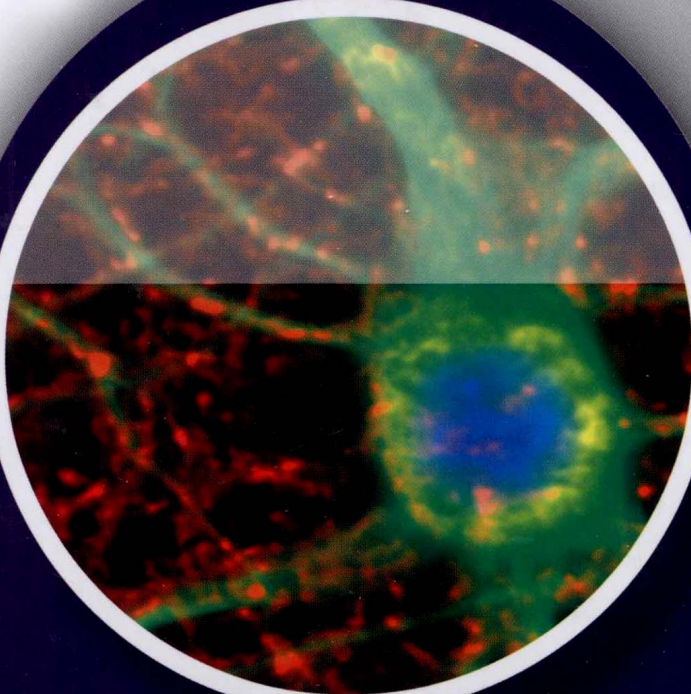


纳 | 米 | 科 | 学 | 进 | 展 | 系 | 列

纳米生物光子学

Nanobiophotonics

Gabriel Popescu



Nanobiophotonics

纳米生物光子学

Edited by

Gabriel Popescu

科学出版社

北京

图字:01-2010-7772 号

Gabriel Popescu
Nanobiophotonics

ISBN: 978-0-07-173701-2

Copyright © 2010 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

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

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of The McGraw-Hill Companies, Inc. and Science 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。本授权双语版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和科学出版社合作出版。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© 2011 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与科学出版社所有。
本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

纳米生物光子学=Nanobiophotonics:英文/(美)波佩斯库(Popescu,G.)主编.—北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-029849-2

I. ①纳… II. ①波… III. ①纳米材料-应用-生物光学-英文 IV. ①Q81 ②Q63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 259364 号

责任编辑:田慎鹏 李小汀/责任印制:钱玉芬
封面设计:耕者设计工作室

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

北京天利彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 1 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 1 月第一次印刷 印张:28

