

高职高专教学用书

IT类专业项目课程系列教材（电子技术专业）

马成荣 丛书主编

徐国庆 丛书副主编

模拟电路设计与制作

ELECTRONIC TECHNOLOGY

goal was to make a network that could survive if parts of it were destroyed (like it a war). In the late 1970s it was used in a limited way by some colleges and universities for research in the United States, and in 1981 it was opened to the public by a law passed by the American Congress. It has grown very fast and now because everyone can use it.

Money is made on the Internet in many ways. Although E-Commerce is a big buzzword now, only some companies are actually making a lot of money through online purchases. Generally, the Internet is used as a marketing or promotion tool that offers the low cost transmission of a lot of information to almost anywhere. So online advertising has been a source of revenue for some companies with very popular websites, but has not been big enough to sustain many companies. Other ways to make money are through subscription information services, though these businesses have had difficulty because there is so much free information on the Web now.

The future of the Internet is Ubiquity and Mobility and Delivery Adaptation. The Internet will be available everywhere, it will not require fixed connections, and it will be available in many screen sizes and formats. Imagine you have access to almost any information you want anywhere you are through many devices you never thought of as computers before (like your refrigerator and your clothing). You can communicate with your friends and business associates with text and pictures and sound and video. That is the Internet's future.

access to almost any information you want anywhere you are through many devices you never thought of as computers before (like your refrigerator and your clothing). You can communicate with your friends and business associates with text and pictures and sound and video. That is the Internet's future.

华永平 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高职高专教学用书

IT类专业项目课程系列教材（电子技术专业）

模拟电路设计与制作

马成荣 丛书主编

徐国庆 丛书副主编

华永平 主编

刘楠 马永兵 孙刚 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是依据江苏省教育科学“十五”规划重点课题“中高职 IT 类专业课程开发与实验研究”的成果开发的项目课程教材,是高职高专电子信息类专业主干课程教材。全书的主要内容包括:光控电子开关的设计与调试、小功率三极管放大器的设计与调试、小功率场效应管放大器的设计与调试、小功率高保真放大器的设计与调试、立体声调音控制器的设计与制作、音频功率放大器的设计与制作、直流稳压电源的设计与制作等 7 个项目。在每个项目中均有明确的工作任务要求,并在项目完成的过程中嵌入知识的学习,即将“读、做、想、学”等内容融为一体。

本书可作为高职高专电子、通信、自控和机电类等相关专业“模拟电子技术”类课程的教材,亦可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电路设计与制作 / 华永平主编. —北京: 电子工业出版社, 2007.7

(IT 类专业项目课程系列教材)

高职高专教学用书. 电子技术专业

ISBN 978-7-121-04066-5

I. 模… II. 华… III. 模拟电路—电路设计—高等学校: 技术学校—教材 IV. TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 097213 号

策划编辑: 施玉新

责任编辑: 宋兆武

印 刷: 北京市李史山胶印厂
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19 字数: 481.6 千字

印 次: 2007 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 25.70 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

丛书编委会名单

主任 马成荣

副主任 徐国庆

成员（按姓氏笔画为序）

尤玉梅

王羽军

石光耀

刘振海

曲晓绪

杨克

张荣胜

李燕

林原

陈振宇

陈振源

俞冬伟

郑步春

赵彬

秦建平

徐强

徐震

梁红光

黄洪成

韩国志

秘书长：施玉新

序

当今世界已进入信息时代，以微电子为基础，以计算机和通信技术及相应的软件、信息服务为主体的信息技术，已成为新兴生产力的代表和经济增长点；信息技术和网络信息的结合与应用，催生了大量新兴产业，促进了传统产业的升级，推动着工业社会向信息社会转变。信息化无疑已经成为一个国家提高竞争力的必然选择。党的十六大明确提出，要走新型工业化道路，必须坚持以信息化带动工业化，以工业化促进信息化。世界性的发展趋势及国家的发展战略，使我国的信息产业自 20 世纪 90 年代末期开始，一直以 2~3 倍于 GDP 的速度发展，迄今方兴未艾。

信息产业的发展也对人才培养提出了更高的要求，并将进一步促进以培养应用型人才为己任的职业院校人才培养模式的改革。在这一改革的进程中，课程改革因其在实现培养目标中具有核心地位和关键作用，显得尤为重要。

