



国际机械工程先进技术译丛

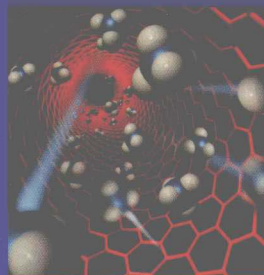
# 纳米物理 与纳米技术

纳米科学中的现代概念介绍  
(原书第2版)

## Nanophysics and Nanotechnology

An Introduction to Modern Concepts  
in Nanoscience, Second, Updated and  
Enlarged Edition

(美) Edward L. Wolf 编著  
薛冬峰 等译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



国际机械工程先进技术译丛

# 纳米物理与纳米技术

纳米科学中的现代概念介绍(原书第2版)

Nanophysics and Nanotechnology  
An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience,  
Second, Updated and Enlarged Edition



机械工业出版社

本书研究在纳米和亚纳米尺度下的物理现象,特别侧重于对所有潜在应用技术中的最小尺度的重要性的研究。本书从磁学和量子学的角度,围绕“纳米电子学”做了说明,对现有的成功硅技术则叙述了涉及量子计算的可能性;介绍了关于碳纳米管的电子学新应用;在超导性方面,通过具体实例的介绍帮助理解以低功耗和高效率著称的“快速单通量量子”计算机逻辑设备。本书提供了一些新领域必需的基本概念,也包括了纳米科技的一些最新进展。

Nanophysics and Nanotechnology: An Introduction to Modern Concepts in Nanoscience, Second, Updated and Enlarged Edition by Edward L. Wolf/ISBN: 978-3-527-40651-7

Copyright©2006 by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. Authorized translation from English language edition published by WILEY-VCH. All rights reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese(Simplified Characters)language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书封面贴有 Wiley 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2007-4483

### 图书在版编目(CIP)数据

纳米物理与纳米技术/(美)沃尔夫(Wolf,E.L.)编著;  
薛冬峰等译. —北京:机械工业出版社,2010.1

(国际机械工程先进技术译丛)

书名原文:Nanophysics and Nanotechnology

ISBN 978-7-111-29505-1

I. 纳… II. ①沃…②薛… III. 纳米材料—物理学  
IV. TB383.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 003241 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:高依楠 封面设计:鞠杨

责任校对:李婷 责任印制:乔宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2010 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·17.5 印张·337 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-29505-1

定价:51.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

销售二部:(010)88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

# 序 言

本书适用于非专业人士，这里的纳米物理学是研究在纳米和亚纳米尺度下的物理现象，特别是对所有潜在应用技术中的最小尺度的重要性的研究。

“纳米物理”涵盖了从100nm到亚原子尺度(低于0.1nm尺度)的物理学定律。包括由理论物理学家薛定谔(Schrodinger)大约在1925年提出的“量子力学”，更具多样化和最新起源的“介观物理”，以及在 $10^{-15}$ m(飞米)尺度上的原子核物理。从教育学的观点来说，1nm的尺度需要一些“量子力学”的概念(在此有时被称为“纳米物理”)，这些概念一经引入就成为理解飞米尺度原子核物理行为的关键。

在第2版中，从磁学和量子学的观点出发，增添了围绕“纳米电子学”和涉及“量子计算”的可能性的新内容作为现有的成功硅技术的扩展。新增的第8章和第9章分别为基于磁、电子自旋和超导性的量子技术和硅纳米电子学及其扩展；除此还包括关于碳纳米管的电子学新应用。书中增加了超导部分的内容，列举了一个量子相干性的具体实例，帮助人们理解以低功耗和高效率著称的“快速单通量量子”(RSFQ)计算机逻辑设备(在第1版的第7章中已提及)；第1版中的第8章(“展望未来”)已改为第10章。

另外增加的内容中(主要是在第4章与第5章)提供了一些最重要的新领域必需的概念，其中包括纳米科技的一些最新进展。新加入的铁磁相互作用及量子计算的基本思想是所有量子或磁性相关技术的核心。新版本比原版更加自成一体，新增加了常用物理常数和术语表。

