

# 电子电路原理

(原书第7版)

[美] Albert Malvino 著  
David J. Bates

李冬梅 幸新鹏 李国林 等译

*Electronic Principles*  
*Seventh Edition*

Electronic  
Principles

Seventh Edition

Albert Malvino  
David J. Bates



机械工业出版社  
China Machine Press

国外电子与

# 电子电路原理

(原书第7版)

[美] Albert Malvino 著  
David J. Bates

李冬梅 幸新鹏 李国林 等译

*Electronic Principles*  
*Seventh Edition*

**Electronic  
Principles**

Seventh Edition

Albert Malvino  
David J. Bates



机械工业出版社  
China Machine Press

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电子电路原理 (原书第 7 版) / (美) 马尔维诺 (Malvino, A.), (美) 贝茨 (Bates, D. J.) 著; 李冬梅等译. —北京: 机械工业出版社, 2014.7

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Electronic Principles, Seventh Edition

ISBN 978-7-111-46693-2

I. 电… II. ①马… ②贝… ③李… III. 电子电路—电路理论 IV. TN710.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 097840 号

本书版权登记号: 图字: 01-2007-2447

Albert Malvino, David J. Bates: Electronic Principles, Seventh Edition (0-07-322277-1).  
Copyright © 2007 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and China Machine Press. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2014 by The McGraw-Hill Education and China Machine Press.

版权所有。未经出版人事先书面许可, 对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播, 包括但不限于复印、录制、录音, 或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和机械工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)销售。

版权 © 2014 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与机械工业出版社所有。

本书封面贴有 McGraw-Hill Education 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

本书介绍电子电路和器件的基本概念、原理及分析方法。内容从半导体器件到功能电路, 从电路结构到故障诊断, 从理论分析到实际应用。半导体器件包括: 二极管、双极型晶体管、结型场效应管、MOS 场效应管、晶闸管; 放大器包括: 单管放大器、差分放大器、功率放大器和运算放大器; 功能电路包括: 运算放大器的线性和非线性应用、有源滤波器、振荡器和稳压电源。同时包括器件模型、偏置电路、频率特性和负反馈。

本书可作为高等院校信息领域本科生和研究生的教材或参考书, 也可以供相关专业技术人员自学和参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 曲 熠

责任校对: 殷 虹

印 刷: 冀城市京瑞印刷有限公司

版 次: 2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm × 260mm 1/16

印 张: 46.5

书 号: ISBN 978-7-111-46693-2

定 价: 125.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

## 出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Mark I. Montrose、David A. Johns、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Dikshitulu K. Kalluri、Bhag Singh Guru、Stephane Mallat 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：[www.hzbook.com](http://www.hzbook.com)

电子邮件：[hzsj@hzbook.com](mailto:hzsj@hzbook.com)

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

## 译者序

电子电路作为信息技术的重要基础，是相关领域的科研与技术人员的必修内容。随着电路技术的飞速发展，其应用日益广泛，读者对能够反映现代电路技术内容的专业基础教材的需求也越来越迫切。《电子电路原理》是经多次修订的经典教材，既注重基础知识，又兼顾工业界的应用及仿真技术；既可供教师和学生作为教材使用，也可供相关领域的技术人员学习参考。

本书从半导体器件的基础知识入手，系统地介绍了电子电路的基本概念、构成原理、分析方法、实际器件和应用电路，结构严谨、叙述清晰、内容丰富。作为经典教材，本书具有鲜明的特色：每一章的开始部分都有概要、目标和关键术语，章后有总结和习题，便于课堂讲授和学生自学；注重与实践相结合，配有大量 MultiSim 仿真实例，并以对实际电路的故障诊断方法和练习贯穿全书；适当给出了相关概念的拓展知识，同时针对常用器件数据手册中的实际特性进行分析，并附有工作面试题目，颇具实用性。

本书的内容比较全面，在使用过程中可根据实际需求有所取舍和侧重。

第 1 章给出了分析方法、定理等基本概念，是学习本书的基础。本章对三种公式（定义、定律、推理）进行了界定；定义了电路分析中所采用的近似方法和条件；基本概念（电压源和电流源）和定理（戴维南定理和诺顿定理）是电子电路分析的初步知识，对于入门读者来说是非常重要的。本章还介绍了电路故障产生的原因和诊断方法，这是本书的特色之一。电路故障虽然在实际中很常见，但现有教材中涉及这部分内容的却不多见。

第 2 章介绍的是半导体的基础知识。半导体的物理结构和特性决定了电子元器件以及电子电路乃至电路系统的特性。理解这部分内容是后续学习的前提。第 3~6 章介绍了电子电路的基本元器件（二极管和双极型晶体管）的原理和特性。第 3 章和第 6 章分别介绍二极管和晶体管的结构、工作原理、器件特性和近似模型；同时给出了器件数据手册，有助于读者对器件参数的理解。第 4 章给出了二极管的应用电路；第 5 章介绍了特殊用途二极管，类型比较全面。

第 7~9 章介绍了晶体管电路分析方法的核心概念。第 7 章给出了负载线、工作点、图解法、器件饱和、截止、偏置等概念，同时介绍了 LED 和光耦合器件，描述了微变参数对电路特性的影响及故障诊断的几种方法。第 8 章重点介绍晶体管的几种偏置电路的形式、分析方法及故障诊断方法。第 9 章给出了放大器的小信号分析概念、器件交流模型、交直流等效电路等放大电路分析的基础知识。

第 10~12 章集中介绍双极型晶体管放大器的特性及分析方法。第 10 章以共发射极（CE）放大器为例，介绍了电压增益、负载效应、多级放大器的特性和分析方法。第 11 章介绍共集电极（CC）、共基极（CB）放大器的特性分析。第 12 章介绍了 A 类、B 类、AB 类及 C 类功率放大器的特性。

第 13~15 章分别介绍结型场效应管、MOS 场效应管和晶闸管。其中 MOS 场效应管是集成电路的主流器件，其工作原理、特性及分析方法都比较重要。

第 16 章是频率特性的分析。还介绍了放大电路频率特性的基本概念和分析方法，包括波特图、电压增益及功率增益的分贝表示方法与意义、阻抗匹配、密勒效应、时域与频域特性的关系、双极型和场效应晶体管电路的频率特性分析等。

第 17~18 章分别介绍差分放大器和运算放大器。第 17 章的差分放大电路是构成集成运算放大器的基本单元，对其结构和特性的分析和理解是非常重要的。对差分放大器的分析包括直流分析、交流分析、输

入特性及共模特性。同时对集成电路和电流源的基本概念进行了简要介绍。第 18 章以集成运放 741 为例介绍了运算放大器的组成、特性分析、指标参数的意义等。还介绍了同相和反相负反馈放大器的特性及分析方法、分析了运放在加法器和电压跟随器电路中的典型应用。最后给出了几种常见集成运放的参数比较及应用,包括音视频放大器和射频放大器等。

第 19 章介绍了负反馈的基本概念、负反馈放大电路的四种类型及特性分析。负反馈是提高放大电路特性的重要形式,是运算放大器线性应用的前提条件。负反馈的电路形式、分析方法及对电路特性的影响都需要读者很好地掌握。

第 20~22 章是运算放大器的三种主要应用即线性运算电路、有源滤波器和非线性电路。第 20 章给出了运算放大器在实际中较常用的典型线性应用电路,包括同相/反相放大、仪表放大、差分放大、加法、减法、电流放大、压控电流源、自动增益控制等。第 21 章介绍五种基本滤波器(低通、高通、带通、带阻、全通)的概念及滤波器特性的五种逼近方式(巴特沃斯、切比雪夫、反切比雪夫、椭圆和贝塞尔)和特点分析,并介绍了一阶、二阶和高阶滤波器的典型电路和特性。第 22 章非线性运算放大器电路主要包括比较器、积分器/微分器、波形变换器、波形发生器和 D 类放大器。这三章内容非常丰富,在使用时可根据学时情况有所侧重,具有较大的选择空间。第 23 和 24 章分别介绍振荡器和稳压电源,这两部分都是电子电路中的重要功能电路。第 23 章介绍了正弦波振荡器和锁相环的基本概念,给出几种基本振荡器电路(文氏电桥、RC 振荡器、考毕兹振荡器、LC 振荡器及晶体振荡器),作为实用电路的 555 定时器及其电路是非常实用的。第 24 章介绍了稳压电源的基本类型(并联式、串联式、开关式),并给出 DC-DC 转换器的原理和实例。

作为教材,建议全书 120~180 学时,可分解为 2~3 门课程分阶段完成,也可侧重其中基础原理部分作为入门课程,或侧重其中分析应用部分作为专业课程。书中的电路(或器件)类型和应用电路不必全部讲授学习,可选典型部分作为重点,其余部分作为参考。

本书由李冬梅组织翻译并完成审校和统稿。参加翻译工作的人员有:李冬梅、辛新鹏、李国林、刘力源、郭静宜、劳森、王鑫、井光超、师峰、朱育飞、孙超、倪铭辰、邹涌、古松、刘中、乔峻石、朱颖佳、负磊、陈润、祁楠、杨东、陈昊、李鹏。机械工业出版社华章公司的编辑对本书的翻译出版给予了大力支持,在此一并表示感谢。

鉴于译者水平有限,译文中的错误与疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

译者

2014 年 5 月于清华园

# 前 言

《电子电路原理》第7版继承了之前版本的主要内容，对半导体器件和电子电路进行了清晰且深入的讲解。本书适于初次学习线性电子课程的学生使用，预备知识为直流/交流电路课程、代数和部分三角函数的内容。

本书详细介绍了半导体器件特性、测试及其应用电路，为学生理解电子系统的工作原理和故障诊断打下了良好的基础。其中，电路实例和故障诊断练习将贯穿全书。

## 新增内容

基于广泛的反馈意见和课程研究，《电子电路原理》第7版增加了电子器件和电路的种类，包括：

- 对 *pn*p 晶体管的分析
- 基本双极型晶体管 (BJT) 分压电路设计
- BJT 功率放大器交流负载线的分析
- 增强型和耗尽型功率场效应晶体管 (MOSFET) 的偏置
- 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)
- R/2R 阶梯 D/A 转换器
- 函数发生器集成电路
- D 类放大器

第1章对故障诊断部分进行了简化，易于学生的使用和理解，相关练习将贯穿其他章节。第2章增加了总结性表格，可用来强化概念并作为便捷的信息资源。从第3章起，将给出该章所讨论的特定半导体器件的数据手册。第4~6章增加了利用万用表、电压表及半导体特性图示仪对二极管和晶体管进行测试的内容。第10章保留了共发射极 (CE) 放大器。第11章重点介绍共集电极 (CC) 放大器 (射极跟随器)、共基极 (CB) 放大器和达林顿放大器的结构。第12章包括 A 类、B 类、AB 类和 C 类功率放大器，同时分析了交流负载线。第13章对结型场效应晶体管 (JFET) 的偏置和偏置技术的顺序做了改动。第14章增加了耗尽型、功率增强型 MOSFET 放大器和 MOSFET 的测试。第15章详细介绍了 RC 相移控制、SCR 测试以及绝缘栅双极晶体管 (IGBT)。第16章增加了对场效应晶体管电路的频率特性分析。第20章包含了 R/2R 阶梯 D/A 转换器电路的工作原理。第22章包含了 D 类放大器的基本原理。第23章还增加了函数发生器集成电路部分，其中包括对 XR-2206 芯片的分析。

本书拥有许多新的特色，它们贯穿于各个章节，包括：

## 章节概要

每章开篇的简短介绍提炼了该章将讲授的主要内容。

## 章节目标

该章预期学习成果的简要说明。

## 关键术语

该章中出现的关键词汇列表，这些关键词首次出现时采用**黑体标记**。

## 例题

每章都包括例题和解答，这些例子阐明了重要的概念或电路原理，题目类型包括电路分析、应用、故障诊断和初级设计。

## 自测题

通过完成例题后面紧接着的自测题，读者可以检测所学知识的掌握情况。这些自测题的答案放在每章的最后。

## 知识拓展

穿插在文中的拓展内容，是关于当前问题的一些有趣的附加知识。

## MULTISIM

每章中带有 MultiSim标记的电路可以“运行”起来<sup>⊖</sup>，结合现有的 Tektronix 和 Agilent 电路仿真工具，读者可以改变电路参数的值，并立即看到结果。还可以通过在电路中加入故障并进行测量分析的方法来训练并掌握故障诊断的技巧。

## 数据手册

书中提供了很多半导体器件的完整或部分数据手册，并对关键参数进行测试和解释。这些器件的完整数据手册可以在互联网上找到。

---

⊖ 登录华章网站 [www.hzbook.com](http://www.hzbook.com) 搜索本书可下载 MultiSim 电路仿真文件。还可访问本书学习中心网站 [www.mhhe.com/malvino7e](http://www.mhhe.com/malvino7e) 获取更多学习资源。——编辑注

## 元器件照片

实际电子元器件的照片可以使读者对所学元器件有感性认识。

## 总结性表格

对知识要点的总结表，可用来回顾重要内容并作为便捷的信息资源。

## 元器件测试

可以在这里找到如何用普通仪器（如数字万用表）对独立电子元器件进行测试的清晰描述。

## 章节总结

这些总结可以用来帮助读者复习所学内容，或查找学习中是否存在遗漏的重要概念。其中也包括重要的电路推导和定义，以巩固所学知识。

## 故障诊断表

故障诊断表清晰地列出了每种电路故障对应的电路节点的测试结果。读者可以结合 MultiSim 学习故障诊断的技巧。

## 章后习题

每章的后面都有大量的习题，其中 30% 以上是这一版新增或修订的习题。这些习题包括电路分析、故障诊断、关键问题的思考以及求职面试的相关问题。

## 致 谢

《电子电路原理》第7版的出版是团队合作的结果，它凝聚了很多人的艰辛努力和付出。感谢 McGraw-Hill 出版社高教部门为本书付出努力的每一个人，尤其是 Tom Casson、Jonathan Plant、Lindsay Roth、Kay Brimeyer 和 Carol Kromminga。特别要感谢 Pat Hoppe 认真且富有见解的复审，以及对 Multi-Sim 文件所做的大量工作，这些贡献对本书具有非常重要的意义。

感谢每一位对本书提出有价值的意见和建议的人。包括那些在初稿修改之前花费时间回复调查问卷的人，以及那些对修改后的材料进行审校的人。他们的工作非常仔细，对本书十分有益。下面是具体的人员名单，正是由于他们的帮助才使得本书具有易读性和连贯性。

### 目前版本的审校人员名单

**Ron Barrier**  
*Rowan Cabarrus Community  
College, NC*

**Adrien Berthiaume**  
*Northern Essex Community College,  
MA*

**M. C. Greenfield**  
*Indiana State University, IN*

**Craig Hill**  
*Erie Institute of Technology, PA*

**Patrick Hoppe**  
*Gateway Technical College, WI*

**Paul Kiser**  
*National Institute of Technology, WV*

**Dan Lookadoo**  
*New River Community College, VA*

**William Murray**  
*Broome Community College, NY*

**Rina Mazzucco**  
*Mesa Community College, AZ*

**Rajappa Papannareddy**  
*Purdue University, IN*

**Ken White**  
*Lakeland Community College, OH*

### 调查问卷的答复人员名单

**Ben Bartlett**  
*College of Southern Idaho, ID*

**Michele J. Chance**  
*Rowan-Cabarrus Community  
College, NC*

**Walter O. Craig, III**  
*Southern University, LA*

**Sheila Donchoo**  
*Southern Polytechnic State  
University, GA*

**James A. Duru**  
*Essex County College, NJ*

**William Eaton**  
*Hinds Community College, MS*

**Udezei F. Edgal**  
*North Carolina A&T State  
University, NC*

**Glen Elliott**  
*Cambria County Area Community  
College, PA*

**Fred Etcheverry**  
*Hartnell College, CA*

**Jim Fiore**  
*Mohawk Valley Community  
College, NY*

**Rex Fisher**  
*Brigham Young University, ID*

**John E. Fitzen**  
*Idaho State University, ID*

**George Fredericks**  
*Northeast State Technical Community  
College, TN*

**G. J. Gerard**  
*Gateway Community Technical  
College, CT*

**Albert Gerth**  
*Corning Community College, NY*

**Melvin G. Gomez**  
*Green River Community  
College, WA*

**James Henderson**  
*Arkansas State University, AR*

**George Hendricks**  
*Gaston College, NC*

**Larry Hoffman**  
*Purdue University, IN*

**David A. Kruse**  
*Lane Community College, OR*

**Daniel Landiss**  
*St. Louis Community College, MO*

**M. David Luneau, Jr.**  
*University of Arkansas, AR*

**Richard McKinney**  
*Nashville State Technical Community  
College, TN*

**Paul Nelson**  
*College of the Sequoias, CA*

**Robert Peeler**  
*Lamar State College, TX*

**Nasser H. Rashidi**  
*Virginia State University, VA*

**Steven D. Rice**  
*University of Montana, MT*

**Robert J. Scoff**  
*University of Memphis, TN*

**Ron Tinckham**  
*Santa Fe Community College, FL*

**Anthony Webb**  
*Missouri Tech, MO*

**Harold Wiebe**  
*Northern Kentucky University, KY*

**Michael Wilson**  
*Kansas State University, KS*

初稿的审校人员名单

**Abraham Falsafi**  
*National Institute of Technology, WV*

**Mohamed Haj-Mohamadi**  
*North Carolina A&T University, NC*

**Patrick Hoppe**  
*Gateway Technical College, WI*

**John Lindsey**  
*Kansas Community and Technical  
College System, KS*

**Jim Ramming**  
*Vatterott College, MO*

**Vince Vasco**  
*Pittsburgh Technical Institute, PA*

## 作者简介

**Albert P. Malvino** 1950~1954 年在美国海军任电子技术员。1959 年毕业于圣克拉拉大学，获得电气工程学士学位。接下来的五年，他在微波实验室和惠普公司任电子工程师，并于 1964 年获得圣何塞州立大学电气工程硕士学位。之后，他在山麓学院任教四年，于 1968 年获得国家科学基金会奖学金。在 1970 年获得斯坦福大学的电气工程博士学位以后，Malvino 便开始了全职写作生涯。他编著的 10 本教材被翻译成 20 种语言，拥有超过 108 个版本。Malvino 博士目前是一名顾问，并为“SPD-Smart™ windows”设计微控制电路。另外，他正在为电子技术人员和工程师编写教育软件。他还在 Research Frontiers 公司的理事会任职。Malvino 的个人网页为 [www.malvino.com](http://www.malvino.com)。

**David J. Bates** 西威斯康星技术学院（位于拉克罗斯）电子技术系教师。作为电子维护和电子工程技术人员，他拥有 25 年以上的教学经验。Bates 曾获得工业教育专业学士学位和职业/技术教育专业硕士学位。他拥有 FCC GROL 证书、计算机硬件技术人员 A+ 证书，以及由国际电子技师认证协会 (ISCET) 授予的电子技术员熟练等级证书。Bates 目前是 ISCET 的资质管理员、理事会成员，并且任美国国家联合电子教育 (NCEE) 基础电子学的学科专家 (SME)。David J. Bates 还与 Zbar、Rockmaker、Bates 合著了“基础电学”实验指南。