印数:1—1 800 字数:564 000

定价:108.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

导 读

一、该领域国内外研究进展及相关背景知识

纳米生物光子学是一门新兴前沿学科，具有很强的交叉性，是纳米科学与技术、光子学和生物学三个学科的交叉研究领域。目前，该领域国际上的研究热点主要包括以下几个方面。

1. 单分子研究

近十年来随着各种先进的光学探测技术（如光镊、扫描探针技术和单分子成像技术）的出现，生命科学诞生了一个新的研究方向——单分子生物学。它可以在单分子层次揭示基本的生命活动，如 DNA 转录、蛋白质折叠、细胞信号转导、酶的催化、生物大分子的相互作用（如分子马达）等，在单分子层次揭示传统生物学方法无法获得的精确分子动态信息，以及被大量分子组成的宏观系统淹没掉的生物信息，成为近年生命科学的热点研究领域之一。单分子研究技术主要包括单分子成像和单分子操纵。单分子成像技术主要是单分子荧光成像术，包括荧光共振能量转移（FRET）、全内反射荧光显微（TIRFM）成像、激光扫描共焦显微（LSCM）成像、扫描近场光学显微（SNOM）成像等，以及超分辨荧光成像技术。超分辨成像又可分为基于硬件和基于软硬两类。基于硬件超分辨成像技术主要有受激发射耗损（stimulated emission depletion, STED），光激活局域显微术（photoactivatable localization microscopy, PALM），随机光学重构显微术（stochastic optical reconstruction microscopy, STORM）等，以及在此基础上衍生的各种方案；基于软件的超分辨成像术，如基于软件的单荧光发射粒子跟踪（fluorescence imaging with one-nanometer accuracy, FIONA）技术，通过连续采集时间序列的一系列远场图像，用 2D 高斯函数来拟合荧光点衍射极限的点扩展函数，从而找出荧光衍射极限的中心。该方法目前已达到 1.5nm 的空间分辨精度。单分子操纵工具主要有光镊（optical tweezers）、磁镊（magnetic tweezers）和原子力显微镜（AFM）。光镊主要用于单分子、单细胞操纵，以及生物大分子（受体-配体，抗原-抗体，分子马达等）间的单分子力（0.1~100pN）的精细测量。磁镊用微磁珠作为操纵手柄，主要用于对样品的转动操纵，如测量分子的转动马达，研究 DNA 的拓扑结构和拓扑异构酶等。AFM 用纳米针尖对样品进行扫描探测，适合于测量的样品间较大的作用力（10~10⁴pN），或对微小样品表面进行高分辨扫描成像。

2. 微纳流体学

主要是利用各种微流池技术，控制微流体中样品的局部微环境（如浓度、pH 值等）或减小流池中样品与光的作用体积，甚至小于聚焦光斑的体积，从而

提高空间分辨率。该技术一般与其他技术，如单分子技术、超分辨成像、微流芯片等配合使用。

3. DNA 芯片

DNA 芯片是最常用的生物芯片技术，主要用于 DNA 分子基因的高通量检测，是分子生物学与微纳米技术及光子学技术结合的产物。DNA 芯片将分子生物学中 DNA 杂交与酶联反应 (PCR) 放在微阵列反应池中进行，用光子学 (通常用荧光) 的方法检测反应产物，可同时并行检测数百至上千个反应，大大提高了分析检测速度。在基因测序、药物筛选、疾病诊断等生命科学诸多领域有着广泛的应用。

4. 光囚禁与光操控 (光镊) 技术

通过激光与微纳米粒子相互作用，可将光子的动量传递给粒子，对其施加机械作用。实验上常采用高度会聚的激光光束产生的三维稳定光阱，对粒子进行束缚或操纵，通过对粒子相对光阱中心位移的精确测量，可得知光镊对粒子的精确作用力。目前，光镊位置测量可达亚纳米精度，力的测量可达亚皮牛顿 ($<10^{-12}\text{N}$)。该技术具有不接触、无污染、无机械损伤、活体操纵、实时动态等独特的优势，是生命科学研究的理想工具，在单分子、单细胞等生命科学诸多领域有广泛的应用。

5. 近场光学

近场是指探针到样品的距离远小于光波波长的情形，扫描近场光学显微镜 (SNOM) 是上个世纪末诞生的一种高分辨扫描探针技术，它的空间分辨率可超过光学衍射极限，达到数十纳米，可同时得到样品的形貌像和光学信息。

6. 表面等离子体光子学 (plasmonics)

这是最近迅速发展起来的一门新兴学科。金属纳米结构在光场的作用下能产生表面等离子体共振，从而产生非常奇特的光电性质，如产生很强的局域电场。在生物光子学领域主要用于表面等离子体共振传感器、表面增强拉曼散射等离子共振能量转移及选择性光吸收等。

7. 各种先进的生物光学成像技术

包括荧光、共聚焦、Raman 光谱与成像、相干反斯托克斯拉曼光谱 (CARS)、全内反射显微镜、荧光共振能量转移、高次谐波产生成像、多光子显微成像、X 射线纳米成像、时间分辨荧光显微镜 (荧光寿命成像 FLIM, 荧光相关谱 FCS)、荧光共振能量转移 (FRET)、时间相关单光子计数技术 (TCSPC) 等，这些先进的光学成像技术，在空间和时间分辨上大大提高研究者的“视野”，从而使科学家们能观测活细胞内部亚细胞结构和动态过程，甚至单分子动态过程。

