



西安交通大学 本科“十三五”规划教材

普通高等教育生物医学类专业“十三五”规划教材

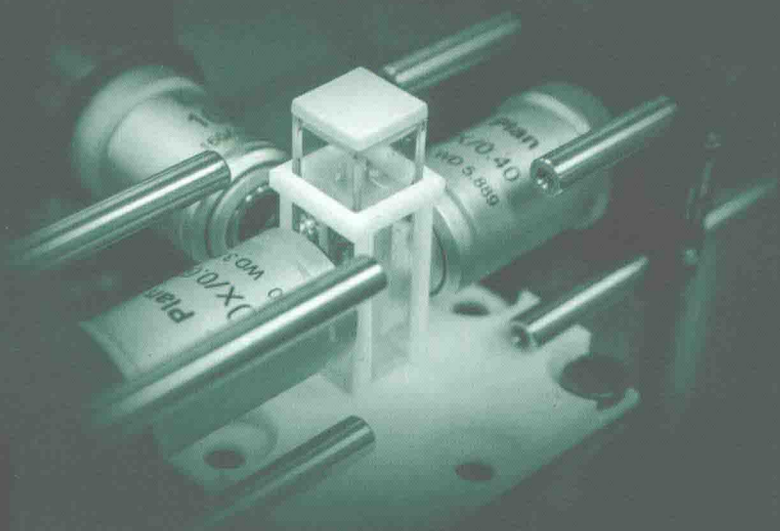
生物医学光子学

诊断、治疗与监测

主编 张镇西

Biomedical Photonics

Diagnosis, Therapy and Monitoring



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学 本科“十三五”规划教材

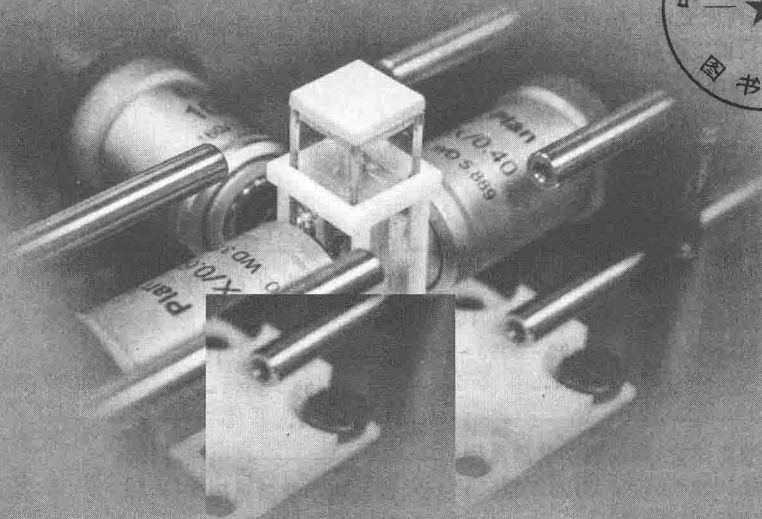
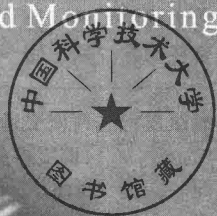
普通高等教育生物医学类专业“十三五”规划教材

生物医学光子学

诊断、治疗与监测

主 编 张镇西
副 主 编 蒋曙东 李步洪 丁志华 陈同生 李 辉 姚翠萍
编 委 李 鹏 王 晶 梁晓轩 王斯佳
统稿秘书 陈韵竹

Biomedical Photonics
Diagnosis, Therapy and Monitoring



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书选取了光子技术在生物医学领域近几年来较为重要和发展前景较好的内容编辑成册,运用光子学的原理和技术,为医学、生物学和生物技术领域中的问题提供解决的思路和方法,为读者展示了生物医学光子学这一极具生命力的前沿交叉研究领域。全书共 10 章,分四个部分,分别介绍了生物组织的光学原理,以及光子技术在医学诊断、医学治疗和功能监测领域的应用,适合从事生物医学工程、光学工程、应用光学等专业的相关学者、研究人员、技术人员、研究生和本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

