

文章编号: 1001-3806(2007)03-0265-03

肌肉组织的光透射特性与辐射传输理论的修正

来建成, 李振华, 王春勇, 王清华, 贺安之

(南京理工大学 信息物理与工程系, 南京 210094)

摘要: 为了更确切地认识光在生物组织内的传输规律, 通过实验测量研究了鸡肌肉组织和猪脂肪组织切片的光透射特性。结果表明, 激光束经过肌肉组织后, 能在远场处产生明显的衍射条纹。为了解释这种衍射现象, 将衍射效应考虑进辐射传输模型, 对辐射传输理论进行了修正。修正后的辐射传输理论不仅能定性地说明肌肉组织衍射现象的成因, 而且其数值结果与实验现象吻合较好, 说明了修正后辐射传输理论的正确性。

关键词: 医用光学与生物技术; 光透射特性; 实验测量; 辐射传输理论; 生物组织

中图分类号: Q631 **文献标识码:** A

Light transmitting properties of muscle tissues and modification of radiative transfer theory

LAI Jian-cheng, LI Zhen-hua, WANG Chun-yong, WANG Qing-hua, HE An-zhi

(Department of Information Physics & Engineering Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract Light transmitted properties of chicken muscle tissue are experimentally measured under the condition of far field. And the results show that slice muscle tissue can make the incident laser beam generate obvious diffraction phenomena. In order to interpret the experimental results, the radiative transfer theory is modified and the diffraction effects are considered in the modified theory. According to the modified model, theoretical calculation is executed for light transmitted properties of chicken muscle tissues and the result is well matched with the experimental results.

Key words medical optics and biotechnology; light transmitted properties; experiment measurement; radiative transfer theory; biological tissues

引 言

新兴的生物医学光子学的根本目的在于探讨和发展基于光学手段的疾病治疗与诊断技术。为此, 首先要建立贴切的生物组织光传播模型, 因为无论是基于激光的诊断还是治疗, 光或激光只有透过皮肤及肌肉, 才能传到皮下组织和器官^[1-3]。虽然, 在组织光学的前期研究中建立了不少处理组织内光传输与分布问题的模型与方法, 如漫射近似理论、随机游走理论、蒙特卡罗模拟等等, 它们在一定程度上解决了组织内的光传输问题, 但是由于它们都是基于唯像模型——辐射传输理论, 忽略了光的波动性及生物组织的具体结构, 这使得它们在处理具有规则结构组织内的光传输问题时失效^[4-8]。作者在鸡肌肉组织薄片的光透射特性实

验中观测到了清晰的 0 级 ~ 2 级衍射条纹。为了能在理论上解释或计算肌肉组织薄片的光传输特性, 作者在辐射传输理论的基础上, 考虑了肌肉薄片组织的周期结构和光的衍射效应, 提出用衍射和漫射相结合的辐射传输模型。改进后的模型不仅能直观地给出肌肉组织切片衍射和散射的成因——组织内折射率分布的空间周期性和亚微米尺度上的不均匀性, 而且实验条件下的理论计算与实验结果的一致性较好, 充分说明了经修正的辐射传输理论的正确性和有效性。

1 实验描述

鸡肌肉组织和猪脂肪组织在冷冻状态下被切成大约 400 μm 厚的组织薄片, 然后放入如图 1 所示的样品固定盒中, 在室温条件下进行解冻测量。实验中, 选择输出功率 5mW, 波长 632.8 μm 的单模 He-Ne 激光器 (TEM₀₀ 模) 为实验光源。由 He-Ne 激光器发出的激光束经过一个光衰减器 (用于调节入射激光的强弱) 之后, 垂直入射到生物组织切片上, 在组织切片的背面形成一个透射光场。在组织切片的背面放置一个傅里叶透镜, 这样就可以在傅里叶透镜的后焦面上观察透射

基金项目: 江苏省高等学校研究生创新计划资助项目 (200312)

作者简介: 来建成 (1978-), 男, 讲师, 主要从事光电测试技术、新型激光器件以及生物医学光学领域的相关研究。

Email: laijiancheng@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2006-03-13 收到修改稿日期: 2006-06-05

