



全国高职高专教育精品规划教材

# 模拟电子技术与应用

主编 刘恩华



MONI DIANZI JISHU YU YINGYONG



北京交通大学出版社  
<http://press.bjtu.edu.cn>

全国高职高专教育精品规划教材

---

# 模拟电子技术与应用

主 编 刘恩华  
副主编 徐科明 陆渊章  
参 编 期俊玲 张 墅

北京交通大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书按工作过程和项目内容组织教学,项目内容主要包含模拟电子技术应用中所涉及的基本知识,并围绕各知识点进行仿真实验,给出仿真结果。对于仿真实验,每个项目安排有技能训练和综合训练两个模块。全书共有4个项目:小信号放大电路、信号运算与处理电路、功率放大器的设计与制作、直流稳压电源的设计与制作,每个项目包含若干个子模块,对知识的阐述做到了系统、清晰、详尽。

《模拟电子技术与应用》以应用为目的,突出理论与实践训练相结合,加强基本概念的叙述,将课堂讲授内容、讨论思考题、技能训练、课外自学内容、自测题与习题等优化组合,有利于启发引导学生自主思维的能力,激发学生学习的积极性。

本书可作为高职高专院校电子、自动化控制、机电、信息类专业模拟电子技术课程的教材,也可作为从事电子技术工作技术人员的参考书。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术与应用 / 刘恩华主编. — 北京: 北京交通大学出版社, 2010. 2

(全国高职高专教育精品规划教材)

ISBN 978 - 7 - 81123 - 986 - 7

I. ① 模… II. ① 刘… III. ① 模拟电路 - 电子技术 IV. ① TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 220459 号

责任编辑: 张慧蓉

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010 - 51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京泽宇印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185 × 260 印张: 12. 25 字数: 295 千字

版 次: 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 81123 - 986 - 7/TN · 68

印 数: 1 ~ 3 000 册 定价: 22. 00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010 - 51686043, 51686008; 传真: 010 - 62225406; E-mail: press@bjtu. edu. cn。

## 出版说明

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分,其根本任务是培养生产、建设、管理和服务第一线需要的德、智、体、美全面发展的应用型专门人才,所培养的学生在掌握必要的基础理论和专业知识的基础上,应重点掌握从事本专业领域实际工作的基础知识和职业技能,因此与其对应的教材也必须有自己的体系和特点。

为了适应我国高职高专教育发展及其对教育改革和教材建设的需要,在教育部的指导下,我们在全国范围内组织并成立了“全国高职高专教育精品规划教材研究与编审委员会”(以下简称“教材研究与编审委员会”)。“教材研究与编审委员会”的成员所在单位皆为教学改革成效较大、办学实力强、办学特色鲜明的高等专科学校、成人高等学校、高等职业学校及高等院校主办的二级职业技术学院,其中一些学校是国家重点建设的示范性职业技术学院。

为了保证精品规划教材的出版质量,“教材研究与编审委员会”在全国范围内选聘“全国高职高专教育精品规划教材编审委员会”(以下简称“教材编审委员会”)成员和征集教材,并要求“教材编审委员会”成员和规划教材的编著者必须是从事高职高专教学第一线的优秀教师和专家。此外,“教材编审委员会”还组织各专业的专家、教授对所征集的教材进行评选,对所列选教材进行审定。

此次精品规划教材按照教育部制定的“高职高专教育基础课程教学基本要求”而编写。此次规划教材按照突出应用性、针对性和实践性的原则编写,并重组系列课程教材结构,力求反映高职高专课程和教学内容体系改革方向;反映当前教学的新内容,突出基础理论知识的应用和实践技能的培养;在兼顾理论和实践内容的同时,避免“全”而“深”的面面俱到,基础理论以应用为目的,以必要、够用为尺度;尽量体现新知识和新方法,以利于学生综合素质的形成和科学思维方式与创新能力的培养。

此外,为了使规划教材更具广泛性、科学性、先进性和代表性,我们真心希望全国从事高职高专教育的院校能够积极参与到“教材研究与编审委员会”中来,推荐有特色、有创新的教材。同时,希望将教学实践的意见和建议及时反馈给我们,以便对出版的教材不断修订、完善,不断提高教材质量,完善教材体系,为社会奉献更多、更新的与高职高专教育配套的高质量教材。

