



国 家 “十三五” 规划教材



教 育 部 高 等 学 校 教 学 指 导 委 员 会 “十 三 五” 规 划 教 材

BME

全国高等学校教材
供生物医学工程等专业用

生物医学光子学

主 编 骆清铭 张镇西
副主编 高 峰 廖新华



人民卫生出版社





国家卫生健康委员会“十三五”规划教材



教育部生物医学工程专业教学指导委员会“十三五”规划教材

BME

全国高等学校教材

供生物医学工程等专业用

生物医学光子学

主 编 骆清铭 张镇西

副主编 高 峰 廖新华

编 者(以姓氏笔画为序)

丁志华	浙江大学	赵会娟	天津大学
朱 苒	华中科技大学	赵祥伟	东南大学
刘小龙	福建医科大学	姚翠萍	西安交通大学
李 勤	北京理工大学	骆清铭	华中科技大学
李步洪	福建师范大学	席 鹏	北京大学
杨思华	华南师范大学	高 峰	天津大学
张镇西	西安交通大学	顾月清	中国药科大学
屈军乐	深圳大学	钱志余	南京航空航天大学
罗建文	清华大学	廖新华	陆军军医大学
赵元弟	华中科技大学	魏勋斌	上海交通大学

学术秘书

邓 勇 华中科技大学

人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

生物医学光子学/骆清铭,张镇西主编. —北京:人民
卫生出版社,2018

全国高等学校生物医学工程专业首轮“十三五”规划
教材

ISBN 978-7-117-26829-5

I. ①生… II. ①骆…②张… III. ①生物工程-医学
工程-生物光学-高等学校-教材 IV. ①R318.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 149414 号

人卫智网 www.ipmph.com 医学教育、学术、考试、健康,
购书智慧智能综合服务平台
人卫官网 www.pmph.com 人卫官方资讯发布平台

版权所有,侵权必究!

生物医学光子学

主 编: 骆清铭 张镇西

出版发行: 人民卫生出版社(中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E-mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷: 三河市博文印刷有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 850×1168 1/16 印张: 19 插页: 4

字 数: 562 千字

版 次: 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-26829-5

定 价: 56.00 元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

全国高等学校生物医学工程专业首轮规划教材

出版说明

生物医学工程(biomedical engineering, BME)是运用工程学的原理和方法解决生物医学问题,提高人类健康水平的综合性学科。它在生物学和医学领域融合数学、物理、化学、信息和计算机科学,运用工程学的原理和方法获取和产生新知识,促进生命科学和医疗卫生事业的发展,从分子、细胞、组织、器官、生命系统各层面丰富生命科学的知识宝库,推动生命科学的研究进程,深化人类对生命现象的认识,为疾病的预防、诊断、治疗和康复,创造新设备,研发新材料,提供新方法,实现提高人类健康水平、延长人类寿命的伟大使命。

1952年,美国无线电工程学会(IRE)成立了由电子学工程师组成的医学电子学专业组(Professional Group on Medical Electronics, PGME)。这是BME领域标志性事件,这一年被认为是BME新纪元年。1963年IRE和美国电气工程师学会(AIEE)合并组建了美国电气电子工程师学会(IEEE)。同时PGME和AIEE的生物学与医学电子技术委员会合并成立了IEEE医学和生物学工程学会(IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE EMBS)。1968年2月1日,包括IEEE EMBS在内的近20个学会成立了生物医学工程学会(Biomedical Engineering Society, BMES)。这标志着BME作为一个新型学科在发达国家建立起来。

1974年南京军区总医院正式成立医学电子学研究室,后更名为医学工程科。这是我国第一个以BME为内涵的研究单位。1976年,以美籍华人冯元祯教授在武汉、北京开设生物力学讲习班为标志,我国的BME学科建设开始起步。1977年协和医科大学、浙江大学设置了我国第一批BME专业,1978年BME专业学科组成立,西安交通大学、清华大学、上海交通大学相继设置BME专业,1980年中国生物医学工程学会(CSBME)和中国电子学会生物医学电子学分会(CIEBMEB)成立。1998年,全国设置BME专业的高校17所。2018年,全国设置BME专业的高校约160所。