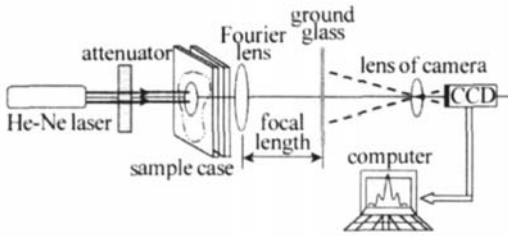


Fig 1 Experimental setup

光场的远场分布特征。为了便于 CCD 相机拍摄傅里叶透镜后焦面上的光场分布, 在傅里叶透镜的焦面上放置一个毛玻璃屏。采用 CCD 摄像头 (或数码相机) 结合微机系统对毛玻璃屏上的光斑图像进行实时采集、存储与分析。

2 典型的实验结果及理论分析

图 2 和图 3 中给出了单模激光垂直照射下, 鸡肌肉组织切片透射光场的远场分布。图中存在清晰的 0



Fig 2 The distribution of light transmitted from chicken muscle tissue at far field

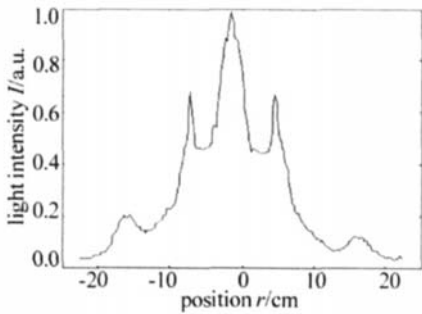


Fig 3 The longitudinal sectional distribution of Fig 2

级 ~ 2 级衍射条纹。为了说明这些清晰的衍射条纹是肌肉组织自身的特殊结构对入射光束进行调制的结果, 对猪皮下脂肪组织切片进行了对照实验, 测量结果如图 4 和图 5 所示。从图中可以看出, 经过猪皮下脂

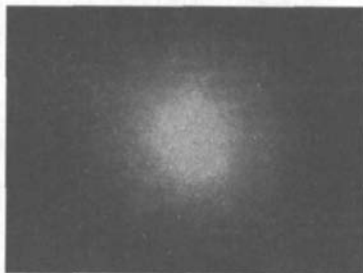


Fig 4 The distribution of light transmitted from porcine adipose tissue at far field

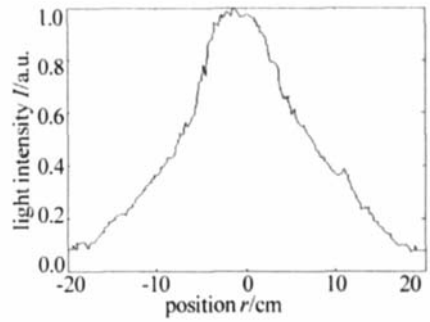


Fig 5 The longitudinal sectional distribution of Fig 4

肪组织传输后的激光束在毛玻璃屏上形成的光场分布是一种典型的类高斯分布。它与通过传统辐射传输理论^[9]计算得到的透射光场分布——类高斯分布相一致的, 而鸡肌肉组织切片的实验结果与理论计算 (类高斯分布) 之间存在较大的差异。通过分析, 发现原因在于: 辐射传输理论把光在生物组织中的传播过程抽象成一种能量粒子的传输过程, 粒子数密度等价于光能, 同时忽略生物组织自身的具体结构, 将组织理解为大量均匀随机分布的散射和吸收中心, 由吸收系数、散射系数和各向异性因子来描述组织的光传输特性。这样一个模型成立的前提是“组织的具体结构可以被忽略, 且能被看成是一种准均匀介质 (光学不均匀性要求小, 且在生物介质内均匀分布)”。由于辐射传输理论自身的这种限制, 使得它不能考虑组织自身结构对光传输过程的影响。而在实验中选择的鸡肌肉组织恰好存在比较规则的周期结构, 同时组织的厚度较薄, 这时漫射散射光还没能占据主导地位, 这就导致了实验结果与辐射传输理论计算结果的不一致。作者认为这一原因也是文献 [10] 中报道的“蒙特卡罗模拟 (以辐射传输理论为基础) 计算得到的距入射光束距离小于 2mm 范围内肌肉组织的漫反射分布与实验测量不一致”的真正原因。

文献 [11] 中曾经讨论过激光肌肉衍射条纹的机理与探测, 但是它仅用平面振幅光栅衍射理论计算了蟾蜍骨骼肌的光栅常数。单纯的振幅调制光栅衍射只能简单地解释衍射条纹的形成机理, 但是用其来处理肌肉组织的光透射问题是不完整和不充分的, 原因在于生物组织是一种强散射介质不能将其散射特性忽略。因此, 需要有一个比较完整的光传输模型来描述肌肉组织内的光传输规律。