8. 量子点 (QD)

当金属或半导体粒子的体积减小到纳米尺度时，将会产生量子效应，此时粒子的电荷和能量都是量子化的，其光、电、磁、热和化学活性方面表现出与宏观尺度粒子显著的不同。由 IIA 与 VIB 或 IIIA 与 VB 族元素组成的半导体量子点，

由于电子与空穴被量子限域，连续能带变成类似分子特征的分离能级结构，受激后可以发射荧光，且激发光范围很宽，发射光谱较窄。该量子点的一个明显的特点是“尺寸效应”，即同一材料的量子点，由于尺寸大小不同，在同一种光照射下会发出不同颜色的荧光。换言之，用同一激发光可以同时激发不同颜色的量子点，这给生物标记带来很多方便。量子点标记具有荧光强度高、抗光漂白能力强等优点。此外，量子点在药物传输、光热肿瘤治疗和医学影像等医学领域也有应用。

9. Raman—光镊技术

该技术将光镊与显微 Raman 光谱技术两者有机地结合起来，将两束不同波长的激光（分别作为囚禁光和激发光）耦合到显微物镜中，用一束光悬浮固定待探测的微观样品（如单个悬浮细胞、气溶胶粒子等），而用另一束光进行 Raman 激发，从而克服样品粒子的布朗运动和样品池的干扰。该方法能显著提高光谱的信噪比，有效地探测单个悬浮粒子的 Raman 光谱。

纳米生物光子学是一门迅速发展的新兴前沿交叉学科，研究范围很广，且交叉性强。有些内容难于准确界定和概括全面。上面仅介绍了当前一些重要的技术发展，许多方面没有包括进来，如光学分子影像，光学生物传感器等等。

二、本书的结构与特点

本书是目前少有的介绍纳米生物光子学的专著。其内容包括三个层次：导论，方法评述和前沿研究领域。

第一部分：导言。首先，以癌细胞生物学为例，简要说明了癌细胞发展在基因和组织学水平的复杂性和多步过程，并指出基因改变是引起感染细胞不可控增殖的原因。为读者简要提供了生物学的例子。随后回顾了经典电磁场理论，给出了麦克斯韦方程及光与物质相互作用的经典洛伦兹理论框架，为后续部分理解光与生物体相互作用提供了必要的物理基础。最后，介绍了纳米光子学的基本概念、特性和研究方法。

第二部分：方法综述。从不同角度介绍了生物光子学的研究方法。包括从临床的角度介绍生物组织样品的制备和检测；从物理方面，介绍了非均介质中的光散射问题、二次谐波的产生；从光学方面，介绍视觉恢复问题。随后讨论了低相干光技术及其在纳米医学中的应用，其中详细分析了光学相干断层扫描（OCT）的各种技术，以及迅速发展的离子体光学与负材料问题。

第三部分，介绍了生物光子学的前沿研究领域。包括红外光谱成像，主要介绍了傅里叶变化红外光谱（FTIR）技术及在生物医学中的应用；用于相干光学成像的各种纳米探针技术以及在光学分子影像中的应用；基于胶原质的二次谐波产生成像，该技术的优点是可用于胶原纤维等在空间结构有固定取向生物组织的无损、无标记定量分析；等离子体光学作为纳米尺度的光操纵的一个范例近来受到极大关注，其中一个主要原因是长期以来人们期望在超过衍射极限尺度下控制光，以期实现光学纳米器件。

