

纳米科学与技术



DNA纳米技术

分子传感、计算与机器

樊春海 刘冬生 主编



科学出版社

中国海洋出版社

国际航海技术 设计指南、标准与规范

曹德成 周建忠 主编



纳米科学与技术

DNA 纳米技术

分子传感、计算与机器

樊春海 刘冬生 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书的主旨是介绍 DNA 纳米技术这个崭新的研究领域。DNA 纳米技术是纳米生物学的重要组成部分，其特点在于融合了 DNA（基因）技术与纳米技术这两个热点领域，并产生了众多激动人心的研究成果。DNA 分子除了具有基因的遗传特性外，同时也是一个结构精巧的一维纳米线。将 DNA 与纳米材料组合起来，甚至将 DNA 本身作为一种纳米材料，可以为生命科学、材料科学、环境科学等领域带来前所未有的推动作用。本书着重介绍 DNA 纳米技术中最为引人注目的几个主要方向，即 DNA 分子的生物传感器、DNA 分子操纵和分子机器，以及 DNA 分子计算机。

全书分为两大部分，“DNA 纳米技术基础”部分主要对本领域的现状和发展趋势进行科普性的介绍，适合本科生阅读；“DNA 纳米技术进阶”部分则邀请国内外相关领域的知名学者共同撰写，希望为有志于从事纳米生物学研究的研究生和科研人员提供帮助和指引，同时也可供相关领域的研究者阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

DNA 纳米技术：分子传感、计算与机器/樊春海，刘冬生主编. —北京：科学出版社，2011

(纳米科学与技术/白春礼主编)

ISBN 978-7-03-032386-6

I. ①D… II. ①樊…②刘… III. ①纳米材料-应用-生物技术 IV. ①Q81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 192646 号

责任编辑：夏 梁 刘 晶/责任校对：刘小梅

责任印制：钱玉芬/封面设计：黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 12 月第 一 版 开本：B5 (720×1000)

2011 年 12 月第一次印刷 印张：31 3/4 插页：4

印数：1—2 500 字数：638 000

定价：98.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

《纳米科学与技术》丛书编委会

顾 问 韩启德 师昌绪 严东生 张存浩

主 编 白春礼

常务副主编 侯建国

副主编 朱道本 解思深 范守善 林 鹏

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

陈小明 封松林 傅小锋 顾 宁 汲培文 李述汤

李亚栋 梁 伟 梁文平 刘 明 卢秉恒 强伯勤

任咏华 万立骏 王 琛 王中林 薛其坤 薛增泉

姚建年 张先恩 张幼怡 赵宇亮 郑厚植 郑兰荪

周兆英 朱 星

《纳米科学与技术》丛书序

在新兴前沿领域的快速发展过程中，及时整理、归纳、出版前沿科学的系统性专著，一直是发达国家在国家层面上推动科学与技术发展的重要手段，是一个国家保持科学技术的领先权和引领作用的重要策略之一。

科学技术的发展和应用，离不开知识的传播：我们从事科学研究，得到了“数据”（论文），这只是“信息”。将相关的大量信息进行整理、分析，使之形成体系并付诸实践，才变成“知识”。信息和知识如果不能交流，就没有用处，所以需要“传播”（出版），这样才能被更多的人“应用”，被更有效地应用，被更准确地应用，知识才能产生更大的社会效益，国家才能在越来越高的水平上发展。所以，数据→信息→知识→传播→应用→效益→发展，这是科学技术推动社会发展的基本流程。其中，知识的传播，无疑具有桥梁的作用。

整个 20 世纪，我国在及时地编辑、归纳、出版各个领域的科学技术前沿的系列专著方面，已经大大地落后于科技发达国家，其中的原因有许多，我认为更主要的是缘于科学文化的习惯不同：中国科学家不习惯去花时间整理和梳理自己所从事的研究领域的知识，将其变成具有系统性的知识结构。所以，很多学科领域的第一本原创性“教科书”，大都来自欧美国家。当然，真正优秀的著作不仅需要花费时间和精力，更重要的是要有自己的学术思想以及对这个学科领域充分把握和高度概括的学术能力。

纳米科技已经成为 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一，其对经济和社会发展所产生的潜在影响，已经成为全球关注的焦点。国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）会刊在 2006 年 12 月评论：“现在的发达国家如果不发展纳米科技，今后必将沦为第三世界发展中国家。”因此，世界各国，尤其是科技强国，都将发展纳米科技作为国家战略。