作者是以对纳米技术发展的重要性为一个评判标准来选择加入该版本中的新内容(自2004年该书的第1版出版后，纳米科技领域又有很多重大的进展)。基于这个原因，核物理部分只是简要涉及，它与在量子计算机中使用核自旋 $1/2$ 作为量子比特信息的提议有关，也和一个新近利用纳米技术成功产生中子的小规模试验(通过一个标准的核聚变反应)有关。

另一个和基础物理相关的重要内容——“全同粒子的交换作用”也被加入到本书中。它对在本质上理解共价键，铁磁性(计算机磁盘驱动器纳米技术的本质)，以及最近提出的量子计算机中的电荷量子比特都非常重要。该主题(交换作用)所具有的重要意义超过了有机化学中共价键的基础作用。

从一开始，本书为学过大学数学和物理，但没有修过原子物理和核物理的读者们介绍了一些适用于微小尺寸(不排除核，飞米尺寸)下的现象和自然规律。读

者需要充满兴趣，且灵活的掌握新概念。

书中所设置的练习题可帮助感兴趣的读者自学，并非正规的问题。考虑到大多数读者的需要，一些新内容，尤其是关于针尖导致的场电离、超声引起的高密度液体中的泡沫的坍塌等方面，并未在正文中出现，而是放到练习中。

非常希望有兴趣的读者通过这本书受到激励，并获得新的有益处的想法。如需对本书中所涉及的知识进行详细了解，读者可以参照书中所列举的大量的最新文献。

**Edward L. Wolf**

**纽约**

**2006年1月**

# 第 1 版序言

本书起源于两门大学选修的高级物理课程，是由我在理工大学首创的“纳米技术的概念”和“纳米科技及其应用”，课程分别设置在大学三年级的春季和随后的秋季，学生们可以自由选择学习这两门课程的顺序。现在，已到了开课第二年的中期，我对学习“纳米”系列课程的学生们的多样性、素质以及兴趣和热情很满意。由于这些学生来自于电气工程，计算机工程，机械工程，化学工程等多个专业，这有利于将班级划分为多个跨学科工作小组，然后准备学期论文和演讲，在丰富有趣的纳米技术领域内，更深入的研究自己选择的课题。8 个学时的计算基础物理是这门课程学习的先决条件，学生也同时要修入门化学，大学数学和计算机科学。

我要感谢跨学科物理组的同事们在课程制定方面对我的帮助，特别感谢 Lorcan Folan 和 Harold Sjursen 对这门本科课程的批准。当我告诉 Iwao Teraoka，我无法找到合适的教材，应该写这样一本书之后，他把我介绍给 Ed Immergut，一个聪明而有经验的顾问编辑，他帮我将课程纲要转变成了一本书。我感谢 Rajinder Khosla 在书中大纲部分给予我有用的建议。在 Wiley-VCH，我受益于 Vera Palmer, Ron Schultz, Ulrike Werner 和 Anja Tschortner 的建议和技术支持。在理工大学我还得到了 DeShane Lyew 的帮助，同时也感谢 Stephen Arnold 和 Jovan Mijovic 参与讨论并对我工作的支持。感谢我的妻子 Carol 一直以来在这门课程上给予我的帮助。

我希望这本难度适中的书除了作为高年级本科生或研究生的教科书，还可以引起具有物理及相关学科专业背景人士和致力于推动纳米科学和纳米技术发展的专业人士的兴趣。同时希望这本书可以对一些读者的事业有所帮助。我在每一章都设置了一些练习，在中间部分还包含了一些指导材料，这些内容许多读者可以忽略。

21 世纪初，随着科学和工程学科知识的不断丰富，时代迅速发展，尤其是在纳米技术、机器人学、生物技术领域，需要对机遇有敏锐的洞察能力。如果真的存在“后人类未来”，那么对事物具有广泛洞察力的人，无疑可以从中受益。