此次所有精品规划教材由全国重点大学出版社——北京交通大学出版社出版。适合于各类高等专科学校、成人高等学校、高等职业学校及高等院校主办的二级技术学院使用。

全国高职高专教育精品规划教材研究与编审委员会  
2010年7月

# 全国高职高专教育精品 规划教材丛书编委会

主任：曹 殊

副主任：武汉生（西安翻译学院）

朱光东（天津冶金职业技术学院）

何建乐（绍兴越秀外国语学院）

文晓璋（绵阳职业技术学院）

梅松华（丽水职业技术学院）

王 立（内蒙古建筑职业技术学院）

文振华（湖南现代物流职业技术学院）

叶深南（肇庆科技职业技术学院）

陈锡畴（郑州旅游职业学院）

王志平（河南经贸职业学院）

张子泉（潍坊科技职业学院）

王法能（青岛黄海学院）

邱曙熙（厦门华天涉外职业技术学院）

逯 侃（步长集团陕西国际商贸学院）

委员：黄盛兰（石家庄职业技术学院）

张小菊（石家庄职业技术学院）

邢金龙（太原大学）

孟益民（湖南现代物流职业技术学院）

周务农（湖南现代物流职业技术学院）

周新焕（郑州旅游职业学院）

成光琳（河南经贸职业学院）

高庆新（河南经贸职业学院）

李玉香（天津冶金职业技术学院）

邵淑华（德州科技职业学院）

刘爱青（德州科技职业学院）

宋立远（广东轻工职业技术学院）

孙法义（潍坊科技职业学院）

颜 海（武汉生物工程学院）

# 总 序

历史的年轮已经跨入了公元 2010 年,我国高等教育的规模已经是世界之最,2009 年毛入学率达到 24.2%,属于高等教育大众化教育阶段。根据教育部 2006 年第 16 号《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》等文件精神,高职高专院校要积极构建与生产劳动和社会实践相结合的学习模式,把工学结合作为高等职业教育人才培养模式改革的重要切入点,带动专业调整与建设,引导课程设置、教学内容和教学方法改革。由此,高职高专教学改革进入了一个崭新阶段。

新设高职类型的院校是一种新型的专科教育模式,高职高专院校培养的人才应当是应用型、操作型人才,是高级蓝领。新型的教育模式需要我们改变原有的教育模式和教育方法,改变没有相应的专用教材和相应的新型师资队伍的现状。

为了使高职院校的办学有特色,毕业生有专长,需要建立“以就业为导向”的新型人才培养模式。为了达到这样的目标,我们提出“以就业为导向,要从教材差异化开始”的改革思路,打破高职高专院校使用教材的统一性,根据各高职高专院校专业和生源的差异性,因材施教。从高职高专教学最基本的基础课程,到各个专业的专业课程,着重编写出实用、适用高职高专不同类型人才培养的教材,同时根据院校所在地经济条件的不同和学生兴趣的差异,编写出形式活泼、授课方式灵活、满足社会需求的教材。

培养的差异性是高等教育进入大众化教育阶段的客观规律,也是高等教育发展与社会发展相适应的必然结果。只有使在校学生接收差异性的教育,才能充分调动学生浓厚的学习兴趣,才能保证不同层次的学生掌握不同的技能专长,避免毕业生被用人单位打上“批量产品”的标签。只有高等学校的培养有差异性,其毕业生才能有特色,才会在就业市场具有竞争力,从而使高职高专的就业率大幅度提高。

北京交通大学出版社出版的这套高职高专教材,是在教育部“十一五规划教材”所倡导的“创新独特”四字方针下产生的。教材本身融入了很多较新的理念,出现了一批独具匠心的教材,其中,扬州环境资源职业技术学院的李德才教授所编写的《分层数学》,教材立意新颖,独具一格,提出以生源的质量决定教授数学课程的层次和级别。还有无锡南洋职业技术学院的杨鑫教授编写的一套《经营学概论》系列教材,将管理学、经济学等不同学科知识融为一体,具有很强的实用性。

此套系列教材是由长期工作在第一线、具有丰富教学经验的老师编写的,具有很好的指导作用,达到了我们所提倡的“以就业为导向培养高职高专学生”和因材施教的目标要求。

教育部全国高等学校学生信息咨询与就业指导中心择业指导处处长

中国高等教育学会毕业生就业指导分会秘书长

曹 殊 研究员

# 前 言

本书根据高职教育人才培养的要求,坚持以职业发展需求为基础,以技能培训为主线,采用与行业企业进行合作的基于工作过程与任务的开发和设计课程的方法,从而体现了职业性、实践性和开放性的教学要求,抓住了职业能力课程标准的建设思想。本教材在处理理论内容与实践能力的关系上,理论知识以够用为出发点,以培养学生实践能力为中心,按照高职高专人才培养目标,坚持“实际、实用、实践”的原则,结合模拟电子技术的典型应用,在项目编排过程中设计了学习目标、技能目标、工作任务、技能训练等模块,力求突出知识的实用性、实效性。

本课程以应用为目的,把理论与实践训练相结合,采用任务驱动的模块化教学方法,对理论知识、技能训练、问题与练习等进行优化组合,有利于启发引导学生自主思维,激发学生学习的积极性,加强了应用能力的培养。以“教、学、做”为一体的任务驱动与项目导向即“以工作过程为导向”的教学指导思想,每个知识点都至少有一个相关的仿真实训,通过仿真实训,使学生在完成工作任务的过程中掌握所学的知识,使课程改革与建设取得了突破性的进展。

本书由刘恩华任主编,徐科明、陆渊章任副主编,期俊玲、张墅等参与本书部分书稿的编写和整理工作。本书在编写过程中得到了南京信息职业技术学院华永平教授的大力支持,也参照了其他院校专家的研究成果,在这里向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错漏及不妥之处在所难免,恳请读者把对本书的意见和修改建议及时提供给我们(leh@jsit.edu.cn),真诚希望得到广大读者持续不断的支持。

