

# 光源会聚角对生物组织光传输问题的影响\*

徐乃洲 来建成 王春勇 李振华 贺安之

(南京理工大学理学院信息物理与工程系, 南京 210094)

**摘要** 基于漫射理论,建立了可处理任意空间光源照射下生物组织内光传输问题的计算模型,并编制了相应的计算程序.在此基础上,通过大量的数值计算讨论了光源会聚角对组织内光场空间强度分布和组织漫反射场的影响.结果表明:随着光源会聚角的增大,组织内光场分布和组织漫反射的分布趋于集中,当大于一特定角度之后,光场强度的分布区域迅速扩大,强度迅速下降,同时强度出现极大值的位置开始偏离中心位置.

**关键词** 会聚光源;计算模型;漫射理论;组织光学

**中图分类号** Q631 **文献标识码** A

## 0 引言

光在生物组织内的传输规律是组织光学的基本问题之一,深入认识光在生物组织内的传输规律是发展各种疾病的光学无创伤诊断和治疗手段的前提和基础<sup>[1]</sup>.

组织光学的研究者们已经提出了多种近似理论来处理生物组织内的光传输问题,如 Monte Carlo 方法,随机游走理论,路径积分法、离散坐标法以及漫射近似理论等等<sup>[2-7]</sup>.这众多的研究主要集中于处理线光束在生物组织内的传输过程或是垂直照射的准直光束在生物组织内的传输过程,而未见有对会聚光束照射条件下,生物组织内的光传输问题进行研究的报道.事实上,在实际的临床应用中,如共焦扫描成像术或激光手术刀头等均采用会聚光束照射生物组织<sup>[8,9]</sup>,因此研究会聚光在生物组织内的问题对于优化设计光学成像术与精确确定光学疗法所需的光辐射剂量有着重要的理论意义.

本文基于漫射近似理论,建立了可处理任意光源照射下生物组织内光传输问题的计算模型,分析了光源会聚角对生物组织内光场分布与组织漫射场分布的影响.

## 1 理论模型

组织光学发展了多种处理生物组织光传输问题的近似理论,这其中数 Monte Carlo 方法和漫射近似理论的应用最为广泛.目前,对于任意光源照射下生物组织内的光传输问题唯有 Monte Carlo 模型能够处理,但受到计算量大的限制,即便是对简单情况下的光传输过程进行分析也需在工作站上完成.而

漫射理论是辐射传输理论的一种近似解,它要求组织的有效散射系数远大于吸收系数,即  $(1-g)\mu_s \gg \mu_a$ ,对于一般的生物组织这一条件容易得到保证.它能够给出点光源照明条件下半无限或层状组织内部光场空间分布和漫反射场空间分布的解析形式,但是,其现有的应用集中于分析点源或无限细光束在生物组织内的光传输问题,未见有用于任意分布光源情况的研究报道.

为此,本文在深入剖析现有漫射理论的基础上,建立了一个可用于处理任意空间光源照射条件,生物组织内光传输问题的计算模型.基本思路如下:首先是将任意空间光源抽象成沿不同方向传播的光线系,这个过程也就是“先将光源按空间位置离散化成网格微源,然后再根据光源的角分布情况对每个微源发出的光进行角度离散化,由此得到可较好描述入射光源特征的一个光线系”;然后求解整个描述光源特征的光线系在生物组织内的传输情况.由于漫射方程(即便是辐射传输方程)的线性特征,使得整个光线系综合作用于组织的结果等价于各光线单独照明生物组织时结果的线性叠加,因此只要求得各光线单独照明时组织内光场的分布情况,即可得到整个光源照射组织时的光场分布,如图1.对于单一无限细光束照明生物组织的情况,根据已有研究可将其近似看成是组织内部某一位置处一虚

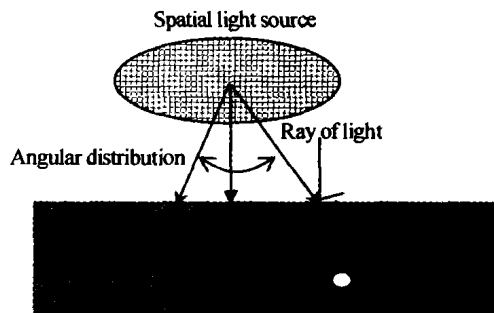


图1 基于漫射近似的计算模型  
Fig.1 Computational model based on the diffuse approximation

\*江苏省高等学校研究生创新计划项目资助

Tel:025-84315699 Email:lzhjcfg@mail.njust.edu.cn

收稿日期:2004-04-05

拟点源照明生物组织的情况,点源在组织内的位置可根据光线的入射角和组织的特性确定

$$\begin{aligned} x &= x_0 + S_x^* 3D \\ y &= y_0 + S_y^* 3D \\ z &= z_0 + S_z^* 3D \end{aligned} \quad (1)$$

这里,  $(x, y, z)$  为虚拟点源的位置,  $(x_0, y_0, z_0)$  为无限细光线在组织界面入射点的位置坐标,  $(s_x, s_y, s_z)$  为无限细光线经界面折射后在组织内传播的方向余弦,  $D$  为组织的漫射系数.