在光学领域, 用于描述介质光传输特性的独立光学参量是介质的折射率, 因此, 也希望将折射率作为描述生物组织光传输特性的基本参量, 并在此基础上构建新的组织光传输模型或修正传统的光传输理论, 使其适用于描述肌肉组织等具有规则结构的组织内的光传输过程。生物组织的折射率应该是一个复折射率

(折射率是复数)的概念, 折射率的虚部代表了生物介质对光波的吸收能力, 折射率分布的空间不均匀性是组织衍射和散射特性的内在原因。因而从折射率的角度出发, 可以较好地描述生物组织的光学性质。一般的生物介质可以看成是一个兼具衍射、散射和吸收的综合体, 较大尺度的折射率不均性使得生物介质具备光的衍射能力, 小尺度的折射率不均匀性(亚微米尺度)造成生物介质的强散射特性。根据实验观察, 肌肉组织内大尺度的折射率不均匀性的分布具有周期性, 形成类似衍射光栅的结构; 在大尺度折射率不均匀的基础上, 同时还存在亚微米尺度上的不均匀性, 它是造成生物组织强散射特性的内在原因。基于上述考虑, 将肌肉组织抽象成一个光栅, 同时在光栅内部随机均匀分布着大量散射元。如果考虑到在组织“光学窗口”内肌肉组织的吸收很弱, 可以进一步将肌肉组织抽象成一个内部均匀随机分布着大量散射元的相位光栅。

根据上述考虑, 可以将衍射效应引入辐射传输理论。在激光照射下, 组织内的光场辐射强度 L 可以分为两部分: 约化入射强度(相干项) L_c 和漫射强度(非相干项) L_d

$$L = L_c + L_d \quad (1)$$

在辐射传输理论中, 仅考虑能量的输运过程, 因此约化入射强度(相干项) I_c 和漫射强度(非相干项) I_d 分别满足:

$$\frac{dL_c(r, \vec{s})}{ds} = -\mu_1 L_c(r, \vec{s}) \quad (2)$$

$$\frac{dL_d(r, \vec{s})}{ds} = -\mu_1 L_d(r, \vec{s}) +$$

$$\frac{\mu_1}{4\pi} \int P(\vec{s}, \vec{s}') [L_d(r, \vec{s}') + L_c(r, \vec{s}')] d\omega' \quad (3)$$

式中, μ_1 为消光系数, $P(\vec{s}, \vec{s}')$ 是散射的相函数, r 为空间位置坐标, \vec{s} 和 \vec{s}' 为不同方向向量, s 表长度, $d\omega'$ 表立体角微元。

在辐射传输理论的基础上, 考虑光的衍射效应。由于漫射光在组织内经历了多重散射过程, 因此不用考虑其衍射效应; 约化入射强度(相干项)没有经历散射过程, 因此, 它要参与衍射过程。基于上述考虑, 在对辐射传输理论进行修正时, 只需要考虑约化入射强度的衍射问题。

约化入射强度 I_c 在满足(2)式的同时, 其相位将受到折射率空间周期分布 $\Delta n_0(x)$ 的调制:

$$E_c(r, \vec{z}) = \sqrt{\exp(\mu_1 z)} \exp\{-i\omega[\Delta n_0(x)z/c]\} \quad (4)$$

$$L_c(r, \vec{z}) = E_c(r, \vec{z})E_c^*(r, \vec{z}) \quad (5)$$

式中, E_c 为与约化入射强度对应光波电场, $\Delta n_0(x)$ 为折射率的周期分布, ω 为光波的角频率, c 为光的传播速度, z 表 z 轴坐标, \vec{z} 为 z 的方向向量。

约化入射强度(相干项)经过厚度为 h 的肌肉组

织的传输后, 在出射面上形成一个褶皱波面, 褶皱的波面在远场条件下将发生夫朗和费衍射:

$$E_c(l) = \sqrt{\exp(\mu_1 h)} \int \exp\{ik[lx + \Delta n_0(x)h]\} dx \quad (6)$$

