

## 近红外光谱范围生物组织表面漫反射率的研究\*

刘 迎, 陈红军

(天津大学 理学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**首先分析了近红外光在均匀生物组织中的传播过程,在此基础上提出一种计算分层生物组织表面漫反射率的理论模型。利用这种理论模型,讨论了两种不同组成的生物组织的表面漫反射率,得到双层介质表面漫反射率随探测距离的变化趋势与其他文献报道的研究结果一致。

**关键词:** 近红外光; 分层组织; 能流分布; 漫反射率

**中图分类号:** TN2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)01-0107-04

## Diffuse reflection ratio measurement on the surfaces of layered tissues with near infrared light\*

LIU Ying, CHEN Hong-jun

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Technical Science,  
College of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the transmission of near infrared light in homogeneous tissues, a calculating method of diffuse reflection ratio (DRR) for layered tissue is presented. According to this method, the DRRs of two layers of tissues were calculated, which were consistent with former literatures. By use of this theoretical model, DRRs of two kinds of tissue with different structures are discussed. It shows that DRR of two-layered medium varies with detecting separation in the same tendency with that of former literature.

**Keywords:** Near infrared light; Layered tissue; Flux distribution; Diffuse reflection ratio

### 0 引言

近年来,近红外漫反射光谱测量技术作为一种安全、便捷、无创伤的检测技术,在医学领域得到了越来越广泛的应用。近红外光在生物介质中的传播规律

作为这一技术的理论依据引起了越来越多科研工作者的关注。但是,由于生物组织的复杂结构及其强散射低吸收的光学特性<sup>[1,2]</sup>,给这一研究工作带来了许多困难。提出了一种计算具有双层结构的生物组织的表面漫反射率的理论模型,这种新的理论模型简化了传统的复杂计算过程,从分析均匀介质的光子路径分

收稿日期:2003-04-14; 修订日期:2003-06-04

\* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(60278004)

作者简介:刘迎(1956-),男,天津人,教授,博士生导师,主要从事激光与红外在生物医学领域中有关理论与应用技术的研究。

布特性入手<sup>[3]</sup>,考虑不同深度的介质层与入射光作用的几率不同,给出计算双层结构的生物组织的表面漫反射率的理论分析结果。

### 1 理论分析

#### 1.1 半无限均匀散射介质的光子路径分布函数

为了研究双层散射介质的漫反射率,首先考虑半无限均匀散射介质中的光子路径分布特性。如图 1 所示,激光器和接收器位于  $x-z$  平面内,锥形光束

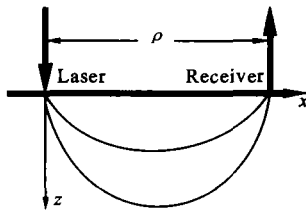


图 1 光子路径分布

Fig. 1 Photon path distribution

从原点入射,接收器在散射介质表面,与激光器相距  $\rho$ 。从原点发射的光在介质中随机迁移,部分光子能够散射回到介质表面,由接收器接收。能够到达接收器的光子在介质中经历的路径是随机的,Feng Shechao 等人依据漫散射近似理论得到了这种光子路径分布函数(Photon path distribution)<sup>[3]</sup>:

$$p(x,y,z) = \frac{z^2 \exp(-k\{(x^2+y^2+z^2)^{1/2} + [(\rho-x)^2+y^2+z^2]^{1/2}\})}{(x^2+y^2+z^2)^{3/2} + [(\rho-x)^2+y^2+z^2]^{3/2}} \times [k(x^2+y^2+z^2)^{1/2} + 1] \{k[(\rho-x)^2+y^2+z^2]^{1/2} + 1\} \quad (1)$$

式中  $k = \sqrt{3\mu_a(1-g)\mu_s}$ ,其中  $\mu_a$ 、 $\mu_s$  和  $g$  分别为介质的吸收系数、散射系数和各项异性因子。Feng Shechao 等人的研究表明,能够到达接收器的光子在介质中所经历的路径主要集中在从激光器到接收器的一个香蕉状的区域中(见图 1),并且在激光器与接收器中心位置  $\rho/2$  处,光子达到最大深度。

