



半导体科学与技术丛书

生物光子学

黄维 董晓臣 汪联辉 著



科学出版社

www.sciencep.com

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

半导体科学与技术丛书

生物光子学

黄 维 董晓臣 汪联辉 著

科学出版社

内 容 简 介

生物光电子学的研究内容主要包括三个方面:一是研究生物体系本身的电子学特性、生物体系中的信息存储和信息传递;二是利用光学材料和光学理论解决生物分子识别、信息传递、信息标记问题;三是应用电子信息科学的理论和技术解决生物信息获取、信息分析问题,发展生物医学检测技术及辅助治疗的新方法和新技术,探索开发微型检测仪器。围绕以上研究内容,本书系统、全面而又详细地介绍了生物光电子学的相关基本概念、基本理论及其在生物医学检测等方面的发展状况。基于对生物光电子学理论的理解,书中介绍了生物电子学、生物光子学及各种光电相关的生物传感器,讨论了相应生物传感器在实际电子器件中的应用。例如,场效应晶体管生物传感器、电化学生物传感器、表面等离子激元、微流控等。对于各种传感器件,本书主要强调了它们的基础知识、基本原理、结构和性能的关系等。

本书可供生物、生物电子、光学、光电子学等相关领域的研究人员参考,也可供生物光电子学材料研发领域的科技人员使用。同时,作为一本系统介绍生物光电子学基本知识、基本理论的专业书籍,也可以作为各大院校相关专业师生基础知识读本。

图书在版编目(CIP)数据

生物光电子学/黄维,董晓臣,汪联辉著. —北京:科学出版社,2018.1

(半导体科学与技术丛书)

ISBN 978-7-03-043327-5

I. ①生… II. ①黄… ②董… ③汪… III. ①生物学-光电子学
IV. ①Q②TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 023741 号

责任编辑:钱俊 / 责任校对:钟洋
责任印制:肖兴 / 封面设计:陈敬

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>

北京利丰雅高长城印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:29 3/4

字数:552 000

定价:238.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问: 王守武 汤定元 王守觉

顾 问: (按姓氏拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有焯

主 编: 夏建白

副 主 编: 陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委: (按姓氏拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用，它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新，并在许多技术领域引起了革命性变革和进步，从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动 21 世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后，在国际上对中国禁运封锁的条件下，我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下，自力更生，艰苦奋斗，从无到有，在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果，为我国半导体科学技术事业的发展，为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前，在改革开放的大好形势下，我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统，正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果，发展我国的半导体事业，使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域，包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作，总结自己的研究经验，吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来，为他们提供一套有用的参考书或教材，使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究，为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展，力求覆盖较广阔的前沿领域，展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题，而不求面面俱到。在写作风格上，希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点，深入浅出，图文并茂，文献丰富，突出物理内容，避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会，将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

序

长久以来，生物光电子学现象已为人们发现并探索和研究。早在 1780 年，伽伐尼用莱顿瓶在青蛙腿肌上进行试验，证明动物肌体组织与电的相互作用，并发现了生物电流。基于此，人们进一步发展了心电图和脑电图等检测分析技术，应用于生物医学领域。人们在研究中逐渐发现并证明：不论是能量转换、神经传导，光合作用、呼吸过程，甚至生命起源、大脑思维、基因遗传、癌症防治等过程，都离不开一个神奇的角色——电子和光子作为信息载体。因此一门独立的前沿学科——生物光电子学就此诞生，它涉及材料科学、信息科学、生命科学与光电子学等学科领域，具有鲜明的多学科交叉融合的特色。

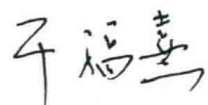
近年来，随着人们对生物光电科学技术的认识不断深入，生物光电子的研究与应用也受到国内外学术界和医学界的广泛关注，但纵观国内外，与生物光电子学相关的著作却屈指可数。人们亟需系统阐述材料科学、生命科学、光电子学和信息科学等四个学科领域交叉研究的生物光电子学专著，由此《生物光电子学》应运而生。