# 推荐阅读



## 电路基础（英文版·第5版）

作者：（美）Charles K. Alexander 等 于歆杰 注释 ISBN: 978-7-111-41184-0 定价: 129.00元

本书是电类各专业“电路”课程的一本经典教材，被美国众多名校采用，是美国最有影响力的“电路”课程教材之一。本书每章开始增加了中文“导读”，适合用做高校“电路”课程双语授课或英文授课的教材。本书前4版获得了极大的成功，第5版以更清晰、更容易理解的方式阐述了电路的基础知识和电路分析方法，并反映了电路领域的最新技术进展。全书总共包括2447道例题和各类习题，并在书后给出了部分习题答案。

## 交直流电路基础：系统方法

作者：（美）Thomas L. Floyd 译者：殷瑞祥 等 ISBN: 978-7-111-45360-4 定价: 99.00元

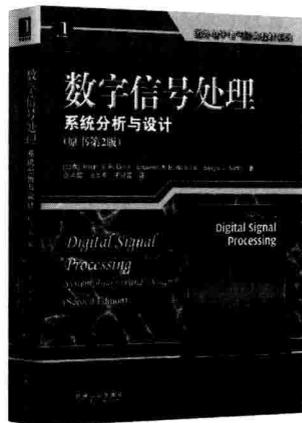
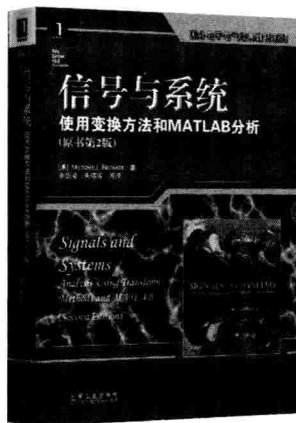
本书是知名作者Floyd的最新力作，在国外被广泛使用。本书系统介绍了直流和交流电路理论，强调直流/交流电路基本概念在实际系统中的应用。全书丰富的实例，有助于学生的理解系统模块、接口和输入/输出信号之间的关系。书中实例使用Multisim进行仿真，并提出在模拟电路与系统和排除故障中存在的问题及解决方法。本书可作为电子信息、电气工程、自动化等电类专业的电路课程教材。

## 应用电路分析（英文版）

作者：（美）Matthew N. O. Sadiku 等 ISBN: 978-7-111-41781-1 定价: 89.00元  
中文版 预计出版时间: 2014年8月

本书可作为高等院校电类专业“电路分析”双语课的教材，以更清晰、生动、易于理解的方式来阐述电路分析的方法。全书分为两部分，第一部分包括第1~10章，主要介绍直流电路；第二部分包括第11~19章，主要介绍交流电路。本书可以作为大学两学期或三学期的教材，授课教师也可选择适当的章节，将其用作一学期课程的教材。

# 推荐阅读



## 模拟电子电路基础

作者：堵国樑 吴建辉等 ISBN: 978-7-111-45504-2 出版时间：2014年1月 定价：45.00元

本书是在多年教学改革的基础上编写而成的，其基本原则为“以电路分析为主线，以设计应用为目的”。编写思路采用了从宏观到微观，从对集成器件外特性的了解、应用，引导到对内电路研究学习的兴趣；以单元电路的分析为铺垫，强调电子系统设计的思路；以工程教育理念为导向，理论联系实际，教材内容落实到具体的工程项目应用中。本书主要从应用角度介绍器件、集成电路以及电子电路的基本概念、基本原理、性质与特点，通过电子电路具体分析方法的介绍，培养电子电路的设计能力。本书共分11章，内容包括：绪论，运算放大器及其线性应用，运算放大器的非线性应用，半导体器件概述，基本放大电路，负反馈放大电路，集成运算放大器，正弦波产生电路，功率电路，应用电路设计分析，门电路。

## 信号与系统：使用变换方法和MATLAB分析（原书第2版）

作者：(美) M. J. Roberts 译者：胡剑凌等 ISBN: 978-7-111-42188-7 出版时间：2013年6月 定价：89.00元

信号与系统课程是数字信号处理和控制理论等课程的基础课程，本书以主要涵盖傅里叶变换、傅里变换分析、拉普拉斯变换、拉普拉斯变换分析、离散时间系统的 $z$ 变换、 $z$ 变换分析等。书中给出了大量的例子，并介绍实现分析方法的MATLAB函数和运算。可作为电子信息类相关专业的本科生教材。

## 数字信号处理：系统分析与设计（原书第2版）

作者：(巴西) Paulo S. R. Diniz等 译者：张太镒等 ISBN: 978-7-111-41475-9 出版时间：2013年4月 定价：85.00元

本书全面、系统地阐述了数字信号处理的基本理论和分析方法，详细介绍了离散时间信号及系统、傅里叶变换、 $z$ 变换、小波分析和数字滤波器设计的确定性数字信号处理，以及多重速率数字信号处理系统、线性预测、时频分析和谱估计等随机数字信号处理，使读者深刻理解数字信号处理的理论和设计方法。本书不仅可以作为高等院校电子、通信、电气工程与自动化、机械电子工程和机电一体化等专业本科生或研究生教材，还可作为工程技术人员DSP设计方面的参考书。

# 目 录

出版者的话		2.15 反偏二极管	34
译者序		总结	35
前言		习题	38
导读			
致谢		<b>第3章 二极管原理</b>	40
作者简介		3.1 基本概念	40
		3.2 理想二极管	43
<b>第1章 绪论</b>	1	3.3 二阶近似	44
1.1 三种类型的公式	1	3.4 三阶近似	45
1.2 近似	3	3.5 故障诊断	47
1.3 电压源	4	3.6 电路的参量增减分析	48
1.4 电流源	6	3.7 阅读数据手册	49
1.5 戴维南定理	8	3.8 计算体电阻	52
1.6 诺顿定理	10	3.9 二极管的直流电阻	53
1.7 故障诊断	13	3.10 负载线	53
总结	14	3.11 表面贴装二极管	55
习题	16	总结	55
		习题	57
<b>第2章 半导体</b>	19	<b>第4章 二极管电路</b>	60
2.1 导体	19	4.1 半波整流器	60
2.2 半导体	20	4.2 变压器	64
2.3 硅晶体	21	4.3 全波整流器	65
2.4 本征半导体	23	4.4 桥式整流器	68
2.5 两种电流	24	4.5 扼流圈输入滤波器	70
2.6 半导体的掺杂	24	4.6 电容输入滤波器	72
2.7 两种非本征半导体	25	4.7 峰值反向电压和浪涌电流	77
2.8 无偏置的二极管	26	4.8 关于电源的其他知识	78
2.9 正向偏置	27	4.9 故障诊断	81
2.10 反向偏置	27	4.10 削波器和限幅器	83
2.11 击穿	29	4.11 钳位器	86
2.12 能级	30	4.12 电压倍增器	88
2.13 能垒	31	总结	90
2.14 势垒与温度	33	习题	93

<b>第 5 章 特殊用途二极管</b> .....	97	总结 .....	177
5.1 齐纳二极管 .....	97	习题 .....	180
5.2 带负载的齐纳稳压器 .....	100		
5.3 齐纳二极管的二阶近似 .....	103	<b>第 8 章 晶体管偏置</b> .....	184
5.4 齐纳失效点 .....	106	8.1 分压器偏置 .....	184
5.5 阅读数据手册 .....	107	8.2 VDB 电路的精确分析 .....	187
5.6 故障诊断 .....	110	8.3 VDB 电路的负载线与 Q 点 .....	188
5.7 负载线 .....	112	8.4 双电源发射极偏置 .....	191
5.8 光电器件 .....	113	8.5 其他类型的偏置 .....	194
5.9 肖特基二极管 .....	117	8.6 故障诊断 .....	195
5.10 变容二极管 .....	120	8.7 <i>pnp</i> 型晶体管 .....	196
5.11 其他类型二极管 .....	122	总结 .....	198
总结 .....	125	习题 .....	201
习题 .....	128	<b>第 9 章 交流模型</b> .....	205
<b>第 6 章 双极型晶体管</b> .....	131	9.1 基极偏置放大器 .....	205
6.1 无偏置的晶体管 .....	131	9.2 发射极偏置放大器 .....	209
6.2 有偏置的晶体管 .....	132	9.3 小信号工作 .....	211
6.3 晶体管电流 .....	134	9.4 交流电流增益 .....	213
6.4 共发射极组态 .....	135	9.5 发射结交流电阻 .....	213
6.5 基极特性 .....	137	9.6 两种晶体管模型 .....	216
6.6 集电极特性 .....	137	9.7 放大器的分析 .....	217
6.7 晶体管的近似 .....	141	9.8 数据手册中的交流参量 .....	220
6.8 阅读数据手册 .....	144	总结 .....	223
6.9 表面贴装晶体管 .....	148	习题 .....	225
6.10 故障诊断 .....	149	<b>第 10 章 电压放大器</b> .....	228
总结 .....	151	10.1 电压增益 .....	228
习题 .....	153	10.2 输入电阻的负载效应 .....	231
<b>第 7 章 晶体管基础</b> .....	156	10.3 多级放大器 .....	233
7.1 电流增益的变化 .....	156	10.4 发射极负反馈放大器 .....	235
7.2 负载线 .....	157	10.5 两级反馈 .....	239
7.3 工作点 .....	161	10.6 故障诊断 .....	241
7.4 饱和的识别 .....	163	总结 .....	242
7.5 晶体管开关 .....	165	习题 .....	244
7.6 发射极偏置 .....	166	<b>第 11 章 共集和共基放大器</b> .....	247
7.7 LED 驱动 .....	169	11.1 CC 放大器 .....	247
7.8 微变参数的影响 .....	171	11.2 输出阻抗 .....	251
7.9 故障诊断 .....	172	11.3 CE-CB 级联放大器 .....	253
7.10 光电器件 .....	174		

11.4	达林顿组合	254	14.5	电阻区	348
11.5	稳压应用	256	14.6	数字开关	353
11.6	CB放大器	258	14.7	互补MOS管	355
总结		262	14.8	功率场效应晶体管	357
习题		264	14.9	增强型MOS场效应晶体管 放大器	361
<b>第12章</b>	<b>功率放大器</b>	269	14.10	MOS场效应晶体管的 测试	364
12.1	放大器相关术语	269	总结		365
12.2	两种负载线	271	习题		367
12.3	A类工作	275	<b>第15章</b>	<b>晶闸管</b>	371
12.4	B类工作	280	15.1	四层二极管	371
12.5	B类推挽射极跟随器	281	15.2	可控硅整流器	375
12.6	B/AB类放大器的偏置	284	15.3	可控硅短路器	382
12.7	B/AB类放大器的驱动	286	15.4	可控硅整流器相位控制	384
12.8	C类工作	288	15.5	双向晶闸管	386
12.9	C类放大器的公式	290	15.6	绝缘栅双极型晶体管	391
12.10	晶体管额定功率	295	15.7	其他晶闸管	394
总结		297	15.8	故障诊断	396
习题		301	总结		396
<b>第13章</b>	<b>结型场效应晶体管</b>	305	习题		398
13.1	基本概念	305	<b>第16章</b>	<b>频率特性</b>	402
13.2	漏极特性曲线	307	16.1	放大器的频率响应	402
13.3	跨导特性曲线	309	16.2	功率增益的分贝值	406
13.4	电阻区的偏置	310	16.3	电压增益的分贝值	408
13.5	有源区的偏置	312	16.4	阻抗匹配	410
13.6	跨导	320	16.5	基准分贝值	412
13.7	JFET放大器	321	16.6	波特图	413
13.8	JFET模拟开关	324	16.7	波特图相关问题	415
13.9	JFET的其他应用	326	16.8	密勒效应	419
13.10	阅读数据手册	332	16.9	上升时间与带宽的关系	421
13.11	JFET的测试	334	16.10	双极型晶体管级电路的频率 特性分析	423
总结		335	16.11	场效应晶体管级电路的频率 特性分析	428
习题		338	16.12	表面贴装电路的频率效应	432
<b>第14章</b>	<b>MOS场效应晶体管</b>	343	总结		432
14.1	耗尽型MOS场效应晶体管	343	习题		435
14.2	耗尽型MOS场效应晶体管 特性曲线	344			
14.3	耗尽型MOS场效应晶体管 放大器	345			
14.4	增强型MOS场效应晶体管	346			

<b>第 17 章 差分放大器</b> .....	438	20.6 加法放大器电路 .....	535
17.1 差分放大器 .....	438	20.7 电流增强电路 .....	539
17.2 差分放大器的直流分析 .....	441	20.8 压控电流源 .....	541
17.3 差分放大器的交流分析 .....	444	20.9 自动增益控制 .....	543
17.4 运算放大器的输入特性 .....	448	20.10 单电源工作方式 .....	545
17.5 共模增益 .....	453	总结 .....	546
17.6 集成电路 .....	455	习题 .....	548
17.7 电流镜 .....	458	<b>第 21 章 有源滤波器</b> .....	553
17.8 有载差分放大器 .....	459	21.1 理想频率响应 .....	554
总结 .....	460	21.2 频率响应的逼近方式 .....	556
习题 .....	463	21.3 无源滤波器 .....	564
<b>第 18 章 运算放大器</b> .....	467	21.4 一阶滤波器 .....	567
18.1 运算放大器概述 .....	467	21.5 VCVS 单位增益二阶低通 滤波器 .....	569
18.2 741 运算放大器 .....	469	21.6 高阶滤波器 .....	573
18.3 反相放大器 .....	476	21.7 VCVS 等值元件低通 滤波器 .....	575
18.4 同相放大器 .....	480	21.8 VCVS 高通滤波器 .....	577
18.5 运算放大器的两种应用 .....	484	21.9 多路反馈带通滤波器 .....	578
18.6 线性集成电路 .....	487	21.10 带阻滤波器 .....	581
18.7 表面贴装的运算放大器 .....	491	21.11 全通滤波器 .....	582
总结 .....	492	21.12 双二阶滤波器和可变状态 滤波器 .....	585
习题 .....	495	总结 .....	587
<b>第 19 章 负反馈</b> .....	499	习题 .....	590
19.1 负反馈的四种类型 .....	499	<b>第 22 章 非线性运算放大器   电路</b> .....	593
19.2 VCVS 电压增益 .....	501	22.1 过零比较器 .....	593
19.3 其他 VCVS 公式 .....	503	22.2 非过零比较器 .....	598
19.4 ICVS 放大器 .....	506	22.3 迟滞比较器 .....	601
19.5 VCIS 放大器 .....	507	22.4 窗口比较器 .....	604
19.6 ICIS 放大器 .....	508	22.5 积分器 .....	606
19.7 频带宽度 .....	509	22.6 波形变换 .....	608
总结 .....	512	22.7 波形发生器 .....	610
习题 .....	515	22.8 典型的三角波发生器 .....	612
<b>第 20 章 线性运算放大器电路</b> .....	519	22.9 有源二极管电路 .....	613
20.1 反相放大器电路 .....	519	22.10 微分器 .....	615
20.2 同相放大器电路 .....	521		
20.3 反相/同相电路 .....	524		
20.4 差分放大器 .....	528		
20.5 仪表放大器 .....	532		

22.11 D类放大器 .....	616	总结 .....	657
总结 .....	618	习题 .....	660
习题 .....	620		
<b>第 23 章 振荡器</b> .....	624	<b>第 24 章 稳压电源</b> .....	663
23.1 正弦波振荡原理 .....	625	24.1 电源特性 .....	663
23.2 文氏电桥振荡器 .....	626	24.2 并联式稳压器 .....	665
23.3 其他 RC 振荡器 .....	629	24.3 串联式稳压器 .....	670
23.4 考毕兹振荡器 .....	630	24.4 单片线性稳压器 .....	677
23.5 其他 LC 振荡器 .....	635	24.5 电流增强电路 .....	683
23.6 石英晶体 .....	636	24.6 DC-DC 转换器 .....	684
23.7 555 定时器 .....	640	24.7 开关式稳压器 .....	685
23.8 555 定时器的非稳态工作 模式 .....	644	总结 .....	692
23.9 555 电路 .....	646	习题 .....	695
23.10 锁相环 .....	650	<b>词汇表</b> .....	700
23.11 函数发生器集成电路 .....	653	<b>答案 (奇数编号的习题)</b> .....	720

# 第1章

## 绪论

本章主要内容包括公式、电压源、电流源、两个电路定理和故障诊断。虽然有些内容是对旧知识的复习，但是可以从中产生新的认识，有助于对半导体器件的理解，同时也是本书其他章节的框架。

### 目标

在学习完本章后，你应该能够：

- 区分三种公式，并能解释每种公式成立的原因；
- 解释为什么常常采用近似的估算方法而不用精确的公式计算；
- 说出理想电压源和理想电流源的定义；
- 描述识别准理想电压源和准理想电流源的方法；
- 阐述戴维南定理并能把它应用到实际电路中；
- 阐述诺顿定理并能把它应用到实际电路中；
- 举出两个开路器件和两个短路器件的例子。

### 关键术语

虚焊点 (cold-solder joint)	开路器件 (open device)
定义 (definition)	二阶近似 (second approximation)
推论 (derivation)	短路器件 (shorted device)
对偶原理 (duality principle)	焊锡桥 (solder bridge)
公式 (formula)	定理 (theorem)
理想化 (一阶) 近似 (ideal (first) approximation)	戴维南电阻 (Thevenin resistance)
定律 (law)	戴维南电压 (Thevenin voltage)
诺顿电流 (Norton current)	三阶近似 (third approximation)
诺顿电阻 (Norton resistance)	故障诊断 (troubleshooting)

## 1.1 三种类型的公式

公式是将不同参量联系起来的一种规则。这个规则可能是等式、不等式或者其他数学表述。在本书中将会出现许多公式，只有知道了每个公式成立的原因，才能更好地理解它。公式的类型只有三种，懂得了这三种公式的意义，在电子学的学习中就会更有条理并获得更满意的效果。

**知识拓展** 从实用角度出发，公式有点像一个用简略的数学方式写成的指令集。公式表述了如何对一个特定量或参量进行计算。

### 1.1.1 定义

在学习电学或者电子学的时候，需要记住诸如电流、电压和电阻等一些新词汇。然

而，仅对这些词汇做字面上的解释是不够的，还须在数学角度上和其他人的理解相一致，而达成这种一致性的唯一方式就是通过**定义**。所谓定义，就是为阐述一个新概念而创造的公式。