BME类专业是工程领域涵盖面最宽的专业,涉及的领域十分广泛。多学科融合是

BME 类专业的特质。关键领域包括:生物医学电子学,生物医学仪器,医学成像,生物医学信息学,生物医学材料,生物力学,仿生学,细胞,组织和基因工程,临床工程,矫形工程,康复工程,神经工程,制药工程,系统生理学,生物医学纳米技术,监督和管理,培训和教育。

BME 在国家发展和经济建设中的重要战略地位,是医疗卫生事业发展的重要基础和推动力量,其涉及的医学仪器、医学材料等是世界上发展迅速的支柱性产业。高端医学仪器和先进医学材料成为国家科技水平和核心竞争力的重要标志,是国家经济建设中优先发展的重要领域,需要大量专业人才。

我国 BME 类专业设置四十余年,涉及高校一百多所,却没有一部规划教材,大大落后于当前科学教育发展需要。为此教育部高等学校生物医学工程类教学指导委员会(下称“教指委”)与人民卫生出版社(下称“人卫社”)经过深入调研,精心设计,启动“十三五”BME 类规划教材建设项目。

规划教材调研于 2015 年 11 月启动,向全国一百余所高校发出调研函,历时一个月,结果显示开设 BME 类课程三十余门,其中(因被调研学校没有回函)缺材料类相关课程。若计及材料类课程,我国 BME 类专业开设的课程总数约 40 门。2015 年 12 月教指委和人卫社联合召开了首次“十三五”BME 类规划教材(下简称“规划教材”)论证会。提出了生物医学与生物医学仪器、生物医学光子学、生物力学与康复工程、生物医学材料四个专业方向第一轮规划教材的拟定目录。确定了主编、副主编及编者的申报与遴选条件。2016 年 12 月教指委和人卫社联合召开了第二次规划教材会议。会上对规划教材的编著人员的审查和教材内容的审定进行了研究和落实。2017 年 7 月召开了第三次规划教材会议,成立了规划教材评审委员会(见后表),进一步确定编写的规划教材目录(见后表)和进度安排。与会代表一致认为启动和完成“十三五”规划教材是我国 BME 类专业建设意义重大的工作。教材评审委员会对教材编写提出明确要求:

- (1) 教材编写要符合教指委研制的本专业教学质量国家标准。
- (2) 教材要体现 BME 类专业多学科融合的特质。
- (3) 教材读者对象要明确,教材深浅适度。
- (4) 内容紧扣主题,阐明原理,列举典型应用实例。

本套教材包括三类共 18 种,分别是导论类 3 种,专业课程类 13 种,实验类 2 种。详见后附整套教材目录。

本套教材主要用于 BME 类本科,以及在本科阶段未受 BME 专业系统教育的研究生教学使用,也可作为相关专业人员培训教材使用。

全国高等学校生物医学工程专业首轮规划教材

目录

序号	书名	主审	主编	副主编
01	生物医学工程导论	郑筱祥 董秀珍	张建保 赵俊	周凌宏 李永杰
02	生物医学工程 基础医学概论		闫剑群 李云庆	董为人 郑敏
03	生物医学工程 临床医学概论		李宗芳	吉训明 范竹萍 邹建中
04	医学成像	陈武凡	万遂人 康雁	郑海荣 郭兴明 刘锐刚
05	医学图像处理	王广志	冯前进	李纯明 陈阳
06	医学仪器原理与应用		王智彪 李刚	廖洪恩 付峰 柴新禹 吴非
07	生物医学传感技术	彭承琳 王明时	王平 沙宪政	史学涛 吴春生 阮萍
08	生物医学光子学		骆清铭 张镇西	高峰 廖新华
09	生物医学信息学	李兰娟	李劲松	刘奇 张岩 蔡永铭
10	健康信息工程	俞梦孙 董秀珍	陆祖宏	王磊 洪文学
11	神经工程导论	顾晓松 高上凯	明东 尧德中	王珏 杨卓 侯文生 封洲燕
12	生物医学材料学 材料生物学	刘昌胜	尹光福 张胜民	吴江 陈忠敏 陈爱政
13	生物医学材料学 性能与制备		陈晓峰 翁杰	慈勇 郑裕东
14	生物医学材料学 生物学评价	奚廷斐	周长忍 赵长生	
15	生物力学		樊瑜波	刘志成 王贵学
16	临床工程学	黄诒焯	吕毅 包家立	韩玥 乔清理
17	生物医学工程实验 电子工程方向		李刚	
18	生物医学工程实验 生物医学材料方向		尹光福 陈晓峰 周长忍	