对于点源照明层状或半无限生物组织情况,组织光学的研究已经给出了漫射方程的解析解,式(2)、(3)分别是点源照明下半无限生物组织时组织内部光场强度分布与组织漫反射光场强度分布的解析形式<sup>[6]</sup>

$$h(\rho)_{x,y,z} = \frac{1}{4\pi D} \left\{ \frac{1}{r_1} \exp \left[ - \left( \frac{\mu_a r_1^2}{D} \right)^{1/2} \right] - \frac{1}{r_2} \exp \left[ - \left( \frac{\mu_a r_2^2}{D} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (2)$$

$$h(\rho)_{x,y,0} = \frac{1}{4\pi} \left\{ z_0 \left( \mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_1} \right) \frac{\exp(-\mu_{\text{eff}} r_1)}{r_1^2} + (z_0 + z_b) \left( \mu_{\text{eff}} + \frac{1}{r_2} \right) \frac{\exp(-\mu_{\text{eff}} r_2)}{r_2^2} \right\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} r_1 &= [\rho^2 + (z - z_0)^2]^{1/2}, \\ r_2 &= [\rho^2 + (z + 2z_b + z_0)^2]^{1/2} \end{aligned}$$

式中,  $D$  为漫射系数,其大小为  $\{3[\mu_a + \mu_s(1-g)]\}^{-1} \mu_{\text{eff}}$ ; 为有效衰减系数,其大小为  $\sqrt{\mu_a/D}$ ;  $z_b$  为外延边界条件描述参数,其大小为  $2AD$ ;  $\mu_a, \mu_s, g$  和  $z_0$  分别为组织散射系数、吸收系数、各向异性因子和点源在组织内的埋藏深度.

根据前面对整个计算模型的描述,任意光源照射下生物组织的光场分布可以通过式(4)进行计算.

$$L(x, y, z) = \int_{\Omega} h(x, y, z; x', y', z') \cdot \Omega(x', y', z') dx' dy' dz' \quad (4)$$

式中,  $h(x, y, z; x', y', z')$  为点源照明下,生物组织内的光场空间分布或组织漫反射场分布,是描述组织光传输特性的 Green 函数;  $\Omega(x', y', z')$  为与光源各条光线相对应的虚拟点源在组织内的分布情况.

## 2 会聚光源在组织内的传输过程计算

在详细分析之前,我们将以相同条件下的 Monte Carlo 模拟结果作为参考,说明本文所建立计算模型的正确性.如图2所示的光路,准直激光束通过一个会聚透镜照明生物组织,通过改变透镜的焦距可以改变照明光束的会聚角,因而借此模型来分析光束会聚角对组织内光场分布的影响.这里假

定入射光束的空间强度分布服从高斯分布,光束的  $1/e$  全宽度为  $2R$ ,透镜距组织样品的高度为  $h$ ,透镜的焦距为  $f$ ,因此光束的会聚角  $\theta = \sin^{-1}(R/f)$ .为了进行对照,两种模型对同一参数条件进行计算.取高斯光束的  $1/e$  全宽度为  $0.5 \text{ cm}$ ,透镜距界面的高度为  $0.1 \text{ cm}$ ,组织光学参数如表1.通过计算发现本文所建模型的计算结果与 Monte Carlo 模拟的结果吻合较好,其中会聚角为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  时组织漫反射曲线分别如图3(a)和图3(b),两种模型计算结果的吻合性充分说明本文所建计算模型的正确性,但在计算效率方面,本文提出的模型性有着很强的优越性,就上述问题在同一计算机上实现计算,本文所建的模型需要的计算时间不到  $1 \text{ min}$ ,而 Monte Carlo 模拟需要几小时以上的计算时间,因而,本文建立的

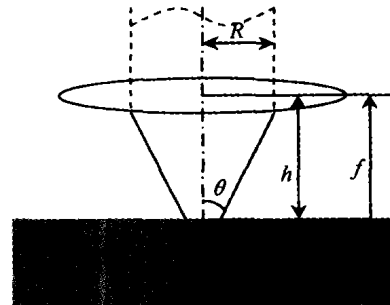


图2 会聚光束照射生物组织的物理模型  
Fig.2 Physical model of converging laser beam incident on biological tissues