编 者

2010年6月

# 目 录

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 项目 1 小信号放大电路                  | (1)   |
| 模块 1.1 二极管的性能测试与应用            | (1)   |
| 1.1.1 二极管单向导电特性的测试            | (2)   |
| 1.1.2 发光二极管的特性测试              | (18)  |
| 1.1.3 二极管性能综合测试               | (19)  |
| 模块 1.2 小功率三极管的性能测试            | (23)  |
| 1.2.1 三极管基本特性的测试              | (23)  |
| 1.2.2 三极管特性曲线的测试              | (28)  |
| 1.2.3 三极管的检测与特性测试             | (35)  |
| 模块 1.3 小功率三极管放大电路的测试与应用       | (39)  |
| 1.3.1 三极管基本放大电路直流与交流工作状态的测试   | (39)  |
| 1.3.2 放大电路性能指标的测试             | (45)  |
| 1.3.3 共集电极放大电路和共基极放大电路基本性能的测试 | (49)  |
| 1.3.4 三极管小信号放大电路的研究与测试        | (53)  |
| 模块 1.4 小功率场效应管放大电路的测试         | (57)  |
| 1.4.1 JFET 基本特性的测试            | (58)  |
| 1.4.2 MOSFET 基本特性的测试          | (65)  |
| 1.4.3 场效应管基本放大电路基本特性的测试       | (68)  |
| 模块 1.5 放大器频率失真与非线性失真的测试       | (72)  |
| 模块 1.6 负反馈放大器基本性能测试           | (79)  |
| 1.6.1 负反馈的基本概念                | (80)  |
| 1.6.2 反馈的分类与判别                | (82)  |
| 1.6.3 负反馈对放大器性能的影响            | (87)  |
| 1.6.4 负反馈放大器的分析计算             | (92)  |
| 项目 2 信号运算与处理电路                | (100) |
| 模块 2.1 集成运算放大器                | (100) |
| 2.1.1 集成运算放大器的基础知识            | (101) |
| 2.1.2 理想集成运算放大器               | (104) |
| 2.1.3 集成运算放大器使用中的问题           | (106) |
| 模块 2.2 集成运算放大器的应用             | (107) |
| 2.2.1 集成运算放大器线性应用电路的测试        | (107) |
| 2.2.2 集成运算放大器非线性应用电路的测试       | (113) |
| 模块 2.3 正弦波、方波、三角波变换电路的设计与制作   | (120) |

|             |                             |              |
|-------------|-----------------------------|--------------|
| 2.3.1       | 非正弦信号发生器 .....              | (121)        |
| 2.3.2       | 正弦波、方波、三角波变换电路的组装与测试 .....  | (123)        |
| <b>项目 3</b> | <b>功率放大器的设计与制作 .....</b>    | <b>(127)</b> |
| 模块 3.1      | 功率放大器的测试 .....              | (127)        |
| 3.1.1       | 功率放大器的特点及要求 .....           | (128)        |
| 3.1.2       | 功率放大电路提高效率的主要途径 .....       | (130)        |
| 3.1.3       | 乙类双电源互补对称功率放大电路 .....       | (132)        |
| 3.1.4       | 甲乙类互补对称功率放大电路 .....         | (139)        |
| 3.1.5       | 集成功率放大器 .....               | (140)        |
| 模块 3.2      | 音频功率放大器的设计与制作 .....         | (144)        |
| <b>项目 4</b> | <b>直流稳压电源的设计与制作 .....</b>   | <b>(146)</b> |
| 模块 4.1      | 直流稳压电源基本特性的测试 .....         | (146)        |
| 4.1.1       | 直流稳压电源的基本组成 .....           | (147)        |
| 4.1.2       | 半波整流电路 .....                | (148)        |
| 4.1.3       | 全波桥式整流电路 .....              | (150)        |
| 4.1.4       | 电容滤波电路 .....                | (151)        |
| 4.1.5       | 反馈串联型稳压电路 .....             | (153)        |
| 4.1.6       | 集成稳压电路 .....                | (157)        |
| 模块 4.2      | 直流稳压电源的设计与制作 .....          | (162)        |
| 4.2.1       | 直流稳压电源的性能指标 .....           | (163)        |
| 4.2.2       | 串联型直流稳压电源性能指标的测试 .....      | (164)        |
| 4.2.3       | 串联型直流稳压电源的设计与制作 .....       | (166)        |
| <b>附录 A</b> | <b>项目测试报告格式 .....</b>       | <b>(167)</b> |
| <b>附录 B</b> | <b>半导体器件型号命名方法 .....</b>    | <b>(168)</b> |
| <b>附录 C</b> | <b>常用半导体二极管参数表 .....</b>    | <b>(172)</b> |
| <b>附录 D</b> | <b>常用半导体三极管参数表 .....</b>    | <b>(176)</b> |
| <b>附录 E</b> | <b>常用半导体场效应管参数表 .....</b>   | <b>(180)</b> |
| <b>附录 F</b> | <b>部分集成运算放大器主要参数表 .....</b> | <b>(182)</b> |
| <b>附录 G</b> | <b>常用集成稳压器的主要参数表 .....</b>  | <b>(184)</b> |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>                | <b>(186)</b> |