该著作首先介绍了光电子学、分子生物学以及纳米技术之间的关系，并简单介绍了生物光电子学的内容和特点；随后分别对生物电化学、半导体生物电子学以及荧光、拉曼、等离子激元、微流控技术等生物光学检测技术进行了系统分析和讨论，总结了生物光电子技术在生物医学等领域的应用；最后介绍了基于 DNA、蛋白质、细菌等生物分子的生物存储器，常用的生物医学成像与诊断技术及其发展趋势。

该专著由生物光电子学领域的知名院士和杰出中青年专家分章撰写，包括西北工业大学、南京工业大学和南京邮电大学的黄维院士、董晓臣教授、汪联辉教授等。他们在生物光电子学领域有着多年造诣，并长期活跃于生物光电子学研究的最前沿，在生物电化学、生物光子学、生物检测与成像、生物信息存储和显示等方面有着深厚的学术积累与重大的创新突破。因此，相信该书的出版必将引起国内外同行的关注和思考，极大推动生物光电子这一新兴交叉学科的形成和发展，有力促进生物光电子学科在我国的发展及其产业化进程。

该专著可供高等学校、科研院所等机构初涉生物光电子学学科的教师、科研人员、

研究生及高年级本科生作为入门的基础教材，同时对多年从事生物光电子领域研究的专业人士，在了解研究进展、开阔研究视野、启发研究思路等方面，也有所裨益，可以预见该书将会有较为广泛的读者群。

Handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '于福鑫'.

2017年10月18日

前 言

生物光子学是材料科学、物理科学、信息科学、生命科学与光子科学等多个学科交叉融合的新兴学科。该学科将光子科学与技术应用于分子生物学领域，利用光电技术研究生物成像、生物分子检测、生物信息等，在分子层面上探究细胞的结构和功能，为实现细胞及生物分子的检测、改造和疾病治疗提供技术手段。生物光子学既要材料科学与技术的最新研究成果引入到生物医学领域中，利用纳米材料独特的光电性质、局域场增强效应等特性，深入研究生物检测与成像、疾病诊断与治疗，为生物医学应用提供材料保障；也要将生物科学与技术研究成果移植到电子信息领域，特别是把生物信息等过程中的诸多变化规律、重要生物信息引入到信息科学，为生物信息传递与存储提供新的方法。随着科学技术的不断进步，生物光子学在内涵和外延方面还将持续延展，助推材料科学、信息科学、生命科学与健康科学的快速发展。

近年来，随着人们对生物光电科学技术认识的逐步深化，生物光电子的研究与应用也日益受到国内外学术界和产业界的广泛关注，特别是在生命科学应用方面具有独特优势，主要表现在以下几个方面：

(1) 光电子技术作为信息载体，可以实现纳米尺度分子标记及检测、探测分子相互作用过程，发挥光电探针无毒、无害、无损伤，甚至是非侵入的优势。

(2) 光电子技术应用于生物体系具有极高的分辨率与灵敏度。譬如，在探测生物三维结构时，光波动性在空间探测精度上可达到纳米量级，而在动力学探测过程中，其在时间分辨精度上可达到皮秒量级。

(3) 在研究基因表达、蛋白质与蛋白质分子相互作用、生物分子空间时间分布及活细胞和组织中的化学—物理过程等分子过程中，光电子技术可提供有力的分析工具。

正是基于以上优势，生物光子学在材料科学、物理科学、信息科学、生命科学等学科领域高度交叉，其在生物分子检测、生物成像、医学诊断与治疗等方面的研究优势日益凸显，逐步形成了新的生物光子学研究体系。

作为当前备受瞩目的新兴交叉和前沿学科，生物光子学领域的国内外专著尚属凤毛麟角，包括 Willey-VCH 出版的 *Introduction to Biophotonics* 和 *Bioelectronics*；Springer 出版的 *Biophotonics: Optical Science and Engineering for the 21st Century*；