下面是一个定义的例子。电容等于一个平板上的电量除以加在两个平板间的电压。对应公式为：

$$C = \frac{Q}{V}$$

这个公式就是一个定义，它说明了电容  $C$  是什么，以及如何计算它。这是以前的研究者给出的定义，现在已被广泛接受。

下面给出一个创造新定义的例子。假设我们在进行阅读技巧方面的研究，并需要一种方式来衡量阅读速度。为此，我们想到定义阅读速度为一分钟内阅读单词的数量。如果单词的数量是  $W$ ，所用的时间是  $M$  分钟，可以建立如下公式：

$$S = \frac{W}{M}$$

在该式中， $S$  是用每分钟所阅读的单词数来衡量的阅读速度。

可以使用希腊字母： $\omega$  代表单词数， $\mu$  代表分钟数， $\sigma$  代表阅读速度。该定义描述如下：

$$\sigma = \frac{\omega}{\mu}$$

这个等式表述的仍然是阅读速度等于单词数量除以阅读时间。当这个公式再次出现时，读者就会知道这是一个定义。

总而言之，定义是研究人员创造的公式。基于科学的观察和研究，这些定义构成了电子学的基础。定义是可以接受的事实，这在科学界已成为惯例。一个定义的正确性犹如一个单词的正确性，每个定义都代表了某些需要讨论的内容。定义是学习的起点，需要理解并记住它们。当知道了哪些公式是定义时，对电子学的理解就会更加容易。

## 1.1.2 定律

**定律**和定义不同，定律是对自然界中已经存在的某种关系的总结。下面是一个定律的例子：

$$f = K \frac{Q_1 Q_2}{d^2}$$

其中， $f$  代表力， $K$  是比例常量  $9 \times 10^9$ ， $Q_1$ 、 $Q_2$  分别代表两个电荷所带的电量， $d$  是两个电荷的间距。

这是库仑定律，它阐述的是两个电荷间的吸引力或排斥力与所带电量成正比，与电荷间距的平方成反比的关系。这个方程式很重要，是电学的基础。那么它从何而来？又为什么正确呢？首先，在库仑定律发现之前，定律中所有的变量就已存在。库仑通过实验证明了两个电荷间的吸引力或排斥力正比于每个电荷所带电量，并反比于两个电荷间距的平方。库仑定律就是反映自然界中存在的某种关系的一个例子，虽然早期的研究人员已经可以测量出  $f$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$  和  $d$ ，但库仑发现了这些量之间的关系，并以公式的形式描述了这种关系。

在定律发现之前，有些人可能预感到这种关系的存在。经过大量的实验，研究人员将他们的发现总结为公式。当足够多的人通过实验证实了这个发现后，该公式就变成了定律。定律是事实，因为可以通过实验进行验证。

### 1.1.3 推论

给定一个等式：

$$y = 3x$$

在等式两边同时加上 5，则有：

$$y + 5 = 3x + 5$$

等式两边相等，所以等式依然成立。还有很多其他运算，如减法、乘法、除法、因式分解，或者变量置换，都可以保持等式两边仍然是相等的。因此，可通过数学方法推导出许多新的公式。

**推论**是指从其他公式中推导出的公式。这意味着可从一个或多个已经存在的公式开始，用数学方法推导出一个不在原先公式集中的新公式。推论是正确的，因为从原始公式到推演的公式之间的每一步数学变换都保持了公式两边的相等关系。

举例来说，欧姆在做导体实验时，发现了电压和电流的比值是一个常量，他把这种常量命名为电阻，并且给出如下公式：

$$R = \frac{V}{I}$$

这是欧姆定律的原始形式。重新组织这个公式，有：

$$I = \frac{V}{R}$$

这是一个推论，它是从欧姆定律的原始形式推导出的另一个等式。

下面是另一个例子，电容的定义为：

$$C = \frac{Q}{V}$$

可以在等式两端同时乘以  $V$ ，得到下面的新等式：

$$Q = CV$$

这是一个推论，它表述了一个电容上的电荷量等于电容乘以加在电容两端的电压。

### 1.1.4 必要常识

一个公式为什么是正确的？有三种可能的答案。要将对电子学的理解建立在坚实的基础上，有必要区分每一个新公式属于下面三种类型中的哪一类。

**定义：**为描述新概念而创造的公式。

**定律：**描述自然界中已存在的关系的公式。

**推论：**用数学方法推导出的公式。

## 1.2 近似

在我们的日常生活中，每天都在运用着近似。如果有人问你的年龄，你可能回答 21 岁了（理想化近似），也可能回答 21 岁多，快 22 岁了（二阶近似），或者还可能回答 21 岁零 9 个月（三阶近似）。当然，如果希望更精确一些，可以回答 21 岁零 9 个月 2 天 6 小时 23 分钟 42 秒（精确值）。

上述例子阐述了不同程度的近似：理想化近似、二阶近似、三阶近似和精确解答。采用哪种近似取决于当时的情况。在电子学中也是一样，进行电路分析时，需要根据情况选择合适的近似精度。

### 1.2.1 理想化近似

有一段长度为 1 英尺的 AWG22 导线，与基板的距离为 1 英寸，你知道它具有  $0.016\Omega$  电阻、 $0.24\mu\text{H}$  电感和  $3.3\text{pF}$  电容吗？如果在每次计算电流时都计入连线的电阻、电感和电容效应，那么将耗费太多的时间。这就是人们在大多数情况下都忽略连线的电阻、电感和电容的原因。

**理想化近似**，有时也称一阶近似，是一个器件最简单的等效电路。例如，一段导线的理想化近似就是一个阻抗为零的导体，这种理想化近似适用于日常的电路分析。

例外的情况发生在高频电路中，这时不得不考虑导线的电感和电容的影响。假设 1 英寸的导线有  $0.24\mu\text{H}$  电感和  $3.3\text{pF}$  电容，那么在 10MHz 频率下，感抗是  $15.1\Omega$ ，容抗是  $4.82\text{k}\Omega$ ，可见此时的设计已经不能再将导线理想化了。互连线的感抗和容抗可能会非常重要，这取决于电路其他部分的情况。

工作频率在 1MHz 以下时可以将导线理想化，这是一个常用的经验法则。但并不意味着可以对互连线掉以轻心。通常情况下，应使互连线越短越好，因为在一定的频率下，长互连线将使电路性能下降。

在做故障诊断时，通常可以采用理想化近似，因为需要寻找的是那些与正常电压或电流有明显偏差的故障。在本书中，将把半导体器件理想化地等效成简单电路。借助于理想化近似，可以更容易地分析和理解半导体电路的工作原理。

### 1.2.2 二阶近似

一个手电筒电池可以理想化近似为一个 1.5V 的电压源，而二阶近似将在理想化近似的基础上加入一个或多个元件。例如，手电筒电池也可表述为一个 1.5V 电压源串联上一个  $1\Omega$  电阻，这个串联电阻称为电池的源电阻或内阻。如果负载电阻小于  $10\Omega$ ，则负载电压会明显少于 1.5V，因为有一部分电压被分配到电源内阻上，在这种情况下，精确计算就必须考虑电源内阻。

### 1.2.3 三阶和高阶近似

出现三阶近似的情况时，器件的等效电路中会包含另一个元件。第 3 章讨论半导体二极管时将会给出一个三阶近似的例子。

更高阶的近似在等效电路中可能包含更多元件，此时手工计算将变得很困难而且很费时，因此经常利用计算机仿真软件进行电路计算。例如，由 EWB 公司开发的软件 MultiSim，以及 PSpice 等商用软件，均采用高阶近似模型来分析半导体电路。本书中的大量实例和电路都可以采用这类软件进行分析。

### 1.2.4 结论

采用哪种近似取决于想要做什么事。如果进行故障诊断，那么理想化近似就足够了。更多时候，二阶近似是最佳选择，因为它便于使用，也不需要计算机辅助。对于高阶近似，则需要有一台计算机和类似 MultiSim 的软件。

## 1.3 电压源

理想直流电压源可提供恒定的负载电压。没有内阻的电池就是一个最简单的理想直流

电压源。如图 1-1a 所示，一个理想电压源与一个从  $1\Omega$  到  $10\text{M}\Omega$  的可变电阻相连，电压表的读数为  $10\text{V}$ ，与电源电压完全一致。

图 1-1b 给出了负载电压随负载电阻变化的曲线。如图 1-1b 所示，在负载电阻从  $1\Omega$  变化到  $10\text{M}\Omega$  过程中，负载电压保持  $10\text{V}$  不变。换句话说，无论负载电阻变大或变小，理想的直流电压源总能输出恒定的负载电压。对于理想电压源，只有负载电流是随负载电阻的变化而变化的。

### 1.3.1 二阶近似

理想电压源只是理论上存在的器件，实际是不存在的。原因是当负载电阻值趋近于零时，负载电流就会变为无穷大。没有任何实际的电压源可以产生无穷大的电流，实际电压源总会存在一定的内阻。电压源的二阶近似就包括这个内阻。

图 1-2a 说明了这种情况。一个  $1\Omega$  的电源内阻  $R_s$  和一个理想电池串联在一起，当负载电阻是  $1\Omega$  时，电压表的读数是  $5\text{V}$ 。因为负载电流等于  $10\text{V}$  除以  $2\Omega$ ，即  $5\text{A}$ ，当  $5\text{A}$  的电流流过电源内阻时，产生了  $5\text{V}$  的压降。因为内阻分掉了一半电压，所以负载电压只有电源电压理想值的一半。

图 1-2b 给出了负载电压随负载电阻变化的曲线。在这种情况下，只有当负载电阻远远大于电源内阻时，负载电压才会接近电源电压的理想值。不过，怎样才能称为“远远大于”呢？换句话说，什么时候才可以忽略电源内阻呢？

### 1.3.2 准理想电压源<sup>⊖</sup>

下面将创造一个非常用的新定义。当电源内阻为负载电阻的  $1/100$  或更小时，则内阻可以忽略。满足这个条件的电压源称为准理想电压源。定义如下：

$$\text{准理想电压源 } R_s < 0.01R_L \quad (1-1)$$

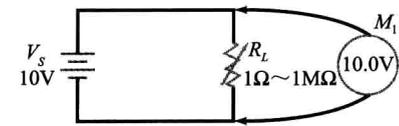
该公式定义了什么是准理想电压源。在不等式的边界处（把“ $<$ ”换成“ $=$ ”）得到下面的等式：

$$R_s = 0.01R_L$$

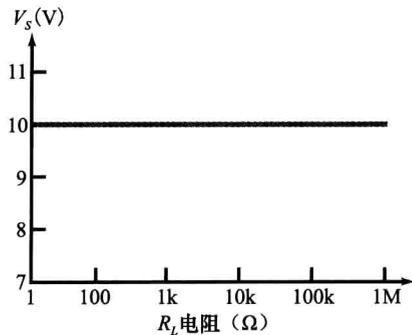
由此可以推导出满足准理想电压源条件的最小负载电阻为：

$$R_{L(\min)} = 100R_s \quad (1-2)$$

即最小的负载电阻值等于电源内阻的  $100$  倍。

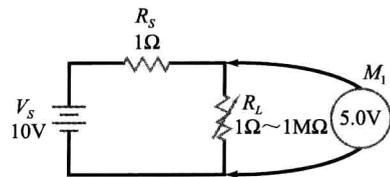


a) 连接可变电阻的理想电压源

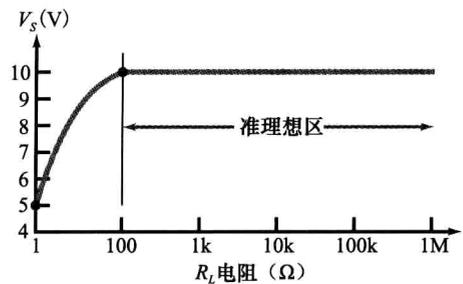


b) 负载电压在所有负载电阻情况下恒定不变

图 1-1 理想电压源



a) 包含电源内阻的二阶近似



b) 负载电压在大负载电阻时恒定不变

图 1-2 二阶近似电压源

⊖ 原文为“stiff voltage source”，因其可近似认为是理想电压源，所以这里译作“准理想电压源”。——译者注

式(1-2)是一个推论,它从准理想电压源的定义出发,推导出满足准理想电压源条件的最小负载电阻。只要负载电阻大于100倍的电源内阻,电压源就是准理想的。当负载电阻恰好等于这个最小负载时,忽略电源内阻带来的计算误差为百分之一,这个误差足够小,可以在二阶近似计算中忽略。

图1-3总结了准理想电压源的条件:当负载电阻大于电源内阻的100倍时,电压源就是准理想的。

**例 1-1** 对于准理想电压源的定义同样也适用于交流电压源。假设一个交流电压源的内阻为 $50\Omega$ ,负载电阻为何值时可认为它是准理想电压源?

**解:** 电源内阻乘以100,得到最小负载电阻:

$$R_L = 100R_s = 100 \times 50\Omega = 5\text{k}\Omega$$

只要负载电阻的值大于 $5\text{k}\Omega$ ,就可以认为交流电压源是准理想电压源,此时可以忽略电源内阻的影响。

最后需要说明的是,对于交流电源使用二阶近似仅在低频区有效。在高频区,导线电感和寄生电容等附加因素会产生不可忽视的影响。稍后的章节将讨论这些高频效应。

**自测题 1-1** 如果例1-1中的交流电压源内阻为 $600\Omega$ ,负载电阻为何值时可认为是准理想电压源?

**知识拓展** 稳压性能良好的电源就是一个很好的准理想电压源的例子。

**知识拓展** 恒流源的输出电压 $V_L$ 与负载电阻值成正比。

## 1.4 电流源

直流电压源在不同的负载电阻下可提供恒定的负载电压。直流电流源的不同之处在于,对于不同的负载电阻它产生恒定的电流。内阻很大的电池就是一个直流电流源(如图1-4a所示),该电路中,电池内阻为 $1\text{M}\Omega$ ,负载电流为:

$$I_L = \frac{V_s}{R_s + R_L}$$

当图1-4a中 $R_L$ 为 $1\Omega$ 时,负载电流为:

$$I_L = \frac{10\text{V}}{1\text{M}\Omega + 1\Omega} = 10\mu\text{A}$$

在这个计算中,小的负载电阻对负载电流几乎不产生影响。

图1-4b中给出了负载电阻从 $1\Omega$ 变化到 $1\text{M}\Omega$ 过程中负载电流的变化曲线。负载电流在很大的范围内保持 $10\mu\text{A}$ ,只有当负载电阻大于

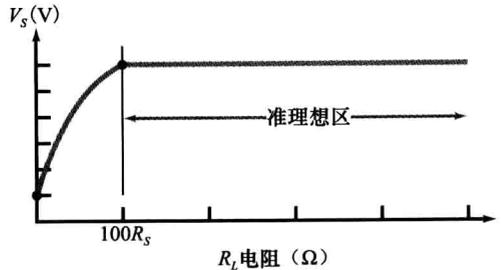
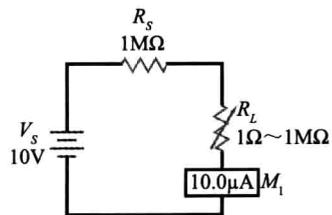
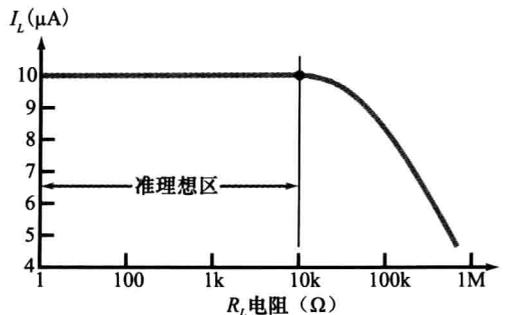


图 1-3 准理想区出现在负载电阻足够大的区域



a) 用直流电压源和大电阻构成的模拟电流源



b) 负载电阻很小时负载电流保持恒定

图 1-4 电流源

10kΩ时，负载电流才出现明显的下降。

### 1.4.1 准理想电流源<sup>⊖</sup>

这是另一个有用的定义，尤其是在半导体电路中。当电流源内阻比负载电阻大至少100倍时，可以忽略电流源内阻。满足这一条件的电流源称为准理想电流源。定义如下：

$$\text{准理想电流源 } R_S > 100R_L \quad (1-3)$$

其上界是最坏情况，该值为：

$$R_S = 100R_L$$

求解可获得满足准理想电流源条件的最大负载电阻为：

$$R_{L(\max)} = 0.01R_S \quad (1-4)$$

即最大负载电阻是电流源内阻的百分之一。

式(1-4)是一个推论，它从准理想电流源的定义出发推导得到满足准理想电流源定义的负载电阻的最大值。当负载电阻等于最大值时，计算误差为百分之一。这个误差足够小，可以在二阶近似中忽略。

图1-5给出了准理想区。只要负载电阻小于电流源内阻的百分之一，电流源就是准理想的。

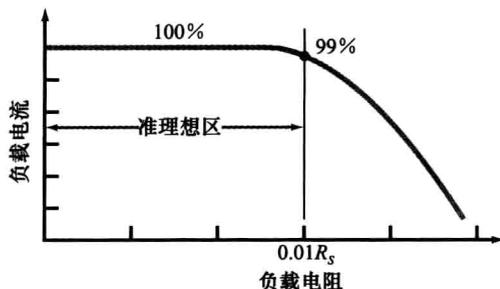


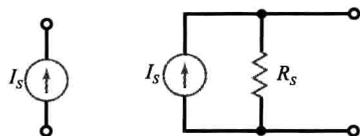
图 1-5 准理想区出现在负载电阻足够小的区域

### 1.4.2 电路符号

图1-6a所示是一个理想电流源的电路符号，它具有无穷大的内阻。这个理想近似在实际电路中是不存在的，但它可以在数学层面存在。因此，在故障诊断等过程中，我们可以用这个理想电流源进行快速的电路分析。

图1-6a是一个图形定义，这是一个电流源的符号。这个符号表示该器件可以产生恒定电流 $I_S$ 。电流源也可以被想象为一个每秒钟可输出固定数目库仑电荷的泵。所以有“电流源给1kΩ的电阻输出5mA电流”的表述方法。

图1-6b给出的是二阶近似情况。内阻并联于理想电流源，这与电压源中内阻的串联关系不同。本章稍后将讨论诺顿定理，由此可知为什么内阻必须和理想电流源是并联关系。表1-1可以帮助理解电压源和电流源之间的区别。



a) 电流源的电路符号 b) 电流源的二阶近似

图 1-6 电流源的符号和近似

表 1-1 电压源和电流源的性质

参量	电压源	电流源
$R_S$	一般比较低	一般比较高
$R_L$	大于 $100R_S$	小于 $0.01R_S$
$V_L$	常量	取决于 $R_L$
$I_L$	取决于 $R_L$	常量

**例 1-2** 一个 2mA 的电流源内阻为 10MΩ。负载电阻取值在什么范围时是准理想电流源？

⊖ 原文为“stiff current source”，因其可近似认为是理想电流源，所以这里译作“准理想电流源”。——译者注

**解：**由于是电流源，因此负载电阻应该相对内阻尽量小，由 100 : 1 的关系可以算出，最大的负载电阻为：

$$R_{L(\max)} = 0.01 \times 10\text{M}\Omega = 100\text{k}\Omega$$

对于这个电流源来说，使其保持准理想特性的负载电阻的范围是 0~100kΩ。

图 1-7 给出了完整解答。在图 1-7a 中，一个 2mA 的电流源和 10MΩ 的电阻并联，此时可变电阻设为 1Ω，电流表测出负载电流为 2mA。当负载电阻从 1Ω 变为 1MΩ 时，由图 1-7b 可以看到电流源的准理想特性一直保持到负载电阻增到 100kΩ。在这个点上，负载电流比理想值低了 1%，或者说，99% 的电流都通过了负载电阻，另外 1% 的电流通过了电流源内阻。随着负载电阻继续增大，负载电流持续减小。