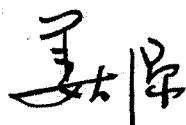
江苏省教育科学“十五”规划重点课题“中高职 IT 类专业课程开发与实验研究”就是在全面分析、准确把握我国信息产业发展态势及在对应用型人才需求要素的基础上展开的。该课题立意高，目标明确，研究路径正确，因此它所取得的研究成果在国内同类研究中具有领先地位。其优点突出表现在：构建了“以能力为本位，以职业实践为主线，以项目课程为主体的模块化专业课程体系”，并对其相关理论内涵进行了科学的阐述，提出了“德育课程与专业课程的渗透式、学历证书与职业资格证书的嵌入式、实践知识与理论知识的整合式、中职课程与高职课程的衔接式”这一课程理念。尤为可贵的是，该课题对项目课程开发技术层面的开发程序，以及相关的理论基础，均进行了归纳和整理，形成了可供操作的方案，极具应用性。电子工业出版社出版的这套中职、高职 IT 类专业项目课程系列教材，正是在上述研究成果指导下的“产品”。

这套教材特色鲜明。首先，思路新，它秉承了课题研究所体现的“能力本位—实践主线—项目主体”的脉络和“渗透式—嵌入式—整合式—衔接式”的先进理念。其次，结构新，与传统教材的学科结构不同，作为一种全新的项目课程教材，它指向以生产一个具体的、具有实际应用价值的产品为目的的工作任务，以此为基础构建项目形式的学习任务，并围绕项目的完成过程展开课程内容。这一结构要求采取项目—任务驱动的教学方法，师生双方边教、边学、边做，融理论教学、实践教学、生产、技术服务于一体，目的在于培养学生的职业能力。再次，定位新，本套教材是依据“学生中心”的教育理念编写的，在目标设定、教学实施及学习检测等方面，都以学生为主体进行了安排。

众所周知，教学改革是一项系统工程，涉及诸多领域和各种因素，但课程和教材的改

革始终是最重要的环节。成功的课程和教材将成为促进教学质量提高的助推器，有利于培养既满足社会需求又满足个性发展的高素质劳动者和专门人才。我相信，这套教材的出版将对开发更多符合职业教育特色和规律的教材起到一个促进的作用，一个引领的作用。

最后，我期望使用这套教材的教师，能边应用、边研究、边总结，把握项目课程及其教材的特点，并在此基础上为开发更多项目课程和教材做出自己的贡献。

Handwritten signature in black ink, appearing to read '王翔' (Wang Xiang).

2007年3月1日

前 言

项目课程《模拟电路设计与制作》是高职高专电子信息类专业的一门重要的基础能力课程。本书是独具特色的融理论、实践、仿真、多媒体为一体的项目教材，是作者在多年的教学改革与实践的基础上，应用江苏省教育科学“十五”规划重点课题“中高职 IT 类专业课程开发与实验研究”的成果而编写的教学改革系列教材之一，重点体现了“以能力为本位，以职业实践为主线”的课程设计要求。该课程以形成模拟放大电路设计、电路制作、电路测试与调试等能力为基本目标，打破传统学科课程的设计思路，紧紧围绕工作任务完成的需要来选择和组织课程内容，突出工作任务与知识的联系，让学生在职业实践活动的基础上掌握知识，增强课程内容与职业岗位能力要求的相关性，提高学生的职业能力。

《模拟电路设计与制作》也是高职高专电子信息类专业的主干项目课程，具有很强的实践性。通过本课程的学习，可以使学生会本专业高等技术应用型人才所必需的半导体器件、三极管放大电路、场效应管放大电路、集成运算放大器、功率放大器、直流稳压电源等有关知识，以及掌握常用仪器仪表的使用、元器件与放大电路的测试、电路的设计、电路的制作与调试等技能。本课程的前修课程是《电工电路设计与制作》，后续课程有《射频电路设计与制作》、《数字电路设计与制作》等。

本书内容包含了 7 个主项目，是按初学者循序渐进学习项目的过程进行编排的，主要有：光控电子开关的设计与调试、小功率三极管放大器的设计与调试、小功率场效应管放大器的设计与调试、小功率高保真放大器的设计与调试、立体声调音控制器的设计与制作、音频功率放大器的设计与制作、直流稳压电源的设计与制作等项目，并在书后附有“项目测试报告格式”、“项目设计报告格式”、各类常用半导体器件参数等内容，突出了项目教学的工程性和技术性特征。在每个主项目的内容中，先简单，后复杂；先测试，后设计；先单元电路，后总体电路；先子项目，后主项目。一般最后一个子项目完成最终的主项目，而前面的子项目则为最后一个子项目作铺垫。在每个项目完成的过程中嵌入了知识（理论知识和实践知识）的学习，做到“读、做、想、学”等方面环环紧扣，师生互动，以期达到最佳的教学效果。