生物医学光子学:诊断、治疗与监测/张镇西主编. —西安:西安交通大学出版社,2017.8

ISBN 978-7-5693-0055-0

I. ①生… II. ①张… III. ①生物光学-应用-生物医学工程 IV. ①R318.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 213304 号

书 名 生物医学光子学:诊断、治疗与监测
主 编 张镇西
策划编辑 鲍 媛
责任编辑 鲍 媛

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 陕西日报社

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 20.25 彩页 4 页 字数 484千字
版次印次 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5693-0055-0
定 价 58.00 元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126

版权所有 侵权必究

序

2008年,本人组织编写出版了《生物医学光子学新技术及应用》(科学出版社)。又经过近10年的发展,我们共同见证了生物医学光子学的研究进展以及各种新技术与方法在疾病诊断、治疗和监控中的应用。《生物医学光子学:诊断、治疗与监测》(Biomedical Photonics:Diagnosis, Therapy and Monitoring)在介绍生物组织的光学特性和生物光学仿体的基础上,重点介绍了近年来生物医学光子学在诊断、治疗和监测等领域所取得的最新研究成果,可供从事生物医学工程、光学工程、应用光学等专业的相关学者、研究人员、技术人员、研究生和本科生参考。

我们在开展生物医学光子学前沿课题研究的同时,还先后出版了《激光与生物组织的相互作用——原理及应用》(西安交通大学出版社,1999)、《医学工作者的因特网》(西安交通大学出版社,2000)、《分子光子学——原理及应用》(科学出版社,2004)、《激光与生物组织的相互作用——原理及应用(第三版)》(科学出版社,2005)、《纳米光子学》(西安交通大学出版社,2010)和《医学纳米技术与纳米医学》(西安交通大学出版社,2013)等译著。我们不仅学习了国外最新的先进技术,而且还将部分技术的应用和推广融入本书呈现给大家。

衷心感谢国家自然科学基金委员会长期以来对我们研究工作的资助和支持。同时,要特别感谢中国科学院院士、中国人民解放军总医院顾瑛教授及团队,福建师范大学谢树森教授及团队,华中科技大学骆清铭教授及团队、华南师范大学邢达教授及团队和深圳大学屈军乐教授等给予我们研究工作的鼎力支持和帮助。这里还要感谢教育部高等学校生物医学工程专业教学指导委员会主任石遂人教授及全体委员对本书撰写的支持和多次的讨论。

呈现给大家这本书,我们还要感谢姚翠萍、徐正红、张虹、喻有理、熊建文等为编著本书的上一版《生物医学光子学新技术及应用》所作出的贡献。以上一

版书为课程媒介,我们开设的“生物医学光子学”也被评为了2012年度陕西省精品课程(<http://bmp.xjtu.edu.cn/bmpjpkc/>)。本书是在《生物医学光子学新技术及应用》上根据近几年国内外生物医学光学相关技术进行的更新与补充,并邀请了国内外生物医学光学领域的数位专家学者参与了不同章节的撰写。感谢蒋曙东、李步洪、丁志华、陈同生、李辉和姚翠萍等副主编,以及编委浙江大学李鹏副教授、德国吕贝克大学梁晓轩博士、西安交通大学王晶和王斯佳博士、全书统稿秘书陈韵竹硕士等积极参与本书的撰写工作。本书的第2章“生物光学仿体”及第5章“荧光成像介导恶性肿瘤切除术”由蒋曙东教授组织撰写,第3章“光学相干层析成像技术”由丁志华教授、李鹏博士组织撰写,第4章“光学显微成像”由李辉研究员组织撰写,第6章“光动力疗法”由李步洪教授组织撰写,“光动力疗法”中的“光化学内化”一节由王斯佳博士负责撰写,第7章“纳米尺度激光紧聚焦光穿孔技术”由梁晓轩博士组织撰写,第8章“心脏光标测技术”由王晶博士组织撰写,第9章“荧光共振能量转移技术”由陈同生教授组织撰写,第10章“光学纳米探针”由姚翠萍教授组织撰写。这里还要感谢付磊、王思琪博士生、王森豪及王佳壮硕士生为本书的撰写所作出的努力。特别是王森豪硕士生用相机记录了实验室为获得科研数据而自行搭建的测量设备及为来访人员拍摄值得留存的照片,还要感谢他尽心维护生物医学光子学教育部网上合作研究中心西安交通大学分部的网页(<http://bmp.xjtu.edu.cn/>)。