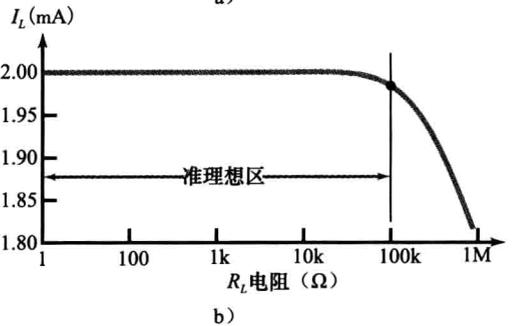
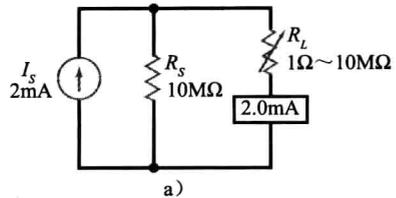


图 1-7 例 1-2 题解

**自测题 1-2** 在图 1-7a 中当负载电阻等于 10kΩ 时，负载电压是多少？

**例 1-3** 当分析晶体管电路时，可以把晶

体管看做是一个电流源。在一个设计良好的电路中，晶体管就像一个准理想电流源，可以忽略内阻影响来计算其负载电压。例如，如果晶体管向 10kΩ 的负载电阻输出 2mA 的电流，则负载电压为 20V。

## 1.5 戴维南定理

一些人在工程实践中偶然做出的重大突破可以把我们的认识提升到一个新的高度。法国工程师 M. L. 戴维南推导出的电路定理就是这些重大突破之一，该定理以他的名字命名为戴维南定理。

### 1.5.1 戴维南电压和戴维南电阻的定义

**定理**是可以通过数学手段证明的一个命题。因此，它区别于定律和定义，应归入推论的范畴。回顾前面课程对戴维南定理的表述，如图 1-8a 所示，戴维南电压  $V_{TH}$  的定义为当负载开路时负载两端的电压，因此，戴维南电压有时也称作开路电压。定义如下：

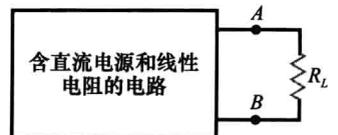
$$\text{戴维南电压 } V_{TH} = V_{OC} \quad (1-5)$$

**戴维南电阻**的定义为当图 1-8a 所示电路中的负载电阻开路且所有电源置零时，在负载两端所测得的电阻：

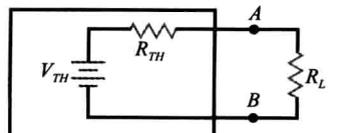
$$\text{戴维南电阻 } R_{TH} = R_{OC} \quad (1-6)$$

凭借这两个定义，戴维南得到了以他名字命名的著名定理。

求戴维南电阻时有一个小问题，所谓电源置零，对电压源和电流源而言是不一样的。对于电压源，相当于把它短路，因为这是确保电压源流过电流时其电压为零的唯一办法。对



a) 内含线性电路的黑盒子



b) 戴维南等效电路

图 1-8 戴维南定理

于电流源，相当于把它开路，因为这是确保电流源两端加载电压时其电流为零的唯一办法。总结如下：

将电压源置零时，使之短路。

将电流源置零时，使之开路。

## 1.5.2 推论

戴维南定理是什么？请看图 1-8a，其中的黑盒子内可以包含任何含有直流电源和线性电阻的电路（线性电阻的阻值不随电压变化）。戴维南证明了无论图 1-8a 中黑盒子里面的电路有多么复杂，它将产生与图 1-8b 中简化电路完全相同的负载电流，推导如下：

$$I_L = \frac{V_{TH}}{R_{TH} + R_L} \quad (1-7)$$

戴维南定理是一个强大的工具，工程师和技术人员一直都在使用这个定理。如果没有这个定理，电子学甚至可能无法发展到今天的程度。戴维南定理不仅简化了计算，而且可以由此解释电路的工作原理，如果仅用基尔霍夫方程来解释有时不太可能。

**例 1-4** 图 1-9a 所示电路的戴维南电压和戴维南电阻分别是多少？

MultiSim

**解：**首先计算戴维南电压。将负载电阻开路，即将负载电阻从电路中移除，如图 1-9b 所示。由于有 8mA 的电流通过由 6kΩ 电阻与 3kΩ 电阻串联的电路，3kΩ 电阻上的分压为 24V。由于负载电阻开路，4kΩ 电阻上没有电流经过，所以 AB 节点间的电压为 24V。故戴维南电压为：

$$V_{TH} = 24V$$

然后计算戴维南电阻。将直流电压源置零等价于将其短路，如图 1-9c 所示。如果把欧姆表连在图 1-9c 中 AB 两个节点间，读数将是多少？

读数将会是 6kΩ。因为当电池短路时，从 AB 两端向里看，欧姆表看到的电阻是 4kΩ 电阻串联在 3kΩ 电阻与 6kΩ 电阻并联后的电阻上，可以表述为：

$$R_{TH} = 4k\Omega + \frac{3k\Omega \times 6k\Omega}{3k\Omega + 6k\Omega} = 6k\Omega$$

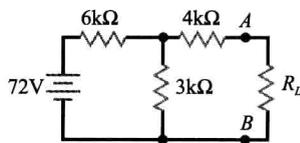
3kΩ 和 6kΩ 的积除以它们的和等于 2kΩ，再加上 4kΩ，得到 6kΩ。

对于并联的表示方法，我们需要一个新的定义。由于并联在电路中很常见，人们习惯用一个简写符号“||”来表示并联。当方程式中出现 || 时，则代表其两侧的量是并联关系。在工业界，上述戴维南电阻有如下表达形式：

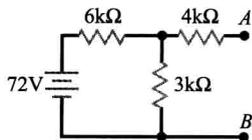
$$R_{TH} = 4k\Omega + (3k\Omega \parallel 6k\Omega) = 6k\Omega$$

绝大多数的工程师和技术人员都理解这两条竖线是并联的意思，会用积除以和的方法求出 3kΩ 与 6kΩ 并联后的等效电阻。

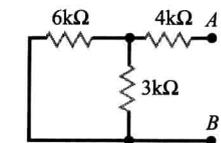
图 1-10 给出了带负载的戴维南等效电路。将这个简化电路与图 1-9a 中的原始电路对比，就会发现在求解不同负载情况下的负载电流时，问题变得容易多了。下面通过自测题 1-4 来体会一下。



a) 原始电路



b) 负载电阻开路求戴维南电压



c) 电源置零求戴维南电阻

图 1-9 举例

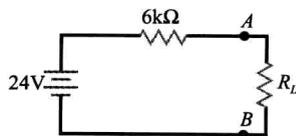


图 1-10 图 1-9a 的戴维南等效电路

**自测题 1-4** 使用戴维南定理, 求当图 1-9a 所示电路的负载电阻分别为  $2\text{k}\Omega$ 、 $6\text{k}\Omega$  和  $18\text{k}\Omega$  时, 负载电流是多少?

如果要真正领略戴维南定理的好处, 可以采用图 1-9a 的原始电路或者其他方法重新计算上述电流。

**例 1-5** 面包板可用来验证电路设计的可行性, 面包板上的电路器件不是通过焊锡连接的, 其位置也不是固定不变的。假设实验台上有一块用面包板插接完成的电路, 如图 1-11a 所示, 如何测量戴维南电压和戴维南电阻? **MultiSim**

**解:** 首先用万用表充当负载电阻, 如图 1-11b 所示。当把万用表调到电压挡时, 它将显示读数  $9\text{V}$ , 这就是戴维南电压。然后, 用短接线取代电源 (见图 1-11c), 将万用表调节到欧姆挡, 它将显示读数  $1.5\text{k}\Omega$ , 这就是戴维南电阻。

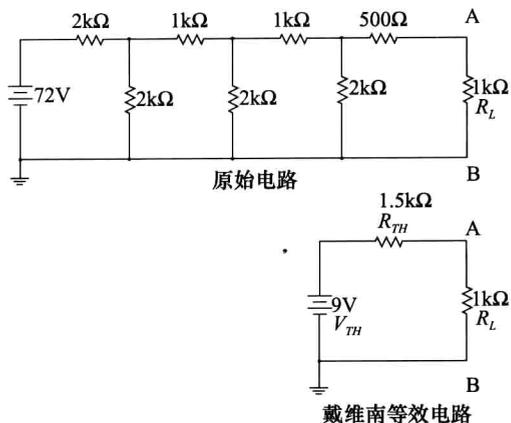
在上述测量中引入了误差。值得注意的是在测量电压的时候万用表的输入电阻。由于万用表跨接在两个节点之间, 因此会有小电流通过万用表。例如, 如果使用可动线圈式万用表, 典型的灵敏度是每伏特  $20\text{k}\Omega$ , 那么  $10\text{V}$  挡对应的输入电阻就是  $200\text{k}\Omega$ , 这个负载将使电路的输出电压降低, 使负载电压从  $9\text{V}$  降到  $8.93\text{V}$ 。

在测量中通常要遵守一个准则, 即电压表的输入电阻至少要大于戴维南电阻的 100 倍, 这样, 负载导致的误差就会下降到 1% 以内。为了避免负载误差, 可以使用以场效应晶体管作为输入管的万用表或者数字万用表来代替可动线圈式万用表。由于这些仪表的输入电阻至少为  $10\text{M}\Omega$ , 通常可以消除负载误差。 ◀

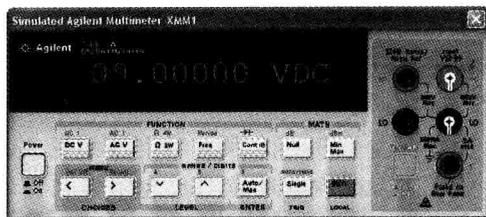
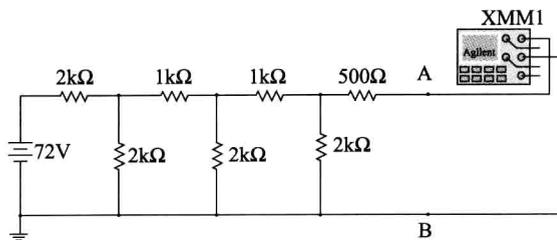
## 1.6 诺顿定理

回顾一下前面课程里关于对诺顿定理的表述。在图 1-12a 中, 诺顿电流  $I_N$  定义为当负载电阻短路时的负载电流。因此, 诺顿电流有时也称为“短路电流”。定义如下:

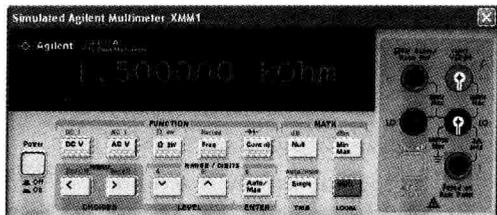
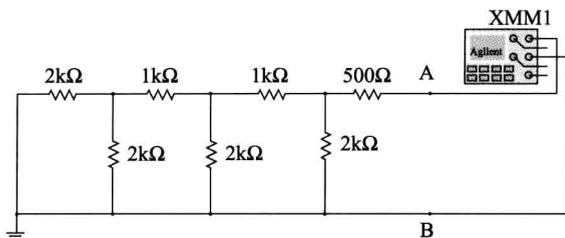
$$\text{诺顿电流 } I_N = I_{SC} \quad (1-8)$$



a) 实验电路



b) 戴维南电压的测量



c) 戴维南电阻的测量

图 1-11 举例

而诺顿电阻是将所有电源置零后，负载电阻开路时在负载两端测得的电阻。定义如下：

$$\text{诺顿电阻 } R_N = R_{OC} \quad (1-9)$$

由于戴维南电阻的值也是  $R_{OC}$ ，因而有：

$$R_N = R_{TH} \quad (1-10)$$

这个推论说明诺顿电阻等于戴维南电阻。当算出戴维南电阻是  $10\text{k}\Omega$  时，便立刻知道诺顿电阻也是  $10\text{k}\Omega$ 。

### 1.6.1 基本概念

诺顿定理的本质是什么呢？在图 1-12a 中的黑盒子内可以包含任何含有直流电源和线性电阻的电路。诺顿证明了图 1-12a 中黑盒子内的电路与图 1-12b 中的简化电路会产生完全相等的负载电压。作为推论，诺顿定理可表述为：

$$V_L = I_N(R_N \parallel R_L) \quad (1-11)$$

即负载电压等于诺顿电流乘以诺顿电阻与负载电阻的并联。

诺顿电阻虽然与戴维南电阻相等，但是它们在等效电路中的位置是不同的：戴维南电阻始终与电压源串联，而诺顿电阻始终与电流源并联。

注意：如果使用的是电子流，记住下面的符号表示方法。在工业界，电流源内部箭头方向几乎总是按照电流的方向而设定，例外的情况是当电流源内部的箭头是虚线时，电流源按照虚线箭头方向输出电子。

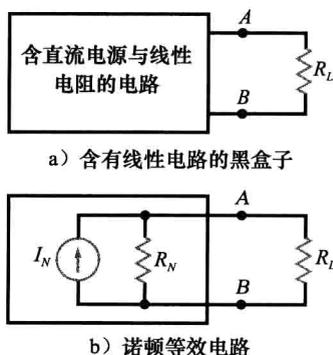


图 1-12 诺顿定理

**知识拓展** 和戴维南定理一样，诺顿定理可以应用于包含电感、电容和电阻的交流电路。对于交流电路，诺顿电流  $I_N$  常常以极坐标下的复数形式表示，而诺顿阻抗  $Z_N$  则常常以直角坐标下的复数形式表示。

### 1.6.2 推论

诺顿定理可以由对偶原理推导出来。这个原理表明，在电路分析中任何定理都存在一个对偶（对立）定理，在对偶定理中，原定理中的各个物理量都替换为相应的对偶物理量。以下是最常见的对偶物理量：

- 电压  $\longleftrightarrow$  电流
- 电压源  $\longleftrightarrow$  电流源
- 串联  $\longleftrightarrow$  并联
- 串联电阻  $\longleftrightarrow$  并联电阻

图 1-13 解释了对偶原理应用在戴维南定理和诺顿定理中的情形，这表明我们可以将两个电路中的任意一个用于计算。在后续的讨论中将会了解到，两个电路都很有用。有时使用戴维南电路更方便，有时

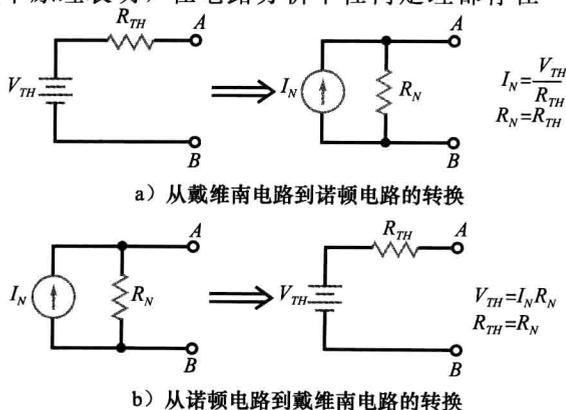


图 1-13 对偶原理：戴维南定理与诺顿定理的互换关系

则使用诺顿电路，这取决于具体的问题。表 1-2 总结了得到戴维南和诺顿电路物理量的步骤。

表 1-2 戴维南和诺顿物理量

过程	戴维南等效	诺顿等效
步骤 1	将负载电阻开路	将负载电阻短路
步骤 2	计算或测量开路电压，即戴维南电压	计算或测量短路电流，即诺顿电流
步骤 3	将电压源短路，电流源开路	将电压源短路，电流源开路，同时负载电阻开路
步骤 4	计算或测量开路电阻，即戴维南电阻	计算或测量开路电阻，即诺顿电阻

### 1.6.3 戴维南电路和诺顿电路的关系

戴维南电阻和诺顿电阻的数值相等，但是位置不同：戴维南电阻和电压源串联，而诺顿电阻和电流源并联。

还可以推导出如下两个关系。可以把任意一个戴维南电路转化为诺顿电路，如图 1-13a 所示。证明很简单，将戴维南电路的 AB 两端短路，得到诺顿电流：

$$I_N = \frac{V_{TH}}{R_{TH}} \quad (1-12)$$

这个推论说明诺顿电流等于戴维南电压除以戴维南电阻。

类似地，可以把任意一个诺顿电路转化为戴维南电路，如图 1-13b 所示。开路电压为：

$$V_{TH} = I_N R_N \quad (1-13)$$

这个推论说明戴维南电压等于诺顿电流乘以诺顿电阻。

图 1-13 总结了两种电路的转换公式。

**例 1-6** 假设一个复杂的电路已经化简成如图 1-14a 所示的戴维南等效电路，如何把它转化成一个诺顿等效电路呢？

解：使用式 (1-12) 得到：

$$I_N = \frac{10\text{V}}{2\text{k}\Omega} = 5\text{mA}$$

图 1-14c 为诺顿等效电路。

大多数的工程师和技术人员在离开学校之后很快就会忘记式 (1-12)，但他们通常会用欧姆定律解决同样问题。具体方法是，对于图 1-14a 所示电路，假设 AB 两端短路，如图 1-14b 所示，则短路电流就是诺顿电流：

$$I_N = \frac{10\text{V}}{2\text{k}\Omega} = 5\text{mA}$$

结果和前面的相同，不过这里是把欧姆定律应用在戴维南电路中了。图 1-15 总结了这种方法，有助于在给定戴维南电路的情况下算出诺顿电流。

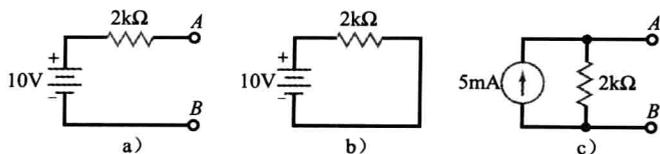


图 1-14 计算诺顿电流

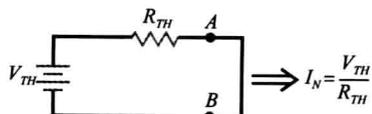


图 1-15 诺顿电流求解的记忆方法

**自测题 1-6** 当图 1-14a 所示电路的戴维南电阻为  $5\text{k}\Omega$  时，计算诺顿电流的值。

## 1.7 故障诊断

**故障诊断**就是查明电路没有正常工作的原因。最常见的故障原因是开路 and 短路。例如晶体管故障，很多原因会导致其开路或者短路，原因之一就是实际功率超过了晶体的最大功率。

当消耗在电阻上的功率超过额定值之后就会导致电阻开路。而以下原因会间接导致电阻短路：在印制电路板的制作或焊接过程中，一些焊锡可能会意外地溅到两个相邻的互联线中间使它们短路，这就是所谓的**焊锡桥**，它使得被连接的两根导线间的器件全部短路。另一方面，一个糟糕的焊点通常根本没有连接上，这种情况称为**虚焊点**，意味着器件是开路的。