本书由南京信息职业技术学院华永平老师主编，刘楠、马永兵、孙刚老师担任副主编。南京长盛仪器有限公司的朱晓明总工程师作为编写顾问为本书的编写提供了许多有价值的参考资料，并提出了一些具体的编写意见。在此对各位老师和专家对本书编写工作的大力支持表示衷心的感谢！

编 者

2007 年 6 月于南京

目 录

P1	光控电子开关的设计与调试	(1)
	P1M1 二极管单向导电特性的测试.....	(2)
	P1M2 发光二极管特性的测试.....	(14)
	P1M3 光电二极管特性的测试.....	(15)
	P1M4 光控电子开关的设计与调试.....	(17)
	知识小结.....	(24)
	思考与练习.....	(25)
P2	小功率三极管放大器的设计与调试	(27)
	P2M1 三极管基本特性的测试.....	(28)
	P2M2 三极管基本放大器直流与交流工作状态的测试.....	(44)
	P2M3 放大器性能指标的测试.....	(65)
	P2M4 共集电极放大器和共基极放大器基本特性的测试.....	(76)
	P2M5 小功率三极管放大器的设计与调试.....	(84)
	知识小结.....	(88)
	思考与练习.....	(90)
P3	小功率场效应管放大器的设计与调试	(96)
	P3M1 结型场效应管(JFET)基本特性的测试.....	(97)
	P3M2 金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)基本特性的测试.....	(106)
	P3M3 场效应管放大器基本特性的测试.....	(115)
	P3M4 小功率场效应管放大器的设计与调试.....	(123)
	知识小结.....	(126)
	思考与练习.....	(127)
P4	小功率高保真放大器的设计与调试	(130)
	P4M1 放大器频率失真与非线性失真的测试.....	(131)
	P4M2 负反馈放大器基本特性的测试.....	(142)
	P4M3 小功率高保真放大器的设计与调试.....	(165)
	知识小结.....	(184)
	思考与练习.....	(185)
P5	立体声调音控制器的设计与制作	(190)
	P5M1 集成运放基本应用电路的测试.....	(190)
	P5M2 立体声调音控制器的设计与制作.....	(209)
	知识小结.....	(211)
	思考与练习.....	(211)

P6 音频功率放大器的设计与制作	(213)
P6M1 功率输出级电路的测试.....	(213)
P6M2 音频功率放大器的设计与制作.....	(232)
知识小结.....	(233)
思考与练习.....	(234)
P7 直流稳压电源的设计与制作	(236)
P7M1 直流稳压电源各单元电路基本特性的测试.....	(237)
P7M2 直流稳压电源的设计与制作.....	(258)
知识小结.....	(265)
思考与练习.....	(265)
附录 A 项目测试报告格式	(268)
附录 B 项目设计报告格式	(269)
附录 C 标准电路图纸格式	(270)
附录 D 半导体器件型号命名方法	(271)
附录 E 常用半导体二极管参数表	(276)
附录 F 常用半导体三极管参数表	(280)
附录 G 常用半导体场效应管参数表	(284)
附录 H 部分集成运放主要参数表	(286)
附录 I 常用集成稳压器主要参数表	(288)
附录 J 质量管理基本常识	(290)
参考文献	(291)

P1 光控电子开关的设计与调试



学习目标

- ◇ 能正确测量各种二极管的外特性，能正确记录测量结果并能对结果做出准确描述。
- ◇ 能查阅半导体器件手册。
- ◇ 能描述二极管的主要参数、分类及其选择使用方法。
- ◇ 能设计简单二极管应用电路，并通过调试得到正确结果。
- ◇ 能判断和处理简单电路故障。
- ◇ 能撰写设计和测试报告。
- ◇ 了解半导体二极管及其基本特性：二极管的结构与符号、二极管的单向导电特性、二极管的反向击穿特性、二极管的电容效应、二极管的光电效应、二极管的温度特性等。
- ◇ 了解各种二极管的基本应用。