式中, $l = \sin\theta$ θ 为衍射角, h 为组织厚度, q 为入射光束的半峰半宽, k 为波矢。

图 6 中形象地给出了激光束经肌肉组织的传输后在远场处形成衍射光场分布的示意图。修正后的辐射

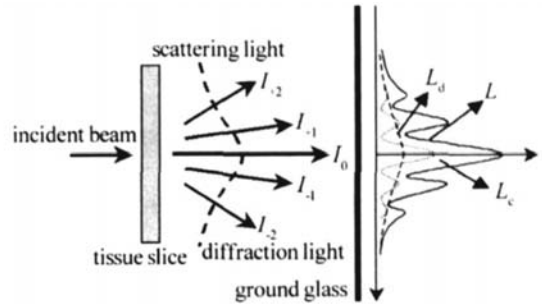


Fig 6 The schematic of a laser beam propagates in a tissue slice and forms a light distribution at far field

传输理论, 可以直观地解释实验现象。在远场处的光场分布由两部分组成: 由约化入射强度项形成的衍射光场和漫射光背景。清晰的衍射条纹是约化入射强度受肌肉组织内折射率的周期分布调制的结果; 由于组织的强散射特性, 使得在衍射条纹的基础上, 叠加了一个漫射光背景。随组织切片厚度增加约化入射强度呈指数形式衰减, 而漫射背景增强, 这是实验现象“随着组织切片厚度的增加, 条纹的对比度下降”的内在原因。此外, 当组织内不存在周期结构(或大尺度的折射率不均匀性)时, 如实验中的猪皮下脂肪组织, (4)式, (5)式和(6)式退化成(2)式, 因此, 猪皮下脂肪组织切片的实验结果与辐射传输理论的计算结果有较好的一致性。

根据改进后的模型, 对鸡肌肉组织薄片在远场条件下的光透射特性进行了理论计算, 结果如图 7 所示。

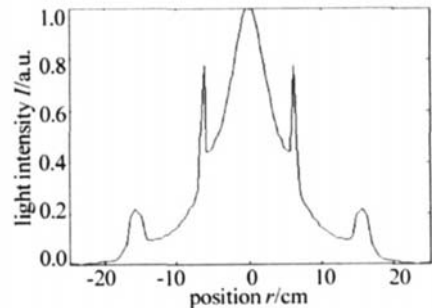


Fig 7 The theoretical result of light distribution at far field which is formed by the light emitted from chicken muscle tissues

计算中所用鸡肌肉组织的基本光学参数如表 1 所示,

Table 1 Optical parameters of chicken muscle tissues

scattering coefficient/cm ⁻¹	absorption coefficient/cm ⁻¹	anisotropic factor
229	0.12	0.965

动速率大,这一现象随着入射角的增大越趋明显。

同时研究了不同入射角对光子晶体传输特性的影响。随着入射角的增大,禁带区域及禁带中的缺陷模均向高频(短波)方向移动, s 偏振的禁带逐渐增宽而 p 偏振的禁带变化不明显;禁带中 p 偏振的缺陷模频率较 s 偏振的移动大。此外随着入射角的增大, s 偏振的缺陷模越来越细,而 p 偏振的缺陷模则逐渐变宽;相应的 s 偏振的缺陷模品质因子越来越大,而 p 偏振的缺陷模品质因子则逐渐变小。

参 考 文 献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys Rev Lett* 1987, 58(20): 2059~2062
- [2] PAN Y, ZHANG J, HU G. Photonic crystal fiber and laser [J]. *Laser Technology* 2004, 28(1): 48~51 (in Chinese).
- [3] FINK Y, WANN JN, FAN S *et al*. A dielectric omnidirectional reflector [J]. *Science* 1998, 282(5394): 1679~1682
- [4] GUPTA S, TUTTLE G. Infrared filters using metallic photonic band gap structures on flexible substrate [J]. *Appl Phys Lett* 1997, 71(17): 2412~2414
- [5] DENG K, SHI D, JIANG M *et al*. Progress in the study of photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* 2004, 21(5): 555~564 (in Chinese).
- [6] YAKOYAMA H, NISHIKI K, ANAN T *et al*. Controlling spontaneous emission and thresholdless laser oscillation with optical microcavities [J]. *Opt & Quant Electron*, 1992, 24(2): 245~275.