感谢生物医学光子学教育部网上合作研究中心西安交通大学分部的全体成员,他们的辛勤努力获取了国家自然科学基金委等项目的支持,拓展了课题组的研究方向,而且还极大提升了研究水平。感谢先后参与了课题研究而为本书基奠素材以及编著和审校工作的课题组成员,他们分别是杨晔、牛金龙、张苏娟、侯振清、肖化、吴红、姚翠萍、熊建文、喻有理、徐正红、张虹、任文君、贺庆丽、严秋芳、杨继庆、张宝琴、刘小龙、何清杭、武亚艳、屈晓超、李忠明、王晶、胡敏、熊予莹、彭年才、李政、梅曦、刘成波、梁佳明、张云、梁晓轩、隆弢、王斯佳、许皓等博士,闫秋芳、杨新会、李红丽、莫晓燕、孙瑜、于亚非、吕未江、向勇阳、艾文静、薛建平、唐艳、胡悦、殷小鹏、金妍姝、冷玉珊、臧留琴、仝泽峰、孔祥云、李春彬、李炜、卢熙、季晓璐、张丽丽、龚大江、刘家家、易超、袁辉、侯文祯、刘维佳、许浩、刘琛、邓亮、赵晓晔、李仁娟、宋欣、陈博、杨洋、钱康、郑诗强、吴洁、宋敏敏、白桐、王泽林、雷迪、贺婷、王萌萌、宋攀婷、常振楠、周湘连、王兵、陈韵竹、张策

程等硕士,宋璟波、王波、付磊、王思琪、贺宇路、沈利剑、张璐薇、蔡志雄等博士生,以及周一成、王森豪、王佳壮、杨睿文、周全等在读研究生等。

这里还要感谢西安交通大学出版社的鲍媛编辑与我们长期合作,她的努力使我们翻译的书籍多次获国家引进版书籍的表彰*。

此书是我们组织从事生物医学光子学领域同事编写的一本教材,希望该书的出版对推动我国生物医学光子学学科的发展有所帮助。由于时间紧迫,加之能力所限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

张镇西

于西安交通大学生命科学与技术学院

生物医学分析技术与仪器研究所

zxzhang@mail.xjtu.edu.cn

2017年8月3日

* 《纳米光子学》(西安交通大学出版社,2010)于2011年8月荣获2010年度(第十届)国家引进版科技类优秀图书奖。

《医学纳米技术与纳米医学》(西安交通大学出版社,2013)于2014年8月荣获2013年度(第十三届)国家引进版科技类优秀图书奖。

作者介绍

张镇西 西安交通大学生命科学与技术学院教授、博士生导师，生物医学分析技术与仪器研究所所长。1990年获西安交通大学生物医学工程及仪器博士学位。1991年至1993年在中国科技大学进行博士后研究。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，在德国斯图加特大学、慕尼黑放射与环境保护研究所、吕贝克大学等从事科学研究。研究方向为生物医学光子学影像与光谱分析技术。出版译著6部，编写研究生教材一部；获省部级科技进步二等奖一项，三等奖两项；主持国家自然科学基金重点项目、仪器专项等十余项；2006年享受政府特殊津贴。



蒋曙东 美国达特茅斯学院工学院副教授，博士生导师。1992年获东京工业大学光电子学博士学位。拥有5项国际专利，主要研究方向为光学分光及成像技术在微弱光检测特别是医疗领域中的应用。在影像医学及生物医学工程学领域高水平杂志上发表论文70余篇，其中有多篇发表在影像医学及生物医学工程学领域高水平杂志上。参与编著《平移多模态光学成像》(*Translational Multimodality Optical Imaging*, Artech House)和《选择性乳腺成像》(*Alternative Breast Imaging*, Springer)。长期担任 *Breast Cancer Research*, *J Biomed Opt*, *Biomed Opt Express*, *Med Physics*, *Opt Letters*, *Appl Opt* 等杂志的审稿人。以首席负责人身份完成并正在进行3项美国国立卫生研究院项目。