工作任务

- ◇ 普通（开关）二极管外特性的测试，记录结果并进行特性描述。
- ◇ 发光二极管外特性的测试，记录结果并进行特性描述。
- ◇ 光电二极管外特性的测试，记录结果并进行特性描述。
- ◇ 通过查阅电子元器件手册选用相关元器件，完成光控电子开关电路的设计、电路的装接与调试。
- ◇ 撰写设计文档和测试报告。

在许多电子或控制设备中，需要用到光控电子开关。如电视遥控器对电视机电源及声音与图像等信号的开关控制、汽车光控防盗锁、路灯自动照明控制等都采用了光控电子开关电路。光控电子开关克服了机械开关寿命短、可靠性差等缺点，另外还避免了人直接接触较危险的使用强电的设备，大大提高了操作的安全性。

需要指出的是，在实际应用中，为防止误触发或控制多路开关，通常要对光控信号进行编码，因此实际应用电路往往比书里介绍的电路设计复杂得多。

包括光控电子开关在内的绝大部分电子电路中都要用到半导体二极管（简称二极管）。

由于二极管是各种半导体器件及其应用电路的基础，因此这里首先通过相关项目训练学习和了解二极管的基本特性。

P1M1 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。
- ◇ 能正确记录测量结果并能对结果做出准确描述。
- ◇ 了解普通二极管及其基本特性：结构与符号、单向导电特性、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装接。
- ◇ 普通二极管单向导电性的测试与结果的记录。
- ◇ 普通二极管单向导电性的描述。



看一看

二极管的外形、结构和符号

各种普通二极管（简称二极管，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。

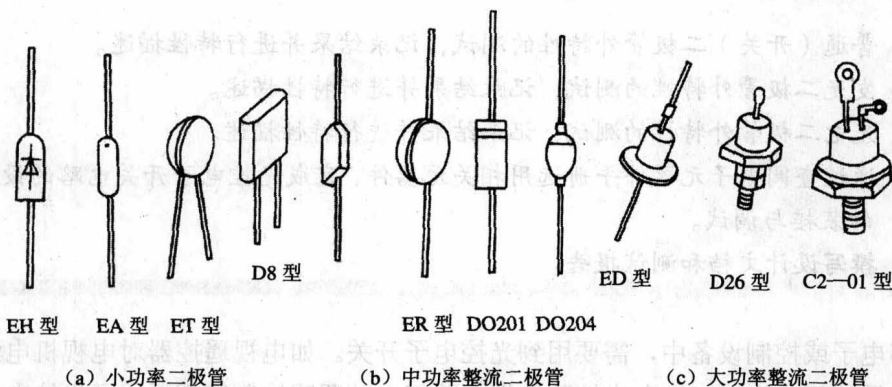


图 1.1 各种普通二极管的外形图及封装形式

二极管的基本结构如图 1.2 (a) 所示，其核心组成部分（管芯）由 P 型半导体和 N 型半导体相互紧密结合构成。为了能使二极管与外部电路可靠连接，需要在 P 区和 N 区两端引出电极引线或贴片焊接区（贴片元器件），并加以封装（管壳）。二极管的电路符号如图 1.2 (b) 所示，箭头方向表示正向电流的方向，即由阳极（anode）指向阴极（kathode）。

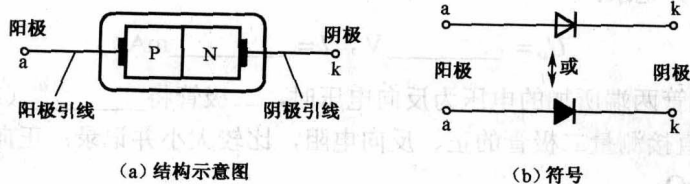


图 1.2 二极管的结构和符号

二极管种类很多,按所用的半导体材料可分为锗管和硅管;按功能可分为开关管、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普通二极管,其他则统称特殊二极管;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。

二极管的命名方法见附录 D。



做一做

项目: 二极管单向导电性的测试

项目编号: MNC1-1

任务要求: 按测试程序要求完成所有测试内容,并撰写测试报告(格式要求见附录 A)。

测试设备: 模拟电路综合测试台 1 台, 0~30V 直流稳压电源 1 台, 数字万用表 1 块, mA 表 1 只。

测试电路: 如图 1.3 所示, 其中二极管 VD 为 1N4148 (或其他), R 为 $1k\Omega$ 。

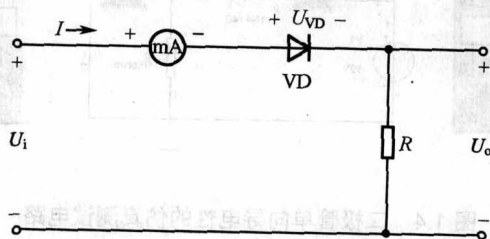


图 1.3 二极管单向导电性的测试电路

测试程序:

① 按图 1.3 接好电路。

② 由直流稳压电源输出 10V 电压接入输入端, 即 $U_i = +10V$ (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:

$$U_o = \underline{\quad\quad} V, I = \underline{\quad\quad} mA$$

测量此时二极管两端的电压为

$$U_{VD} = \underline{\quad\quad} V$$

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, 截止即不导通)。

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：

$$U_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ V}, I = \underline{\hspace{2cm}} \text{ mA}$$

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 Ω ，反向电阻=_____k Ω 。

结论：二极管_____（具有/不具有）单向导电性，且正向导通时，导通电压降约为_____（零/零点几/几）伏。



做一做

【能力拓展】

项目：二极管单向导电性的仿真测试

项目编号：MNF1-1

任务要求：按测试程序要求完成所有测试内容，并撰写测试报告（格式要求见附录A）。

测试设备与软件：计算机1台，Multisim2001或其他同类软件1套。

测试电路：如图1.4所示。

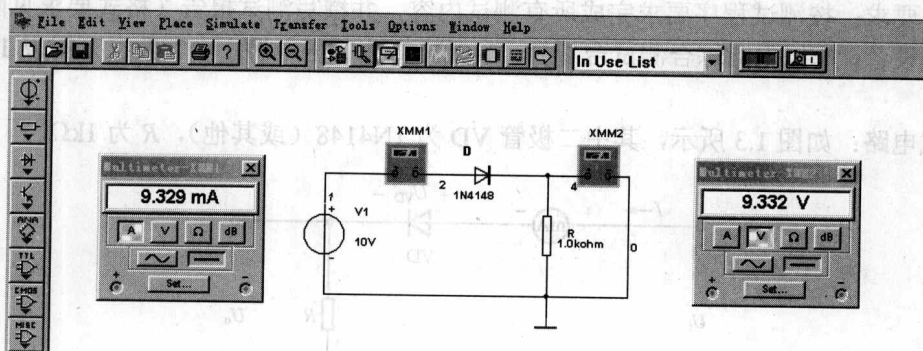


图 1.4 二极管单向导电性的仿真测试电路

测试程序：略，类同项目 MNC1-1。



读一读

【知识拓展】

在各种电子设备（electronic equipment）中，其主要组成部分是电子线路（circuits）。而电子线路中最重要核心组成部分是半导体器件（semiconductor device），如半导体二极管（diode，简称二极管）、半导体三极管（transistor，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、重量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛应用。集成电路特别是大规模和超大规模集成电路不断更新换代，致使电子设备在微型化、可靠性和电子系统设计的灵活性等方面有了重大的进步，因而电子技术已成为当代高新技术的龙头。

1. 半导体的基本知识

(1) 半导体材料

所谓半导体是指导电能力介于导体 (conductor) 和绝缘体 (insulator) 之间的一种物质。电子设备中应用最普遍的半导体器件就是由半导体材料制成的。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; 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。半导体的真正应用价值并不在于其导电性能与导体或绝缘体在数值上的差异 (如电导率的大小等), 最主要的是它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和热的激发时, 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, 必须首先了解半导体的结构。

(2) 半导体的共价键结构

硅和锗的简化原子结构模型如图 1.5 所示。硅和锗都是四价元素, 它们的原子的最外层电子都是四个, 称为价电子。由于原子呈中性, 因此原子核用带圆圈的 +4 符号表示。价电子受原子核的束缚力最小。物质的化学性质及其导电能力是由价电子决定的, 所以价电子是重点讨论的对象。