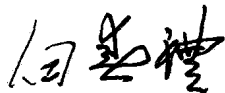
兴起于 20 世纪后期的纳米科技，给我国提供了与科技发达国家同步发展的良好机遇。目前，各国政府都在加大力度出版纳米科技领域的教材、专著以及科普读物。在我国，纳米科技领域尚没有一套能够系统、科学地展现纳米科学技术各个方面前沿进展的系统性专著。因此，国家纳米科学中心与科学出版社共同发起并组织出版《纳米科学与技术》，力求体现本领域出版读物的科学性、准确性和系统性，全面科学地阐述纳米科学技术前沿、基础和应用。本套丛书的出版以高质量、科学性、准确性、系统性、实用性为目标，将涵盖纳米科学技术的所有领域，全面介绍国内外纳米科学技术发展的前沿知识；并长期组织专家撰写、编

辑出版下去，为我国纳米科技各个相关基础学科和技术领域的科技工作者和研究生、本科生等，提供一套重要的参考资料。

这是我们努力实践“科学发展观”思想的一次创新，也是一件利国利民、对国家科学技术发展具有重要意义的大事。感谢科学出版社给我们提供的这个平台，这不仅有助于我国在科研一线工作的高水平科学家逐渐增强归纳、整理和传播知识的主动性（这也是科学研究回馈和服务社会的重要内涵之一），而且有助于培养我国各个领域的人士对前沿科学技术发展的敏感性和兴趣爱好，从而提高全民科学素养做出贡献。

我谨代表《纳米科学与技术》编委会，感谢为此付出辛勤劳动的作者、编委会委员和出版社的同仁们。

同时希望您，尊贵的读者，如获此书，开卷有益！



中国科学院院长

国家纳米科技指导协调委员会首席科学家

2011年3月于北京

序

半个多世纪以前，美国学者理查德·费曼预言：当材料和器件小到原子和分子尺度时，会因量子效应而呈现奇异特性。30年后，这个预言得到诸多实验证实，并由此催生了一个崭新的领域——纳米科学技术。

也是半个多世纪以前，美国学者詹姆斯·沃森和英国学者弗朗西斯·克里克发现 DNA 双螺旋结构并建立了分子模型，奠基了分子生物学和基因技术，并催生了现代生物技术。

如今，纳米技术和生物技术都已发展成为最受关注的科学技术前沿领域，对科学技术自身发展和人类社会经济发展的作用难以估量。

DNA 不仅承载着生命遗传信息，还是天然的纳米生物材料和元件。科学家们巧妙地用 DNA 分子来设计构建各类功能结构和器件，如 DNA 传感器和 DNA/基因芯片、DNA 分子探针和分子信标、DNA 或 DNA/蛋白复合体分子机器、DNA 拓扑结构、DNA 计算机等。这些崭新的新技名词高频出现，令人炫目，表明 DNA 正在从分子生物学的核心转而成为纳米技术的宠儿。

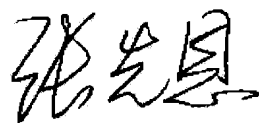
在一次纳米科学学术会上，两位青年学者告诉我，他们正在撰写一本有关 DNA 纳米技术的书，希望我能为之作序。我觉得该书选题前沿，编写及时，加上我自己也有不少研究心得和经验，故欣然答应。

我快速浏览了书稿清样。书名为《DNA 纳米技术——分子传感、计算与机器》，内容涉及 DNA 纳米技术相关原理和方法、最新研究进展和应用展望。全书主题明确，层次分明，编写系统，图文并茂，深入浅出，兼顾原理和应用。另值得指出，书中以相当篇幅介绍了我国学者的研究成果，而迄今我国出版的许多科技专著仍然以介绍国外的研究进展为主。这说明我国在 DNA 纳米技术研究方面已经处在国际前沿。

该书作者樊春海和刘冬生是我熟悉的青年学者。他们关注前沿，致力创新，是国家“973”计划及纳米重大研究计划项目的承担者，分别在 DNA 生物纳米机器和 DNA 纳米结构组装方面做出了前瞻性的研究工作，获得同行专家高度评价。两人在 2007 年同时获得了国家杰出青年科学基金资助，还联合举办了国内首次“DNA 纳米技术国际研讨会”。由他们编写这本书，再合适不过了。

中国科学家在纳米科学技术领域有不凡的表现，数年来，在国际期刊上发表的论文总数保持第一，论文总被引用次数和专利数也位居前列，但该领域发展不

够平衡，其中贡献最大的当属纳米材料研究，纳米生物学和纳米器件研究还比较滞后。相信该书的出版，能引导更多的学者和研究生进入到这一崭新的领域，做出更多的重要发现和创新，贡献人类。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '张', '先', and '恩'.