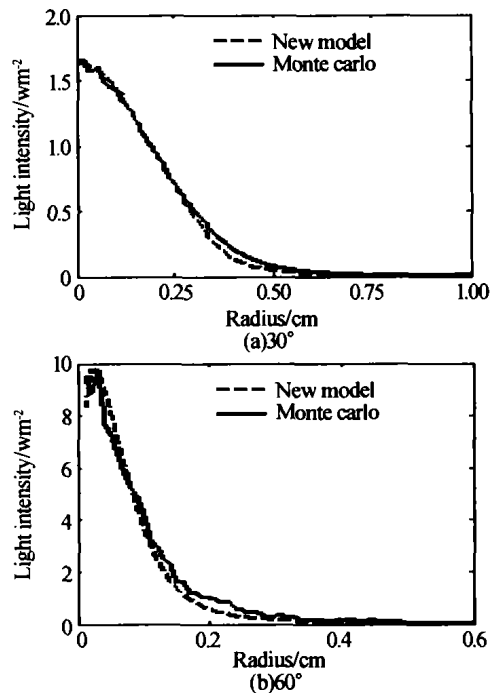


图3 会聚光束照射下组织漫反射场强度的径向分布  
Fig.3 Radial distributions of diffuse reflection from semi-infinite biological tissues irradiated by converging laser beam

表1 计算中采用的组织光学参数

散射系数	吸收系数	散射各向异性因子
$100 \text{ cm}^{-1}$	$1 \text{ cm}^{-1}$	0.9

计算模型为快速分析不同光源照射下组织内光场的空间分布提供了一个有效的工具.

在验证了计算模型正确性的基础上, 选择局部平面光波为照明光源, 其全宽度  $2R$  为  $0.5\text{ cm}$ , 透镜距组织界面之间的高度为  $0.1\text{ cm}$ , 光束会聚角在  $[0^\circ, 90^\circ]$  之间变化, 组织的光学参数如表 1. 通过大量数值计算得到组织内光场强度分布随光束会聚角的变化如图 4 ~ 7. 图 4 给出了光源会聚角为  $30^\circ$  时, 组织内光场的空间分布情况. 从图中可以看出组织内光场随深度的增加先是增加, 达到最大值之后随深度增加近似呈指数形式衰减. 通过对不同光束会

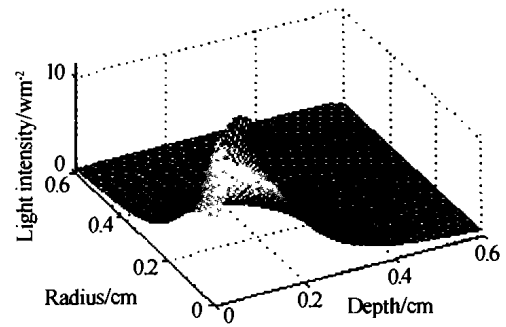


图 4 在会聚角为  $30^\circ$  时, 组织内光场的空间分布情况  
Fig. 4 Spatially resolved distribution of light in biological tissues irradiated by converging laser beam with convergence angle  $30^\circ$