科学出版社出版的《生物医学光子学》和《纳米生物医学光电子学前沿》等，系统阐述材料科学、生命科学、信息科学和光电子科学等四个学科交叉研究的国内外专著则尚属空白。有鉴于此，本书在构建生物光电子学方面做出了大胆尝试和有益探索。

本书作者均为柔性电子学，特别是生物光电子学领域活跃的杰出专家和青年学者，黄维院士领衔的创新团队从事该领域研究二十余年，有着良好的理论及实验基础，取得了大量原创性、系统性的科研成果，在国内外具有较大的影响力，同时也对本领域国际前沿发展状况有着全面的把握。本书作者之一的黄维院士曾率先出版《有机电子学》专著，通过分子的电子结构理论阐释了有机固体聚集态的光电过程与特性，阐述了有机半导体在光电器件领域的应用，形成了有机电子学学科框架体系。随着科学研究的进一步发展以及人们对生物光电子学认识的不断深化，作者充分认识到，撰写一部阐述生物光电子学理论基础及应用技术的专著具有重要意义。

因此，本书在系统介绍和阐释生物光电子学基本概念、原理、规律及其在生命科学领域应用的基础上，聚焦学科前沿，对学科发展动态和趋势进行了详细梳理，引用了作者团队以及国内外同行的前沿工作，旨在促进生物光电子学学科的形成，提升人才培养质量，加速我国生物光电子学的发展。本书的特色在于：系统总结了生物光电子学中所涉及的电化学技术、半导体技术、光谱学技术、微流控芯片技术等，在生物医学检测、成像、诊断与治疗中的应用；每个章节之间有着重要的逻辑关系，体现了光电子学与生物分子学之间的内在必然联系；指出了生物光电子学的发展前景和趋势。希望本书既能够为对生物光电子学感兴趣的初学者提供系统介绍，又可以为专业人士提供借鉴和参考。

鉴于生物光电子学的研究内容、研究方法及检测技术所涉及的领域比较广泛，本书分为9章论述。第1章，系统介绍了光电子学、分子生物学以及纳米技术之间的关系，并简单介绍了生物光电子学的内容和特点；第2~6章，分别从生物电化学、半导体生物电子学以及荧光、拉曼、等离子激元等生物光学检测技术，深入总结了生物光电子技术在生物医学等领域的应用；第7章，介绍了微流控技术及其在生物传感领域的高通量、微型化、高灵敏检测应用；第8章，介绍了基于DNA、蛋白质、细菌等生物分子的生物存储器构筑原理，总结了生物分子信息在光电子学领域的应用；第9章，深入分析了常用的生物成像与诊断技术及其发展趋势，并简单介绍了目前新兴的光学生物检测技术。本书各章节均由该领域著名院士和活跃中青年专家撰写，包括西北工业大学、南京工业大学和南京邮电大学的黄维院士、董晓臣教授、汪联辉教授、石伟博士、沈清明博士、宋春元博士、张磊博士、宇文力辉博士、吴琼博士、苏邵博士、涂真珍博士等。本书最终由黄维院士、董晓臣教授、汪联辉教授整理统稿。

需要指出的是,本书呈现的相当一部分研究工作是在以下科研项目的支持下展开的:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“基于纳米技术的肺癌早期检测研究”(2012CB933301)、国家自然科学基金杰出青年科学基金项目“半导体生物光子”(61525402)、国家自然科学基金项目“针尖石墨烯纳米场效应晶体管生物传感器的研究”(21275076)、“近红外光敏剂负载抗癌药物的光声成像介导双模式肿瘤靶向治疗”(61775095)、“化学气相沉积法制备石墨烯薄膜及其器件的生物传感性能”(61076067)、“纳米等离子体激光光学探针监测药物载体的智能释放研究”(61205195)、“结合微流控和磁性分离技术的肺癌标志物 SERS 生物芯片研究”(61302027)、“UCNP 标记的 ER β 基因对结直肠癌的靶向诊断和治疗作用研究”(61605085)、双标志物血检动脉粥样硬化微型电化学传感器的研究(61601218)、“教育部新世纪优秀人才”(NCET-13-0853)、教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队“有机与生物光子学”(IRT1148)、江苏省杰出青年基金资助项目“基于石墨烯场效应晶体管的纳米电子生物传感器研究”(BK20130046)及江苏省重点研发计划社会发展—临床前沿技术“多功能 Aza-BODIPY 光敏剂在口腔鳞状细胞癌诊疗中的应用”(BE2017741)和“基于微针技术的病理性瘢痕治疗”(BE2016770)等。同时,本书的出版也得到了国家科学技术学术著作出版基金的支持。