全国高等学校生物医学工程专业首轮规划教材

评审委员会

顾问

李兰娟 余梦孙 王威琪 王明时 彭承琳 郑筱祥
董秀珍 黄诒焯 胡广书 陈武凡 陈思平 徐学敏

主任委员

万遂人 东南大学

副主任委员 (以姓氏笔画为序)

王广志 清华大学	刘志成 首都医科大学
尹光福 四川大学	段会龙 浙江大学
吕毅 西安交通大学	骆清铭 华中科技大学
邬洁 人民卫生出版社	

委员 (以姓氏笔画为序)

王平 浙江大学	汪源源 复旦大学
王智彪 重庆医科大学	张建保 西安交通大学
史学涛 第四军医大学	陈晓峰 华南理工大学
冯前进 南方医科大学	金东 《中国医疗设备》杂志社
尧德中 电子科技大学	郑小林 重庆大学
朱怀球 北京大学	赵俊 上海交通大学
刘常春 山东大学	赵会娟 天津大学
李金 哈尔滨工程大学	徐桂芝 河北工业大学
李劲松 浙江大学	康雁 东北大学
李德玉 北京航空航天大学	彭屹 北京协和医学院
汪天富 深圳大学	廖洪恩 清华大学

秘书长

李志勇 东南大学 刘水 人民卫生出版社

主编简介



骆清铭

教授、博士生导师。现任华中科技大学党委常委、副校长，武汉光电国家研究中心主任，国家自然科学基金委员会“生物医学光子学”创新研究群体负责人和国家创新人才推进计划重点领域创新团队负责人，中组部“万人计划”领军人才，教育部科技委生物与医学学部副主任，教育部高校生物医学工程类专业教指委副主任。当选美国医学与生物工程院（AIMBE）、国际光学工程学会（SPIE）、美国光学学会（OSA）、英国工程技术学会（IET）和中国光学学会 Fellow。曾受聘教育部长江学者奖励计划特聘教授（首批），荣获国家杰出青年科学基金，担任国家重大科学研究计划项目首席科学家，国家重大科学仪器设备开发专项项目负责人。自1989年以来，骆清铭一直从事信息光子学与生物医学交叉的学科——生物医学光子学新技术、新方法研究，通过光电信息理论与技术的创新，在光学表征、光学检测和信息解析三个方面实现了突破，在光学分子成像和神经光学成像两个方向上作出了系统性、创新性贡献，是国家自然科学二等奖“生物功能的飞秒激光光学成像机制研究”和国家技术发明二等奖“单细胞分辨的全脑显微光学切片断层成像技术与仪器”第一完成人。历时十余年，他率领研究团队首次获得了亚微米体素分辨率的小鼠全脑高分辨图谱，成果发表于 *Science* 并入选中国科学十大进展，首次展示了鼠脑轴突的长距离追踪，为实现单神经元分辨水平的全脑三维可视化（全脑介观神经联接图谱）研究提供了重要研究手段。提出脑空间信息学新兴交叉学科。



张镇西

教授、博士生导师。现任西安交通大学生物医学分析技术及仪器研究所所长、2006—2010年曾任教育部高等学校生物医学工程专业教学指导委员会委员、2000—2006年曾任西安交通大学生命科学与技术学院副院长、中国技术协会决策咨询专家、《激光生物学报》和《生物医学工程学进展》副主任编委、《中国激光》与《西安交通大学学报》常务编委等。

讲授“生物医学光子学”课程。出版译著《激光与生物组织的相互作用——原理及应用》、《医学工作者的因特网》、《分子光子学》、《激光与生物组织的相互作用原理及应用》(第3版)、《纳米光子学》(获2010年度第十届引进版科技类优秀图书奖)、《医学纳米技术与纳米医学》(获2013年度第十三届引进版科技类优秀图书奖)6部,主编《生物医学光子学新技术及应用》以及《生物医学光子学:诊断、治疗与监测》2部。研究方向为生物医学光子学影像与光谱分析技术、光生物物理学与生物光量子调控技术。获部级科技进步三等奖2项、2006年度陕西省科学技术奖二等奖1项、2006年享受政府特殊津贴、2012年陕西省师德先进个人、2013年获宝钢优秀教师奖,“生物医学光子学”获2012年度陕西省精品课程,获陕西省政府2015年高等教育教学成果一等奖。