本书首先从理论上介绍了计算纳米光学、用于纳米光学优良等离子材料的遗传算法设计。然后，从实验上介绍了相位极化控制、一维纳米粒子阵列形成的等离子驱动的光囚禁和光导引，以及光与等离子光栅的完美耦合等该领域的最新研究动态；等离子体共振能量转移 (PRET) 谱，指出等离子体共振与在金属薄膜中传播的表面等离子共振明显不同。纳米等离子体限制在纳米空间物理范围内，但它可以通过等离子耦合，在邻居粒子间连续传播或将能量共振传递给吸附在金属纳米粒子表面的生物分子，白光照射下的纳米粒子其 Rayleigh 散射光谱将发生凹陷，该凹陷峰的位置对应于生物分子的吸收峰。该章以吸附在金纳米粒子 (30nm) 上的 Cyt c 金属蛋白分子为例，介绍了这种基于 PRET 超灵敏生物分子吸收光谱用于分子成像、极少量的生物分子的检测和纳米粒子探测活细胞内部纳米局域范围内的电荷转移、氧的浓度和 pH 值的变化等前沿动态；红血球纳米尺度的表面起伏作为疾病标志物，在介绍血液学检测的基础上着重阐述了定量相位成像技术，以及用该技术进行血细胞静态和动态检测，特别是血红细胞膜纳米尺度起伏的定量测量。最后分析了血细胞的定量测量在临床疾病诊断和治疗中的应用前景；超分辨远场荧光成像，在讨论超分辨显微成像术基本原理的基础上，介绍了目前最常用的超分辨荧光成像技术 (STED, FPALM, STORM) 及其生物学应用。

总之，本书内容广泛，具有很强的跨学科性。引言部分简明扼要地介绍了后续部分涉及的光学基本原理和生物学基础知识，使不论是生物或是物理及工程专业的读者在阅读此书时都不会感到太困难。每章后都附有大量的推荐读物或参考文献，供进一步研读。大多数章节都做了总结，使读者易于掌握所述内容。因此，通俗易懂、实用性强也是本书的特色。

三、作者背景

本书由二十位作者共同编写，他们主要来自美国伊利诺斯大学及隶属该校的国际著名的贝克曼研究所。此外，还包括美国耶鲁大学、德国海德堡大学、德国马普研究所、美国亚利桑那州立大学和伊利诺斯眼科中心的诸多科研人员。他们均为活跃在各自研究领域的专家，其研究领域涵盖生物光子学、微纳光子学、生物光学成像、电子与计算机工程、生物医学工程、微纳米技术、机械科学与技术、细胞生物学、结构生物学、生物物理与化学、材料科学与生物系统、应用数学和眼科学等多个学科领域。可见，本书的内容覆盖面广，体现了该学科的特点、最新发展方向和研究水平。由于作者都是各自领域的专家学者，因此，本书在内容上具有权威性。

叶安培
于北大燕东园

前 言

《纳米生物光子学》(*Nanobiophotonics*) 作为一本案头参考书, 是专为纳米技术、光子学和生物医学交界领域的研究者设计的。虽然, 这个交叉领域主题是当前人们特别感兴趣的研究方向, 但是, 作者贡献了他们精心准备的材料, 使本书对该领域外的学生和学者而言都是不太晦涩的。本书包括 16 章, 分为三个部分, 从导言到专题反映了该领域的研究进展。导言部分涵盖了癌细胞生物学基础、电磁场和纳米光学。方法综述部分向读者展现了多种有趣的技术: 组织病理学、光散射、二次谐波产生、视觉恢复、低相干干涉测量法、等离子体和负材料。最后, 第三部分是当前研究领域, 包括了目前活跃的研究方向: 红外光谱成像、相干成像、二次谐波成像、等离子体光学与等离子体共振能量转移、纳米尺度的血红细胞波动、超分辨显微术和空间光干涉显微镜。

作者在伊利诺斯大学 (University of Illinois at Urbana-Champaign) 组织了 2009 年纳米生物光子学暑期 (6 月 1 日—6 月 12 日) 学校, 并得到计算纳米网络 (NCN) 的赞助, 该组织是由美国国家科学基金资助的。

如果没有 NCN 及 nanoHub、美国国家科学基金、贝克曼研究所、材料计算中心和电子与计算机工程系的支持, 《纳米生物光子学》的出版是不可能实现的。Umberto Ravaioli, Nahil Sobh 及 Julie McCartney 在组织暑期学校方面起了关键作用。