除了开路 and 短路以外，其他任何故障也都有可能发生。例如，焊接时温度过高可能造成一个电阻阻值的永久性改变。如果这个电阻值对于电路来说是关键值，那么受到这种热冲击后电路便有可能工作异常。

令故障诊断员棘手的是那些间断出现的电路故障。这种电路故障很难被分离出来，因为它们时而出现时而消失。有可能是因为虚焊引起的导通与断开间断出现，也可能是电缆接头松动，或者是其他类似的故障造成电路的时通时断。

### 1.7.1 开路器件

需要记住**开路器件**的两个特征：

流过开路器件的电流为零。

加载在开路器件两端的电压值是不确定的。

因为开路器件的电阻值是无穷大的，所以电阻上不可能存在电流。根据欧姆定律：

$$V = IR = 0 \times \infty$$

在等式中，零乘以无穷大在数学上是不确定的，所以需要由电路的其他部分来确定开路器件两端的电压。

### 1.7.2 短路器件

**短路器件**恰好相反，需要记住的两个特征为：

加载在短路器件两端的电压为零。

流过短路器件的电流值是不确定的。

因为短路器件的电阻值为零，所以电阻上不可能存在电压。根据欧姆定律：

$$I = \frac{V}{R} = \frac{0}{0}$$

零除以零在数学上是没有意义的，所以需要由电路的其他部分来确定流经短路器件的电流。

### 1.7.3 诊断过程

通常测量的电压是对地而言的，由这些测量值和基础电学知识，一般可以推断出问题所在。当把最大的疑点集中在某个元件上时，可以断开这个元件然后用欧姆表或其他仪表来证实这个判断。

#### 1. 正常值

图 1-16 所示的电路是一个准理想分压器，由电阻  $R_1$  和  $R_2$  构成，并驱动串联电阻  $R_3$

和  $R_4$ 。在诊断该电路的故障之前, 需要知道这个电路的正常电压值是多少。首先算出  $V_A$  和  $V_B$ , 前者是 A 点到地的电压, 后者是 B 点到地的电压。由于  $R_1$  和  $R_2$  远远小于  $R_3$  与  $R_4$  ( $10\Omega$  对  $100k\Omega$  而言), 准理想分压器 A 点电压近似为  $+6V$ 。此外, 由于  $R_3$  和  $R_4$  相等, 因此 B 点电压近似为  $+3V$ 。如果电路没有问题, 应该测出 A 点对地的电压为  $6V$ , B 点对地的电压为  $3V$ , 这两个电压值列于表 1-3 的第一行。

### 2. $R_1$ 开路

如果  $R_1$  开路, 电路的电压会怎样变化? 由于没有电流通过开路的  $R_1$ , 所以也没有电流流过  $R_2$ 。由欧姆定律可知  $R_2$  两端电压将为 0, 因此  $V_A=0$ , 且  $V_B=0$ , 见表 1-3 “ $R_1$  开路” 的情况。

### 3. $R_2$ 开路

如果  $R_2$  开路, 电路的电压会怎样变化? 由于没有电流通过开路的  $R_2$ , A 点电压被拉高到电源电压。由于  $R_1$  远远小于  $R_3$  和  $R_4$ , 所以 A 点电压近似为  $12V$ 。又因为  $R_3$  和  $R_4$  相等, B 点电压应该是  $6V$ , 所以表 1-3 中 “ $R_2$  开路” 时对应的  $V_A=12V$ ,  $V_B=6V$ 。

### 4. 其他问题

如果作为地的 C 点开路, 没有电流可以流过  $R_2$ , 这种情况 and  $R_2$  开路是等效的。因此表 1-3 中 “C 开路” 时对应的  $V_A=12V$ ,  $V_B=6V$ 。

对于表 1-3 中的其他问题, 应该计算各种情况所对应的电压值并理解其产生原因。

**例 1-7** 如果测得图 1-16 所示电路的  $V_A$  和  $V_B$  都是 0, 故障可能在哪里?

**解:** 查看表 1-3, 可知有两种可能的故障: “ $R_1$  开路” 或 “ $R_2$  短路”, 这两种情况都会导致 A、B 两点的电压为 0。为了区分究竟是哪种情况, 可以断开  $R_1$  然后测量它, 如果测出它是开路的, 则故障为 “ $R_1$  开路”。如果测量没有问题, 则故障为 “ $R_2$  短路”。

**自测题 1-7** 如果测得图 1-16 所示电路的  $V_A=12V$ ,  $V_B=6V$ , 故障可能在哪里?

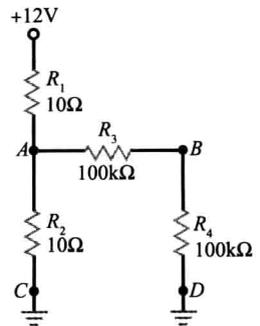


图 1-16 故障诊断讨论: 分压器及其负载

表 1-3 故障及其线索

故障	$V_A$	$V_B$
电路正常	6V	3V
$R_1$ 开路	0	0
$R_2$ 开路	12V	6V
$R_3$ 开路	6V	0
$R_4$ 开路	6V	6V
C 开路	12V	6V
D 开路	6V	6V
$R_1$ 短路	12V	6V
$R_2$ 短路	0	0
$R_3$ 短路	6V	6V
$R_4$ 短路	6V	0

## 总结

- 1.1 节 定义是为了说明新概念而创造的公式; 定律是对自然界中已经存在的某种关系的描述; 推论是由数学推导产生的公式。
- 1.2 节 近似方法在工业上应用广泛。理想化近似适用于故障诊断, 二阶近似适用于对电路的初步计算, 高阶近似适用于计算机辅助分析。
- 1.3 节 理想电压源没有内阻。电压源的二阶近似包含了一个与电压源串联的内阻。准理想电压源的内阻小于负载电阻的 1%。
- 1.4 节 理想电流源具有无穷大的内阻。电流源的二阶近似包含了一个与电流源并联的大的内阻。准理想电流源的内阻大于负载电阻的

100 倍。

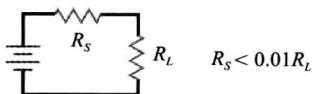
- 1.5 节 戴维南电压是跨接在开路负载两端的电压。戴维南电阻是在负载开路且所有电源都置零的情况下, 从负载两端测得的电阻。戴维南证明了戴维南等效电路产生的负载电流与任何其他含电源和线性电阻的对应电路的负载电流相等。
- 1.6 节 诺顿电阻与戴维南电阻相等。诺顿电流等于负载短路时的负载电流。诺顿证明了诺顿等效电路产生的负载电压与任何其他含电源和线性电阻的对应电路的负载电压相等。诺顿电流等于戴维南电压除以戴维南电阻。

1.7 节 最常见的电路故障是短路、开路和间断出现的故障。短路器件上总是出现零电压，其电流取决于电路的其他部分。开路器件上总是出

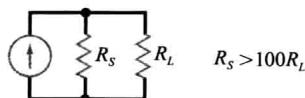
现零电流，其电压取决于电路的其他部分。间断出现的故障是电路时通时断的问题，需要耐心地、有逻辑地排查，把故障分离出来。

### 定义

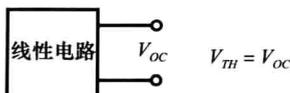
(1-1) 准理想电压源



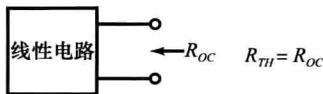
(1-3) 准理想电流源



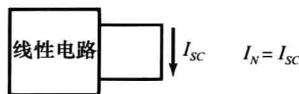
(1-5) 戴维南电压



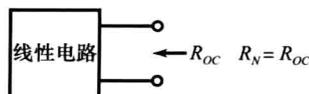
(1-6) 戴维南电阻



(1-8) 诺顿电流

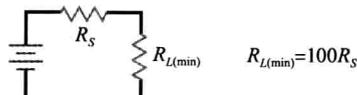


(1-9) 诺顿电阻

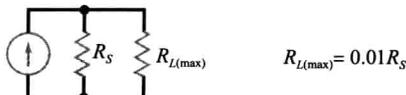


### 推论

(1-2) 准理想电压源



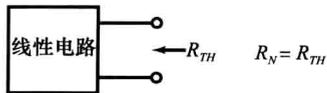
(1-4) 准理想电流源



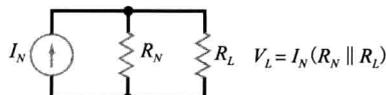
(1-7) 戴维南定理



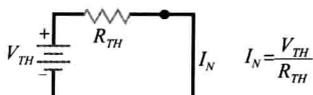
(1-10) 诺顿电阻



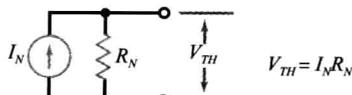
(1-11) 诺顿定理



(1-12) 诺顿电流



(1-13) 戴维南电压



### 选择题

1. 理想电压源具有
  - a. 零内阻
  - b. 无穷大内阻
  - c. 和负载相关的电压
  - d. 和负载相关的电流
2. 实际电压源具有
  - a. 零内阻
  - b. 无穷大内阻
  - c. 小的内阻
  - d. 大的内阻
3. 如果负载电阻为 100Ω，则准理想电压源的内阻为
  - a. 小于 1Ω
  - b. 至少 10Ω
  - c. 大于 10kΩ
  - d. 小于 10kΩ
4. 理想电流源具有
  - a. 零内阻
  - b. 无穷大内阻
  - c. 和负载相关的电压
  - d. 和负载相关的电流
5. 实际电流源具有
  - a. 零内阻
  - b. 无穷大内阻
  - c. 小的内阻
  - d. 大的内阻

6. 如果负载电阻为  $100\Omega$ , 则准理想电流源的内阻为  
 a. 小于  $1\Omega$                       b. 大于  $1\Omega^{\ominus}$   
 c. 小于  $10k\Omega$                     d. 大于  $10k\Omega$
7. 戴维南电压等于  
 a. 负载短路电压                    b. 负载开路电压  
 c. 理想电压源电压                  d. 诺顿电压
8. 戴维南电阻的值等于  
 a. 负载电阻                          b. 负载电阻的一半  
 c. 诺顿等效电路的内阻              d. 负载开路电阻
9. 为得到戴维南电压, 需要  
 a. 把负载电阻短路                  b. 把负载电阻开路  
 c. 把电压源短路                      d. 把电压源开路
10. 为得到诺顿电流, 需要  
 a. 把负载电阻短路                  b. 把负载电阻开路  
 c. 把电压源短路                      d. 把电流源开路
11. 诺顿电流有时也称为  
 a. 负载短路电流                      b. 负载开路电流  
 c. 戴维南电流                        d. 戴维南电压
12. 焊锡桥  
 a. 可能会造成短路                  b. 可能会造成开路  
 c. 在有些电路中有用处              d. 总是具有高阻
13. 虚焊点  
 a. 总是呈现低电阻  
 b. 显示了高超的焊接技术  
 c. 通常造成开路  
 d. 会造成短路
14. 开路电阻  
 a. 流过的电流无穷大                b. 两端的电压为零  
 c. 两端的电压无穷大                d. 流过的电流为零
15. 短路电阻  
 a. 流过的电流无穷大                b. 两端的电压为零  
 c. 两端的电压无穷大                d. 流过的电流为零
16. 理想电压源和内阻属于以下哪种情况  
 a. 理想化近似                        b. 二阶近似  
 c. 高阶近似                          d. 严格模型
17. 把导线当成零电阻导体属于以下哪种情况  
 a. 理想化近似                        b. 二阶近似  
 c. 高阶近似                          d. 严格模型
18. 理想电压源的输出电压  
 a. 是零                                b. 是常数  
 c. 和负载电阻相关                  d. 和内阻相关
19. 理想电流源的输出电流  
 a. 是零                                b. 是常数  
 c. 和负载电阻的值相关              d. 和内阻相关
20. 戴维南定理把一个复杂电路替换成负载与以下哪种电路的连接  
 a. 理想电压源和并联电阻  
 b. 理想电流源和并联电阻  
 c. 理想电压源和串联电阻  
 d. 理想电流源和串联电阻
21. 诺顿定理把一个复杂电路替换成负载与以下哪种电路的连接  
 a. 理想电压源和并联电阻  
 b. 理想电流源和并联电阻  
 c. 理想电压源和串联电阻  
 d. 理想电流源和串联电阻
22. 使器件短路的一种方式  
 a. 通过虚焊点                        b. 通过焊锡桥  
 c. 该器件未连接                      d. 使该器件开路
23. 推论是  
 a. 发现                                b. 发明  
 c. 由数学推导产生的                  d. 总被称做定理

## 习题

### 1.3 节

- 1-1 已知电压源的理想电压为  $12V$ , 内阻为  $0.1\Omega$ . 负载电阻为何值时该电压源是准理想电压源?
- 1-2 若负载电阻可以在  $270\Omega$  到  $100k\Omega$  之间变化, 作为一个准理想电压源, 其最大内阻是多少?
- 1-3 若函数发生器的输出电阻为  $50\Omega$ , 负载电阻为何值时该函数发生器是准理想的?
- 1-4 汽车蓄电池的内阻为  $0.04\Omega$ , 负载电阻为何值时该电池具有准理想特性?
- 1-5 电压源的内阻为  $0.05\Omega$ . 当流过  $2A$  电流时,

该内阻上的压降是多少?

- 1-6 图 1-17 中的电压源电压为  $9V$ , 内阻为  $0.4\Omega$ . 如果负载电阻为零, 负载电流是多少?

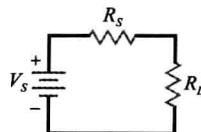


图 1-17

### 1.4 节

- 1-7 假设一个电流源的理想电流为  $10mA$ , 内阻为

$\ominus$  原书为小于  $1\Omega$ , 有误。——译者注

10MΩ。负载电阻为何值时该电流源是准理想的？

- 1-8 若要驱动阻值在 270Ω 到 100kΩ 之间可变的负载电阻，准理想电流源的内阻应为多少？
- 1-9 某电流源的内阻为 100kΩ，如果要求该电流源具有准理想特性，则负载电阻最大是多少？
- 1-10 图 1-18 中电流源的理想电流为 20mA，其内阻为 200kΩ。如果负载电阻为零，则负载电流是多少？

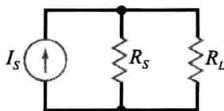


图 1-18

- 1-11 图 1-18 中电流源的理想电流为 5mA，其内阻为 250kΩ。如果负载电阻为 10kΩ，则负载电流是多少？该电流源是准理想电流源吗？

### 1.5 节

- 1-12 图 1-19 所示电路的戴维南电压和戴维南电阻各是多少？

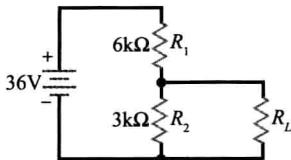


图 1-19

## 思考题

- 1-23 将电压源的负载短路，若理想电压为 12V，短路负载电流为 150A，则电压源内阻是多少？
- 1-24 图 1-17 所示电路中，理想电压为 10V，负载电阻为 75Ω。如果负载电压为 9V，则内阻是多少？该电压源是准理想的吗？
- 1-25 有一个黑盒子，一个 2kΩ 的电阻跨接在黑盒子的外部负载端上。如何测量它的戴维南电压？
- 1-26 题 1-25 中的黑盒子上有一个旋钮可以将所有内部电源置零。如何测量它的戴维南电阻？
- 1-27 试试不使用戴维南定理求解题 1-13。然后想一想你学到了有关戴维南定理的什么知识。
- 1-28 研究如图 1-20 所示的电路，给出该电路驱动负载时的戴维南等效电路，并描述测量该电路的戴维南电压和戴维南电阻的实验过程。

- 1-13 用戴维南定理计算图 1-19 所示电路在负载电阻分别为 0、1kΩ、2kΩ、3kΩ、4kΩ、5kΩ、6kΩ 时的负载电流。
- 1-14 若图 1-19 所示电路中的电源电压减小到 18V，戴维南电压和戴维南电阻有何变化？
- 1-15 若图 1-19 所示电路中的所有电阻都变为原来的两倍，戴维南电压和戴维南电阻有何变化？

### 1.6 节

- 1-16 某电路的戴维南电压为 12V，戴维南电阻为 3kΩ。求其对应的诺顿等效电路。
- 1-17 某电路的诺顿电流为 10mA，诺顿电阻为 10kΩ。求其对应的戴维南等效电路。
- 1-18 求图 1-19 所示电路的诺顿等效电路。

### 1.7 节

- 1-19 若图 1-19 所示电路的负载电压为 36V，则  $R_1$  出现了什么故障？
- 1-20 若图 1-19 所示电路的负载电压为 0，电池和负载电阻都正常。设想两种可能的故障。
- 1-21 若图 1-19 所示电路的负载电压为 0，所有电阻都是正常的。故障在哪里？
- 1-22 在图 1-19 所示电路中，负载电阻被一个电压表取代，测量  $R_2$  两端电压。则电压表的输入电阻为多大时可以避免仪表的负载效应？

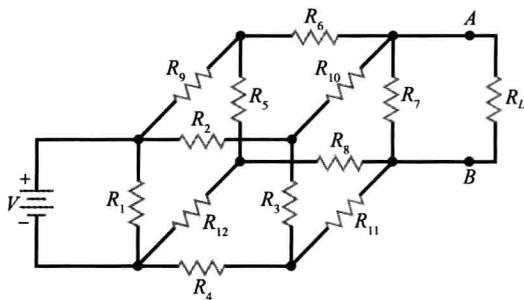


图 1-20

- 1-29 用一节电池和一个电阻设计一个电流源，要求该电流源对于 0~1kΩ 范围的负载电阻均能输出 1mA 的恒定电流。
- 1-30 设计一个分压器（类似图 1-19 所示电路），满足以下要求：电压源理想电压为 30V，负载开路电压为 15V，戴维南电阻不大于 2kΩ。
- 1-31 设计一个如图 1-19 所示的分压器。对于任何大于 1MΩ 的负载电阻均输出恒定的 10V 电压。其中，电压源理想电压为 30V。



# 第2章 半 导 体

为了理解二极管、晶体管和集成电路的工作原理，首先必须要了解半导体。半导体是一种既不是导体也不是绝缘体的材料，其中包含自由电子和空穴，空穴的存在使半导体具有特殊的性质。在本章中，将学习半导体、空穴和其他相关内容。

## 目标

在学习完本章之后，你应该能够：

- 在原子的层面识别良导体和半导体；
- 描述出硅晶体的结构；
- 列出两种载流子，指出导致两种载流子分别为多子的掺杂类型；
- 分别解释二极管在无偏置、正向偏置和反向偏置时  $pn$  结的状况；
- 描述由于二极管反向电压过大导致的击穿电流的类型。