# 项目 1

## 小信号放大电路



### 学习目标

- ◇ 了解半导体基础知识，熟悉二极管的基本结构、伏安特性和主要参数。
- ◇ 熟悉晶体三极管的结构、工作原理、输入和输出特性曲线、主要参数。
- ◇ 熟悉结型和 MOS 场效应管的结构，了解其性能参数。
- ◇ 熟悉放大电路的组成结构，了解静态、动态分析方法。
- ◇ 熟悉多级放大器的组成结构及性能指标估算方法。
- ◇ 掌握反馈的极性、类型判别方法，了解负反馈对放大电路性能的影响；了解深度负反馈放大电路的结构特点与性能估算方法。



### 技能目标

- ◇ 能够识别和检测二极管。
- ◇ 能够识别、检测和选用三极管。
- ◇ 会测试三极管电路的基本特性。
- ◇ 会进行单管共射放大电路的分析和测试。

### 模块 1.1 二极管的性能测试与应用



### 学习目标

- ◇ 了解二极管的结构与符号、单向导电性、反向击穿特性、电容效应、光电效应。
- ◇ 能正确测试各种二极管的外特性。
- ◇ 能查阅半导体器件手册，了解二极管的主要参数。
- ◇ 能设计简单二极管应用电路，并通过调试得到正确结果。

## 工作任务

- ◇ 进行普通二极管外特性的测试、结果记录以及特性描述。
- ◇ 进行发光二极管外特性的测试、结果记录以及特性描述。

### 1.1.1 二极管单向导电特性的测试

## 学习目标

- ◇ 能正确测试普通二极管的单向导电特性。
- ◇ 能正确记录测试结果并作准确地描述。
- ◇ 了解普通二极管的结构与符号、单向导电性、反向击穿特性、温度特性等。

## 工作任务

- ◇ 普通二极管单向导电性测试电路的连接。
- ◇ 普通二极管单向导电性的测试与结果记录。

各种普通二极管（区别于发光、光电、稳压等特殊二极管）器件的外形图及封装形式如图 1-1 所示。

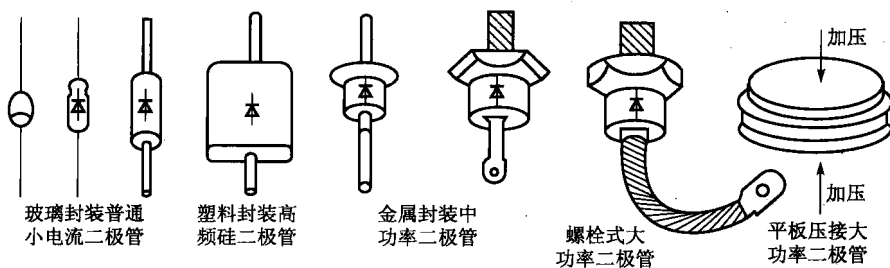


图 1-1 各种普通二极管外形图及封装形式

二极管的基本结构如图 1-2 (a) 所示。其核心部分——管芯由 P 型半导体和 N 型半导体相互紧密结合而成。为了使二极管能与外部电路进行可靠连接，需要在 P 区和 N 区两端引出电极引线或贴片焊接区（贴片元件），并加以封装（管壳）。二极管的电路符号如图 1-2 (b) 所示，其箭头方向表示正向电流的方向，即由阳极（anode）指向阴极（kathode）。

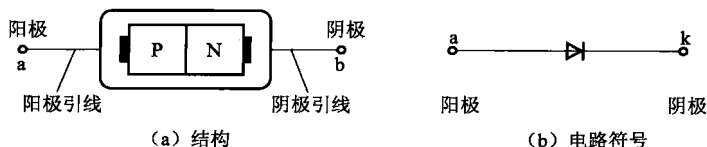


图 1-2 二极管的基本结构和电路符号

二极管种类很多，按所用的半导体材料的不同可分为锗管和硅管；按功能的不同可分为开关管、整流管、稳压管、变容管、发光管和光电（敏）管等，其中开关管和整流管统称

为普通二极管,其他则统称为特殊二极管;按工作电流大小可分为小电流管和大电流管;按耐压高低可分为低压管和高压管;按工作频率高低可分为低频管和高频管等。具体型号及选择可查阅有关手册。



## 技能训练

### 项目任务1

二极管单向导电性的测试 (常规仪器)

#### 测试电路

如图1-3所示,其中二极管VD为1N4007,电阻 $R$ 为1 k $\Omega$ 。

#### 测试步骤

① 按图1-3接好电路。

② 在输入端接入10 V直流电压,即 $U_i = +10$  V (此时二极管两端所加的电压为正向电压),测量输出电压和电流的大小,并记录:  
 $U_o =$  \_\_\_\_\_ V,  $I =$  \_\_\_\_\_ mA,  
 $U_{VD} =$  \_\_\_\_\_ V。

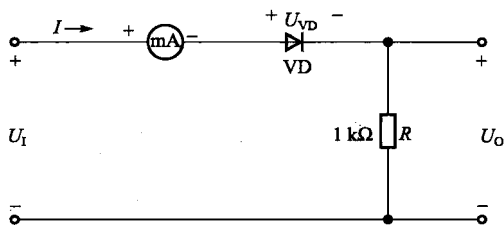


图1-3 二极管单向导电性测试电路

结论:当二极管两端所加的电压为正向电压时,二极管将\_\_\_\_\_ (导通/截止)。

③ 保持步骤②,将二极管反接 (此时二极管两端所加的电压为反向电压),测量输出电压和电流的大小,并记录:  $U_o =$  \_\_\_\_\_ V,  $I =$  \_\_\_\_\_ mA。