2011年3月于北京

前 言

DNA 是一个拗口的科学名词——脱氧核糖核酸 (deoxynucleic acid) 的缩写。近几十年来作为“基因”或“遗传密码”的同义词，DNA 已“飞入寻常百姓家”，成为老百姓耳熟能详的少数科学用语之一。让我们也来看看科学家群体是如何称誉这个生物分子的吧：2003 年《自然》(*Nature*) 杂志出版了一期“纪念 DNA 双螺旋结构发现 50 周年”的专刊，邀请 15 位著名科学家以“DNA”为主题撰写了系列研究综述，在开篇介绍中，《自然》杂志主编 Philip Campbell 毫不吝啬地将“DNA”称为“永远的分子”(The Eternal Molecule)，而在当期的另一篇文章中则以“现代科学中的蒙娜丽莎”(The Mona Lisa of Modern Science) 为题来形容 DNA 这个明星分子。可以说，我们很难在科学中再找到这么一个能受到如此“礼遇”的名词了。

DNA 的发现史充满了传奇色彩。1978 年霍勒斯·贾德森 (Horace Judson) 出版了以他与 DNA 发现和发展相关的 111 位科学家的谈话录为基础的书——《创世纪的第八天：生物学革命的缔造者》(*The Eighth of Creation: Makers of Revolution in Biology*)，该书迅速成为极为畅销的科普巨著，被誉为 DNA 科学发展的史传。该书于 1996 年再版时，《自然》杂志的荣誉编辑约翰·马多克斯 (John Maddox) 作序并给予高度评价。正如该书的书名所暗示的，DNA 双螺旋结构的发现无异于开天辟地或划破黑暗天空的曙光那样的“创世纪”过程。让我们简单回顾一下这个历史时刻。1951 年詹姆斯·沃森 (James Watson) 来到英国剑桥大学的卡文迪许实验室，并与弗朗西斯·克里克 (Francis Crick) 一同开始了对 DNA 结构的探索。他们在经历很长时间的黑暗中的摸索之后，终于在伦敦国王学院的罗莎琳德·富兰克林 (Rosalind Franklin) 获得的 DNA 结构 X 射线衍射图基础上，在人类历史上第一次提出了 DNA 的双螺旋结构模型，并将这个简单、完美的结构发表于 1953 年 4 月 25 日的《自然》杂志。致力于探索生命本质的分子生物学时代从此开始了！

50 多年过去之后，人们回首这段历程时很容易发现 DNA 和分子生物学给人类社会带来的革命性变化。人们对于遗传、疾病和人类自身的了解达到了前所未有的高度。有趣的是，在这个过程中，DNA 作为遗传分子之外的其他面目也逐渐被揭示出来。20 世纪 90 年代初，一些科学家发展了被称为“体外进化”

(*in-vitro* selection) 的 SELEX 技术, 并利用该技术筛选出了一些具有特定结构和功能的 DNA 分子。有一些被命名为核酸适配体 (aptamer) 的 DNA 分子可以像抗体一样与各种“抗原”分子特异性结合; 而另一些被称为核酶 (DNAzyme) 的 DNA 分子则可以发挥类似于酶的催化活性。要知道, 抗体和酶可是传统意义上蛋白质分子的领地啊! 另一个可能更为“奇特”的 DNA 分支领域——DNA 纳米技术起源于 20 世纪 80 年代美国纽约大学的乃遽尔·西曼 (Nadrian Seeman) 教授的奇思妙想。他试图将通常被认为是遗传信息载体的 DNA 分子作为一种材料构件来搭建各种纳米尺度的形状或结构。尽管他可以用 DNA 来组装一些简单的形状, 这种离经叛道的想法很快遭到了生物学家的鄙视而几乎堕入历史的尘埃。幸运的是, 西曼教授以其坚韧不拔的性格在黑暗中孤独跋涉而毫不退缩。在经过很长时间的冷遇后, 90 年代以来纳米技术的兴起使 DNA 的这个材料特性得到了淋漓尽致的发挥。DNA 纳米技术这个生物与纳米联姻的全新领域开始进入了快速发展期。科学家们清晰地认识到, DNA 分子除了其作为基因的遗传特性外, 同时也是一个结构精巧、具有超强组装能力的一维纳米线。将 DNA 作为一种纳米材料或与其他纳米材料组合起来, 可以为生命科学、材料科学、环境科学等领域带来前所未有的推动作用。正如我们在本书中试图展示的那样, 现在科学家们已经可以用 DNA 这个神奇分子来制作各种各样对称和不对称的、静止和运动的纳米物件。从简单的十字形到复杂的地图乃至扭曲的三维形状, 从简单的“分子开关”到可以走动的“分子蜘蛛”, 层出不穷的新成果正以前所未有的速度不断冲击和震撼着人们。2010 年, 西曼教授被授予纳米科学领域的最高奖——卡弗里 (Kavli) 纳米科学奖, 他也应上海应用物理研究所邀请成为中国科学院爱因斯坦讲座教授。