制造半导体器件的材料都要制成晶体 (crystal) 结构, 晶体硅或晶体锗结构是由硅或锗原子按一定的规则整齐地排列 (称为空间点阵) 而成的。硅或锗制成晶体后, 由于晶体中原子之间距离很近, 价电子不仅受到原来所属原子核的吸引, 而且还受到相邻原子核的吸引, 即一个价电子为相邻的两个原子核所共有。这样, 相邻原子之间通过共有价电子的形式结合起来, 即形成“共价键 (covalent bond)”结构。共价键指的是两个相邻原子各提供一个价电子作为共有价电子所形成的束缚作用。因此, 每个硅或锗的原子都以对称的形式与其邻近的四个原子通过共价键紧密地联系起来, 如图 1.6 所示, 其中两个相邻原子间的两条虚线表示原子间的共价键。图 1.6 表示的是二维结构, 实际结构应是三维的。



图 1.5 硅或锗的简化原子结构模型图

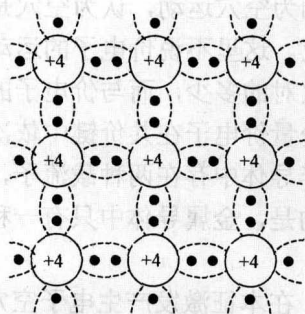


图 1.6 硅或锗晶体的共价键结构示意图

(3) 本征半导体、空穴及其导电作用

① **本征半导体**。本征半导体是一种完全纯净的、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 (carrier, 即可移动的

带电粒子，如自由电子等）的数目有关。电荷载流子的浓度越高，电导率越高。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、温度值及杂质的存在。在热力学温度为零开（ $T=0\text{ K}$ ，相当于 -273.15°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（bonded electron）。

这样，本征半导体中虽有大量的价电子，但没有自由电子，此时半导体是不导电的。但是，半导体的共价键实际上是一种“松散联合”的形式，其中的价电子并不像在绝缘体中那样被束缚得很紧。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（free electron），如图 1.7 所示（B 处），这种现象称为本征激发。

② 空穴（hole）。当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后，就同时在原来的共价键的相应位置上留下一个空位，这个空位称为空穴，如图 1.7 所示。其中 A 处为空穴，B 处为自由电子。

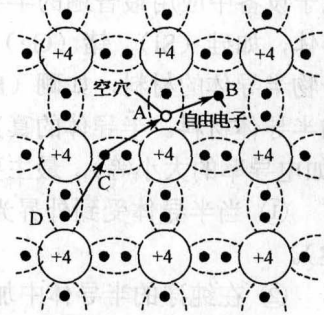


图 1.7 本征激发现象

空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。显然，自由电子和空穴是成对出现的，所以称它们为电子空穴对。

③ 两种载流子。本征激发产生的自由电子，将在电场作用下定向运动形成电流，因此它是本征半导体中的一种载流子，即电子载流子。下面讨论空穴在电场作用下的运动情况。

由于共价键中出现了空穴，在外加电场或其他能源的作用下，邻近价电子就可填补到这个空位中来，而该价电子原来所在的位置上就留下一个新的空位，其他电子又有可能转移到这个新的空位。这样就在共价键中出现了一定的电荷迁移。

参见图 1.7，设外加电场 E 的方向为从右至左，若 A 处出现一个空穴，C 处电子就可填补到这个空位中来，从而使空穴从 A 处移到 C 处；同样，邻近的 D 处的电子又可以填补 C 处的空穴，空穴又从 C 处移到 D 处。在这个过程中，价电子由 D 处移动到 C 处再移动到 A 处，虽然它可以移动，但仍处于束缚状态。价电子填补空穴的运动，可以等效为带正电荷（charge）的空穴在向与价电子运动相反的方向运动。为了区别于自由电子的运动，通常称这种价电子的填补运动为空穴运动，认为空穴是一种带正电荷的载流子，它所带的电量与电子电量相等，符号相反。这里不说价电子的运动而说是空穴的运动是因为本征半导体的导电能力只取决于电子空穴对的多少，而与价电子的多少无关。在电场作用下，并非所有的价电子都参与导电，只是少量价电子在共价键中依次填补的运动才起导电作用。

可见，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。需要特别指出的是，金属导体中只有一种载流子，即电子载流子，这是二者的一个重要区别。

必须指出的是，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，从而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”。显然，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，载流子浓度很低，因此，本征半导体的导电能力很弱。

(4) 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改变。根据掺入杂质的化合价不同，可将杂质半导体分为 N 型和 P 型两大类。