李步洪 福建师范大学光电与信息工程学院教授，博士生导师。教育部新世纪优秀人才和福建省百千万领军人才。曾任西安交通大学博士后、多伦多大学访问学者和柏林洪堡大学高级研究学者。兼任中国光学学会激光医学专业委员会副主任委员、福建省激光医学专科分会主任委员和福建省光学学会副理事长。主要从事医学光子技术及其临床应用研究，主持国家自然科学基金项目5项，其中含国际合作研究重点项目1项和重点项目(合作)2项；发表论文90余篇，授权发明专利3项；获福建省科学技术奖3项；获得福建省青年科技奖、运盛青年科技奖、优秀留学回国人员和优秀科技工作者等荣誉称号。



丁志华 浙江大学光电科学与工程学院教授、博士生导师,激光生物医学研究所所长。1989年获浙江大学学士学位,1996年获中国科学院上海光学精密机械研究所博士学位。现任生物医学光子学专业委员会副主委。曾在日本静冈大学、美国加州大学欧文分校等从事科学研究。长期从事先进光子技术及其在生物医学中的应用与基础研究,重点研究方向为光学相干层析成像(OCT)技术及应用。主持国家自然科学基金重点项目、国家863计划课题等十余项,发表学术论文100余篇,获得中国发明专利30余项。



陈同生 华南师范大学激光生命科学教育部重点实验室和生物光子学研究院教授,博士生导师,学术委员会主任。广东省“千百十人才工程”省级培养对象。主持国家重大科研仪器研制项目、国家863项目和国家自然科学基金项目等国家级项目6项。研究领域主要涉及生物医学光子学、生物物理学、肿瘤细胞生物学、分子生物学。发表学术论文140余篇,获授权国家发明专利9项。长期担任 *ACS Nano*, *Nano Letters*, *Biomaterials*, *Microscopy and Microanalysis*, *J Microscopy*, *BBA-Molecular Cell Research*, *Apoptosis*, *Cancer Letter* 等杂志的审稿人。



李辉 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所江苏省医用光学重点实验室研究员。2013年获中科院“百人计划”支持。从事单分子生物物理方面的研究工作,主要发展单分子操纵、单分子荧光观测和超高分辨荧光显微镜技术及其在生命科学领域的应用。在 *Nature communications*, *Nano Letters*, *Soft Matters* 等国际顶级学术杂志上发表论文20余篇。担任 *Phys. Biol.*, *Nanotechnology*, *Surface Science* 等杂志特约审稿人。



姚翠萍 西安交通大学生命科学与技术学院副教授、博士生导师。西安交通大学生物医学工程博士,曾两次在德国吕贝克大学交流学习。发表文章30余篇,参与国家自然科学基金课题包括重点、仪器专项等5项,主持国家自然科学基金项目3项。参与译/编著4本。主要研究方向为生物医学光学传感与医学应用。



目 录

序

作者介绍

第一部分 生物组织的光学原理

第 1 章 生物组织光学特性	(3)
1.1 光学特性基本原理	(3)
1.2 组织中的光传输	(7)
1.3 光与组织相互作用机理	(11)
参考文献	(23)
第 2 章 生物光学仿体	(25)
2.1 组织光学仿体的定义与发展	(25)
2.2 仿体光学特性的组成	(27)
2.3 常用的光学仿体	(29)
参考文献	(36)

第二部分 光子技术在医学诊断中的应用

第 3 章 光学相干层析成像技术	(41)
3.1 导论	(41)
3.2 工作原理	(41)
3.3 性能参数	(44)
3.4 发展动态	(49)
3.5 总结	(53)
参考文献	(54)
第 4 章 光学显微成像	(60)
4.1 光学显微成像的基本要素	(60)
4.2 光学层切成像	(65)
4.3 超分辨光学显微成像	(76)
4.4 非标记光学显微成像	(88)
参考文献	(98)