结论:当二极管两端所加的电压为反向电压时,二极管将\_\_\_\_\_ (导通/截止)。

④ 用万用表直接测量二极管的正、反向电阻,比较大小并记录:正向电阻 = \_\_\_\_\_ k $\Omega$ ,反向电阻 = \_\_\_\_\_ k $\Omega$ 。

结论:二极管\_\_\_\_\_ (具有/不具有) 单向导电性,且正向导通时管压降为 \_\_\_\_\_ V。

在各种电子设备中,其主要组成部分是电子电路。而电子电路中的核心组成部分是半导体器件,如半导体二极管 (简称二极管)、半导体三极管 (简称三极管)、场效应管 (FET) 和集成电路 (IC)。半导体器件是现代电子技术的重要组成部分,由于它具有体积小、质量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到了广泛应用。

#### 1. 半导体的基本知识

半导体是指导电能力介于导体和绝缘体之间的一种物质。常用的半导体材料有元素半导体,如硅 (Si)、锗 (Ge) 等;化合物半导体,如砷化镓 (GaAs) 等;以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料,如硼 (B)、磷 (P)、铟 (In) 和锑 (Sb) 等。其中硅和锗是目前最常用的半导体材料。半导体具有不同于其他物质的独特性质,主要有以下两点。

① 当半导体受到外界光或热地激发时,其导电能力将发生显著变化 (即光敏与热敏特性)。

② 在纯净的半导体中加入微量的杂质,其导电能力也会有显著的增加 (即掺杂特性)。

以上两点足以说明,半导体的导电机理必然不同于其他物质。要理解这些特点,必须先了解半导体的结构。

### 1) 本征半导体

本征半导体是一种完全纯净、结构完整的半导体晶体。半导体的重要物理特性是它的电导率,电导率与材料内单位体积中所含的电荷载流子(即可移动的带电粒子,如自由电子

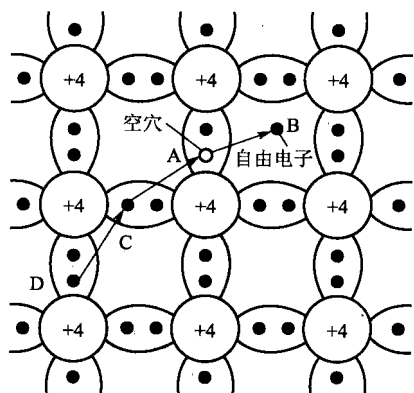


图 1-4 本征激发现象

等)的数目有关。电荷载流子的浓度愈高,其电导率愈高。半导体内载流子的浓度取决于许多因素,包括材料的基本性质、温度以及存在的杂质等。在热力学温度为零开( $T=0\text{ K}$ ,相当于 $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ )时,价电子不能挣脱共价键的束缚,也就不能自由移动,所以共价键内的价电子又称为束缚电子。这样,本征半导体中虽有大量的价电子,但没有自由电子,半导体是不导电的。但是,半导体的共价键实际上是一种“松散联合”,其中的价电子并不像在绝缘体中被束缚得很紧,当温度升高或受光照射时,价电子以热运动的形式不断从外界获得一定的能量,少数价电子因获得的能量较大从而挣脱共价键的束缚,成为自由电子,如图 1-4 (B 处)所示,这种现象称为本征激发。

在本征半导体中存在两种载流子,带负电荷的电子载流子和带正电荷的空穴载流子。在本征激发产生电子空穴对的同时,自由电子在运动中因能量的损失有可能和空穴相遇,重新被共价键束缚起来,电子空穴对消失,这种现象称为“复合”。在一定的温度下,激发和复合都在不停地进行,但最终将处于动态平衡状态,这时半导体中的载流子浓度保持在某一定值。

由于本征激发产生的电子空穴对的数目很少,载流子的浓度很低,因此,本征半导体的导电能力很弱。

由于本征激发产生的电子空穴对的数目很少,载流子的浓度很低,因此,本征半导体的导电能力很弱。

### 2) 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质,就会使半导体的导电性能发生显著地改变。根据掺入的杂质不同,杂质半导体可分为 N 型和 P 型两大类。

#### (1) N 型半导体

在 4 价元素的硅(或锗)晶体中,掺入微量的 5 价元素磷(或砷、锑等)后,磷原子将散布于硅原子中,且替代了晶体点阵中某些位置上的硅原子。磷原子有 5 个价电子,它以 4 个价电子与周围的硅原子组成共价键,多余的一个价电子处于共价键之外。由于这个价电子不受共价键的束缚,因此使杂质磷的原子变成带正电荷的离子,如图 1-5 (a) 所示。由于这种杂质原子可以提供电子,因此称为施主杂质。施主原子的数目虽然不多,但在室温下每掺入一个施主原子,都能产生一个自由电子和一个正离子,自由电子则成为该杂质半导体主要的导电载流子。正离子被束缚在晶体点阵中,不能自由移动,对半导体的导电能力毫无作用。掺入的杂质越多,杂质半导体的导电性能越好。