#### 1.2 引入深度探测因子

利用 Feng Shechao 等人提出的光子路径分布函数的概念,考虑流经不同深度层的光子对接收信号的贡献不同,将半无限均匀介质划分为若干层,如图 2 所示,每层厚度为  $\Delta z$ ,引入深度探测因子  $\alpha_i(\Delta z, \rho)$ :

$$\alpha_i(\Delta z, \rho) = \int_{z_i}^{z_i+\Delta z} p(\rho/2, 0, z) dz / \int_0^\infty p(\rho/2, 0, z) dz \quad (2)$$

$\alpha_i(\Delta z, \rho)$  近似描述了流经第  $i$  层的光子到达接收器

的概率。 $\alpha_i(\Delta z, \rho)$  的数值与介质的光学性质、分层的位置  $i$  及探测距离  $\rho$  有关。

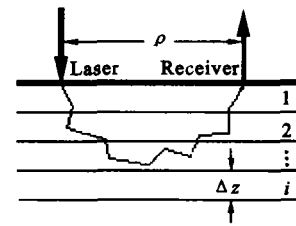


图 2 介质分层模型

Fig. 2 Layered medium model

设散射系数、吸收系数和各向异性因子分别为  $\mu_s = 0.003 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_a = 1.49 \text{ mm}^{-1}$ ,  $g = 0.9$ ,将散射介质按 2 mm 的间隔划分为不同的深度层,利用高斯积分公式代入公式(1)和公式(2),得到  $\alpha_i$  随探测距离  $\rho$  的变化曲线,如图 3(a)所示。从图中可以看出,  $\alpha_i$  的极大值出现在不同的位置,深度越大,  $\alpha_i$  的极大值出现的位置越远。并且随着探测距离的增加,所有的  $\alpha_i$  在经历一个极大值以后趋于相对稳定值。增加介质的吸收,  $\mu_a = 0.0375 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_s = 1.0 \text{ mm}^{-1}$ ,  $g = 0.9$ ,  $\alpha_i$  随探测距离  $\rho$  的变化曲线如图 3(b)所示。从图 3(b)中可以看出,介质的吸收增加后,靠近介质表面的  $\alpha_i$  变化较缓慢。

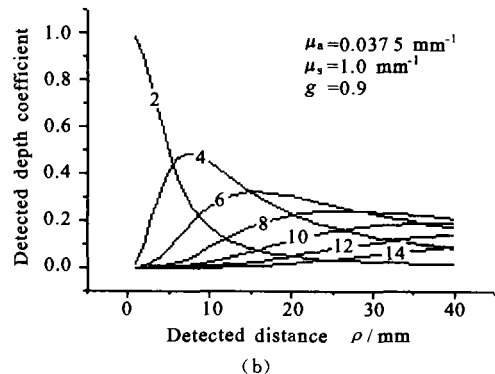
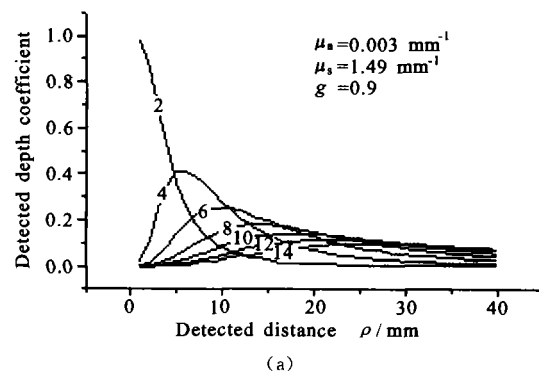


图 3 半无限均匀介质的深度探测因子随探测距离的变化曲线  
Fig. 3 Variation of detected depth coefficient of semi-infinite media with variant separation