**Edward L. Wolf**

**纽约**

**2004 年 7 月**

# 译丛序言

## 一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及到机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

## 二、图书交流渊源流长

近年来,国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用,制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到,我国制造业与工业发达国家相比,仍存在较大差距。因此必须加强原始创新,在实践中继承和创新,学习国外的先进制造技术和经验、引进消化吸收创新,提高自主创新能力,形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史,可以追溯到唐朝甚至更远一些,唐玄奘去印度取经可以说是一次典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式,早在20世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段,但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性,看书总比在计算机上看资料要方便习惯,不同层次的要求可以参考不同层次的图书,不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书,同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然,技术图书的交流具有时间上的滞后性,不够及时,翻译的质量也是个关键问题,需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者做出贡献,为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源,翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作,从而能够提升我国制造业的自主创新能力,引导和推进科研与实践水平的不断进步。

## 三、选择严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书,在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量,力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担,充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书,组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,例如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、



研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

#### 四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

# 译者序

当今社会正处在一个快速发展的“纳米时代”，“纳米”已经由概念演变为科学和技术，并被越来越多的人所熟知和应用。纳米科技的发展为人类处理环境、生命、能源、国防科技等重要领域的关键性难题提供了很多富有成效的新思路、新见解，显示出了越来越多的诱人之处，并迅速成长为可持续发展社会建设的一个重要方面。纳米科技的开发与应用有赖于人们对纳米科学的深入理解，有赖于多学科知识的交叉应用。纳米科技已经由初期以化学制备为主导的纳米材料合成研究，发展到以功能为主体的性能优化与器件研发。纳米科技发展的重要特征是快速，这就更要求人们应该具备正确和全面的纳米科学基础知识。

本书根据 WILEY-VCH 图书出版公司出版的“Nanophysics and Nanotechnology”第二版译出。该书英文版是由纽约布鲁克林理工大学物理系的 Edward L. Wolf 教授编写。Wolf 教授长期从事电子隧穿现象、超导和扫描隧道显微镜方面的研究。这本书内容丰富，形象地介绍了纳米物理和纳米技术的基础和背景知识并总结了近年来纳米领域研究的一些最新结果。全书分为十章，第一章至第三章介绍与纳米科技相关的一些基础问题，第四章和第五章介绍了纳米物理的相关知识，第六章和第七章主要介绍了纳米材料、纳米器件以及它们的制备方法，第八章和第九章的内容包括超导、存储等概念，列举了纳米技术在一些前沿领域的最新应用，第十章对纳米技术的未来以及一些潜在的危险及伦理问题提出了展望和分析。

本书是纳米物理与纳米技术方面的一部系统、完整的教学及科研用参考书，可供相关专业学生以及科研人员参考使用，我们相信读者会从本书中得到很多有益的启示。书中对大量概念和观点深入浅出的讲解，可以让更多人对纳米科学与技术有更加深入和全面的认识，有利于我们国家的知识创新和技术创新，对于我国的纳米科技发展将会起到积极的推动作用。

本书由刘飞、刘军、晏成林、薛冬峰等主要参与翻译。此外，吴俊书、高坤、吕派、刘美男、纪亮、孙丛婷、朱冠家、黄科、陈坤峰、司云飞等也参加了部分章节内容的翻译与校稿工作。

在本书的翻译和策划过程中，机械工业出版社的孔劲等同仁也给予了很多的关心和支持，在此，译者对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。

译者  
大连理工大学化工学院  
材料化工系  
2009年9月

# 目 录

序言

第1版序言

译丛序言

译者序

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 纳米,微米,毫米.....	2
1.2 摩尔(Moore)定律.....	6
1.3 Esaki 量子隧穿二极管.....	7
1.4 量子点的多种颜色.....	8
1.5 巨磁电阻 100 Gb 硬盘读取磁头.....	10
1.6 汽车上的加速计.....	11
1.7 纳米孔道过滤器.....	12
1.8 传统技术中的纳米元素.....	12
参考文献.....	13
<b>第2章 当物体尺寸变小时,接近于量子尺度时的体系</b> .....	14
2.1 小型化系统中机械频率增加.....	14
2.2 由简单谐振子表示的尺寸缩放关系.....	17
2.3 由简单电路元件表示的尺寸缩放关系.....	17
2.4 热时间常数和温度差异的减少.....	18
2.5 在流体介质中粘滞阻力成为小颗粒的主导力量.....	18
2.6 在对称分子尺度的体系中摩擦力的消失.....	20
参考文献.....	22
<b>第3章 小的限度是什么?</b> .....	23
3.1 物质的粒子(量子)本质:光子,电子,原子,分子.....	23
3.2 纳米发动机和纳米器件的生物学实例.....	24
3.2.1 线性弹簧发动机.....	24
3.2.2 轨道上的线性引擎.....	26
3.2.3 旋转式发动机.....	27
3.2.4 离子通道,生物中的纳米晶体管.....	31