关于编者

Gabriel Popescu 是伊利诺斯大学 (University of Illinois at Urbana-Champaign) 电子与计算机工程系的一名副教授, 同时也是贝克曼研究所的全职教员。他和同事于 2009 年在贝克曼研究所开始组织纳米生物光子学的暑期学校。该学校得到美国国家科学基金投资的计算纳米网络 (NCN) 组织的赞助。

Contributors

Catherine A. Best, Ph.D. *Department of Medical Cell and Structural Biology, College of Medicine, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAP. 15)*

Joerg Bewersdorf, Ph.D. *Department of Cell Biology, Yale University School of Medicine, New Haven, CT (CHAP. 16)*

Rohit Bhargava, Ph.D. *Department of Bioengineering, Micro and Nanotechnology Laboratory and Beckman Institute for Advanced Science and Technology, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAP. 10)*

Stephen A. Boppart, M.D., Ph.D. *Departments of Electrical and Computer Engineering, Bioengineering, and Medicine, Biophotonics Imaging Laboratory, Beckman Institute for Advanced Science and Technology, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAPS. 8 AND 11)*

Nicholas X. Fang, Ph.D. *Department of Mechanical Science and Engineering, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAP. 9)*

Kin Hung Fung, Ph.D. *Department of Mechanical Science and Engineering, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAP. 9)*

Travis J. Gould, Ph.D. *Department of Cell Biology, Yale University School of Medicine, New Haven, CT (CHAP. 16)*

Renu John, Ph.D. *Biophotonics Imaging Laboratory, Beckman Institute for Advanced Science and Technology, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAP. 11)*

Manuel F. Juetten, Dipl.-Phys. *Department of Cell Biology, Yale University School of Medicine, New Haven, CT
Department of Biophysical Chemistry, University of Heidelberg, Heidelberg, GER
Department of New Materials and Biosystems, Max Planck Institute for Metals Research, Stuttgart, GER (CHAP. 16)*

Logan Liu, Ph.D. *Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAPS. 3 AND 14)*

Marina Marjanovic, Ph.D. *Strategic Initiative on Imaging, Beckman Institute for Advanced Science and Technology, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAPS. 1 AND 4)*

Monal R. Mehta, M.S. *Laboratory for Photonics Research of Bio/Nano Environments (PROBE), Department of Mechanical Science and Engineering, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAP. 12)*

Gabriel Popescu, Ph.D. *Quantitative Light Imaging Laboratory, Department of Electrical and Computer Engineering, Beckman Institute for Advanced Science and Technology, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAPS. 2 AND 5)*

Raghu Ambekar Ramachandra Rao, M.S. *Laboratory for Photonics Research of Bio/Nano Environments (PROBE), Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAPS. 6 AND 12)*

S. Sayegh, M.D., Ph.D. *The Eye Center, Urbana, IL (CHAP. 7)*

Utkarsh Sharma, Ph.D. *Biophotonics Imaging Laboratory, Beckman Institute for Advanced Science and Technology, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAP. 8)*

Maxim Sukharev, Ph.D. *Department of Applied Sciences and Mathematics, Arizona State University at the Polytechnic Campus, Mesa, AZ (CHAP. 13)*

Krishnarao Tangella, M.D. *Department of Pathology, College of Medicine, University of Illinois at Urbana–Champaign and Christie Clinic, Urbana, IL (CHAPS. 1 AND 4)*

Kimani C. Toussaint, Jr., Ph.D. *Laboratory for Photonics Research of Bio/Nano Environments (PROBE), Department of Mechanical Science and Engineering, Affiliate, Departments of Electrical and Computer Engineering, and Bioengineering, Affiliate, Beckman Institute for Advanced Science and Technology University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAPS. 6 AND 12)*

Michael J. Walsh, Ph.D. *Department of Bioengineering, Micro and Nanotechnology Laboratory and Beckman Institute for Advanced Science and Technology, University of Illinois at Urbana–Champaign, Urbana, IL (CHAP. 10)*

