制成的面接触型 (junction type) 硅二极管结构如图 12-9 (b) 所示。面接触型二极管 PN 结面积大, 允许通过的电流也较大, 适用于工作频率较低的情况, 一般用作整流器件。国产硅二极管 2CP 和 2CZ 系列都属于这一结构。

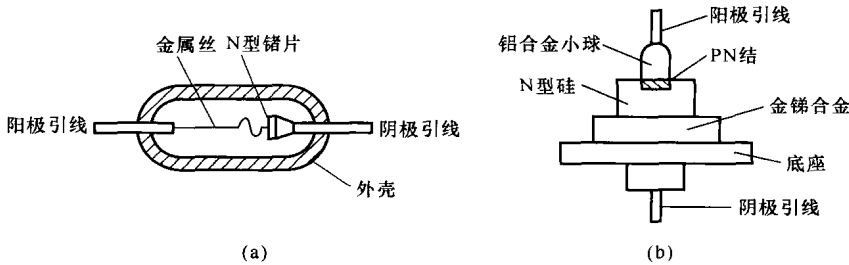


图 12-9 二极管外部结构
(a) 点接触型; (b) 面接触型

还有一种平面型硅二极管, 是采用先进的集成电路工艺制成的, 它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。

12.3.2 二极管的伏安特性

1. 二极管的单向导电性

二极管就是一个 PN 结, 因此具有单向导电性, 这可通过实验证明。把二极管接成如图 12-10 (a) 所示电路, 阳极接电源正极, 阴极接电源负极 (二极管正偏), 这时灯泡发光, 电流表中示出较大电流, 二极管处于导通状态, 流过二极管的电流 I 称作正向电流 (forward current)。

将二极管接成如图 12-10 (b) 所示电路, 阳极接电源负极, 阴极接电源正极 (二极管反偏), 这时灯泡不亮, 从电流表中看到电流几乎为零, 二极管处于截止状态。

二极管正向偏置导通、反向偏置截止的这种特性称为二极管的单向导电性 (unilateral conductivity), 单向导电性是二极管最显著的特征。

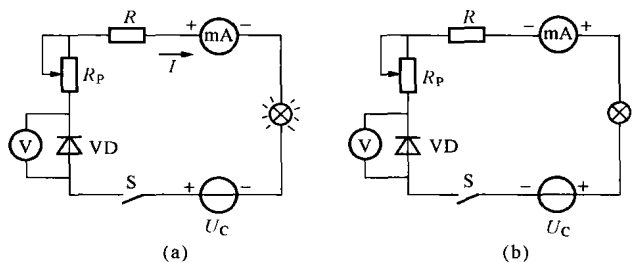


图 12-10 半导体二极管单向导电性实验
(a) 二极管处于正偏; (b) 二极管处于反偏

2. 二极管的伏安特性

电压和电流之间的关系曲线 $I = f(U)$ 称为伏安特性曲线 (volt-ampere characteristics), 硅二极管的伏安特性如图 12-11 所示。

(1) 正向特性。当二极管处于正向偏置, 但电压 $U < 0.5\text{V}$ (锗管小于 0.1V) 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 12-11 中 0A 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 12-11 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, 其值硅管约为 $0.6\sim 0.7\text{V}$, 锗管约为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。BC 段的特点是电流变化很快, 但电压基本保持恒定不变。

(2) 反向特性。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 12-11 中 0D 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) 反向击穿特性。在图 12-11 中, 当由 D 点继续增加反向电压时, 反向电流在 E 点急剧上升, 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} 。二极管的反向击穿电压值随二极管类型而异。普通二极管不允许反向击穿的情况发生, 因反向击穿发生后, 很大的反向电流将会使二极管 PN 结过热而造成永久损坏。

(4) 温度对二极管特性的影响。半导体二极管的导电特性与温度有关, 反映在伏安特性上, 其特性曲线会随温度的变化而变化。通常温度每升高 1°C , 硅和锗二极管导通时的正向压降将减小 2.5mV 左右。从反向特性看, 半导体二极管温度每升高 10°C , 反向电流增加约一倍。但当温度升高时, 二极管反向击穿电压 U_{BR} 会有所下降。

12.3.3 二极管的主要参数

二极管的特性还可以用一些数据来说明, 这些数据就是二极管的参数 (parameters), 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_{FM}

I_{FM} 是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。 I_{FM} 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, 流过二极管最大平均电流不应超过 I_{FM} , 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

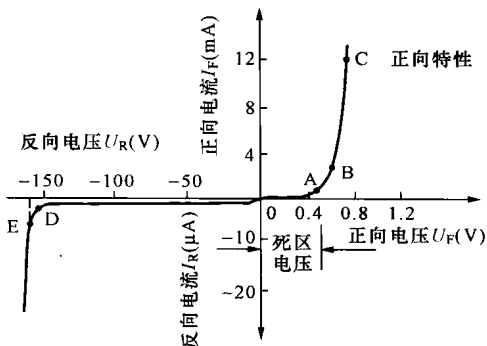


图 12-11 半导体硅二极管的伏安特性

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个微安以下,锗管的反向电流较大,为硅管的几十到几百倍。

其他参数,如二极管的最高工作频率、最大整流电压下的管压降、结电容等,可在使用时查阅手册。

12.3.4 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组成整流、检波、限幅、元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元件。