第三部分 光子技术在医学治疗中的应用

第 5 章 荧光成像介导恶性肿瘤切除术	(105)
5.1 用于手术介导的荧光探针	(105)
5.2 荧光介导颅内肿瘤切除	(107)
5.3 荧光介导其他器官肿瘤的切除手术	(109)
5.4 近红外荧光介导微创手术	(111)
5.5 光介导在器官移植手术中的应用	(112)
5.6 荧光介导手术的局限与挑战	(113)
参考文献.....	(114)
第 6 章 光动力疗法	(116)
6.1 光动力疗法的基本原理和作用机制	(118)
6.2 光源	(119)
6.3 光敏剂	(121)
6.4 氧	(128)
6.5 光化学内化	(134)
6.6 剂量学	(138)
6.7 临床应用	(154)
6.8 发展趋势	(155)
参考文献.....	(156)
第 7 章 纳米尺度激光紧聚焦光穿孔技术	(161)
7.1 光穿孔技术研究背景	(161)
7.2 激光紧聚焦光穿孔技术	(162)
7.3 在体光穿孔研究	(169)
7.4 光穿孔技术的发展趋势	(170)
7.5 总结	(170)
参考文献.....	(171)

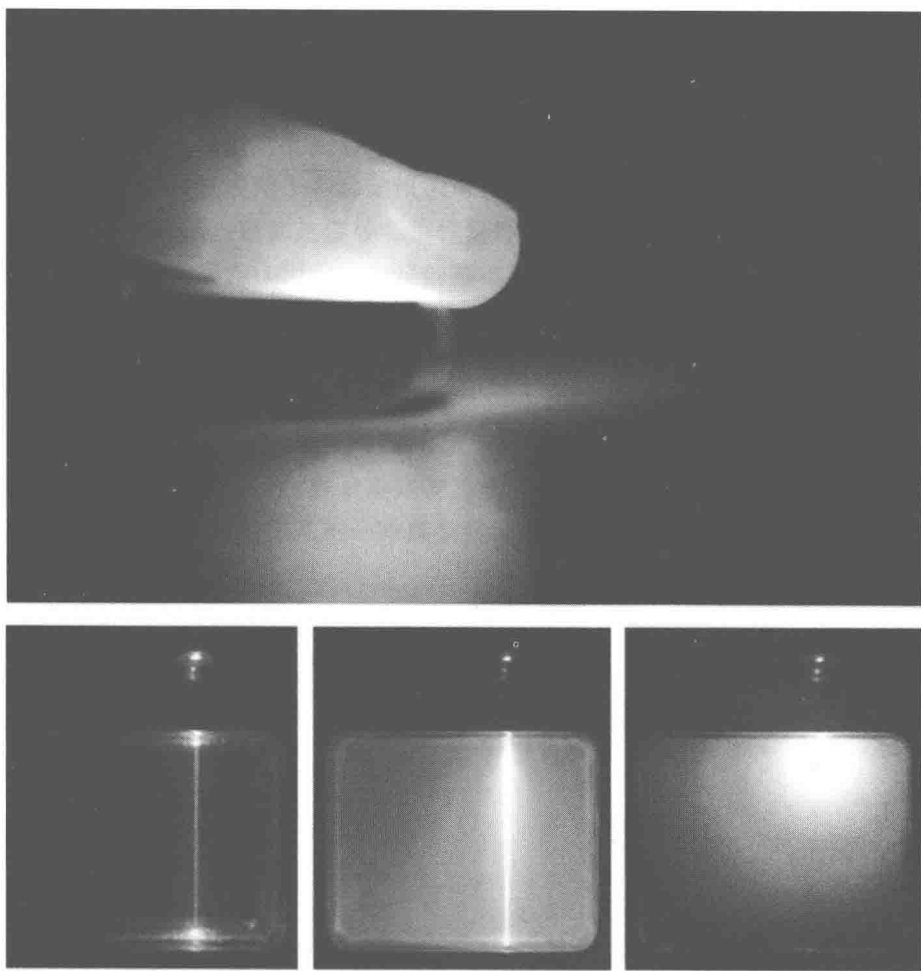
第四部分 光子技术在功能监测中的应用

第 8 章 心脏光标测技术	(177)
8.1 电压敏感染料	(177)
8.2 基本原理	(179)
8.3 系统结构	(180)
8.4 实验系统	(182)