Preface

N*anobiophotonics* is designed to serve as a desktop reference for the field at the boundary between nanotechnology, photonics, and biomedicine. Although this interdisciplinary topic is of current, specialized research interest, the authors contributed preparatory material, which makes the book accessible to both students and scholars outside the field. To this end, the book consists of 16 chapters, grouped in three different parts, which reflect the progression from introductory to specialized topics. The Introduction covers the basics of cancer cell biology, electromagnetic fields and nano-optics. In the Review of Methods, the reader is exposed to a number of techniques of broad interest: tissue pathology, light scattering, second-harmonic generation, vision restoration, low-coherence interferometry, plasmonics, and metamaterials. Finally, Part III Current Research Areas cover a range of active research directions: infrared spectroscopic imaging, coherence imaging, second-harmonic imaging, plasmonics and plasmon resonance energy transfer, nanoscale red blood cell fluctuations, super-resolution microscopy, and spatial light interference microscopy.

The authors organized the 2009 Nanobiophotonics Summer School at University of Illinois at Urbana-Champaign, during the period of June 1 - June 12, 2009. The school was sponsored by the Network for Computational Nanotechnology (NCN), which is funded by the National Science Foundation.

Nanobiophotonics would not have been possible without the support from NCN and nanoHub, National Science Foundation, Beckman Institute for Advanced Science and Technology, Materials Computing Center, and Department of Electrical and Computer Engineering. Crucial in organizing the summer school were Umberto Ravaioli, Nahil Sobh, and Julie McCartney.

About the Editor

Gabriel Popescu is an assistant professor in the Department of Electrical and Computer Engineering and a full-time faculty member with the Beckman Institute for Advanced Science and Technology at the University of Illinois at Urbana-Champaign. He and his colleagues started the Nanobiophotonics Summer School at the Beckman Institute in 2009. The school was sponsored by the Network for Computational Nanotechnology (NCN), which is funded by the National Science Foundation.

目 录

撰稿人	xiii
前言	xv

第 I 部分 引言

1 癌细胞生物学 <i>Marina Marjanovic and Krishnarao Tangella</i>	3
1.1 细胞——生命的基本单元	3
1.2 细胞周期	4
1.3 细胞周期的控制	6
1.4 癌细胞生物学	7
1.5 癌细胞分子生物学	12
小结	13
推荐读物	13
2 电磁场综述 <i>Gabriel Popescu</i>	15
2.1 麦克斯韦方程组	15
2.1.1 时空表象中的麦克斯韦方程组	15
2.1.2 边界条件	16
2.1.3 在空间-频率表象 (\mathbf{r}, ω) 中的麦克斯韦方程组	17
2.1.4 亥姆霍兹方程	18
2.1.5 在 (\mathbf{k}, ω) 表象中的麦克斯韦方程组	19
2.1.6 相速度, 群速度和能量速度	21
2.1.7 菲涅耳方程	23
2.1.8 全内反射	26
2.1.9 以布鲁斯特角传播	27
2.2 光与物质相互作用的洛伦兹模型	29
2.2.1 从微观到宏观响应	29
2.2.2 低于共振频率 $(\omega \ll \omega_0)$ 时的响应	32
2.2.3 共振频率 $(\omega \simeq \omega_0)$ 时的响应	32
2.2.4 高于共振频率 $(\omega \gg \omega_0)$ 时的响应	33
2.3 光—金属相互作用的 Drude 模型	33
推荐读物	35

3 纳米光子学导论 <i>Logan Liu</i>	37
3.1 概述	37
3.2 纳米光子学基础	38
3.3 纳米光子学中的量子受限	39
3.4 等离子体光学	41
3.4.1 光场增强与聚集	42
3.5 纳米光子学具有近场光学的特性	43
3.6 纳米光子学中的计算与模拟	44
3.6.1 米氏散射理论	45
3.6.2 麦克斯韦方程组	46
3.6.3 有限元频域纳米光子学模拟	49
3.6.4 有限差分时域 (FDTD)	52
参考文献	53