## 关键术语

环境温度 (ambient temperature)	结型二极管 (junction diode)
雪崩效应 (avalanche effect)	结区温度 (junction temperature)
势垒 (barrier potential)	多数载流子 (majority carrier)
击穿电压 (breakdown voltage)	少数载流子 (minority carrier)
导带 (conduction band)	$n$ 型半导体 ( $n$ -type semiconductor)
共价键 (covalent bond)	$p$ 型半导体 ( $p$ -type semiconductor)
耗尽层 (depletion layer)	$pn$ 结 ( $pn$ junction)
二极管 (diode)	复合 (recombination)
掺杂 (doping)	反向偏置 (reverse bias)
非本征半导体 (extrinsic semiconductor)	饱和电流 (saturation current)
正向偏置 (forward bias)	半导体 (semiconductor)
自由电子 (free electron)	硅 (silicon)
空穴 (hole)	表面漏电流 (surface-leakage current)
本征半导体 (intrinsic semiconductor)	热能 (thermal energy)

## 2.1 导体

从原子结构可以判断：铜是良导体（见图 2-1）。铜原子核中包含 29 个质子（带正电荷），当它表现出电中性时，29 个电子（带负电荷）像行星环绕太阳一样环绕着原子核运动。电子位于不同的轨道（又称为层）上，两个电子在第一轨道，8 个电子在第二轨道，18 个电子在第三轨道，1 个电子在最外层的轨道。

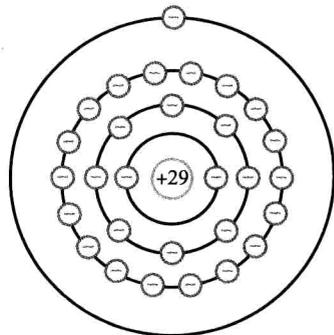


图 2-1 铜原子

### 2.1.1 稳定轨道

图 2-1 中带正电的原子核吸引环绕它运动的电子，而这些电子没有被拉进原子核的原因在于其圆周运动产生的（向外的）离心力，该离心力恰好等于原子核对电子的吸引力，因此轨道是稳定的。这类似于卫星在轨道上围绕地球的运行，在合适的速度和高度下，卫星就处在一个稳定的运行轨道中。

电子轨道越大，来自原子核的吸引力就越小。在较大的轨道上，电子运动的速度较慢，产生的离心力也相对较小。图 2-1 中所示的最外层的电子运动速度就非常慢，它几乎感受不到来自原子核的吸引力。

### 2.1.2 核心

对于电子来说，最外层轨道最重要，称为价带轨道，它决定了原子的电特性。为了强调价带轨道的重要性，将原子核与所有内层轨道定义为原子的核心。对于铜原子来说，其核心就是原子核（+29）及其内层的三个轨道（-28）。

铜原子的核心带有+1 的净电荷，这是由于它包含了 29 个带正电的质子和 28 个带负电的内层电子。图 2-2 有助于理解核心和价带轨道的关系。价电子在一个很大的轨道上，其核心的净电荷仅有+1，因此价电子受到的向内的拉力很小。

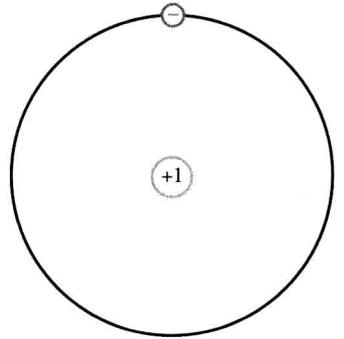


图 2-2 铜原子的核心图

### 2.1.3 自由电子

由于核心和价电子之间的吸引力很弱，外力可以轻易地使这个电子脱离铜原子。这就是价电子经常称为自由电子的原因，也是铜成为良导体的原因。微小的电压就可以使自由电子从一个原子流向另一个原子。最好的导体是银、铜和金，它们都可以用图 2-2 所示的核心图表示。

**例 2-1** 假设一个外力使图 2-2 中的价电子脱离铜原子，那么铜原子的净电荷是多少？如果外来一个电子进入到图 2-2 所示的价带轨道中，铜原子的净电荷又是多少？

**解：**价电子离开后，铜原子的净电荷变为+1。原子失去电子后带正电荷，带正电荷的原子称为正离子。

当外来的电子进入到图 2-2 所示的价带轨道中时，原子的净电荷变为-1。当价带轨道上有多余的电子时，原子带负电荷，称为负离子。 ◀

## 2.2 半导体

最好的导体（银、铜和金）只有一个价电子，而最好的绝缘体有 8 个价电子。半导体是电学特性介于导体和绝缘体之间的元素，最好的半导体具有 4 个价电子。

### 2.2.1 锗

锗是半导体的一个例子，它的价带轨道中有 4 个电子。在早期的半导体器件制造中，锗是唯一一种适合的材料，然而锗器件存在无法克服的致命缺陷（反向电流过大，这将在后面章节中讨论）。后来，由于另一种名为硅的半导体材料的实用化，使得大多数电子应用中已不再使用锗材料。

## 2.2.2 硅

硅是地球上除氧以外含量最丰富的元素。不过在半导体发展的早期，硅的提纯问题制约了它的应用。这个问题解决以后，硅的优点（稍后讨论）使它立刻成为了半导体材料的首选。没有硅，就没有现代电子、通信和计算机。

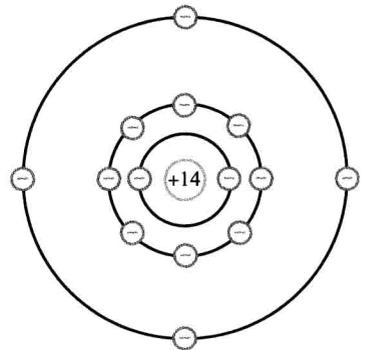
一个独立的硅原子有 14 个质子和 14 个电子。如图 2-3a 所示，第一层轨道中含有 2 个电子，第二层轨道中含有 8 个电子，其余 4 个电子位于价带轨道上。在图 2-3a 中，核心部分包含原子核内 14 个质子和最内两层轨道的 10 个电子，因此共带有 +4 的净电荷。

图 2-3b 显示的是硅原子的核心图，4 个价电子表明硅是半导体。

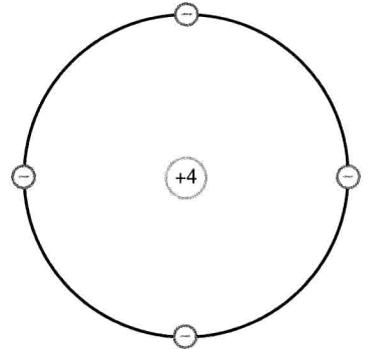
**知识拓展** 另一个常见的半导体元素是碳 (C)，它主要用来制作电阻。

**例 2-2** 如果图 2-3b 中的硅原子失去一个价电子，余下的净电荷是多少？如果它的价带轨道得到一个外来的电子，净电荷又是多少？

**解：**如果失去一个价电子，它将成为带 +1 电荷的正离子。如果得到一个外来的电子，它将成为带 -1 电荷的负离子。



a) 硅原子



b) 硅原子核心图

图 2-3 硅原子

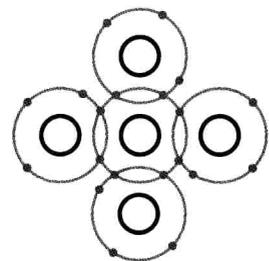
## 2.3 硅晶体

当硅原子结合成固体时，它们的排列具有规律性，称为晶体。每个硅原子和相邻的 4 个硅原子共享价电子，这样其价带轨道内便有 8 个价电子。例如，图 2-4a 显示了一个处于中心位置的硅原子和与其相邻的 4 个硅原子，其中带阴影的圆代表硅原子核心。虽然硅原子价带轨道原来只有 4 个价电子，而现在拥有了 8 个。

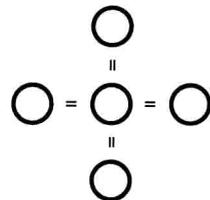
### 2.3.1 共价键

每个中间位置的硅原子都和每个相邻的硅原子共用一个电子，这样，中间位置的硅原子得到了 4 个额外的电子，使得其价带轨道填满 8 个电子。这些电子不再属于任何一个独立的硅原子，每个硅原子都和它相邻的原子共享电子，晶体内的所有硅原子均是如此。换句话说，硅晶体内的每个原子都有 4 个相邻原子。

在图 2-4a 中，每个原子核心都带有 +4 电荷。观察中间的原子核心和它右边的原子核心，这两个原子核心以大小相等方向相反的力吸引着位于它们中间电子对。这种力使硅原子结合在一起，就像拔河的两个队同时拉绳子，



a) 晶体中的原子具有 4 个相邻原子



b) 共价键

图 2-4 相邻原子和共价键

只要两边的拉力大小相等方向相反，他们就始终被连为一体。

由于图 2-4a 中的每个共用电子都被方向相反的力拉着，该电子就成为连接在两个原子之间的键，这种化学键称为共价键。共价键的一种更简单的表示方法如图 2-4b 所示。在一块硅晶体中有数十亿个硅原子，每个原子都拥有 8 个价电子。这些价电子构成的共价键维系着整个晶体，使得晶体非常稳固。

### 2.3.2 价带饱和

硅晶体内每个原子的价带轨道都拥有 8 个电子，这 8 个电子的化学稳定性使得硅材料呈现固态。没有人确切知道为什么所有元素的最外层轨道都趋向于拥有 8 个电子。如果一个元素最外层原来没有 8 个电子，那么这个元素的原子就趋向于与其他原子结合并共享电子，以使其最外层电子达到 8 个。

有些高等物理公式可以部分解释为什么 8 个电子可以使不同材料的化学性能稳定，但是没有人知道为什么 8 这个数会如此特殊。这是一个定律，就像万有引力定律、库仑定律及其他定律一样，我们可以观察到但却无法解释清楚。

当价带轨道填满 8 个电子后，它就饱和了，因为再也没有电子能够填充进这一轨道了。该定律表述为：

$$\text{价带饱和} \quad n = 8 \quad (2-1)$$

总之，价带轨道上最多不能超过 8 个电子。此外，这 8 个价电子也称为束缚电子，因为它们被原子紧紧地束缚住了。由于电子受束缚，硅晶体在室温下（大约 25℃）是接近理想状态的绝缘体。

**知识拓展** 一个空穴和一个电子分别带有  $1.6 \times 10^{-19}$  库仑的电荷量，但是极性相反。

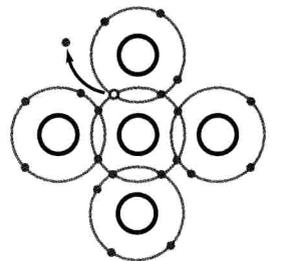
### 2.3.3 空穴

**环境温度**是指所处环境的空气温度。当环境温度高于绝对零度（-273℃）时，空气中的热能使硅晶体中的原子发生振动。环境温度越高，带来的机械振动越显著。拿起一个物体时所感觉到的热度就是原子振动的结果。

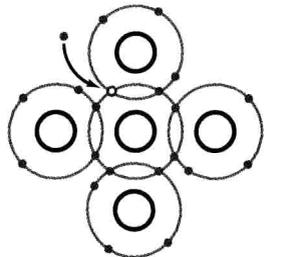
在硅晶体中，由于振动，原子偶尔会释放出一个价带轨道中的电子。这时，被释放出来的电子获得了足够多的能量可以运行在一个更大的轨道上，这个电子就是自由电子，如图 2-5a 所示。

电子的离开使得原来的价带轨道上留下了一个空缺，称为空穴（见图 2-5a）。由于电子的缺失形成了正离子，因此空穴表现出正电荷特性，会吸引并捕获其周边出现的电子。空穴的存在是导体与半导体的本质区别，空穴使得半导体可以实现导体无法实现的功能。

在室温下，热能只激发少量的空穴和自由电子。为了增加空穴和自由电子的数量，需要对晶体进行掺杂，这一内容将在后续章节中叙述。



a) 热激发产生自由电子和空穴



b) 自由电子和空穴的复合

图 2-5 自由电子和空穴

### 2.3.4 复合与寿命

在纯净的硅晶体中，热能激发产生相同数目的自由电子和空穴。自由电子在晶体中随机移动，有时会接近某个空穴，被它吸引并陷入其中。复合指的即是自由电子和空穴的结合（见图 2-5b）。

一个自由电子从产生到消失的这段时间被称为它的寿命。由于晶体纯度等因素的影响，寿命可以从几纳秒到几微秒不等。

### 2.3.5 要点

硅晶体中无时无刻不在发生着以下过程：

1. 热能激发产生一些自由电子和空穴。
2. 另一些自由电子和空穴复合。
3. 一些自由电子和空穴暂时存在，并等待复合。

**例 2-3** 如果一个纯净的硅晶体内部有 100 万个自由电子，那么有多少个空穴？如果环境温度升高，自由电子和空穴的数目将怎样变化？

**解：**如图 2-5a 所示，当热能激发产生一个自由电子的同时自动产生一个空穴，因此在纯净的硅晶体中自由电子和空穴的数目总是相等的。如果有 100 万个自由电子就对应着 100 万个空穴。

温度升高会使原子的振动更剧烈，这意味着有更多的自由电子和空穴被激发。但在任何温度下，纯净的硅晶体中总是含有等量的自由电子和空穴。 ◀

## 2.4 本征半导体

**本征半导体**是指纯净的半导体。如果晶体中的每个原子都是硅原子，那么这个硅晶体就是本征半导体。在室温下，硅晶体具有电绝缘特性，因为热能激发产生的自由电子和空穴数量很少。

### 2.4.1 自由电子的流动

图 2-6 所示是处于带电金属极板间的硅晶体的一部分。假设热能只激发了一个自由电子和一个空穴，该自由电子在一个较大的轨道里运动，且位于晶体的右侧。由于负极板的作用，这个自由电子受到排斥，向左移动。该自由电子可以从一个原子的大轨道迁移到另一个原子的大轨道上，直至到达正极板为止。

### 2.4.2 空穴的流动

观察位于图 2-6 左侧的空穴。该空穴对位于点 A 的价电子有吸引作用，使该价电子移动到这个空穴中。

当 A 点价电子向左移动时，A 点就产生了一个新的空穴，等效于原来的空穴向右移动。位于点 A 的新空穴又可以吸引和捕获另一个价电子。通过这种方式，价电子可以沿着图中标示的箭头方向移动。这意味着空穴沿着 A-B-C-D-E-F 路径向反方向移动，如同一个正电荷的运动。

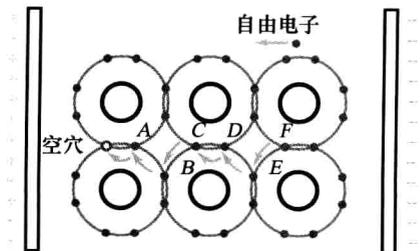


图 2-6 空穴在半导体中的流动

## 2.5 两种电流

图 2-7 显示的是本征半导体。它具有相同数目的自由电子和空穴，因为热能激发产生的自由电子和空穴总是成对出现的。外加电压驱使自由电子向左侧流动，空穴向右侧流动。当自由电子移动到晶体的最左端时，它们将进入到外部的导线中并流向电池的正极。

另一方面，电池负极的自由电子将流向晶体的右端，它们进入晶体并和流动到晶体右侧的空穴复合。这样，在半导体内部形成了自由电子和空穴的稳定流动。值得注意的是，在半导体之外没有空穴的流动。

在图 2-7 中，自由电子和空穴移动的方向相反。半导体中的电流可看成两种电流的组合效应：自由电子沿某方向形成的电流和空穴沿另一方向形成的电流。自由电子和空穴通常称为载流子，因为它们携带电荷从半导体内的一个位置移动到另一个位置。

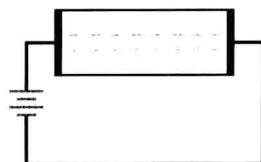


图 2-7 本征半导体含有等量的自由电子和空穴

## 2.6 半导体的掺杂

提高半导体导电性能的方法之一是掺杂。掺杂是指在本征晶体中掺入杂质原子从而改变其电导率。经过掺杂的半导体称为非本征半导体。

### 2.6.1 增加自由电子

如何对硅晶体进行掺杂的呢？第一步是将纯净的硅晶体熔化，这样可以断开共价键并将固态硅转化为液态。为了增加自由电子的数目，将“5 价原子”加入到熔化的硅中。5 价原子的价带轨道上有 5 个电子，如砷、锑和磷。由于这些材料会给硅晶体贡献出一个多余的电子，因此常称为施主杂质。

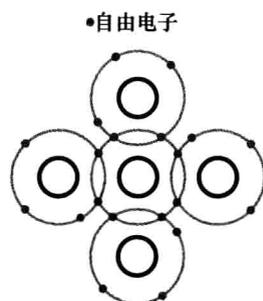
图 2-8a 所示是经掺杂的硅晶体在冷却后重新形成的固态晶体结构。一个 5 价原子在中心，周围是 4 个硅原子，每个中心原子与相邻的原子共享一个电子。但是由于每个 5 价原子有 5 个价电子，所以留下了一个多余的电子。因为价带轨道只能容纳 8 个电子，这个多余的电子将在更大的轨道上运动。或者说，这是一个自由电子。

硅晶体中的每个 5 价原子或施主原子都会产生一个自由电子。据此可控制掺杂半导体的电导率，掺杂越多，电导率就越大。半导体可以轻掺杂，也可以重掺杂。轻掺杂的半导体电阻率高，重掺杂的半导体电阻率低。

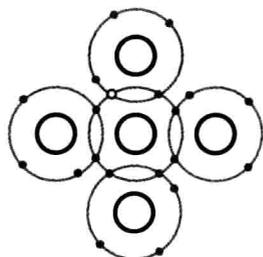
### 2.6.2 增加空穴

纯净硅晶体掺杂仅有 3 个价电子的三价杂质，如铝、硼和镓，可以获得额外的空穴。

图 2-8b 所示的晶体结构中一个 3 价原子在中心，周围是 4 个硅原子，每个硅原子与中心原子共享一个价电子。由于 3 价原子只有 3 个价电子，与每个相邻的原子共享一个电子后，价带轨道内只有 7 个电子。这意味着每个 3 价原子的价带轨道内



a) 通过掺杂获得更多的自由电子



b) 通过掺杂获得更多的空穴

图 2-8 掺杂

都存在一个空穴<sup>⊖</sup>。3价原子也称作受主原子，每个受主原子提供的空穴在复合期间可以接受一个自由电子。

### 2.6.3 必要常识

掺杂之前，首先要制造出纯净的半导体晶体，然后通过控制掺杂数量来精确控制半导体的性能。生产纯净的锗晶体比硅晶体要容易，所以最早的半导体器件是锗器件。后来，随着半导体加工工艺的进步，纯净的硅晶体开始实用化，并逐渐成为最流行且最有用的半导体材料。

**例 2-4** 一个掺杂半导体有  $1 \times 10^{10}$  个硅原子和  $1.5 \times 10^7$  个 5 价原子。如果环境温度是  $25^\circ\text{C}$ ，那么该半导体内的自由电子和空穴各有多少？