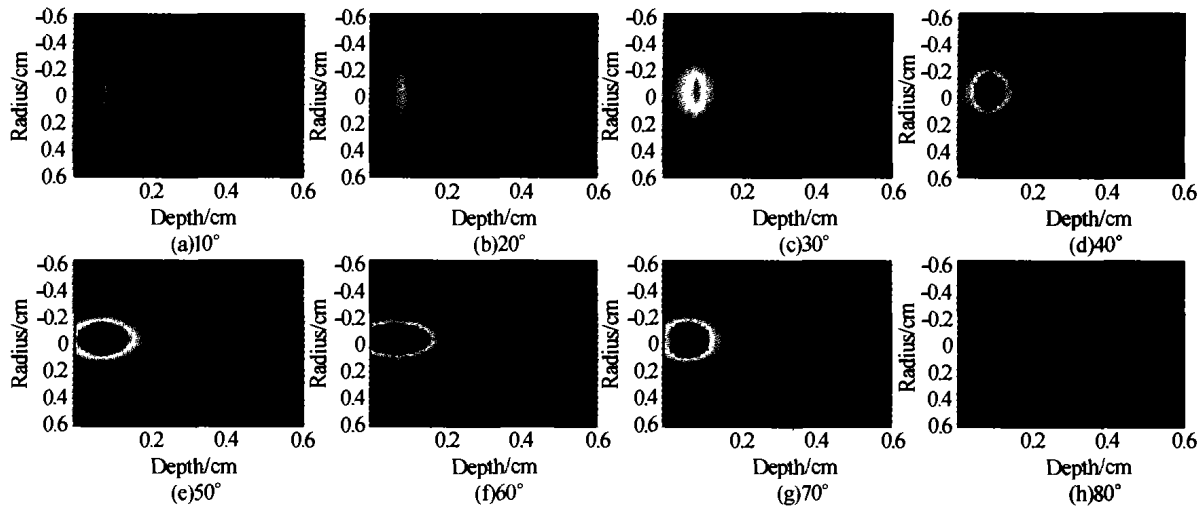


图 5 不同会聚角时, 组织内光场的分布情况

Fig. 5 Gray images of light distribution in biological tissues irradiated by converging laser beam with different convergence angles

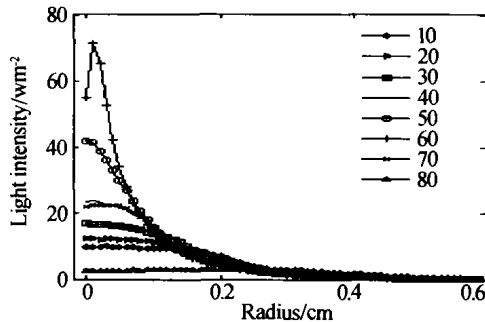


图 6 不同会聚角时, 组织内  $0.1\text{ cm}$  深度层面上的光场强度分布

Fig. 6 Radial distributions of light on a certain plane in biological tissues with depth  $0.1\text{ cm}$

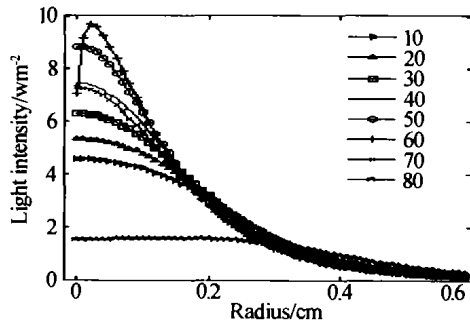


图 7 不同会聚角时, 组织内  $0.2\text{ cm}$  深度层面上的光场强度分布

Fig. 7 Radial distributions of light on a certain plane in biological tissues with depth  $0.2\text{ cm}$

聚角情况下组织内光场分布的数值计算分析发现: 此种光学参数下, 轴线上光强度随深度变化出现极值的深度大概在  $0.09\text{ cm}$  附近, 随会聚角增大出现极值的位置略微变浅; 同时随组织散射系数的增加, 轴向出现极值的位置变浅, 但光学深度基本不变. 不同光束会聚角时出现极值位置的典型结果列于表 2.

表 2 不同光束会聚角时, 组织轴线上光强出现极值的位置参数

会聚角	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$	$70^\circ$	$80^\circ$
极值深度/cm	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07	0.08	0.08

图 5 给出了光源会聚角分别为  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $70^\circ$  和  $80^\circ$  等几种情况下组织内光场分布; 图 6 和图 7 分别给出了与图 5 相对应的组织内两个特定深度层面上光场强度分布的径向曲线 ( $0.1\text{ cm}$  和  $0.2\text{ cm}$ ). 从图中可以看出: 随着光源会聚角的增大, 组织内光场空间分布趋于更加集中, 如图 5(e) 此时光源的会聚角为  $50^\circ$ , 在这个角度附近组织内光场分布最为集中, 过了这角度之后继续增大光源的会聚角, 将会使组织内的光场分布区域迅速扩大, 强度迅速降低. 另外, 从图 5 ~ 7 所示的计算结果中, 还可以看到: 当照射光源的会聚角大于—

个特定的角度之后,组织内的特定深度层面上光场强度出现极值的位置明显偏离中心位置.可见,如果在实际应用中想得到相对集中的组织内光场分布,控制照射光源的会聚角是非常关键的.

此外,我们还得到了在相同条件下,不同会聚角时半无限组织漫反射场的强度分布,结果如图 8.从中可以看出:随着照射光束会聚角的增大,组织背散射场中心强度增强,分布区域趋于集中;当会聚角大于一特定角度之后,组织漫反射场的强度极值位置开始偏离中心位置,同时漫反射场的强度迅速下降、分布区域迅速扩大.这一结果对于发展基于漫反射光探测的组织诊断技术是非常有意义的,当选择照明与探测共光路的探测结构时,应选择适当的光源会聚角使组织漫反射场较为集中,且中心强度最大;当选择照明与探测相分离的探测光路时,可适当控制光源的会聚角使组织漫反射场出现极大值的位置适当偏离中心位置.