3.3 可以把它做到多小? .....	33
3.3.1 制造微器件的方法有哪些? .....	33
3.3.2 怎样才能看到想要制做的物体? .....	33
3.3.3 怎样才能将它与外部世界联系起来? .....	36
3.3.4 如果看不见它或连接不到它, 能使其进行自组装并自主运作吗? .....	36
3.3.5 组装小尺寸三维物体的途径 .....	36
3.3.6 利用 DNA 链引导纳米尺寸结构的自组装 .....	39
参考文献 .....	41
<b>第4章 纳米世界的量子本质</b> .....	<b>44</b>
4.1 核原子的玻尔(Bohr)模型 .....	44
4.1.1 角动量量子化 .....	45
4.1.2 玻尔模型的扩展 .....	46
4.2 光和物质的波粒二象性, 德布罗意(DeBroglie)方程 $\lambda = h/p$ , $E = h\nu$ .....	46
4.3 电子波函数 $\Psi$ , 概率密度 $\Psi^* \Psi$ , 行波和驻波 .....	47
4.4 麦克斯韦方程; $E$ 和 $B$ 为光子、光纤模式的波函数 .....	50
4.5 海森堡测不准原理 .....	52
4.6 薛定谔方程, 量子态和能量, 势垒隧穿 .....	53
4.6.1 一维薛定谔方程 .....	53
4.6.2 一维俘获粒子 .....	54
4.6.3 势阶处的反射和隧穿 .....	56
4.6.4 势垒贯穿, 阱逃逸时间, 共振隧穿二极管 .....	58
4.6.5 二维和三维中的俘获粒子: 量子点 .....	59
4.6.6 二维带和量子线 .....	61
4.6.7 简谐振子 .....	63
4.6.8 球型极坐标中的薛定谔方程 .....	64
4.7 氢原子, 单电子原子, 激发子 .....	64
4.7.1 磁矩 .....	67
4.7.2 磁化强度和磁化率 .....	68
4.7.3 电子偶素和激发子 .....	69
4.8 费米子, 玻色子及其占位规则 .....	70
参考文献 .....	70
<b>第5章 宏观世界的量子行为</b> .....	<b>71</b>
5.1 化学元素周期表 .....	71
5.2 纳米对称性, 双原子分子和铁磁体 .....	71
5.2.1 全同性粒子以及它们之间的交换 .....	72