- [7] VILLENUEVE P R, FAN S, JOANNOPOULOS J D. Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tunability, and coupling efficiency [J]. *Phys Rev* 1996, B54(11): 7837~7842
- [8] FAN S, VILLENUEVE P R, JOANNOPOULOS J D *et al*. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals [J]. *Phys Rev Lett* 1997, 78(17): 3294~3297
- [9] LIDORILIS E, BUSCH K, LIQ M *et al*. Optical nonlinear response of a single nonlinear dielectric layer sandwiched between two linear dielectric structure [J]. *Phys Rev* 1997, B56(23): 15090~15099
- [10] JOHN S, AKOZBEK N. Nonlinear optical solitary waves in a photonic band gap [J]. *Phys Rev Lett* 1993, 71(8): 1168~1171
- [11] STANLEY R P, HOUDRE R, OESTERLE U *et al*. Impurity modes in one-dimensional periodic systems: the transition from photonic band gaps to microcavities [J]. *Phys Rev* 1993, A48(3): 2246~2250.
- [12] TSAI Y C, SHUNG K W K, GOU S C. Impurity modes in one-dimensional photonic crystals: analytic approach [J]. *Journal of Modern Optics* 1998, 45(10): 2147~2157.
- [13] XU G, OUYANG Z, AN H *et al*. Investigation on the bandwidth and quality factor of the defect mode in a photonic crystal with a defect [J]. *Acta Photonica Sinica* 2003, 32(9): 1079~1082 (in Chinese).
- [14] CHEN X, SHEN X, JIANG M *et al*. Studies on the defect mode properties of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Photonica Sinica* 2005, 34(12): 1876~1880 (in Chinese).
- [15] SHEN X, CHEN X, JIANG M *et al*. Effects of quasiperiodicity on photonic crystal defect modes [J]. *Optoelectronics Letters* 2006, 2(4): 292~294
- [16] JIANG M, JIANG X, SHEN X *et al*. Study on the polarization property of 1-D photonic crystals [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* 2005, 22(4): 612~616 (in Chinese).

(上接第 267 页)

其衍射结构的周期为 $2\mu\text{m}$ 。将理论计算结果与实验测量结果进行比较,两者吻合较好,这说明了改进后的模型用于分析肌肉组织光透射特性的正确性和有效性。

3 结 论

作者在实验上测量了远场条件下鸡肌肉组织的光透射特性,并拍摄到了 0 级~2 级清晰的衍射条纹。在理论上,以折射率分布为基础考虑约化入射强度的衍射效应,对辐射传输理论进行了修正。修正后的辐射传输理论不但能直观地给出肌肉组织切片衍射和散射的成因——组织内折射率分布的空间周期性和亚微米尺度上的不均匀性,而且在实验条件下的计算结果与实验的一致性较好。本文中的研究工作对于认识光在生物组织内的传输规律,以及建立统一的组织光传输理论具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] TUCHN V V. Reviews of topic problems——light scattering study tissues [J]. *Physics* 1997, 40(5): 495~515
- [2] CHARLES L M, NATALIE C, LENOREM *et al*. Three-dimensional tumor location in thick tissue with the use of diffuse photon-density waves [J]. *Appl Opt* 1998, 36(1): 214~220
- [3] BACKMAN V, WALLACE M B, PERELMAN L T *et al*. Detection of

preinvasive cancer cells——early warning changes in precancerous epithelial cells can now be spotted in situ [J]. *Nature* 2000, 406(6791): 35~36

- [4] SHIMARU A. Wave propagation and scattering in random media [M]. New York: Academic, 1978. 1~320
- [5] WANG L H. Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues [D]. Houston: University of Texas, 1992. 1~113.
- [6] LI Zh H, LAI J Ch, WANG Zh D *et al*. The application of impulse response function in Monte Carlo simulation of light distribution in biological tissues [J]. *Laser Technology* 2001, 25(4): 263~268 (in Chinese).
- [7] LAI J Ch, LI Zh H, HEA Zh An improved computing method for analyzing the spatial resolved reflectance from biological tissues [J]. *Chinese Physics Letters* 2003, 20(12): 2158~2160 (in Chinese).
- [8] DURIAN D J, RUDNICK J. Photon migration at short times and distances and in cases of strong absorption [J]. *JOSA* 1997, A14(1): 235~245.
- [9] LI Zh H, MA Ch G, LAI J Ch *et al*. Theoretical and experimental research on light transmitting property of biological tissues [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology* 2001, 25(3): 273~278 (in Chinese).
- [10] KIENLE A, LILGE L, PATTERSON M S *et al*. Spatially resolved absolute diffuse reflectance measurements for noninvasive determination of the optical scattering and absorption coefficients of biological tissue [J]. *Appl Opt* 1996, 35(13): 2304~2314.
- [11] XU X, ZHANG Zh X, ZANG H. The mechanism and detection of laser muscle diffraction [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* 1989, 8(4): 208~210 (in Chinese).