8.5	实验方法	(183)
8.6	心脏光学标测实验技术的应用	(185)
8.7	光学标测技术的发展及其局限性	(189)
	参考文献	(190)
第9章	荧光共振能量转移技术	(192)
9.1	荧光发射过程	(192)
9.2	FRET 特性	(195)
9.3	供体-受体对(D-A 对)的 FRET 理论	(196)
9.4	FRET 过程的类型	(197)
9.5	常用的 FRET 荧光基团	(198)
9.6	FRET 影响供体受体的光学性质	(201)
9.7	FRET 信号的定性检测分析	(201)
9.8	FRET 信号的定量检测分析	(202)
9.9	常用的 FRET 信号检测分析仪器	(214)
9.10	FRET 技术在生物医学中的应用	(215)
	参考文献	(225)
第10章	光学纳米探针	(229)
10.1	金纳米微粒	(229)
10.2	量子点探针	(284)
	参考文献	(291)

第一部分

生物组织的光学原理



光在手指和不同散射特性仿体中的传播(梁晓轩、梁佳明摄)

当把激光应用于生物组织时,其相互作用是多种多样的。不同组织的特殊性质,以及激光的多参数类型是这种多样性的原因。在组织的光学特性中,最重要的是反射、吸收以及散射系数,它们共同决定了某一波长的光在组织中的总传输。描述这些特性的传输理论直接论述了光子在吸收介质和散射介质的传输过程,它在处理激光与生物组织相互作用中已得到广泛应用。将激光系统应用于各种靶组织可观察到多种潜在的光与组织的相互作用,研究光在组织中的传播过程,诸如热传导和热容量等性质。

本章将讨论物质受到光作用时所出现的基本现象,以及研究组织光学特性所需建立的光传输和数学模型,最后针对光与组织相互作用的主要类型进行讨论。

1.1 光学特性基本原理

本节我们将讨论光在传播过程中碰到物质会发生的几种现象:反射、折射、散射、吸收。图 1-1 为光束入射到薄片物质上的一种典型情况。

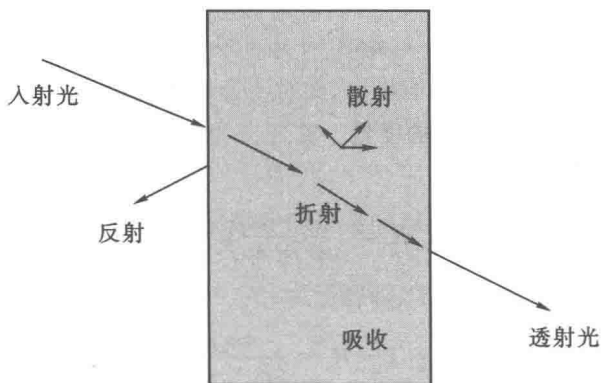


图 1-1 反射、折射、散射和吸收的几何关系

1.1.1 反射和折射

光在一种给定折射率的物质中传播,当传输到另一种不同折射率物质的交界面时,光的传播路径将发生改变。与边界或边界曲率相比,如果波长足够小,将会引起如图 1-2 所示

的反射和折射现象。光发生反射还是折射的概率取决于两种介质的折射率、入射角,以及辐射的偏振度。

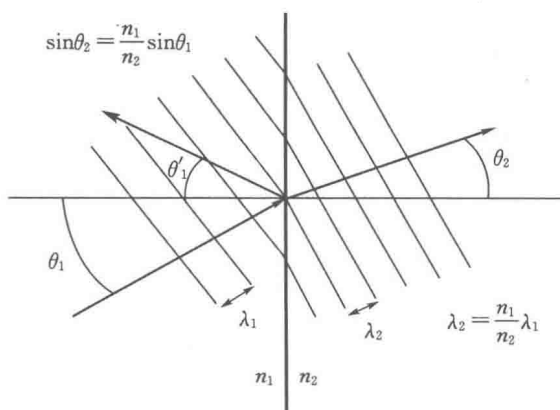


图 1-2 光入射到边界时发生的反射和折射现象

光传播中入射角和折射角的关系由已知的斯涅耳定律给出:

$$\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1 \quad (1-1)$$

式中, θ_2 为折射角; n_1 和 n_2 分别为两种介质相应的折射率, 定义为

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad (1-2)$$

$$n_2 = \frac{c}{v_2} \quad (1-3)$$

其中 c 表示光在真空中的速度, v_1 和 v_2 分别是光在前后两种介质中的传播速度。式(1-1)可写成:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (1-4)$$

仅当 $\sin\theta_1 > n_1/n_2$ 时, 式(1-4)不成立, 此时不会出现折射, 而是全反射。

光强反射率 R 是对反射辐射量的度量。它定义为反射光强度占入射光强度的百分比, 由下式表示:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1-5)$$

而对于穿透界面的光强透射率 T , 则表示为

$$T = 1 - R = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1-6)$$

1.1.2 散射

当把弹性约束的带电粒子置于电磁波中, 粒子就处于由电场引起的运动中。若波的频率与粒子自由振动时的固有频率相等, 就会发生谐振并伴有相当大的吸收。波的频率与粒子的固有频率不相等时才会发生散射。在散射中根据是否有部分入射光子的能量被转化, 将散射可分为弹性散射与非弹性散射。我们首先考虑弹性散射。

在弹性散射中,入射光子与散射光子的能量相同。一类特殊的弹性散射称为瑞利散射。图 1-3 表示的是瑞利散射的简单几何图形。一个平面电磁波照射到一个总厚度为 L 的薄散射介质上,在某一特定的时间入射波的电场可以用下式表示:

$$E(z) = E_0 e^{ikz}$$

式中, E_0 为入射电场的振幅; k 为传播矢量的值; z 表示光轴。

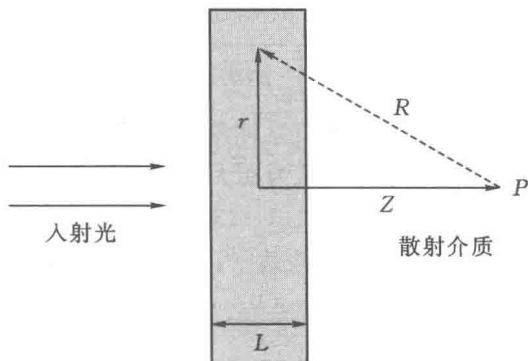


图 1-3 瑞利散射的几何图形

在图 1-3 中可以看到,由具有厚度 L 的薄介质所造成的散射强度正比于散射系数 α_s 和 L ,即

$$I_s \sim \alpha_s L \quad (1-7)$$

在光轴上 z 处的复振幅可以通过把所有散射球面波的振幅叠加到入射平面波的振幅上来获得:

$$E(z) = E_0 \left(e^{ikz} + L \sqrt{\alpha_s N} 2\pi \int_z^\infty e^{ikR} dR \right) \quad (1-8)$$

由于波列的长度有限,在 $R \rightarrow \infty$ 处的散射可以忽略,且 $\lambda = 2\pi/k$ 。因此,式(1-8)可化为

$$E(z) = E_0 e^{ikz} (1 + i\lambda L \sqrt{\alpha_s N}) \quad (1-9)$$

而当光从自由空间进入折射率为 n 的介质时有

$$n - 1 = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sqrt{\alpha_s N} \quad (1-10)$$