5.2.2 氢分子, H—H: 共价键 .....	73
5.3 更加纯粹的纳米物理作用力: 范德华力、Casimir 力、氢键 .....	75
5.3.1 极性波动力和范德华波动力 .....	76
5.3.2 Casimir 力 .....	78
5.3.3 氢键 .....	81
5.4 金属作为自由电子的盒子: 费米能级, DOS, 维度 .....	83
5.5 周期性结构(如 Si、GaAs、InSb、Cu): 电子能带和带隙的 Kronig-Penney 模型 .....	86
5.6 半导体和绝缘体中的电子能带和传导: 局域与离域 .....	91
5.7 类氢施主和受主 .....	95
5.7.1 半导体中的载流子浓度, 金属掺杂 .....	95
5.7.2 PN 结, 电子二极管 $I(V)$ 特征, 注入式激光器 .....	99
5.8 铁磁性的扩展, 磁盘存储器的纳米物理学基础 .....	103
5.9 表面的不同, Schottky 势垒厚度 $W = [2\epsilon\epsilon_0 V_B / eN_d]^{1/2}$ .....	106
5.10 铁电学, 压电学和焦热电学: 纳米技术发展的最新应用 .....	107
参考文献 .....	115
<b>第 6 章 自然界和工业中的自组装纳米结构</b> .....	<b>116</b>
6.1 碳原子 $^{12}_6\text{C } 1s^2 2p^4$ (0.07nm) .....	117
6.2 甲烷 $\text{CH}_4$ , 乙烷 $\text{C}_2\text{H}_6$ , 辛烷 $\text{C}_8\text{H}_{18}$ .....	117
6.3 乙烯 $\text{C}_2\text{H}_4$ , 苯 $\text{C}_6\text{H}_6$ , 乙炔 $\text{C}_2\text{H}_2$ .....	118
6.4 $\text{C}_{60}$ 巴基球 (~0.5nm) .....	119
6.5 $\text{C}_n$ 纳米管 (~0.5nm) .....	119
6.6 InAs 量子点 (~5nm) .....	122
6.7 AgBr 纳米晶体(0.1 ~ 2 $\mu\text{m}$ ) .....	124
6.8 趋磁细菌中的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 铁磁矿和 $\text{Fe}_3\text{S}_4$ 硫复铁矿纳米粒子 .....	124
6.9 在金和其他光滑表面的自组装单层膜 .....	126
参考文献 .....	127
<b>第 7 章 基于物理学的纳米制造和纳米技术的实验方法</b> .....	<b>128</b>
7.1 硅技术: 纳米技术中的 Intel-IBM 方法 .....	129
7.1.1 图形, 掩膜, 光刻 .....	129
7.1.2 硅的刻蚀 .....	130
7.1.3 界定高导电性电极区域 .....	130
7.1.4 金属和绝缘薄膜的沉积方法 .....	131
7.2 受光波长限制的横向分辨率(线宽), 现在是 65nm .....	132
7.2.1 光学和 X 射线光刻 .....	132
7.2.2 电子束光刻 .....	133

7.3 牺牲层, 悬桥, 单电子晶体管 .....	133
7.4 硅计算机技术的未来是什么? .....	135
7.5 散热和 RSFQ 技术 .....	136
7.6 扫描探针(机)方法: 一次一个原子 .....	140
7.7 扫描隧道显微镜(STM)作为分子组装机器的原型 .....	141
7.7.1 移动金原子, 制造表面分子 .....	141
7.7.2 用一台 STM 组装有机分子 .....	144
7.8 原子力显微镜(AFM)阵列 .....	144
7.8.1 光刻制备悬臂阵列 .....	145
7.8.2 用原子力显微镜进行纳米制造 .....	146
7.8.3 采用磁共振原子力显微镜对单电子自旋成像 .....	147
7.9 根本性问题: 速率, 准确性及其他 .....	149
参考文献 .....	149
<b>第8章 基于磁、电子、核自旋以及超导性的量子技术</b> .....	<b>151</b>
8.1 Stern-Gerlach 实验: 电子自旋 $1/2$ 角动量的观测 .....	154
8.2 双核自旋效应: MRI(磁共振成像)和“21.1cm 线” .....	154
8.3 对于量子计算机来说, 电子自旋 $1/2$ 作量子比特: 量子叠加, 相干 .....	157
8.4 硬、软铁磁物质 .....	159
8.5 GMR(巨磁阻)的起源: 依靠自旋的电子散射 .....	160
8.6 GMR 自旋阀, 一个纳米物理的磁阻传感器 .....	162
8.7 隧道阀, 一个更好的(TMR)纳米物理的磁场传感器 .....	163
8.8 磁性随机存储器(MRAM) .....	165
8.8.1 磁性隧道结 MRAM 阵列 .....	165
8.8.2 混合铁磁体-半导体的非易失霍尔(Hall)效应栅器件 .....	165
8.9 自旋注入: Johnson-Silsbee 效应 .....	168
8.10 磁逻辑器件: 一个多数通用逻辑门 .....	171
8.11 超导体和超导(磁)通量子 .....	173
8.12 Josephson 效应和超导量子干涉检测器(SQUID) .....	174
8.13 超导(RSFQ)逻辑/存储的计算机元件 .....	177
参考文献 .....	179
<b>第9章 硅纳米电子学与超越</b> .....	<b>181</b>
9.1 带有相干电子的电子干涉器件 .....	181
9.1.1 截断量子波导中的弹道电子输运: 实验和理论 .....	184
9.1.2 碳纳米管中清晰可辨的量子干涉效应 .....	185
9.2 碳纳米管传感器和密集型非易失随机读写存储器 .....	186