毫无疑问, DNA 纳米技术已经成为国际上的热点研究领域。近年来, 国内的研究者也积极参与到这个领域的研究中, 并做出了有特色的贡献。值得一提的是, 科技部于 2007 年批准了两个与此相关的“973”重大科学研究计划 (2007CB935900, 纳米生物机器原理、制备及其应用探索; 2007CB936000, 人工纳米生物机器构筑与生物医学应用的基础研究), 支持了包括本书的两位编者在内的一批研究者参与到 DNA 纳米技术及分子机器相关的研究中去。2009 年, 我们和亚利桑那州立大学的颜颢教授共同举办了“DNA 纳米技术国际研讨会”, 邀请了国际上多名著名学者 (如哥伦比亚大学的 Milan Stojanovic、哈佛大学的 William Shih、丹麦奥胡斯大学的 Kurt Gothelf、佛罗里达大学的谭蔚泓、伊利诺伊大学的陆艺、普度大学的毛承德等) 和国内积极参与该领域研究的十几位研究者, 共同探讨 DNA 纳米技术的发展。与会者一致认为应该尽快组织出版一本 DNA 纳米技术的书, 将这个激动人心的新领域介绍给中国学生、研究者。这就

是我们编写本书的缘起。

本书分为两大部分。在“DNA 纳米技术基础”篇，我们介绍了本领域若干重要方向的现状和发展，尽可能用平实、科普性的语言，希望能适合于本科生阅读并使其了解这个领域；在“DNA 纳米技术进阶”篇，我们邀请了国际、国内的活跃研究者撰写本领域若干热点方向的最新成果综述，希望为有志于从事相关领域工作的研究生和研究者提供指引和帮助。需要说明的是，对于第二篇，我们除了对一些术语进行统一之外，尽可能保持了原著者提供的原貌，因此在体例上并不完全一致，选题和内容上也可能存在着一定的重叠。我们认为这可以使有兴趣阅读的读者能更好地体会这些工作于国际科学前沿的研究者各自的风格和特色，而这对于科学研究是有益的。

除了 DNA 纳米技术本身的介绍之外，我们还探讨了基于 DNA 纳米技术中的三个方面应用，即 DNA 传感器、DNA 计算机及 DNA 分子机器。DNA 传感器是利用 DNA 分子的生物特异性识别过程来探测基因、病毒粒子、环境毒素、生物武器等的传感检测器，可实现待测物质实时、快速的检测，在国民经济和国防安全中的临床疾病诊断、工业控制、食品分析、遗传分析、军事、反恐、药物筛选、环境检测等众多领域中有着广泛的应用前景。分子机器是人类的一个梦想，也是纳米科学的终极目标之一。由分子尺度的物质构成，能行使某种加工和处理功能的机器称为分子机器。20 世纪 40 年代后期，著名物理学家理查德·费曼就提出了分子机器的设想。由于分子机器尺度小，要制作得到具有复杂、实际功能的分子机器一直是科学界的挑战。DNA 分子机器则是实现分子机器这一人类梦想的可能途径，利用 DNA 无与伦比的精确装配能力，研究者已经实现了一定程度的装配和运动，产生了纳米尺度的马达、试管和容器等分子机器。电子计算机的诞生是人类历史上的一个里程碑式的突破，并在很大程度上改变了人类的生活方式。然而，随着这种惊人的技术发展，人们不断提出这样的问题：摩尔定律是否还能继续有效？电子计算机是否可能走入穷途末路？DNA 分子的大小在纳米尺度，同时具有良好的可操作性与强大的识别和信号转导能力，这就为研制分子层次的、利用 DNA 分子元件组装成的生物计算机提供了无限的想象空间。人们可能利用这种自然界中的物理化学过程蕴涵着的丰富信息处理机制抽象出对应的计算模型，并利用这些过程进行计算。这种基于全新原理的计算机引起了广泛的关注，并可能实现高度的人工智能乃至一定程度的认知能力。