由式(1-7)和(1-10)知,当忽略了波长对 n 的依赖时,我们最终可得到瑞利散射定律,如:

$$L_s \sim \frac{1}{\lambda^4} \quad (1-11)$$

如果考虑到散射角 θ ,更为详细的表达为

$$I_s(\theta) \sim \frac{1 + \cos^2(\theta)}{\lambda^4} \quad (1-12)$$

当 $\theta=0$ 时,表示前向散射。

瑞利散射是一种弹性散射,即散射光和入射光有相同的 k 和 λ 值。一种最重要的非弹性散射称为布里渊散射(Brillouin scattering)。它是声波穿过介质时引起折射率不均匀而产生的。因为散射粒子总是向着或者背离光源的方向运动,所以光的布里渊散射将导致频率的升高或降低。

Parsa 等人发现,在大多数生物组织中,光子更可能发生前向散射。他们根据这些实验数据定义了一个光子关于角度 θ 的散射概率函数 $p(\theta)$ 将是非常方便的^[1]。如果 $p(\theta)$ 不依赖于 θ ,称为各向同性散射,否则称为各向异性散射。

散射的各向异性由各向异性系数 g 度量,当 $g=1$ 表示完全前向散射, $g=-1$ 表示完全后向散射,当 $g=0$ 表示各向同性散射。在极坐标系中, g 定义为

$$g = \frac{\int_{4\pi} p(\theta) \cos\theta d\omega}{\int_{4\pi} p(\theta) d\omega} \quad (1-13)$$

式中, $p(\theta)$ 为概率函数; $d\omega = \sin\theta d\theta d\phi$ 为单位立体角。根据定义,各向异性系数 g 实际上代表散射角 θ 的余弦的平均值。可以近似地认为在大多数生物组织中, g 的值为 $0.7 \sim 0.99$ 。因此,相应的散射角大多数为 $8^\circ \sim 45^\circ$ 。在式(1-13)中最重要的一项是函数 $p(\theta)$,它也称为相函数。据 Yoon 等人的观点,它可由下式表达^[2]:

$$p(\theta) = \frac{1}{4\pi} \frac{u + (1-u)(1-g^2)}{(1+g^2 - 2g\cos\theta)^{3/2}} \quad (1-14)$$

1.1.3 吸收

吸收是由于部分光能转换成热运动或者吸收材料分子的某种振动。在生物医学光子学领域,吸收过程对诊断和治疗的应用研究至关重要。

(1)诊断应用:特殊波长中分子能量跃迁已经有很好的定义,可用于分子的光谱特性研究。

(2)治疗应用:能量的吸收是治疗过程中激光对生物组织产生物理效应的主要机制。

介质的吸收率被定义为吸收强度与入射强度之比。一个完全透明的介质允许光通过而不吸收,即从这个介质中进入的总辐射能量与出射的能量相等。在生物组织中,对可见光来说角膜和晶状体被认为是高透明度的。相反,使入射辐射几乎降为零的介质称为不透明的介质。

“透明”和“不透明”是相对的,因为它取决于波长。例如,主要由水组成的角膜和晶状体,在红外光谱波长内表现出强烈的吸收。因此,在这个光谱范围这些生物组织呈现不透明。实际上,没有介质对于电磁谱的所有波长可被称为“透明”或“不透明”。

如果物质对一定光谱范围内的所有波长的强度衰减程度相似,这个物质就呈现一般吸收。在可见光的情况下,这种物质在我们的眼睛中呈现为灰色。而选择性吸收,是指对特定波长的吸收比其他波长的吸收强。颜色的存在实际上产生于选择吸收。通常,体色和表面颜色是有区别的。一般来说,体色是由能穿透物质一定距离的光产生。在反向散射时,只在选定波长被部分地吸收之后光才从表面向后偏离和逃逸。相反,表面颜色来自表面本身的反射。它主要取决于反射比,这与入射辐射的波长有关。本书第2章描述的生物光学仿体就是与组织的吸收和散射密切相关。

介质吸收电磁辐射的能力取决于许多因素,主要是其原子和分子的电子结构、辐射的波长、吸收层的厚度和温度或吸收剂的浓度等内部参数。朗伯定律和比尔定律是两个经常用到的定律,它们分别描述的是厚度和浓度在吸收上的效应。表示为

$$I = I_0 e^{-\mu z} \quad (1-15)$$