9.2.1 极性分子的碳纳米管传感器, 利用其固有的大电场 .....	187
9.2.2 交叉排列的碳纳米管阵列作为超密超快的非易失随机读写存储器 .....	190
9.3 共振隧道二极管, 隧道热电子晶体管 .....	193
9.4 双势阱电势电荷量子比特 .....	195
9.5 单电子晶体管 .....	198
9.5.1 射频单电子晶体管(RFSET), 一个已被证明了的有用的研究工具 .....	200
9.5.2 以亚电子电荷解析度读出电荷量子比特 .....	202
9.5.3 SET 和 RTD(共振隧道二极管)的对比 .....	203
9.6 通过实验方法获得的双阱电荷量子比特 .....	204
9.7 GaAs 晶片上的离子俘获, 指向一种新的量子比特 .....	210
9.8 单分子作为电子电路上的活性单元 .....	211
9.9 由硅 CMOS 和分子电子学结合而成的杂化纳米电子学: CMOL .....	215
参考文献 .....	216
<b>第 10 章 展望未来</b> .....	<b>218</b>
10.1 Drexler 的机械(分子)轴和轴承 .....	218
10.1.1 Smalley 对机器组装的驳斥 .....	218
10.1.2 范德华力可用于无摩擦力轴承? .....	221
10.2 分子组装机概念是有缺陷的 .....	221
10.3 分子机器的革新技术或自复制技术是否会威胁到地球上的生命? .....	222
10.4 基因工程和机器人学怎样? .....	223
10.5 生物技术和合成生物学中可能存在的社会和伦理问题 .....	226
10.6 会出现福山所预测的后人类未来吗? .....	227
参考文献 .....	228
<b>习题</b> .....	<b>230</b>
<b>简写术语表</b> .....	<b>238</b>
<b>一些有用的常数</b> .....	<b>242</b>
<b>检索</b> .....	<b>243</b>

# 第 1 章 绪 论

技术是指科学知识在商品和服务的经济(利润)生产中的应用。本书关注在不同形式的技术中运行的机器和设备的大小或尺度,特别关注的是可能得到的最小设备的尺寸,以及纳米尺度物理(纳米物理)中所适用,可以准确预测在这个肉眼不可见的尺度下物质行为的物理定律。以薛定谔方程为代表的量子力学可以准确预测物质在纳米尺度下的物理行为。薛定谔方程提供了对原子结构和性质的定量认识。化学品、分子,甚至是生物细胞,凡是由原子构成的物质在原则上都可以由这个行之有效的纳米物理公式进行准确地描述(在具有足够计算能力的条件下)。

在现代半导体电子产业中,把器件做得更小往往有很多优点。设备小型化的极限是什么?一个器件可以做到多小?任何设备都是由原子组成的,其大小为 0.1nm 量级。在此,“纳米技术”一词将与人类设计的工作器件关联起来,在这种器件中基本的单元由一种可控的方式生产,尺度在 0.1~1 000nm 的范围内,或者说在  $1 \times 10^{-10} \text{ m} \sim 1 \mu\text{m}$  之间。因此,在微米尺度上与“微技术”有所重叠。微电子是目前除生物技术外最先进的技术,它复杂的操作单元处于微米尺度这样小的量级。