**解：**每个 5 价原子贡献一个自由电子，因此半导体内共有  $1.5 \times 10^7$  个因掺杂而产生的自由电子。比较而言，空穴几乎可忽略，因为该半导体内只有由热能激发产生的空穴。

**自测题 2-4** 在例 2-4 中，如果掺杂的是  $5 \times 10^6$  个 3 价原子，那么半导体内的空穴有多少？

## 2.7 两种非本征半导体

掺杂可以使半导体拥有额外的自由电子或空穴，因此掺杂半导体有两种类型。

### 2.7.1 *n* 型半导体

掺入 5 价杂质的半导体称作 ***n* 型半导体**，其中 *n* 代表负 (negative) 的意思。图 2-9 是 *n* 型半导体的示意图。由于 *n* 型半导体中的自由电子数量比空穴多，自由电子称作**多数载流子<sup>⊖</sup>**，而空穴称作**少数载流子<sup>⊕</sup>**。

在图 2-9 中，外加电压使得自由电子向左移动而空穴向右移动。自由电子流向晶体的左端，然后进入导线到达电池的正极。而当空穴移动到晶体右端时，外部电路的自由电子就会流进半导体与之复合。

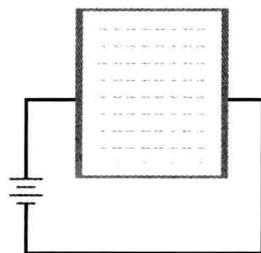


图 2-9 *n* 型半导体含有大量自由电子

### 2.7.2 *p* 型半导体

掺入 3 价杂质的半导体称作 ***p* 型半导体**，其中 *p* 代表正 (positive) 的意思。图 2-10 是 *p* 型半导体的示意图。由于空穴的数量比自由电子多，所以空穴成为多子，而自由电子成为少子。

在图 2-10 中，外加电压使得自由电子向左移动而空穴向右移动。由于自由电子的数量很有限，所以它们形成的电流对电路几乎没有影响。而当空穴移动到晶体右端时，就会与来自外电路的自由电子复合。

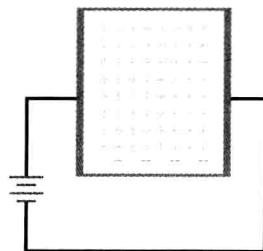


图 2-10 *p* 型半导体含有大量空穴

⊖ 按照定义，空穴应带有正电荷。此处的“空位”是电中性的，不带电荷，所以不是严格意义的空穴。当相邻共价键中的电子填补该“空位”时，受主原子电离，同时在共价键中产生一个真正的空穴。——译者注

⊕ 为表述简捷，后文均简称“多子”。——译者注

⊖ 为表述简捷，后文均简称“少子”。——译者注

## 2.8 无偏置的二极管

单独的  $n$  型和  $p$  型半导体的用途类似于碳电阻。然而对半导体进行掺杂后，使得晶体的一半呈  $p$  型，另一半呈  $n$  型，便产生了新的性能。

$p$  型半导体和  $n$  型半导体的交界处叫作  $pn$  结。二极管、晶体管和集成电路的发明都源于  $pn$  结，只有理解了  $pn$  结，才能理解所有类型的半导体器件。

### 2.8.1 无偏置的二极管

如前所述，每个掺杂在硅晶体中的 3 价原子都会产生一个空穴。因此可以用图 2-11 中左侧的图来表示  $p$  型半导体，这里每个带圆圈的负号代表一个 3 价原子，正号代表位于该原子价带轨道上的空穴。

类似地，可以用图 2-11 中右侧的图表示含 5 价原子和自由电子的  $n$  型半导体。每个带圆圈的负号代表一个 5 价原子，正号代表它贡献出的自由电子。这里特别要注意的是，每块半导体材料都是电中性的，因为正号数量和负号数量相等。

可将一块晶体材料的一边做成  $p$  型，另一边做成  $n$  型，如图 2-12 所示。 $pn$  结就在  $p$  型和  $n$  型区域的交界处，**结型二极管**是  $pn$  结晶体的别称。这里的**二极管** (diode) 是两个电极的缩写，其中“di”代表“二”。

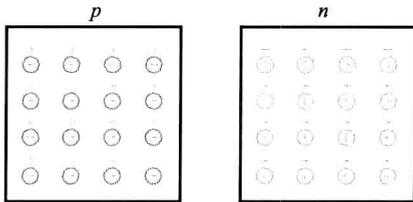


图 2-11 两种类型的半导体

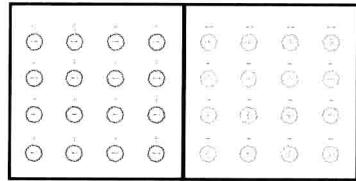


图 2-12  $pn$  结

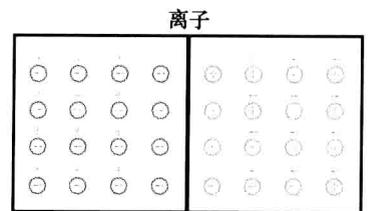
### 2.8.2 耗尽层

图 2-12 中  $n$  区的自由电子由于互相排斥的作用，有向各个方向扩散的趋势。有些自由电子会扩散到结的另一边，当自由电子进入  $p$  区后，就成为少子。由于周围有大量的空穴，少子的寿命很短，一个自由电子进入  $p$  区不久便会与某个空穴复合。这时，该空穴消失，自由电子则成为价电子。

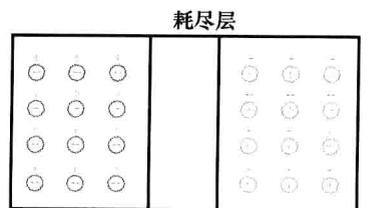
每当一个自由电子扩散并穿越结区，就会产生一个离子对。电子离开  $n$  区时，留下一个缺少了一个负电荷的 5 价原子，使之电离为正离子。当扩散到  $p$  区的电子陷入某个空穴后，该空穴消失，使得这个捕获它的 3 价原子成为负离子。

图 2-13a 给出了结两侧的正离子和负离子的情况，带圆圈的正号代表正离子，带圆圈的负号代表负离子。由于共价键的作用，这些离子被固定在晶体结构中，它们不能像自由电子或空穴那样移动。

在结附近的正负离子对称作偶极子。一个偶极子的产生意味着一个自由电子和一个空穴从载流子中消失。随着



a) 结区离子的产生



b) 耗尽层

图 2-13 耗尽层的形成

偶极子数目的增多，结区附近的载流子匮乏，这部分没有载流子的区域称为耗尽层（见图 2-13b）。

### 2.8.3 势垒

每个偶极子的正负离子之间都有一个电场。因此，如果外来的自由电子进入耗尽层，电场力将试图把它们推回  $n$  区。电场强度随着穿越过去的电子数的增加而增强，直至达到平衡。对于一阶近似，可认为是电场力阻止了电子穿越结区的扩散运动。

在图 2-13a 中，离子之间的电场所对应的电势差称作**势垒**。在  $25^{\circ}\text{C}$  时，锗二极管的势垒约为  $0.3\text{V}$ ，硅二极管的势垒约为  $0.7\text{V}$ 。

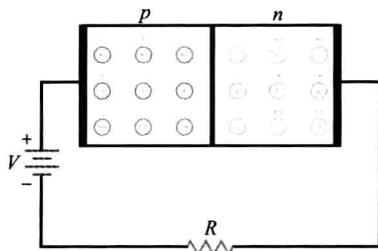
## 2.9 正向偏置

图 2-14 中所示的二极管与直流电源连接，电源的负极与  $n$  区相连，正极与  $p$  区相连，这种连接方式称为**正向偏置**。

### 2.9.1 自由电子的运动

在图 2-14 中，电池驱使自由电子和空穴向结区移动。如果电池电压低于势垒电压，自由电子就没有足够的能量通过耗尽层。当它们进入耗尽层时，离子会把它们推回  $n$  区，因此二极管中没有电流。

当直流电压源的电压大于势垒电压时，自由电子拥有足够的能量通过耗尽层并与空穴复合。可以想象  $p$  区所有的空穴向右移动， $n$  区所有的自由电子向左移动，这些极性相反的电荷在结附近相遇并复合。由于自由电子不断地进入二极管的右端，空穴也在二极管的左端不断产生，因此二极管中有持续的电流流过。



Multisim 图 2-14 正向偏置

### 2.9.2 单个电子的运动

下面观察一个电子通过整个电路的过程。一个自由电子离开电池的负极，进入二极管的右端，穿过  $n$  区并到达  $pn$  结。当电池电压大于  $0.7\text{V}$  时，这个自由电子具有足够的能量穿越耗尽层。当它到达  $p$  区不久，便会与某个空穴复合。

此时，自由电子变成了一个价电子，并继续向左移动，从一个空穴迁移到另一个空穴，直至到达二极管的左端。当它离开二极管的左端时，便产生了一个新的空穴，整个过程又重新开始了。由于有数以亿计的电子都在进行着同样的行程，从而形成了通过二极管的连续电流。图 2-14 中的串联电阻用来限制正向电流的大小。

### 2.9.3 必要常识

在正向偏置二极管中，电流很容易形成。只要外加电压大于势垒电压，电路中就会有较大的连续电流。就是说，只要电源电压大于  $0.7\text{V}$ ，硅二极管中就会产生连续的正向电流。

## 2.10 反向偏置

把直流电源转换一个方向，得到如图 2-15 所示电路。此时，电池负极连接  $p$  区，正

极连接 $n$ 区，这种连接方式称为**反向偏置**。

### 2.10.1 耗尽层变宽

由于电池负极吸引空穴，正极吸引自由电子，所以自由电子和空穴会从 $pn$ 结附近流走，使得耗尽层变宽。

图 2-16a 中的耗尽层有多宽呢？当空穴和自由电子从结中向外移动时，新产生的离子使耗尽层的电势差增加，耗尽层越宽电势差就越大。当电势差与外加反向电压相等时，耗尽层就不再变宽了，这时电子和空穴不再从结中向外移动。

有时用阴影区域来表示耗尽层，如图 2-16b 所示。这个阴影区域的宽度正比于反向电压。随着反向电压的增大，耗尽层变宽。

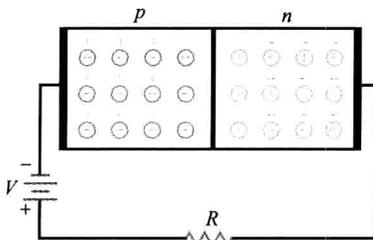


图 2-15 反向偏置

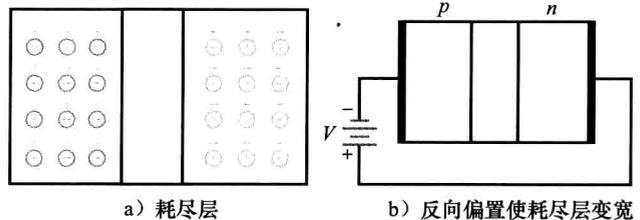


图 2-16 反向偏置时的耗尽层

### 2.10.2 少子电流

在耗尽层稳定后还会有电流存在吗？在反向偏置下还会存在一个很小的电流。热能会持续地激发产生成对的自由电子和空穴，即结的两侧都有少量的少子存在，其中的大部分会与多子复合。但耗尽层中的少子有可能存活足够长的时间并穿过结区，这时，就会有一小股电流流过外部电路。

该过程如图 2-17 所示。假设热能使结附近产生一个自由电子和一个空穴，耗尽层把自由电子推向右侧，迫使一个电子离开晶体的右端。而空穴则被推向左侧，使得一个电子从晶体的左端进入并陷入空穴。由于耗尽层中存在持续的热激发产生的电子-空穴对，外电路中就形成了一个连续的小电流。

由热激发产生的少子所形成的反向电流称为**饱和电流**。在公式中，饱和电流的符号是  $I_s$ 。饱和的意思是这个电流最大就是热激发产生的少子电流，即反向电压的增加不会增加由热激发产生的少子数量。

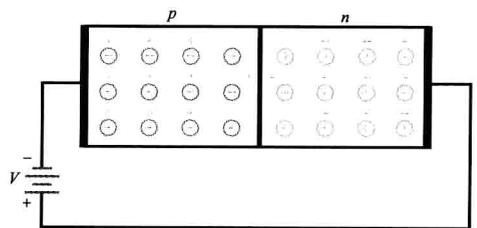


图 2-17 耗尽层中热激发产生的自由电子和空穴形成少子的反向饱和电流

### 2.10.3 表面漏电流

在反偏二极管中，除了由热激发产生的少子电流外，在晶体的表面还存在着一个小电流，称为**表面漏电流**，它是由于晶体中的表面杂质和缺陷造成的。

### 2.10.4 必要常识

二极管中的反向电流由少子电流和表面漏电流组成。在大多数应用中，硅二极管中的反向电流很小，甚至可以忽略。所以，在反向偏置的硅二极管中，电流近似为零。

## 2.11 击穿

二极管有最大额定电压。二极管在损毁之前所能承受的最大反向电压是有限制的。如果持续地增加二极管的反向电压，最终将会达到二极管的**击穿电压**。对于很多二极管来说，击穿电压至少是 50V。击穿电压可以在二极管的数据手册中查到，数据手册将在第 3 章讨论。

一旦达到击穿电压，耗尽层会突然出现大量的少数载流子，从而使二极管导通电流过大。

这些载流子是在较高的反向电压下发生的**雪崩效应**所产生的（见图 2-18）。正常反偏电压下少子电流很小，当电压增大时，迫使少子移动速度加快并和晶体内的原子发生碰撞。当这些少子具有足够高的能量时，就可以把价电子撞击出来成为自由电子。这些新产生的少子和原有的少子一起继续撞击其他原子，整个过程呈几何级数增长。因为一个自由电子释放一个价电子后就变成了两个自由电子，而这两个自由电子又可以释放另外两个价电子变成 4 个自由电子，这个过程一直持续使反向电流变得非常大。

图 2-19 是放大的耗尽层示意图。反偏电压使得自由电子向右运动，电子在运动中获得一定速度。反向电压越大，电子运动得就越快。如果这些高速电子具有足够的能量，能够把第一个原子的价电子撞击到大轨道上，就会形成两个自由电子。这两个自由电子继续加速，进一步释放出另外两个电子。这样，少子的数量会急剧增加，从而使二极管导通电流过大。

二极管的击穿电压取决于这个二极管的掺杂浓度。整流二极管（最普通的类型）的击穿电压通常大于 50V。表 2-1 给出了正向偏置和反向偏置二极管的区别。

**知识拓展** 高于二极管的击穿电压并不意味着二极管必然被损毁，只要反向电压和反向电流的乘积没有超过二极管的额定功率，则二极管可完全恢复。

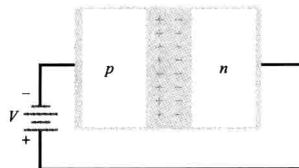


图 2-18 雪崩效应使耗尽层产生大量的自由电子和空穴

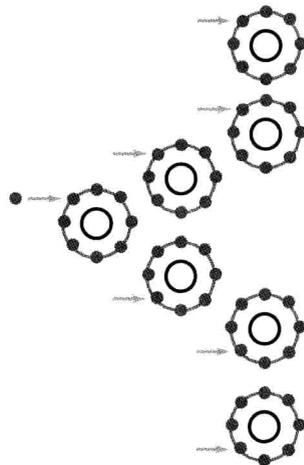


图 2-19 雪崩过程的几何级数增长：1，2，4，8，…

表 2-1 二极管偏置

	正向偏置	反向偏置
$V_s$ 极性	(+) 连接 p 区 (-) 连接 n 区	(-) 连接 p 区 (+) 连接 n 区
电流	当 $V_s > 0.7V$ ，正向电流大	当 $V_s <$ 击穿电压，反向电流（饱和电流和表面漏电流）小
耗尽层	窄	宽

## 2.12 能级

为了更好地实现近似，可以用轨道的大小来区分电子的能量。即可以把图 2-20a 中的每个轨道半径与图 2-20b 中的能级对应。处于最小轨道的电子在第一个能级上，处于第二轨道的电子在第二个能级上，以此类推。

### 2.12.1 大轨道具有较高能级

由于电子被原子核所吸引，电子需要额外的能量才能跃迁到更大的轨道。当一个电子从第一轨道跃迁到第二轨道时，它获得了相对于原子核的势能。能使电子跃迁到更高能级的外力包括热、光和电压。

例如，假设一种外力把图 2-20a 中的电子从第一能级提升到第二能级，该电子就具有了更大的势能，因为它离原子核更远了（见图 2-20b）。如同地球上空的物体，位置越高，相对地球的势能就越大。一旦释放，该物体的下落距离更长，当它撞击地面时也会做更多的功。

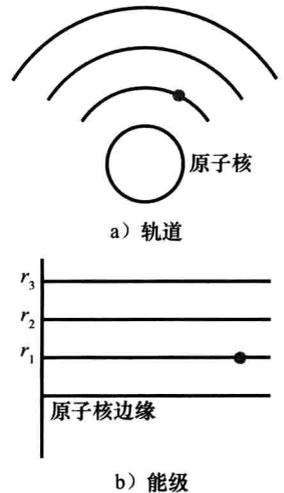


图 2-20 能级和轨道大小成正比

### 2.12.2 回落电子的发光辐射

当一个电子移动到较大轨道上后，它有可能回落到较低的能级。此时，电子将以热、光或者其他辐射形式释放多余的能量。

对于一个发光二极管（LED），外加电压把电子提升到较高能级。当这些电子回落到较低能级时，就会发光。根据所用材料的不同，LED 可发出红光、绿光、橙光或蓝光。有些 LED 发出红外光（不可见的），可用于防盗警报系统。

### 2.12.3 能带

当一个硅原子被孤立时，电子的运行轨道只受孤立原子电荷的影响，形成如图 2-20b 所示的能级。然而，当硅原子处于晶体中时，每个电子的轨道也会同时受其他许多原子电荷的影响。由于每个电子在晶体中都有互不相同的位置，任何两个电子周围的电荷都不会是完全一样的。因此每个电子的轨道都是不同的，或者说每个电子都具有不同的能级。

图 2-21 是能级示意图。由于没有任何两个电子具有完全相同的周边电荷，所以处于第一轨道的电子能级略有不同。晶体中有数十亿的第一轨道电子，微小的能级差别就形成了一簇能量或称能带。类似地，数十亿具有微小能量差别的第二轨道电子形成了第二能带，其他能带的情况类似。

另外，热能会激发出一些自由电子和空穴。空穴留在价带，而自由电子会到达相邻的较高能带，这个能带称为导带。如图 2-21 所示，导带中有一些自由电子，而价带中有一些空穴。当开关闭合时，纯净半导体中存在小电流，其中自由电子在导带中