副主编简介



高峰

教授、博士生导师，现任天津市生物医学检测与仪器重点实验室主任、中国光学学会生物医学光子学专业委员会副主任委员、*Bio-medical Optics Express* 和《天津大学学报（自然科学与工程技术版）》编委。

长期从事生物医学光子学，医学影像与图像处理和光电检测领域的教学与科研工作，完成和承担了国家自然科学基金、科技部“863”和“973”计划等多项国家及省部级科研项目，曾获省部级科技进步奖 2 项，发表学术论文 200 余篇，主编和参编学术专著各 1 部，取得中国发明专利授权 20 余项。



廖新华

教授，现任陆军军医大学物理学与生物物理学教研室主任。

从事教学工作 31 年来，主讲本科及研究生《医学生物物理学》《生物医学工程学》等理论课程，主持国家自然科学基金面上项目或军队相关科研基金项目若干，主要研究方向为分子生物物理学。以第一作者或通讯作者发表 SCI 等论著 10 余篇，主编或副主编国家级规划教材 5 部，获军队一等奖等优秀成果奖励 3 项。2008 年 9 月，获全军育才奖，2009 年获原第三军医大学“教学明星”称号。

前言

本书是按照国家卫生健康委员会与教育部生物医学工程专业教学指导委员会全面规划的首套生物医学工程专业教材的要求而编写的。适用于生物医学工程专业本科生和本科阶段未经过生物医学工程专业系统学习的本专业研究生，以及对生物医学工程学科感兴趣的读者。

本教材不但注重把生物医学光子学学科涉及的基本理论、方法原理以及目前发展较成熟的技术进行提炼、归纳、整合，而且对其在生物医学中的应用上进行了详尽描述，以便使读者能较系统全面地了解 and 掌握相关知识。全书在内容编排上由浅入深，循序渐进，文字简练，重点突出，注重基础且强调实用，力求具有广泛性，力求层次化、模块化。此外，为了开拓读者的视野和知识面，提高深入学习的兴趣，在教材后面增加超出当前教学大纲的前沿技术部分以飨读者。

本教材共 16 章，其内容分为生物医学光子学的基础、光在生物组织中的传输及测量、生物体系的光学成像及光学操控技术、光在生物医学中的应用四部分。每章末附有思考题，配套的数字资源附有同步练习题，供读者练习选用。本教材的推荐学时数为 50 学时。

本教材由国内从事生物医学光子学相关研究并具有丰富教学经验的专家学者经多次集体讨论后分工编写而成。除了本教材的编委，还有李鹏程、韩晓锋、李鹏、李斯文、王斯佳、李晨曦、林丹樱、胡睿、严伟、顾波波、杨雅敏、汪洋等专家学者协助了本教材相关章节的编写。在此，对参与本教材编写的专家学者们表示衷心的感谢，同时也对本教材学术秘书邓勇教授为本书出版所做的统稿及协调工作表示深切的谢意。

由于生物医学光子学学科是一门不断发展的学科，新的理论方法和技术、新的应用领域不断涌现，再加之编著者学识水平及时间有限，教材中难免存在一些歧义和不足，敬请读者给予批评指正。

骆清铭 张镇西

2018 年 5 月

目 录

绪论	1
一、光子学溯源	1
二、生物医学光子学——光子学的新领域	1
三、生物医学光子学的国内外学科现状	3
第一章 光和分子光谱基础	7
第一节 光的物理基础	7
一、光的本质	7
二、几何光学基本定律	8
三、波动光学的基本原理	9
(一) 光的干涉	10
(二) 光的衍射	11
(三) 光的偏振	11
第二节 分子光谱基础	12
一、光与物质三种相互作用	12
二、电子光谱	14
(一) 紫外可见吸收光谱	14
(二) 发光光谱	15
三、振动和转动光谱	16
(一) 红外吸收光谱	16
(二) 拉曼光谱	21
第二章 生物系统的化学发光	25
第一节 化学发光	25
一、化学发光体系及其机制	25
(一) 鲁米诺体系	25
(二) 吡啶酯体系	26
(三) 过氧草酸酯体系	27
(四) 多羟基化合物类	27