相信本书的出版将促进生物光子技术在生命科学领域的应用,提高我国在相关领域的国际竞争力和影响力。由于作者本身知识和专业水平的限制,书中难免存在不妥、甚至错误之处,恳请各位专家学者和广大读者不吝批评指正,以便在改版之际使其更加完善。

黄 维 院士

2017年9月17日于金陵

目 录

《半导体科学与技术丛书》出版说明

序

前言

| | |
|----------------------------------|----|
| 第 1 章 生物光电子学 | 1 |
| 1.1 生物光电子学的范畴 | 1 |
| 1.1.1 生物光电子学的定义 | 1 |
| 1.1.2 生物光电子学涉及的基本理论 | 1 |
| 1.1.3 生物光电子学研究的内容 | 2 |
| 1.1.4 生物光电子学的发展方向 | 3 |
| 1.1.5 光电子技术在分子生物学中的应用 | 3 |
| 1.2 生物材料与生物大分子的相互作用 | 4 |
| 1.2.1 DNA 与生物材料的相互作用 | 5 |
| 1.2.2 蛋白质与生物材料的相互作用 | 7 |
| 1.2.3 细胞膜与生物材料的相互作用 | 8 |
| 1.3 相关技术与应用(概论) | 9 |
| 1.3.1 流式细胞技术 | 9 |
| 1.3.2 生物芯片技术 | 10 |
| 1.3.3 诱捕的前体分子光激活技术 | 11 |
| 1.3.4 生物传感器 | 11 |
| 1.4 纳米尺度的生物光电子 | 12 |
| 1.4.1 纳米粒子的“导线”作用 | 12 |
| 1.4.2 量子点在分子生物学中的应用 | 12 |
| 1.4.3 生物分子作为纳米材料的模板 | 13 |
| 1.5 展望 | 13 |
| 参考文献 | 14 |
| 第 2 章 生物光电子学中的电化学过程 | 16 |
| 2.1 生物光电子学中的电化学过程概述 | 16 |
| 2.2 生物电化学应用技术 | 22 |
| 2.2.1 生物膜与生物界面模拟研究 | 22 |
| 2.2.2 电脉冲基因导入研究 | 24 |
| 2.2.3 电场加速作物生长 | 24 |