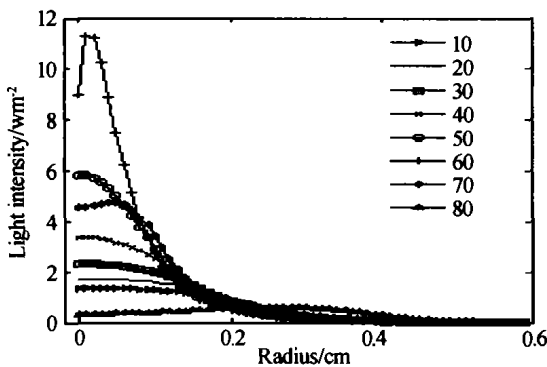


图 8 不同会聚角时,组织内漫反射场强度分布情况  
Fig. 8 Radial distributions of reflectance from biological tissues under different convergence angles

### 3 结论

本文建立了可处理任意光源照射下,生物组织内光传输问题的计算模型,并集中讨论了会聚光束在生物组织内的传输过程.通过大量的数值计算和分析,可以得到以下结论:照明光源的会聚角直接影响组织内光场的空间分布,通过控制光源的会聚角可改变组织内光场分布的横向分布区域,但对组织内轴线上光场强度出现极值的深度影响较小;另外,

通过改变光源的会聚角,可以改变组织漫反射场强度的空间分布,尤其是出现光场强度极值的位置,这对于发展不同照明/探测结构的组织诊断技术是非常有用的.

### 参考文献

- 1 Tuchin V V. Reviews of topic problems-Light scattering study tissues. *Physics*, 1997, **40**(5): 495 ~ 515
- 2 Wang L H, Jacques S L. Monte Carlo Modeling of Light Transport in Multi-layered tissues. Ph. D. dissertation. University of Texas M. D. Anderson Cancer Center, 1992
- 3 Ishimaru A. Wave propagation and Scattering in Random Media. New York: Academic, 1978
- 4 Durian D J, Rudnick J. Photon migration at short times and distances and in cases of strong absorption. *J Opt Soc Am*, 1997, **A14**(1): 235 ~ 245
- 5 来建成,李振华,王春勇,等. 离散坐标法在计算生物组织内光场空间角分布中的应用. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1254 ~ 1258  
Lai J C, Li Z H, Wang C Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1254 ~ 1258
- 6 Lin S P, Wang L H, Jacques S L, et al. Measurement of tissue optical properties by the use of oblique-incidence optical fiber reflectometry. *Appl Opt*, 1997, **36**(1): 136 ~ 143
- 7 周建华,刘登瀛,徐建中,等. 圆柱坐标系下生物组织中激光传输的七流模拟. *光子学报*, 2002, **31**(6): 662 ~ 667  
Zhou J H, Liu D Y, Xu J Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6): 662 ~ 667
- 8 李振华,徐晓东,王振东,等. 接触式激光手术刀出射光束的 Monte Carlo 模拟. *中国激光*, 2001, **28**(7): 664 ~ 668  
Li Z H, Xu X D, Wang Z D, et al. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **A28**(7): 664 ~ 668
- 9 鲁强,绍群,等. 混浊介质显微成像中吸收作用的门机制. *光学学报*. 2001, **21**(7): 796 ~ 799  
Lu Q, Zeng S Q, et al. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(7): 796 ~ 799
- 10 Wal-fung cheong, et al. A review of the optical properties of biological tissues. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, **26**(12): 2166 ~ 2185

## Influence of the Convergence Angle on Light Transporting in Biological Tissues

Xu Naizhou, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, Li Zhenhua, He Anzhi

*Department of Information Physics & Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094*

Received date: 2004-04-05

**Abstract** Based on the diffusion theory, a computational model is developed to deal with the problem of light transporting in biological tissues irradiated by arbitrary light source. According to the numerical calculation, the influence of convergence angle on the light field in biological tissues and light field reflected from biological tissues are discussed. Results show that with the increase of the convergence angle, light field in biological tissues and the reflectance enhanced in the beginning, after reaching the peak value, its intensity decrease quickly and the position of its maximum deflects from central position.

**Keywords** Convergent light source; Computational model; Diffusion theory; Tissues Optics

**Xu Naizhou** was born in 1982. He received his Bachelor's Degree from department of applied physics in Nanjing University of Science and Technology in 2002. Now, he is working for his Master degree in Biomedical Engineering of Nanjing University of Science and Technology.