通常,掺杂所产生的自由电子浓度远大于本征激发所产生的自由电子或空穴的浓度,所以杂质半导体的导电性能远超过本征半导体。由于这种半导体中自由电子浓度远大于空穴浓度,所以称电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。又因为这种

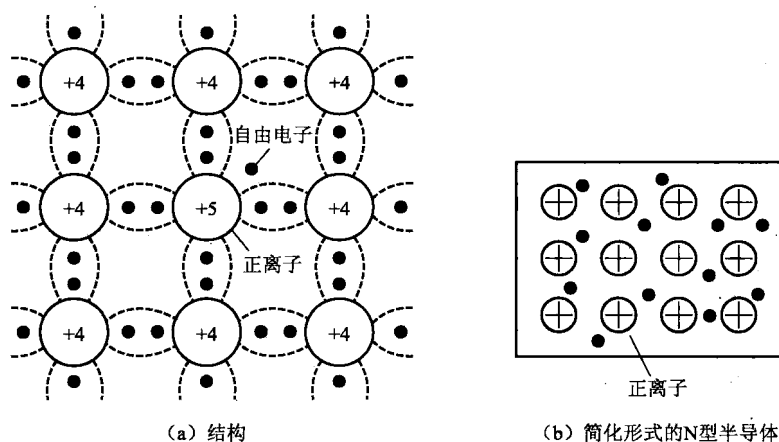


图1-5 N型半导体

半导体的导电主要依靠电子，所以称为N型半导体。

不难理解，N型半导体总体上仍呈电中性，其多子（电子）的浓度取决于所掺杂质的浓度，而少子（空穴）是由本征激发产生的，因此它的浓度与温度或光照密切相关。为了突出N型半导体导电特性的主要特征，通常把N型半导体画成图1-5（b）所示的简化形式，其中，自由电子和正离子总是成对出现。当然，在某些场合还需要考虑N型半导体由于受热激发而产生的少子的影响。

## （2）P型半导体

在硅（或锗）的晶体中掺入微量的3价元素硼（或铝、镓等）后，杂质原子也散布于硅原子中，且替代了晶体点阵中某些位置上的硅原子。由于硼原子只有3个价电子，它与周围的硅原子组成共价键时，因缺少一个电子而使硅原子产生一个空位。在室温下它很容易吸引邻近硅原子的价电子来填补，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1-6（a）所示。由于这种杂质原子能吸收电子，因此称为受主杂质。受主负离子不能移动，也不参与导电，只有空穴才对杂质半导体的导电性能做贡献。同样，掺入的杂质越多，其导电性能越好。

在室温下，每掺入一个受主原子，都能产生一个空穴和一个负离子。在这种半导体中，空穴是多子，自由电子是少子，它的导电主要依靠空穴，因此称为P型半导体。

与N型半导体类似，P型半导体总体上也是呈电中性的，其多子（空穴）的浓度取决于所掺杂质的浓度，少子（电子）的浓度与温度或光照密切相关。为了突出P型半导体导电特性的主要特征，通常把P型半导体画成图1-6（b）所示的简化形式，它的空穴和负离子总是成对地出现。

## 2. PN结的单向导电性

### 1) PN结的形成

当P型半导体与N型半导体结合后，在交界处两侧就出现了电子和空穴的浓度的差别，即N区的电子多空穴少，而P区内则相反，空穴多电子少。这样，N区的电子必然向P区扩散，P区的空穴也要向N区扩散。这种由于电子和空穴的浓度差产生的自然扩散力（方向为高浓度区指向低浓度区）所引起的运动称为扩散运动，如图1-7（a）所示。由于电子

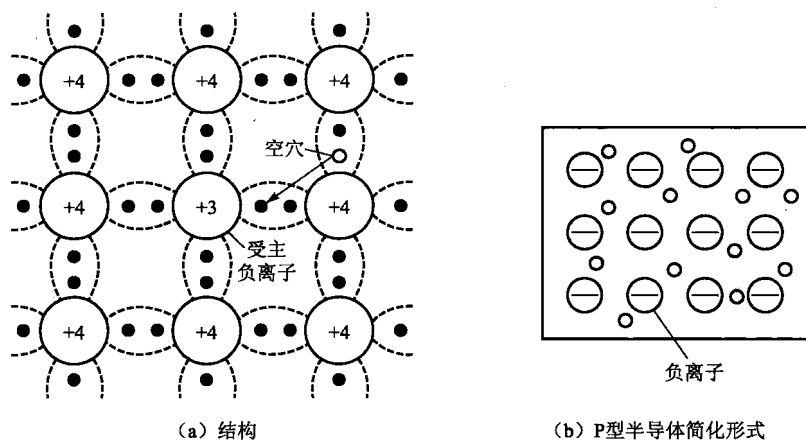


图 1-6 P 型半导体

和空穴都是带电粒子，因此扩散的结果使 P 区和 N 区原来的电中性被破坏，于是在交界处附近，N 区的一侧出现不能移动的杂质正离子区，P 区的一侧出现不能移动的杂质负离子区，这些不能移动的带电离子区称为空间电荷区，即 PN 结，如图 1-7 (b) 所示。