本书得以完成首先应该感谢各位参与者的努力和积极推动，也离不开两位“973”项目首席科学家，中国科学院理论物理研究所的欧阳钟灿院士和中国科学院上海应用物理研究所的胡钧研究员，以及上海交通大学的贺林院士的大力支持。科

技部基础研究司司长张先恩研究员不仅是生物传感研究领域的著名学者，而且对纳米生物学、分子机器等交叉领域有着浓厚的兴趣，他对编写本书给予了积极的支持，并欣然作序。最后，我们还要特别感谢科学出版社邀请我们编写本书并给予了无微不至的帮助。

樊春海 刘冬生

2010年12月10日

目 录

《纳米科学与技术》丛书序

序

前言

第一篇 DNA 纳米技术基础

第 1 章 以纳米的视角看 DNA——DNA 纳米技术中的基本概念	3
1.1 纳米技术引论	3
1.1.1 纳米科技发展简史	5
1.1.2 纳米领域的“眼睛”和“手”	7
1.1.3 纳米领域的“砖瓦”	9
1.2 DNA 分子的化学与生物学	17
1.2.1 DNA 的微观结构	19
1.2.2 DNA 的分子操作	22
第 2 章 用纳米的思维操纵 DNA——DNA 纳米技术中的新思路	31
2.1 DNA 分子的成像和纳米操纵	31
2.1.1 单个 DNA 分子及其复合物的成像	31
2.1.2 单分子纳米操纵	36
2.2 DNA 分子自组装与 DNA 纳米结构	45
2.2.1 基于 DNA 自组装的纳米结构	45
2.2.2 DNA 纳米排布	52
2.2.3 DNA 纳米机器人	55
2.2.4 DNA 构造纳米图形展望	56
第 3 章 以纳米的方式用 DNA——DNA 纳米技术中的新应用	65
3.1 可以感知的 DNA 纳米技术——DNA 生物传感器与基因芯片	65
3.1.1 DNA 生物传感器	65
3.1.2 DNA 芯片	69
3.1.3 微流控芯片	70
3.2 可以计算的 DNA 纳米技术——DNA 分子逻辑门与计算机	75
3.2.1 基于 DNA 分子的逻辑门设计	77
3.2.2 基于 DNA 分子的计算	80
3.3 可以运动的 DNA 纳米技术——DNA 分子机器	90

3.3.1 链交换反应驱动的 DNA 马达	90
3.3.2 环境因素驱动的 DNA 马达	96
3.3.3 两类驱动方式的评价	102

第二篇 DNA 纳米技术进阶

第 4 章 功能 DNA 结构和生物传感器的设计与应用	107
4.1 核酸适配体生物传感器	107
4.1.1 核酸适配体组合筛选技术	107
4.1.2 模型核酸适配体	109
4.1.3 核酸适配体光学传感器	110
4.1.4 核酸适配体电化学传感器	123
4.1.5 核酸适配体比色传感器	130
4.1.6 其他类型核酸适配体传感器	136
4.1.7 核酸适配体生物传感器应用	138
4.1.8 结论与展望	140
4.2 基于水溶性共轭聚合物的核酸分子检测	155
4.2.1 水溶性共轭聚合物结构和性质	156
4.2.2 水溶性共轭聚合物的光学特性和传感机制	158
4.2.3 基于共轭聚合物的核酸生物传感器	159
4.2.4 结论与展望	168
4.3 基于 DNA 分子构型变化设计的电化学基因传感器	173
4.3.1 电化学 DNA 生物传感器的历史	173
4.3.2 E-DNA 传感器的构建	174
4.3.3 E-DNA 传感器的机理与优化	178
4.3.4 信号增益模式	179
4.3.5 相关研究进展	183
4.3.6 展望	185
4.4 基于细胞筛选的核酸适配体技术在癌症诊断和治疗中的应用	190
4.4.1 以活细胞为靶标的核酸适配体筛选技术	191
4.4.2 核酸适配体用于癌细胞的检测	193
4.4.3 基于核酸适配体的癌症标志物发现	196
4.4.4 核酸适配体用于癌症的靶向治疗	198
4.4.5 结论及展望	200
4.5 核酸适配体与核酶生物传感器	203
4.5.1 核酸适配体	204
4.5.2 核酶	209
4.5.3 基于功能 DNA 的生物传感器	211