第 II 部分 方法综述

4 组织病理学: 临床展望 <i>Krishnarao Tangella and Marina Marjanovic</i>	57
4.1 引言	57
4.2 组织准备	58
4.2.1 添加标本	58
4.2.2 核实标本	60
4.2.3 冷冻切片	62
4.2.4 在组织处理器中的标本	64
4.2.5 组织包埋	64
4.2.6 石蜡包块的显微切片	66
4.2.7 组织染色	68
4.2.8 细胞学方法检测标本	71
4.2.9 特殊染色	72
4.3 病理报告	74
4.4 病理学中的预后和预测标志物	74
4.5 纳米尺度下生物光子学的机遇	75
4.6 小结	77
致谢	78
参考文献	78
5 非均匀介质中的光散射 <i>Gabriel Popescu</i>	81
5.1 弹性 (静态) 光散射	81

5.1.1	单个电介质粒子的散射特性	81
5.1.2	瑞利粒子	83
5.1.3	米氏理论	85
5.1.4	体积分布电介质粒子的单粒子散射近似	86
5.2	准弹性(动态)光散射	88
5.3	多次散射	90
5.3.1	辐射传输理论的要素	91
5.3.2	传输理论的扩散近似	93
5.3.3	扩散波谱学	94
	参考文献	96

6 二次谐波产生理论

	<i>Raghu Ambekar Ramachandra Rao and Kimani C. Toussaint, Jr.</i>	97
6.1	引言	97
6.2	非线性显微术	98
6.3	二次谐波产生理论(电磁描述)	99
6.3.1	非线性波方程	101
6.3.2	二阶非线性极化	101
6.3.3	确定二次谐波产生强度	102
6.3.4	不完备相位匹配	105
6.3.5	偏心对称	105
6.3.6	准相位匹配	106
6.3.7	相位匹配带宽	106
6.4	二次谐波产生理论(偶极描述)	107
6.4.1	方向性	108
6.4.2	向后传播的二次谐波产生	109
6.4.3	聚焦效应	110
6.4.4	生物组织中的相位匹配	110
6.5	实验框架	110
6.6	实际考虑	112
6.6.1	辨别二次谐波(SHG)	112
6.6.2	分辨率和穿透深度	112
6.6.3	功率限制	112
6.6.4	二次谐波的优缺点	113
6.7	结论	113
	致谢	114
	参考文献	114

7 纳米生物光子学时代的视觉恢复	<i>S. Sayegh</i>	115
7.1	引言	115
7.2	多层次下的光	116
7.2.1	几何光学, 波动光学和量子光学	116
7.3	视觉	118
7.3.1	视觉敏锐度	118
7.3.2	失明的定义 (法律意义的失明和法律上的推动)	118
7.3.3	失明的原因: 怎样才能看见... 怎样不能	119
7.3.4	眼球解剖学简介	120
7.4	物体的形状	120
7.4.1	眼球	120
7.4.2	角膜	121
7.4.3	举例: 透镜	122
7.4.4	举例: 视网膜	123
7.4.5	视神经	124
7.5	视觉需求的障碍导致的失明	124
7.5.1	透明障碍	124
7.5.2	弯曲或聚焦障碍	125
7.5.3	探测障碍	125
7.5.4	传递障碍	126
7.5.5	处理障碍	126
7.6	诊断工具	126
7.7	治疗工具	129
7.7.1	治疗工具 (光学的)	129
7.7.2	治疗工具 (内科的)	130
7.7.3	治疗工具 (外科的)	131
7.8	小结	137
	推荐读物	137
8 光学低相干干涉技术在纳米医学中的应用		
	<i>Utkarsh Sharma and Stephen A. Boppart</i>	139
8.1	引言	139
8.1.1	OCT 技术的起源与演变	140
8.1.2	在医学中的应用	141
8.1.3	在纳米医学中的应用	141
8.2	低相干干涉测量的基础理论部分	143
8.2.1	OCT 理论	144