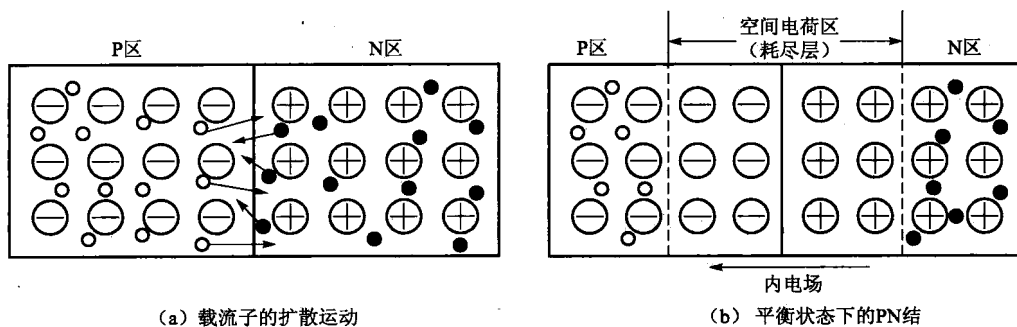


图 1-7 PN 结的形成

出现空间电荷区的同时，也产生了一个由 N 区指向 P 区的电场，这个电场不是外加的，而是由空间电荷区内部电荷产生的，因此称其为内电场。显然，内电场阻止多子的扩散，即对多子的扩散起着类似堡垒的阻挡作用，因此空间电荷区又称为势垒区或阻挡层。但另一方面，内电场又使少子在电场力的作用下产生与扩散运动方向相反的运动，通常把这种在电场力的作用下载流子所产生的运动称为漂移运动。因此，交界处两侧同时存在扩散和漂移这两种方向相反的运动。容易理解，当扩散和漂移运动处于动态平衡状态时，空间电荷区的宽度基本保持不变，且扩散电流与漂移电流大小相等，方向相反，因此流过 PN 结的总电流为零。

PN 结的空间电荷区存在电场，即有电位差，通常称该电位差为内建电位差或接触电位差，其值约为零点几伏。

## 2) PN 结的单向导电性原理

若在 PN 结两端接上外接电源，则 PN 结原来的平衡状态被打破，这种情况被称为偏置，相应的外接电源称为偏置电源。PN 结的 P 区接电源正极、N 区接电源负极的接法称为正向

接法或正向偏置,简称正偏;PN结的P区接电源负极、N区接电源正极的接法称为反向接法或反向偏置,简称反偏,如图1-8所示,其中的电阻 $R$ 为限流电阻。

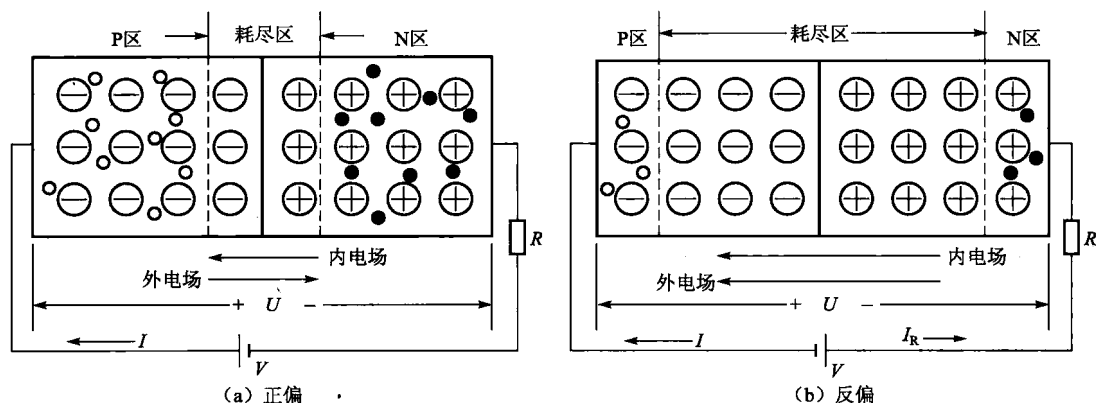


图1-8 外加电压时的PN结

如图1-8(a)所示,正偏时,外加电场与内电场的方向相反,内电场被削弱,PN结的原有平衡状态被打破。这时扩散运动将增强,而漂移运动将减弱,由于多子的数量多,因此可以形成较大的由多子扩散而产生的电流;少子的数量少,由少子漂移而产生的电流很小,可以忽略不计。通常把正偏时PN结流过的电流称为正向电流,其方向由P区指向N区。

由于正偏时正向电流较大,PN结对外电路呈现较小的电阻,这种状态称为PN结的导通。

如图1-8(b)所示,反偏时,外加电场与内电场的方向相同,内电场被增强,PN结的原有平衡状态被打破,漂移运动将增强,而扩散运动将减弱。虽然多子的数量多,但由于此时扩散运动很难进行,因此由多子扩散而产生的电流几乎为零;而少子的数量少,尽管漂移运动增强了,但是由少子漂移而产生的电流仍然很小。通常把反偏时PN结流过的电流称为反向电流,其方向由N区指向P区。