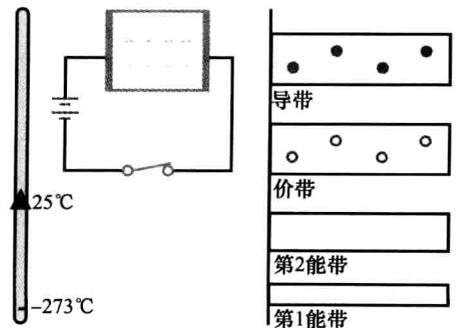


图 2-21 本征半导体及其能带

流动，空穴在价带中流动。

**知识拓展** 对于  $n$  型半导体和  $p$  型半导体，温度的上升会使其少子和多子有相同数量的增加。

### 2.12.4 $n$ 型半导体能带

图 2-22 所示是  $n$  型半导体的能带。多子是位于导带的自由电子，少子是位于价带的空穴。当开关闭合时，多子向左端流动，少子向右端流动。

### 2.12.5 $p$ 型半导体能带

图 2-23 所示是  $p$  型半导体的能带。与  $n$  型半导体正好相反，现在的多子是位于价带的空穴，少子是位于导带的自由电子。当开关闭合时，多子向右端流动，少子向左端流动。

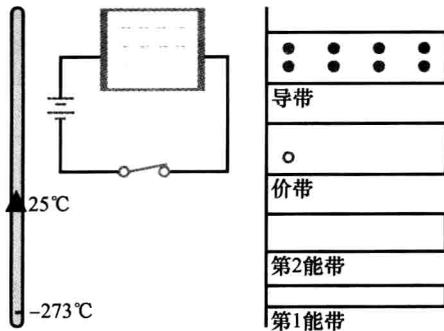


图 2-22  $n$  型半导体及其能带

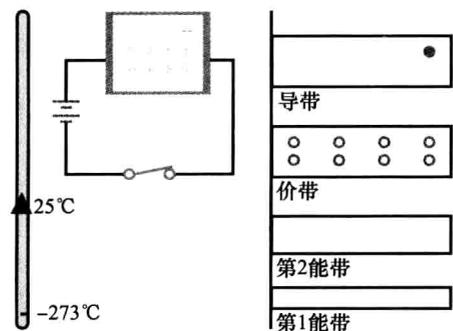


图 2-23  $p$  型半导体及其能带

## 2.13 能垒

为了解更高级的半导体器件，需要弄懂能级是如何控制  $pn$  结的。

### 2.13.1 扩散之前

突变结（材料的  $p$  区和  $n$  区之间是突变的）的能带图是怎样的？图 2-24a 给出了电子在扩散穿越  $pn$  结之前的能带， $p$  区的价带有大量空穴， $n$  区的导带有大量自由电子。然而为什么  $p$  区的能带要略高于  $n$  区的能带呢？

$p$  区有核心电荷为  $+3$  的三价原子（如图 2-24b 所示）， $n$  区有核心电荷为  $+5$  的 5 价原子（如图 2-24c 所示）。 $+3$  价原子核对电子的吸引力显然不如  $+5$  价原子核强，因此 3

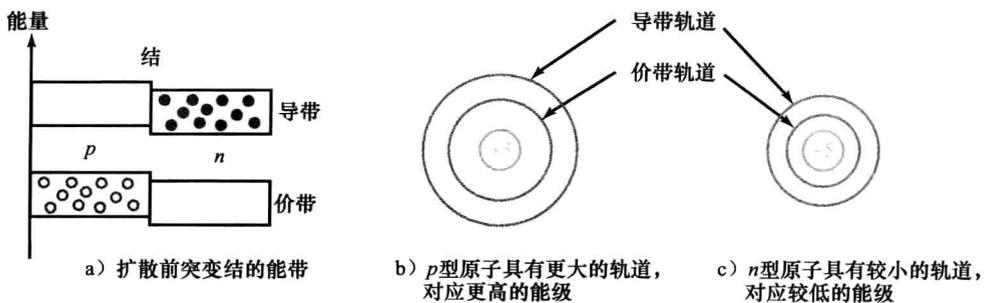


图 2-24 理想突变结

价原子 ( $p$  型) 比 5 价原子 ( $n$  型) 的轨道略大。这就是图 2-24a 中  $p$  型能带比  $n$  型能带略高的原因。

图 2-24a 中的突变结是理想化模型, 因为  $p$  型区不可能在  $n$  型区边缘突然消失。实际二极管中, 材料的不同类型之间是渐变的。因此, 图 2-25a 是一个更接近实际的二极管能带图。

### 2. 13. 2 平衡状态

在二极管最初形成时并没有耗尽层 (见图 2-25a), 此时, 自由电子将扩散穿越结区。从能级的角度来看, 就是靠近  $n$  型导带顶部的电子穿过了结, 之后会与空穴复合。或者说, 电子从导带落回到价带。这时它会发热、发光或发生其他形式的辐射。这种复合不仅产生了耗尽层, 而且由于增大了  $p$  区能带和  $n$  区能带间的能级差而改变了结的能级。

图 2-25b 是耗尽层形成后的能带图。 $p$  区能带相对于  $n$  区能带升高了, 每个  $p$  区能带的底部都与  $n$  区能带的顶部相等。这意味着  $n$  区的电子不再具有足够的能量穿过结了。

下面简单解释一下为什么  $p$  区能带会上升。图 2-25c 所示是在扩散发生之前 3 价原子周围的导带轨道。当一个电子扩散穿过结, 便落入了 3 价原子的空穴之中 (见图 2-25d)。这个处于价带轨道的多余电子将导带轨道推到距离 3 价原子更远的地方, 如图 2-25d 所示。因此任何新来到该区域的电子都需要比之前的电子具有更大的能量才能运行在导带轨道上。更大的导带轨道意味着能级的增加, 所以, 在耗尽层建立之后  $p$  区能带相对于  $n$  区上升了。

在平衡状态下,  $n$  区的导带电子运行的轨道不够大, 不能和  $p$  区的轨道相匹配 (见图 2-25b)。换言之,  $n$  区的电子没有足够的能量穿越结。对于一个试图扩散并穿越结的电子来说, 它必须经过的路径很像一个屏障, 这就是能垒 (见图 2-25b)。除非从外界得到能量, 否则电子没有足够的能量越过这个能垒。外界能源可以是电压源, 也可以是热、光或者其他形式的辐射。可以把能垒理解为是价电子在穿越耗尽层之前必须被“提升”到的更高能级。

### 2. 13. 3 正向偏置

正向偏置降低了能垒的高度 (如图 2-26 所示), 换句话说, 电池增加了自由电子的能量。这使得  $n$  区的能带升高, 因此, 自由电子有了足够的能量进入  $p$  区。进入  $p$  区不久, 它便会陷入空穴中 (路径 A)。之后作为价电子, 它们继续向晶体的左端移动, 相当于  $p$  区的空穴向结的方向移动。

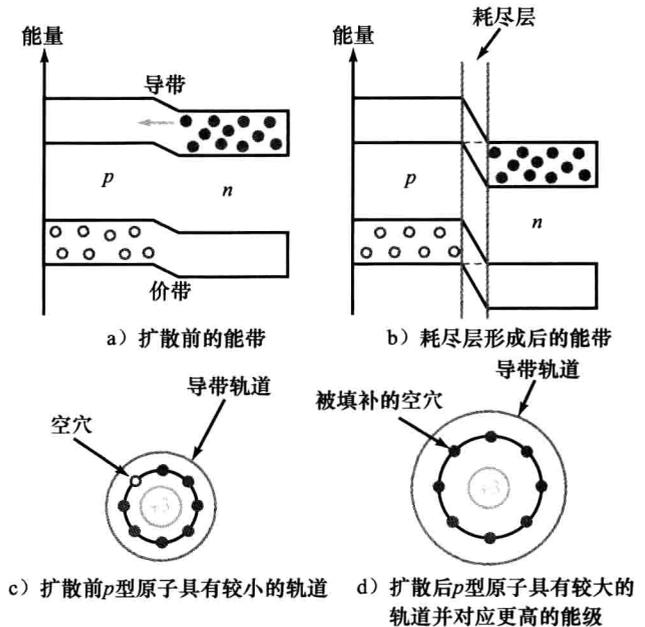


图 2-25 平衡态的能级变化

如图 2-26 所示,有些空穴进入  $n$  区。在这种情况下,导带电子会按照路径  $B$  与空穴复合。无论复合发生在什么位置,结果都是一样的,即有稳定的自由电子流向着结的方向运动并陷入结附近的空穴中。被捕获的电子(现在是价电子)通过空穴稳定持续地穿过  $p$  区向左移动。这样就得到了一个流过二极管的稳定而连续的电子流。

当自由电子从导带落入价带时,它们会以热或光的形式释放出多余的能量。对于普通二极管,释放的是热能,利用价值不大。但是对于发光二极管(LED),它可以辐射出红色、绿色、蓝色或者橙色的光。发光二极管作为可视指示器被广泛应用于电子仪器、计算机键盘和其他电子设备中。

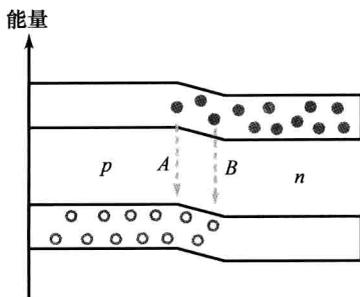


图 2-26 正向偏置给予电子更多能量,相当于提升其能级

## 2.14 势垒与温度

**结区温度**是指二极管内部  $pn$  结处的温度。而**环境温度**则是指二极管周围空气的温度。当二极管导通时,由于复合会产生热量,使得结区温度高于环境温度。

势垒的高低取决于结区温度。结温升高,使得掺杂区域产生更多的自由电子和空穴。当这些电荷扩散至耗尽区,则耗尽区会变窄。这就意味着结区温度升高使势垒下降。

在继续讨论前,需要定义一个符号:

$$\Delta \quad \text{变化量} \quad (2-2)$$

希腊字母  $\Delta$  (delta) 代表变化量的意思。例如,  $\Delta V$  代表电压的变化量,而  $\Delta T$  代表温度的变化量。比值  $\frac{\Delta V}{\Delta T}$  就是电压的变化量除以温度的变化量。

可用如下规则来估算势垒变化:硅二极管势垒按照每提升  $1^\circ\text{C}$  下降  $2\text{mV}$  的速率变化。即:

$$\frac{\Delta V}{\Delta T} = -2\text{mV}/^\circ\text{C} \quad (2-3)$$

重新整理为:

$$\Delta V = (-2\text{mV}/^\circ\text{C})\Delta T \quad (2-4)$$

通过这些公式,可以计算势垒在任何结区温度下的值。

**例 2-5** 假设环境温度  $25^\circ\text{C}$  时硅二极管的势垒为  $0.7\text{V}$ ,当结区温度为  $100^\circ\text{C}$  和  $0^\circ\text{C}$  时,势垒电压分别是多少?

**解:**当二极管的结温是  $100^\circ\text{C}$  时,势垒的变化为:

$$\Delta V = (-2\text{mV}/^\circ\text{C})\Delta T = (-2\text{mV}/^\circ\text{C}) \times (100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = -150\text{mV}$$

也就是说,势垒比室温条件下低了  $150\text{mV}$ ,所以:

$$V_B = 0.7\text{V} - 0.15\text{V} = 0.55\text{V}$$

当结温是  $0^\circ\text{C}$  时,势垒的变化量为:

$$\Delta V = (-2\text{mV}/^\circ\text{C})\Delta T = (-2\text{mV}/^\circ\text{C}) \times (0^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) = 50\text{mV}$$

也就是说势垒比室温条件下高了  $50\text{mV}$ ,所以:

$$V_B = 0.7\text{V} + 0.05\text{V} = 0.75\text{V}$$

**自测题 2-5** 例 2-5 中,当结区温度为  $50^\circ\text{C}$  时,势垒电压为多少?

## 2.15 反偏二极管

下面对反向偏置二极管做进一步的讨论。

### 2.15.1 瞬态电流

耗尽层宽度会随着反偏电压的变化而变化。当反向偏置电压增大时，空穴和电子都向远离结的方向移动。当空穴和电子离开结区之后，留下了正负离子，因此耗尽层变宽了。反偏电压越高，耗尽层就越宽。耗尽层变宽时，会有电流向外部电路流动。当耗尽层停止增长后，这个瞬态电流便减小为零。

瞬态电流的持续时间取决于外部电路的  $RC$  时间常数。通常是在纳秒量级，因此当频率低于  $10\text{MHz}$  时，可以忽略瞬态电流的影响。

### 2.15.2 反向饱和电流

由前面的讨论可知，正向偏置电压使二极管的  $n$  区能带升高，从而使自由电子能够穿过结区。反向偏置电压的作用相反，它使耗尽层变宽，并使  $n$  区能带降低，如图 2-27 所示。

下面从能量的观点来分析反向饱和的情况。假设热能在耗尽层激发了一个空穴和一个自由电子，如图 2-27 所示。在  $A$  点的自由电子和在  $B$  点的空穴可以形成反向电流。由于是反向偏置，自由电子会向右移动，从而迫使一个电子从二极管的右端流出。类似地，空穴会向左移动， $p$  区多出来的空穴会使外部电路的一个电子进入晶体的左端。

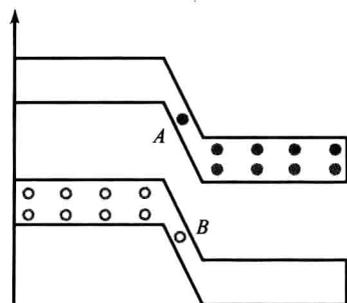


图 2-27 热能在耗尽层激发产生自由电子和空穴

结区温度越高，饱和电流就越大。下面这个估计方法非常有用：温度每升高  $10^\circ\text{C}$ ， $I_s$  增加一倍。即：

$$(\Delta I_s / I_s) \times 100\% = (\Delta T / 10^\circ\text{C}) \times 100\% \quad (2-5)$$

如果温度变化小于  $10^\circ\text{C}$ ，可以用下面这个等效的式子计算：

$$(\Delta I_s / I_s) \times 100\% = (\Delta T / 1^\circ\text{C}) \times 7\% \quad (2-6)$$

即结区温度每增加  $1^\circ\text{C}$ ，电流增加  $7\%$ ，这个  $7\%$  的求解方法是  $10^\circ\text{C}$  法则的近似。

### 2.15.3 硅和锗的比较

在硅原子中，价带和导带的间距称为能隙。当热激发产生自由电子和空穴时，需要给价电子足够的能量使其跃迁到导带。能隙越大，热激发产生电子-空穴对就越困难。幸运的是，硅的能隙较大，也就是说，在常温下热激发不会产生很多电子-空穴对。

在锗原子中，价带离导带很近，即锗的能隙比硅的小很多。因此在锗器件中，热激发产生更多的电子-空穴对，这就是前文提及的锗的最大缺陷。过大的反向电流阻碍了锗在现代计算机、电子产品和通信电路中的广泛应用。

### 2.15.4 表面漏电流

2.10 节对表面漏电流进行了简单的讨论，表面漏电流是在晶体表面流动的反向电流，下面解释存在表面漏电流的原因。假设图 2-28a 所示的顶层和底层的原子位于晶体表面，由于这些原子缺少相邻原子，它们的价带轨道中只有 6 个价电子，这表明每个表面原子有两个空

穴<sup>⊖</sup>。这些在晶体表面的空穴如图 2-28b 所示,可以看到晶体的表面犹如一个 *p* 型半导体。因此电子可以进入晶体的左端,穿越表面的空穴,从晶体的右端离开,这样就在晶体表面形成了一个小的反向电流。

表面漏电流与反偏电压成正比,若将反偏电压加倍,表面漏电流  $I_{sl}$  也会加倍。表面漏电阻可定义为:

$$R_{sl} = \frac{V_R}{I_{sl}} \quad (2-7)$$

**例 2-6** 硅二极管在 25°C 时的饱和电流为 5nA, 100°C 时的饱和电流是多少?

**解:** 温度变化量为:

$$\Delta T = 100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 75^\circ\text{C}$$

由式 (2-5) 可知,温度从 25°C 变化到 95°C,电流倍增了 7 次:

$$I_s = 2^7 \times 5\text{nA} = 640\text{nA}$$

温度从 95°C 到 100°C 还有 5°C 的变化,由式 (2-6) 得:

$$I_s = 1.07^5 \times 640\text{nA} = 898\text{nA}$$

**自测题 2-6** 例 2-6 中的二极管在 80°C 时的饱和电流是多少?

**例 2-7** 如果 25V 反偏电压下的表面漏电流是 2nA, 则 35V 反偏电压下的表面漏电流是多少?

**解:** 有两种方法求解。第一种方法,首先计算表面漏电阻:

$$R_{sl} = \frac{25\text{V}}{2\text{nA}} = 12.5 \times 10^9 \Omega$$

然后再算出 35V 时的表面漏电流,为

$$I_{sl} = \frac{35\text{V}}{12.5 \times 10^9 \Omega} = 2.8\text{nA}$$

第二种方法,由于表面漏电流正比于反偏电压,所以

$$I_{sl} = \frac{35\text{V}}{25\text{V}} \times 2\text{nA} = 2.8\text{nA}$$

**自测题 2-7** 在例 2-7 中,反偏电压为 100V 时的表面漏电流是多少?

## 总结

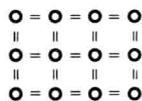
**2.1 节** 一个电中性的铜原子的最外层轨道中只有一个电子,这个电子可以比较容易地从原子中释放出来,因此称为自由电子。微小的电压即可使自由电子从一个铜原子流向下一个铜原子,所以铜是良导体。

**2.2 节** 硅是应用最广泛的半导体材料。一个孤立的硅原子的价带轨道上有 4 个电子。价带轨道上的电子数是决定导电性的关键。导体有 1 个价电子,半导体有 4 个价电子,绝缘体有 8 个价电子。

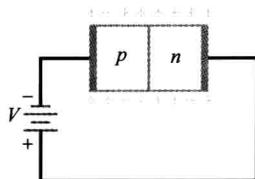
**2.3 节** 处于硅晶体内的每个硅原子有 4 个价电子,还有与相邻硅原子共享的 4 个电子。在室温下,纯净硅晶体中只有少量由热激发产生的自由电子和空穴。一个自由电子和空穴从产生到复合所经历的时间称为寿命。

**2.4 节** 本征半导体就是纯净半导体。当对本征半导体外加电压时,自由电子流向电池正极,空穴流向电池负极。

**2.5 节** 在本征半导体中存在两种载流子的流动。一种是较大轨道(导带)上的自由电子形成



a) 晶体表面的原子没有相邻原子



b) 晶体表面含有空穴

图 2-28 晶体表面的情况

⊖ 此结论对应 4 个顶角原子。其余顶层和底层的原子应有 7 个价电子, 1 个空穴。——译者注

## 关于此电子书的说明

本人由于一些便利条件，可以为您提供各种中文图书的PDF电子版，保证质量清晰。只要图书不是太新，文学、法律、计算机、经济、医学、工业、学术等方面的图书，都可以帮您制作，如果您有这方面的需求，可以通过QQ联系我，我的QQ号是 [3330972307](#)。