(五) 荧光素酶体系·····	27
二、化学发光在生物医学分析中的应用·····	27
第二节 生物发光 ·····	28
一、生物发光的研究历程·····	28
二、生物发光的机制·····	29
(一) 萤火虫发光体系·····	29
(二) 细菌发光体系·····	30
(三) 海萤发光体系·····	31
(四) 腔肠动物生物发光体系·····	32
第三节 生物发光在生物医学中的应用 ·····	32
一、基于生物发光的分析检测应用·····	33
(一) 基于发光细菌法的分析检测·····	33
(二) 基于 ATP 生物发光法的分析检测·····	33
二、基于生物发光报告基因的生物医学应用·····	34
(一) 生物发光报告基因在生物医学中的应用·····	34
(二) 生物发光成像及其应用·····	34
第三章 荧光与荧光探针 ·····	37
第一节 荧光 ·····	37
荧光的特性·····	37
(一) 荧光的吸收与发射光谱·····	37
(二) 荧光寿命·····	39
(三) 荧光的偶极子特性·····	39
(四) 荧光发射光强·····	40
第二节 荧光探针 ·····	41
一、荧光探针的定义及构成·····	41
(一) 荧光探针的定义·····	41
(二) 荧光探针的构成·····	42
二、荧光探针分类及特点·····	43
(一) 荧光分子探针·····	43
(二) 荧光纳米探针·····	44
(三) 基因编码荧光探针·····	45
三、荧光探针构建·····	46
(一) 荧光探针设计(响应)原理·····	46
(二) 荧光探针的识别方式·····	48
四、荧光探针生物应用进展·····	49
(一) 分析检测·····	49
(二) 生物成像·····	50
(三) 荧光探针的临床应用·····	51
(四) 毒性作用·····	52

第四章 生物介质中光子的传输	55
第一节 光与组织体的相互作用	55
一、组织体对光的吸收作用	56
(一) 吸收系数	56
(二) 生物组织中的吸收物质	56
(三) 各种组织吸收系数	58
二、组织体对光的散射作用	58
(一) 散射系数	59
(二) 相位函数和散射各向异性	60
(三) 不同尺寸粒子的散射描述	61
(四) 生物组织中的散射物质	62
(五) 经过组织散射后出射光子分类	63
(六) 各种组织的散射系数	63
第二节 光在生物组织中传输的辐射传输理论	64
一、辐射传输基本理论与概念	64
二、扩散方程近似及其解	66
(一) 扩散方程的推导及适用条件	66
(二) 边界条件	68
(三) 光源模型	69
(四) 几种常用的解析解	70
(五) 扩散方程的数值解	72
(六) 荧光产生及传播的耦合方程	73
第三节 蒙特卡罗模拟	74
一、MC 方法概述	74
二、模拟 MC 法	75
三、方差减小蒙特卡罗方法	77
第四节 其他近似模型	79
一、朗伯-比尔定律	79
(一) 朗伯-比尔定律——针对纯吸收物质的透射测量	79
(二) 修正的朗伯-比尔定律——针对散射介质	80
二、倍增法	80
(一) 基本理论	81
(二) 组织薄层的反射与透射	82
三、Kubelka-Munk 理论(K-M 模型)	83
第五章 组织光学特性参数测量原理与方法	86
第一节 组织光学特性参数测量方法分类	86
一、直接测量法	86
二、非迭代的间接测量法	87
三、迭代的间接测量法	87