由于反偏时反向电流很小,PN结对外电路呈现较高的电阻,这种状态称为PN结的截止。

总之,PN结正向导通、反向截止,这就是PN结的单向导电性。PN结的单向导电性即为二极管的单向导电性。

### 3. 二极管的伏安特性

二极管的伏安特性可用流过它的电流 $I$ 与它两端电压 $U$ 的关系来描述,伏安特性在 $I-U$ 坐标平面上以曲线的形式描绘出来,称为伏安特性曲线,如图1-9所示。

注意:为了使曲线清晰,横轴所代表的电压在 $U > 0$ 和 $U < 0$ 两部分采用不同的比例,纵轴所代表的电流在 $I > 0$ 和 $I < 0$ 两部分则采用不同的单位。由图1-9可以看出,二极管的伏安特性具有以下特点。

#### 1) 正向特性

正向特性曲线开始部分变化很平缓,说明正向电压较小时,正向电流很小,这是因为加在PN结上的外电场太小,还不足以克服内电场力的阻碍作用。这时二极管实际上没有导

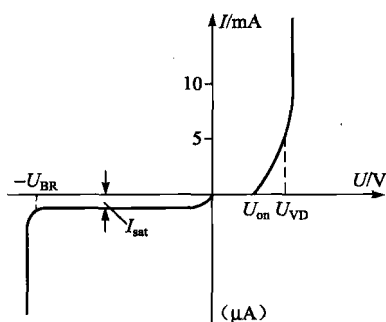


图 1-9 二极管的伏安特性曲线

通, 对外呈现很大的电阻, 这一部分称为正向特性的“死区”。死区以后的正向特性曲线上升较快, 说明正向电压超过某一数值后, 电流才显著增大, 这个电压值称为导通电压或开启电压, 用  $U_{on}$  表示。在室温下, 硅管的  $U_{on} \approx 0.5 \text{ V}$ , 锗管的  $U_{on} \approx 0.1 \text{ V}$ 。因此, 只有当  $U > U_{on}$ , 内电场被大大削弱时, 二极管才真正处于导通状态, 并呈现很小的电阻。由图 1-9 还可以看出, 当正向电流稍大时, 正向特性几乎与横轴垂直, 说明这时电流在较大范围变化时, 二极管两端电压 (称为管压降, 用  $U_{VD}$  表示) 变化很小, 通常, 硅管的管压降为  $0.6 \sim 0.8 \text{ V}$ , 锗

管的管压降为  $0.1 \sim 0.3 \text{ V}$ 。

## 2) 反向特性

反向特性曲线靠近横轴, 说明二极管外加反向电压时, 反向电流很小, 处于反向截止状态, 呈现出很大的电阻, 而且反向电流几乎不随反向电压的增大而变化。小功率硅管的反向电流一般小于  $0.1 \mu\text{A}$ , 而锗管通常为几微安。

图 1-9 中反向区电流随电压急剧变化的区域称为反向击穿区。

实验表明, 当二极管两端所加的反向电压在某一范围内变动时, 流过二极管的电流是很小的反向饱和电流  $I_{sat}$ , 但是当反向电压增大到某一数值  $U_{BR}$  后, 反向电流突然会急剧增加, 这种现象称为二极管的反向击穿。反向电流开始明显增大时所对应的反向电压  $U_{BR}$  称为反向击穿电压。上述的击穿是由所加的反向电压太大引起的, 所以属于电击穿。

需要特别指出的是, 普通二极管的反向击穿电压较高, 一般在几十伏到几百伏以上 (高压管可达几千伏)。普通二极管在实际应用中不允许工作在反向击穿区。

## 4. 二极管的温度特性

二极管对温度也有一定的敏感性。当温度升高时, 扩散运动加强, 正向电流增大, 因此正向特性向左移动; 此时本征激发的少数数目迅速增加, 因此反向电流剧增, 反向特性向下移动。温度对二极管特性影响的规律是: 在室温附近, 温度每升高  $1^\circ\text{C}$ , 正向压降减小  $2 \sim 2.5 \text{ mV}$ ; 温度每升高  $10^\circ\text{C}$ , 反向电流约增大一倍。显然, 二极管的反向特性受温度的影响较大, 在实际应用中, 温度对二极管的影响是不可避免的。

## 5. 二极管的主要参数

二极管的特性还可以用它的参数来表示。参数是用来定量描述二极管性能的指标, 是正确使用和合理选择二极管的依据。二极管的主要参数如下。

### 1) 最大整流电流 $I_F$

$I_F$  是指二极管正常工作时允许通过的最大正向平均电流, 它与 PN 结的材料、结面积和散热条件有关。因为电流流过 PN 结要引起管子发热, 如果在实际运用中流过二极管的平均电流超过  $I_F$ , 则管子将过热而被烧坏。因此, 二极管的平均电流不能超过  $I_F$ , 并要满足散热条件。

### 2) 最大反向工作电压 $U_R$

$U_R$  是指二极管在使用时所允许加的最大反向电压。为了确保二极管安全工作, 通常取二极管反向击穿电压  $U_{BR}$  的一半为  $U_R$ 。例如, 二极管 1N4001 的  $U_R$  规定为  $100 \text{ V}$ , 而  $U_{BR}$  实