虽然在纳米技术类别的文献中会涉及纳米机器,甚至是“能够在原子尺度上进行自我复制的机器”<sup>[1]</sup>,但必须承认的是使这一切成为现实需要“组装技术的突破”<sup>[2]</sup>,目前纳米机器还是不存在的。事实上,即使是微米尺度的机器现在也是不存在的,现有最小的、以许多形式存在的机器实际处于毫米尺度,比如说常见的手表。(为了避免与以光学显微镜为指导的技术,如“显微外科(microsurgery)”等混淆,原书中没有使用“微(micro)”这个前缀。)

读者可以正确地判断出纳米科技目前来说更多的还只是一个概念,而非实际应用,不过它现在确实是一个被资助的对象。从对它的资金投入以及媒体关注度来看,这个概念在技术上有很大的潜力。

小型化技术中的尺寸限制概念能够引起基础研究的兴趣有以下几个原因。因为当接近原子尺度时,相关的物理定律从经典物理学转变到量子力学定律。在当代物理学中,从经典尺度到介观,再到原子尺度,对物质行为的变化只有一个宽泛的认识,但在特定条件下的相关细节还是十分复杂的,需要加以解决。从经典物理学到纳米物理学的变化可能意味着一些现有的设备将不再适用,这也为开发新设备带来了契机。



最初对纳米技术的兴趣源自于它与生物学具有密切的联系。最小的生命形式，比如细菌、细胞，以及生物活体细胞的活性成分，其大小尺度都在纳米范围内。事实可以证明，复杂纳米技术实现的唯一可能是通过生物所体现的。当然，目前对分子生物学的认识已被其开创者和爱好者看作是纳米技术存在的证明。在分子生物学中，在原子尺度上自我复制的机器是以 DNA 作为向导，通过 RNA 进行复制，再由具体的分子通过酶组装而成，而且细胞中充满分子马达，驱动蛋白便是一个例子。离子通道可以允许(或阻隔)特定离子(例如钾和钠)通过脂质层进入细胞，像是精巧设计而成的分子器件，在此，蛋白质分子的不同构型决定是组成一个开放的通道还是封闭的通道。

一些生物传感器，如视网膜中的锥细胞和柱细胞以及趋磁细菌中的纳米磁体，在灵敏度的量子极限下还具有响应。毫无疑问，要了解这些传感器的运行，需要应用到纳米物理。纳米物理定律在本质上都具有概率性质，也可以说，与达尔文进化论中生存几率的概念相似。如果能够理解涵盖于自然界分子构筑单元中的量子纳米物理所作用的方式，便可为人造传感器，发动机或者其他设备提供更多信息，或许会促进纳米技术在试验以及工程技术上朝期待的方向进一步发展。

从传统意义说，分子尺度的机械工程是不可能实现的。一些乐观的观察家指出，可以制造这些肉眼看不到的机器，其尺寸与生物分子相当。医疗用纳米机器将成为可能，这些纳米机器可以依照指示修复有缺陷的细胞，杀死有害的细胞，如癌细胞，更令人感到兴奋的是，这一技术还可能用于修复解冻后生物组织的细胞损伤，从而使冻结成为一种进行活体保存的有效手段<sup>[3]</sup>。

本书旨在对理解这些物理概念提供一个指导，让读者了解到当尺度向着原子尺寸减小时所发生的变化。本书的出发点是能为具有工程学科和应用科学本科专业背景的学生以及专业人士在各个领域的纳米技术研究中提供一些信息。纳米物理作为一个广泛适用的概念是值得研究的，因为在科技发展日新月异的情况下，纳米物理依然没有变得过时。

## 1.1 纳米，微米，毫米

1nm 是  $10^{-9}$ m，是最小的原子如氢和碳大小的 10 倍左右；而  $1\mu\text{m}$  则是稍大于可见光的波长，因此对人眼来说是不可见的；1mm 的大小相当于一个针头，大约是现有技术可制造的最小机器的大小。从毫米到纳米的跨度是一百万倍，这个尺寸的跨度正好等于从最大的摩天大厦，到当今的加工技术中最小的常规机械零件尺寸跨度的大小。能在尺寸上跨越六个数量级(从毫米到纳米)，有很大的机会做出新的机器的设想源自于理查德费曼(Richard Feynman)著名的演说<sup>[4]</sup>：