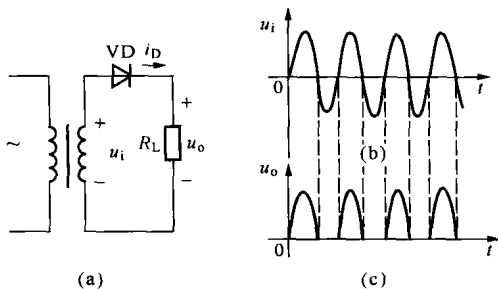


图 12-12 半波整流电路

(a) 电路图; (b) 输入电压波形; (c) 输出电压波形

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 12-12 所示。经过变压器降压后的正弦电压 u_i 经二极管 VD 整流后,在负载 R_L 上得到一个脉动的单方向变化的直流电压 u_o 。

2. 单向限幅电路

用二极管可以构成限幅电路(又称削波电路),它用来限制输出电压幅值,以下通过一个例子说明。

【例 12-1】 单向限幅电路如图 12-13 (a) 所示,图 12-13 (b) 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)。

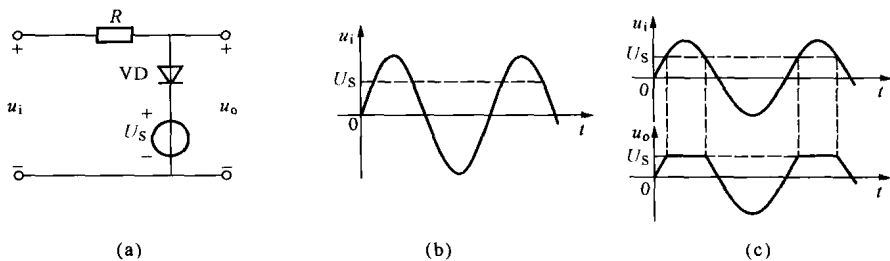


图 12-13 [例 12-1] 的图

(a) 电路; (b) 输入电压波形; (c) 输出电压波形

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 波形如图 12-12 (c) 所示。

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。此例中,二极管是

作为电路开关使用的。

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、数值较小的特点来限制电路中某点的电位。在图 12-14 中, 开关 S 断开时, 二极管处于正偏导通, 如果忽略管压降, 则 V_o 将被钳制在 5V, 当开关 S 合上时, 二极管截止, $V_o = 0$ 。

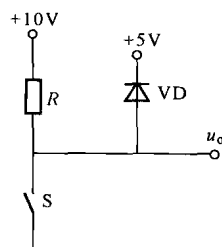


图 12-14 二极管钳位电路

4. 续流二极管

含有电感元件的设备 (如发电机励磁绕组、继电器的线圈等), 在电路突然断开瞬间, 由于电流急剧变化, 会在电感元件两端产生很高的反电势 $L \frac{di}{dt}$, 这个反电势可能造成设备过电压甚至损坏, 为了防止过电压发生, 往往在电感元件两端反向并联一个二极管, 使放电电流经过二极管形成回路, 通过线圈电阻释放电感元件的能量, 起到保护设备的作用, 这个二极管称为续流二极管 (见图 12-15)。

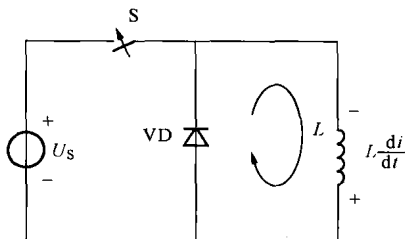


图 12-15 二极管的续流作用

12.3.5 稳压二极管

实验发现, PN 结一旦击穿后, 尽管它的反向电流急剧增大, 但是 PN 结两端的电压几乎保持不变。同时, 只要限制它的反向电流, PN 结就不会被烧坏。利用这种特性制成的二极管称为稳压二极管 (voltage regulator diode) 或齐纳二极管 (zener diode), 简称稳压管, 它是一种特殊的面接触型二极管。

与普通二极管不同, 稳压二极管的反向特性曲线比较陡, 当反向电压增加到击穿电压时, 反向电流突然剧增, 稳压二极管反向击穿, 此后, 虽然电流在很大范围内变化, 但稳压管两端的电压几乎不变。利用这种特性, 稳压管就可以在电路中起稳压作用。与普通二极管不一样, 稳压管可以工作在反向击穿区, 当去掉反向电压后, 稳压管又可恢复正常。常用稳压二极管的外形图如图 12-16 所示, 它的电路符号与伏安特性曲线如图 12-17 所示。

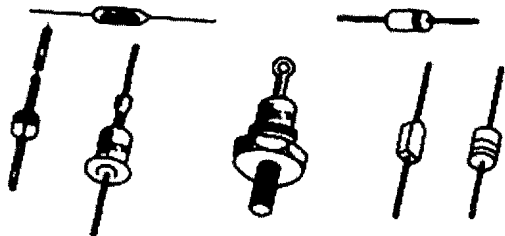


图 12-16 常用稳压二极管外形图

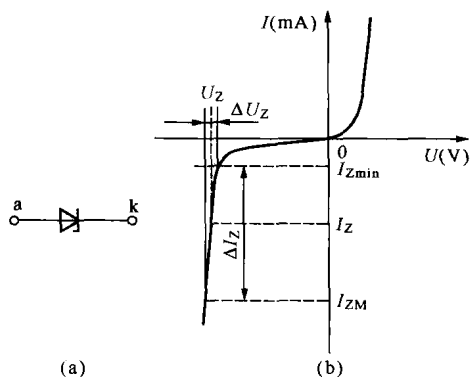


图 12-17 稳压二极管电路符号与伏安特性曲线

(a) 电路符号; (b) 伏安特性曲线

利用稳压管组成的简单稳压电路如图 12-18 所示, R 为限流电阻, 与稳压管 VS 配合使