| | | |
|--------------|--------------------------|-----------|
| 2.2.4 | 癌症的电化学疗法 | 24 |
| 2.2.5 | 电化学控制药物释放技术 | 25 |
| 2.2.6 | 在体研究 | 25 |
| 2.2.7 | 生物分子的电化学行为研究 | 26 |
| 2.3 | 生物电分析化学 | 26 |
| 2.3.1 | 生物电分析化学概述 | 26 |
| 2.3.2 | 伏安分析在生命科学中的应用 | 27 |
| 2.3.3 | 电化学生物传感器 | 27 |
| 2.4 | 电化学酶传感器 | 29 |
| 2.4.1 | 电化学酶传感器的组成及工作原理 | 29 |
| 2.4.2 | 电化学酶传感器的分类 | 30 |
| 2.4.3 | 电化学酶传感器的发展历程 | 30 |
| 2.5 | 电化学 DNA 生物传感器 | 33 |
| 2.5.1 | DNA 概述 | 34 |
| 2.5.2 | DNA 电化学生物传感器 | 36 |
| 2.6 | 电化学免疫传感器 | 42 |
| 2.6.1 | 免疫传感器的原理 | 42 |
| 2.6.2 | 免疫传感器的分类 | 43 |
| 2.7 | 电化学细胞传感器 | 48 |
| 2.7.1 | 化学组成及胞间化学信号分子 | 49 |
| 2.7.2 | 细胞生物生理行为 | 50 |
| 2.7.3 | 细胞的固定技术 | 51 |
| 2.7.4 | 细胞传感器的种类及应用 | 53 |
| 2.8 | 生物能源系统 | 55 |
| 2.8.1 | 生物燃料电池的应用 | 58 |
| 2.8.2 | 目前发展中存在的问题 | 58 |
| 2.8.3 | 生物燃料电池的发展前景 | 59 |
| 2.9 | 目前研究状况及展望 | 59 |
| | 参考文献 | 60 |
| 第 3 章 | 生物光电子学中的半导体材料及其应用 | 68 |
| 3.1 | 概述 | 68 |
| 3.2 | 半导体材料的基本性质 | 69 |
| 3.2.1 | 半导体的晶体结构 | 70 |
| 3.2.2 | 半导体的电子状态和能带结构 | 71 |
| 3.2.3 | 半导体载流子 | 73 |
| 3.2.4 | 半导体杂质与缺陷 | 74 |
| 3.2.5 | 有机半导体 | 77 |
| 3.3 | 半导体器件 | 79 |

| | | |
|--------------|-------------------|------------|
| 3.3.1 | 半导体 pn 结及二极管 | 79 |
| 3.3.2 | 半导体三极管 | 82 |
| 3.3.3 | 半导体场效应晶体管 | 83 |
| 3.4 | 半导体生物传感器 | 86 |
| 3.4.1 | 生物传感器的发展简史 | 86 |
| 3.4.2 | 生物传感器的分类 | 87 |
| 3.4.3 | 生物传感器的结构和原理 | 88 |
| 3.5 | 半导体生物传感器 | 90 |
| 3.5.1 | 半导体生物传感器工作原理 | 90 |
| 3.5.2 | 场效应晶体管生物传感器 | 91 |
| 3.5.3 | 光电化学型半导体生物传感器 | 94 |
| 3.6 | 半导体生物传感器的应用 | 95 |
| 3.6.1 | 在生物分子检测领域的应用 | 95 |
| 3.6.2 | 在食品分析中的应用 | 108 |
| 3.6.3 | 在环境监测中的应用 | 109 |
| 3.7 | 目前研究状况及展望 | 110 |
| | 参考文献 | 110 |
| 第 4 章 | 荧光生物传感技术 | 114 |
| 4.1 | 概述 | 114 |
| 4.2 | 基于荧光共振能量转移的生物传感 | 115 |
| 4.2.1 | FRET 用于蛋白质结构与功能研究 | 117 |
| 4.2.2 | FRET 在细胞凋亡研究中的应用 | 119 |
| 4.2.3 | 细胞内离子的 FRET 传感 | 120 |
| 4.3 | 基于时间分辨的荧光生物传感 | 121 |
| 4.3.1 | 时间分辨荧光分析技术 | 121 |
| 4.3.2 | 荧光寿命生物传感 | 123 |
| 4.3.3 | 时间分辨荧光传感 | 125 |
| 4.4 | 基于荧光偏振的生物传感 | 130 |
| 4.4.1 | 概述 | 130 |
| 4.4.2 | 荧光偏振传感的应用 | 134 |
| 4.5 | 基于量子点的纳米荧光传感 | 136 |
| 4.5.1 | 量子点的概念 | 136 |
| 4.5.2 | 量子点的光学性质 | 138 |
| 4.5.3 | 量子点荧光生物探针的构建 | 140 |
| 4.5.4 | 量子点的制备 | 141 |
| 4.5.5 | 量子点的表面修饰 | 143 |
| 4.5.6 | 量子点的生物功能化 | 145 |