四、测量理论与组织光学特性参数	88
第二节 应用于在体组织的反射测量技术	89
一、稳态漫反射测量	89
(一) 总的漫反射测量	89
(二) 空间漫反射测量	90
二、时间分辨的漫反射测量	92
第三节 应用于离体组织的积分球测量技术	94
一、积分球的基本原理	94
二、单积分球测漫反射与漫透射	95
(一) 利用积分球测混浊样品的漫反射	95
(二) 利用积分球测混浊样品的漫透射	96
三、双积分球测样本的漫反射与漫透射	97
(一) 漫入射	97
(二) 准直入射	98
(三) 双积分球之间的能量交换	98
四、典型的双积分球测量系统	99
五、双积分球测量组织光学特性参数的方法	100
六、组织光学特性参数的提取	101
第六章 显微成像技术	105
第一节 光学显微镜的原理和组成	105
一、光学显微成像原理	105
二、光学显微镜的组成	105
第二节 宽场显微成像	108
一、明场和暗场成像	108
二、相衬显微成像	108
三、微分干涉显微成像	109
四、落射荧光显微成像	110
五、全内反射荧光显微成像	111
第三节 激光扫描共聚焦显微成像	112
一、共聚焦显微成像原理	113
二、激光扫描共聚焦显微成像系统	113
三、激光扫描共聚焦显微成像的关键参数	114
第四节 非线性光学显微成像	114
一、多光子激发荧光显微成像	115
二、二次谐波和三次谐波显微成像	116
三、受激拉曼及相干反斯托克斯拉曼显微成像	116
第五节 超分辨显微成像	118
一、基于结构调制的超分辨显微成像	118
(一) 受激辐射耗尽显微成像	118

(二) 可逆饱和/开关荧光转换显微成像	119
(三) 结构光照明显微成像	119
二、基于分子定位的超分辨显微成像	120
(一) 光致激活定位显微成像和随机光学重构显微成像	120
(二) 光学涨落超分辨显微成像	121
(三) 偏振超分辨显微成像	122
第七章 光学相干层析成像技术	124
第一节 OCT 成像机制	124
一、基本原理	124
二、OCT 信号的数学描述	125
三、OCT 主要性能参数	127
(一) 分辨率	127
(二) 信号噪声比	128
(三) 成像速度	129
(四) 量程	130
(五) 灵敏度随量程衰减	131
第二节 OCT 功能成像	132
一、多普勒 OCT	132
二、OCT 血管造影	134
第八章 激光散斑成像技术	138
第一节 生物组织中的激光散斑现象	138
一、散斑的成因	138
二、生物组织的激光散斑及其应用	140
(一) 激光散斑血流速度检测	140
(二) 植物生长状态监测	141
(三) 其他生物应用	141
第二节 散斑的统计性质	141
一、散斑的基本统计特性	141
二、积分散斑的统计特性	143
(一) 空间积分的散斑统计特性	143
(二) 时间积分的散斑统计特性	145
第三节 激光散斑血流成像	146
一、激光散斑衬比分析血流成像原理	146
二、光学系统参数对激光散斑血流成像的影响	148
三、静态散射对激光散斑血流成像的影响	150
第九章 扩散光学成像技术	152
第一节 扩散光学层析成像	152

一、扩散光学层析成像的模式	152
二、扩散光学层析成像的重建	153
(一) 基本原理	153
(二) 将非线性型问题线性化的方法	155
(三) 非线性问题的迭代求解	155
三、扩散光学层析成像的应用	156
(一) 乳腺癌早期诊断	156
(二) 脑功能成像	158
(三) 新生婴儿脑部组织血流动力学参数监测	159
第二节 荧光分子层析成像	161
一、荧光分子层析成像的系统	162
二、荧光分子层析成像的重建	162
(一) 基本原理	162
(二) 正则化处理	164
(三) 数值优化算法	165
三、荧光分子层析成像的应用	165
(一) 小动物肿瘤模型的早期检测与治疗评估	166
(二) 小动物生理病理学研究	166
(三) 药物临床前筛选和评价的小动物研究	166
(四) 荧光探针的动态监控	167
第十章 光声成像技术	170
第一节 光声效应及其成像原理	170
一、光声现象及其应用背景	170
(一) 概念与背景	170
(二) 发展优势和意义	170
二、光声成像原理	171
(一) 基本原理	171
(二) 数理方程	171
(三) 成像过程	173
(四) 光声成像探测模式及算法	174
第二节 光声显微镜及其应用	176
一、光声显微镜分类及系统	176
二、光声显微镜生物医学应用	178
(一) 无标记单细胞成像	178
(二) 活体微循环结构成像	178
(三) 功能参数检测	179
第三节 光声内镜及其应用	179
一、光声内镜分类及系统	179
二、光声内窥成像的生物医学应用	181