① **N 型半导体**。在四价元素的硅（或锗）晶体中，掺入微量的五价元素磷（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。磷原子有五个价电子，它以四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 1.8 (a) 所示。由于这种杂质的原子可以提供电子，因此称之为施主杂质。施主原子 (donor atom) 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。值得注意的是，正离子被束缚在晶体点阵中，不能自由移动，对半导体的导电毫无作用。显然，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。显然，这种半导体中自由电子的浓度远大于空穴的浓度，所以称电子为多数载流子 (majority carrier, 简称多子)，空穴为少数载流子 (minority carrier, 简称少子)。因为这种半导体的导电主要依靠电子，所以称之为 N 型半导体或电子型半导体。

不难理解，N 型半导体总体上仍为电中性，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 型半导体画成如图 1.8 (b) 所示的简化形式，其中的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 型半导体受热激发而产生的少子的影响。

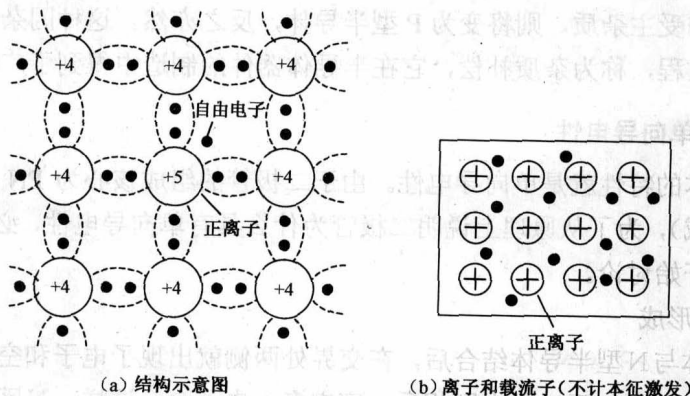


图 1.8 N 型半导体

② **P 型半导体**。在硅（或锗）的晶体中掺入微量的三价元素硼（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。由于硼原子只有三个价电子，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 1.9 (a) 所示。由于这种杂质的原子能吸收电子，因此称之为受主杂质。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

的导电作贡献。同样，掺入的杂质越多，这种杂质半导体的导电性能越好。

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，因此称之为P型半导体或空穴型半导体。与N型半导体类似，P型半导体总体上也是电中性的，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型半导体画成如图1.9(b)所示的简化形式，它的空穴和负离子总是成对地出现。当然，在某些场合还需要考虑P型半导体受热激发而产生的少子的影响。

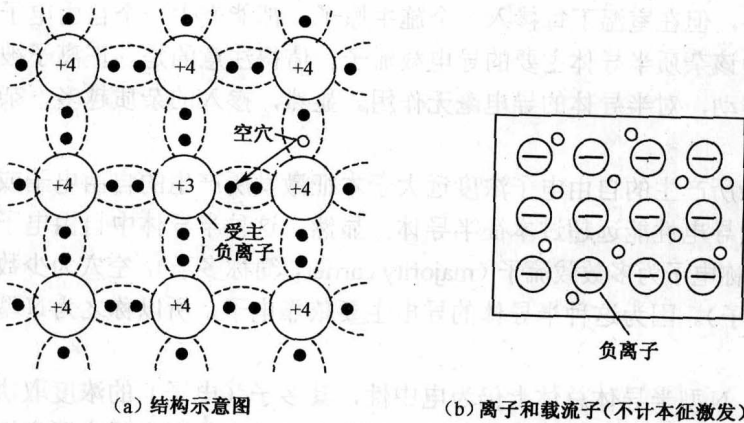


图 1.9 P 型半导体

关于掺杂的概念，在这里还可以有一些引申。如果半导体中的同一区域既有施主杂质，又有受主杂质，则其导电类型（N型还是P型）取决于浓度大的杂质。因此，N型半导体中若掺入浓度更大的受主杂质，则将变为P型半导体，反之亦然。这种因杂质的相互作用而改变半导体类型的过程，称为杂质补偿，它在半导体器件的制造中得到了广泛应用。

2. 二极管的单向导电性

二极管最基本的特性就是单向导电性。由于二极管的组成核心为PN结（两种半导体结合处所形成的区域），为了从原理上说明二极管为什么具有单向导电性，必须先从PN结的形成及其导电机理开始讨论。

(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（diffusion moving），如图1.10(a)所示。由于电子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（space charge layer），这就是所谓的PN结，如图1.10(b)所示。由于空间电荷区内的多数载流子已扩散到对方区域并被复合掉，或者说耗尽了，因此空间电荷区又称耗尽层或耗尽区，它的电阻率很高。