| | | |
|------------|-----------------------|------------|
| 4.5.7 | 量子点的生物传感应用 | 148 |
| 4.6 | 小结与展望 | 166 |
| | 参考文献 | 167 |
| 第5章 | 拉曼光谱生物检测技术 | 174 |
| 5.1 | 概述 | 174 |
| 5.2 | 拉曼散射 | 175 |
| 5.2.1 | 拉曼散射原理 | 175 |
| 5.2.2 | 拉曼散射应用 | 177 |
| 5.3 | 表面增强拉曼散射 | 179 |
| 5.3.1 | SERS 发展历史 | 179 |
| 5.3.2 | SERS 效应增强机理 | 179 |
| 5.3.3 | SERS 基底制备 | 182 |
| 5.3.4 | SERS 技术在生物学中的应用优势 | 186 |
| 5.4 | 表面增强拉曼散射技术在生物医学领域中的应用 | 186 |
| 5.4.1 | 生物小分子 SERS 传感 | 187 |
| 5.4.2 | SERS 在核酸检测中的应用 | 188 |
| 5.4.3 | SERS 在免疫检测中的应用 | 191 |
| 5.4.4 | SERS 在细胞检测中的应用 | 197 |
| 5.5 | 针尖增强拉曼光谱技术 | 203 |
| 5.5.1 | TERS 技术及其原理 | 203 |
| 5.5.2 | TERS 仪器 | 204 |
| 5.5.3 | TERS 应用 | 205 |
| 5.6 | 展望 | 210 |
| | 参考文献 | 211 |
| 第6章 | 纳米等离子激元生物传感 | 219 |
| 6.1 | 引言 | 219 |
| 6.2 | 等离子共振散射 | 220 |
| 6.2.1 | Mie 散射 | 221 |
| 6.2.2 | 椭球体散射 | 224 |
| 6.3 | 等离子激元材料 | 228 |
| 6.3.1 | 纳米盘 | 229 |
| 6.3.2 | 纳米棒 | 232 |
| 6.3.3 | 纳米三角形 | 235 |
| 6.3.4 | 纳米壳 | 239 |
| 6.4 | 纳米等离子激元单颗粒/分子光谱检测技术 | 243 |
| 6.4.1 | 单颗粒 SPR 散射光谱技术 | 243 |
| 6.4.2 | 金属颗粒的 SPR 光学性质 | 244 |

| | | |
|--------------|------------------------|------------|
| 6.4.3 | 等离子散射的影响因素 | 246 |
| 6.4.4 | 单颗粒直接传感器 | 250 |
| 6.4.5 | 等离子共振能量转移传感器 | 251 |
| 6.4.6 | 等离子激元共振耦合传感器 | 253 |
| 6.5 | SPR 细胞成像与治疗 | 255 |
| 6.5.1 | 生物成像 | 256 |
| 6.5.2 | 癌症治疗 | 258 |
| 6.6 | 展望 | 263 |
| | 参考文献 | 263 |
| 第 7 章 | 微流控芯片技术 | 269 |
| 7.1 | 微流控芯片技术概述 | 269 |
| 7.2 | 微流控芯片的制作技术 | 269 |
| 7.2.1 | 微流控芯片的材料 | 269 |
| 7.2.2 | 微流控芯片的制作方法 | 271 |
| 7.2.3 | 微流控设备分类 | 278 |
| 7.3 | 微流控技术与生物光子学在床旁快速诊断中的应用 | 282 |
| 7.3.1 | 微流控芯片在生物光子学方面的应用 | 282 |
| 7.3.2 | 光流体技术在生物学检测中的应用 | 284 |
| 7.3.3 | 床旁快速诊断 | 290 |
| 7.3.4 | 微流控芯片在 POCT 中的应用 | 292 |
| 7.3.5 | 微流控芯片技术展望 | 302 |
| | 参考文献 | 302 |
| 第 8 章 | 生物信息存储与传递 | 309 |
| 8.1 | 生物信息概述 | 309 |
| 8.1.1 | DNA 和 RNA 的组成与结构 | 310 |
| 8.1.2 | 蛋白质的组成与结构 | 311 |
| 8.1.3 | 遗传信息传递 | 312 |
| 8.1.4 | DNA 的损伤与修复 | 315 |
| 8.2 | 生物存储 | 317 |
| 8.2.1 | 信息存储 | 317 |
| 8.2.2 | 生物存储器 | 318 |
| 8.2.3 | 生物存储的未来 | 325 |
| 8.3 | DNA 计算机 | 325 |
| 8.3.1 | DNA 分子计算机的基本原理 | 326 |
| 8.3.2 | DNA 计算机的优势与不足 | 329 |
| 8.3.3 | DNA 计算机的发展简史 | 330 |
| 8.3.4 | DNA 计算机的应用 | 331 |
| 8.3.5 | DNA 计算机的未来 | 337 |