第 5 章 基于 DNA 分子的自组装纳米结构与应用	232
5.1 基于功能核酸的纳米材料定向组装及生物分析	232
5.1.1 功能核酸-纳米金颗粒分子组装在生物分析中的应用	233
5.1.2 磁性纳米颗粒的定向组装在生物分析中的应用	241
5.1.3 量子点的定向组装在生物检测中的应用	243
5.1.4 碳纳米材料的定向组装在生物分析中的应用	245
5.1.5 研究展望	248
5.2 DNA 自组装纳米结构及其应用	254
5.2.1 tile 自组装——聚沙成塔	255
5.2.2 DNA 折纸术——点石成金	269
5.2.3 DNA 纳米排布——锦上添花	280
5.2.4 DNA 指导的化学反应	290
5.3 结构 DNA 纳米技术研究进展	308
5.3.1 二维 DNA 结构	310
5.3.2 三维 DNA 结构	311
5.3.3 DNA 自组装引导的纳米粒子二维结构	316
5.3.4 DNA 自组装引导的纳米粒子三维结构	319
5.3.5 DNA 自组装与微加工技术	321
5.3.6 挑战与展望	322
5.4 DNA 纳米自组装化学	325
5.4.1 用于组装 DNA 纳米结构的各种模块	326
5.4.2 一维 DNA 纳米结构	331
5.4.3 二维 DNA 纳米结构	333
5.4.4 三维 DNA 纳米结构	337
5.4.5 DNA 折纸术	341
5.4.6 DNA 辅助下的纳米组装与制造	343
5.4.7 结论和展望	351
第 6 章 纳米尺度的 DNA 分子操纵与应用	356
6.1 DNA “分子手术”	356
6.1.1 DNA “分子手术”的基本工具及前期技术背景	356
6.1.2 DNA “分子手术台”和“手术刀”	357
6.1.3 DNA “分子手术”的若干基本操作	358
6.1.4 DNA “分子手术”的后处理技术	360
6.1.5 DNA “分子手术”当前面临的主要问题	361
6.1.6 展望	362
6.2 DNA 单分子力学	363
6.2.1 单分子力学实验技术	364

6.2.2	DNA 的单分子力学	367
6.2.3	小结	383
6.3	生物纳米通道在 DNA 分子检测方面的研究及应用	385
6.3.1	纳米孔道检测的背景	386
6.3.2	生物纳米孔道检测的工作原理	389
6.3.3	基于生物纳米孔道的检测方法和器件	391
6.3.4	生物纳米孔道应用于 DNA 测序的研究进展	392
6.3.5	生物纳米孔道应用于 DNA 分子的形态研究	394
6.3.6	DNA 分子与生物纳米通道作用的理论研究	396
6.3.7	展望	404
第 7 章	DNA 逻辑门和计算机的构建与应用	409
7.1	DNA 分子逻辑门	409
7.1.1	DNA 逻辑门	411
7.1.2	DNA 计算	424
7.1.3	生物检测	426
7.1.4	疾病治疗	429
7.1.5	展望	431
7.2	会玩游戏的 DNA 计算机	436
7.2.1	溶液中的医生	437
7.2.2	分子逻辑门	438
7.2.3	可以玩三子棋的 DNA	443
7.2.4	MAYA-II	445
7.2.5	DNA 计算机的未来	445
第 8 章	DNA 分子机器	447
8.1	DNA 分子机器的设计与应用	447
8.1.1	DNA 分子机器的设计	447
8.1.2	DNA 分子机器的应用	449
8.2	从 DNA 自组装到 DNA 分子机器	461
8.2.1	DNA 纳米结构	461
8.2.2	DNA 等温复制机器	468
8.2.3	金属离子依赖型核酸酶实现 DNA 逻辑计算	472
8.2.4	结论与展望	475
8.3	DNA 分子机器——从运动到功能	477
8.3.1	运动的 DNA 纳米机器	477
8.3.2	基于功能 DNA 的纳米机器	483

图版