| | | |
|--------------|------------------------|------------|
| 8.4 | DNA 纳米技术 | 337 |
| 8.4.1 | DNA 纳米技术 | 337 |
| 8.4.2 | DNA 纳米技术的应用 | 340 |
| 8.4.3 | DNA 纳米技术的挑战与展望 | 351 |
| | 参考文献 | 351 |
| 第 9 章 | 生物成像与诊断 | 353 |
| 9.1 | 生物成像与诊断概述 | 353 |
| 9.2 | X 射线成像方法及进展 | 357 |
| | X 射线成像基本原理 | 357 |
| 9.3 | X 射线计算机断层成像方法及进展 | 365 |
| 9.3.1 | 成像原理 | 365 |
| 9.3.2 | 投影重建图像的原理 | 369 |
| 9.3.3 | 投影重建图像的算法 | 371 |
| 9.3.4 | X 射线 CT 的研究热点方向 | 373 |
| 9.4 | 核磁共振成像技术及进展 | 376 |
| 9.4.1 | 磁共振成像概述 | 376 |
| 9.4.2 | 磁共振成像物理基础 | 377 |
| 9.4.3 | 磁共振成像原理 | 380 |
| 9.4.4 | 磁共振成像的研究进展 | 383 |
| 9.5 | 放射性核素成像方法及进展 | 385 |
| 9.5.1 | 放射性核素成像方法概述 | 385 |
| 9.5.2 | 放射性核素成像的物理基础 | 386 |
| 9.5.3 | 放射性核素成像的设备 | 387 |
| 9.5.4 | 主要方法基本原理 | 389 |
| 9.5.5 | PET/CT 成像方法的新进展 | 394 |
| 9.6 | 超声成像方法和进展 | 398 |
| 9.6.1 | 超声波概述 | 398 |
| 9.6.2 | 超声成像的物理基础 | 399 |
| 9.6.3 | 超声成像的原理 | 402 |
| 9.6.4 | 医学超声成像设备 | 404 |
| 9.6.5 | 超声成像的新进展 | 408 |
| 9.7 | 光学生物成像方法及进展 | 414 |
| 9.7.1 | 激光扫描共聚焦显微术 | 414 |
| 9.7.2 | 非线性显微成像 | 422 |
| 9.7.3 | 时间分辨荧光寿命成像 | 426 |
| 9.7.4 | 荧光共振能量转移 | 429 |
| 9.7.5 | 光学相干层析成像 | 432 |
| 9.7.6 | 扩散光学层析成像 | 435 |

| | |
|------------------------|-----|
| 9.7.7 光声层析成像····· | 437 |
| 9.7.8 全内反射荧光显微术····· | 442 |
| 9.8 展望····· | 446 |
| 参考文献····· | 447 |
| 索引····· | 452 |
| 《半导体科学与技术丛书》已出版书目····· | 453 |