图 4(a)、(b)是上述两种介质在同一探测位置  $\rho = 10 \text{ mm}$  处,  $\alpha_i$  随分层数  $i$  的变化曲线。从图中可以看出,探测信号主要来自分布在几个分层内的光子,远离这个区域,光子贡献几乎为零。弱吸收介质的这一深度范围较远离介质表面,包含较多的介质层;强吸收介质的这一深度范围较靠近介质表面,包含较少的介质层。

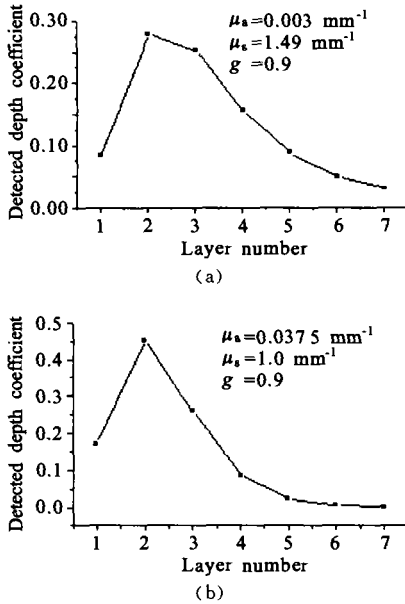


图 4 半无限均匀介质的深度探测因子随分层数的变化曲线( $\rho=10 \text{ mm}$ )  
Fig. 4 Variation of detected depth coefficient of semi-infinite media with variant layers

1.3 双层散射介质的漫反射率

为了给出计算双层介质空间分辨漫反射率的理论模型,首先研究半无限均匀散射介质的漫反射率。对于半无限均匀散射介质,接收器接收到的光子来自于不同的深度层,每一深度层对探测距离  $\rho$  处的辐射强度的贡献可以表示为  $\Phi(\rho) \cdot \alpha_i(\Delta z, \rho)$ , 其中  $\Phi(\rho)$  为探测距离  $\rho$  处的总的辐射强度。因此,所有深度层对入射光的共同作用效果可以表示为:

$$\Phi(\rho) = \sum_i \Phi(\rho) \cdot \alpha_i(\Delta z, \rho) \quad (3)$$

式中  $\Phi(\rho) \cdot \alpha_i(\Delta z, \rho)$  为只存在  $i$  层时,接收距离  $\rho$  处的等效辐射强度。

对于双层散射介质,仍然用均匀介质的深度探测因子  $\alpha_i(\Delta z, \rho)$  近似描述双层介质的深度探测因子,并考虑介质的不均匀性,分别用  $\Phi_{\text{upp}} \cdot \alpha_i(\Delta z, \rho)$  和  $\Phi_{\text{low}} \cdot \alpha_i(\Delta z, \rho)$  表示上层和下层介质的深度层对接收距离  $\rho$  处的辐射强度的贡献,得到双层介质的辐射强

度的表达式:

$$\Phi(\rho) = \sum_{i=1}^k \Phi_{\text{upp}}(\rho) \cdot \alpha_i(\Delta z, \rho) + \sum_{i=k+1}^{\infty} \Phi_{\text{low}}(\rho) \cdot \alpha_i(\Delta z, \rho) \quad (4)$$

式中  $k$  为上层介质的厚度与  $\Delta z$  的比值;  $\Phi_{\text{upp}}(\rho)$ 、 $\Phi_{\text{low}}(\rho)$  分别为均匀条件下,上层介质和下层介质的辐射强度,计算过程中按外推边界条件下的半无限均匀散射介质的辐射强度公式计算<sup>[4]</sup>。

2 比较模型的计算结果

图 5(a)是上层介质的吸收系数大于下层介质的吸收系数的情况,  $\mu_{a1} = 0.0375 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{a2} = 0.003 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s1} = 1.49 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s2} = 1.0 \text{ mm}^{-1}$ ,  $g_1 = g_2 = 0.9$ , 上层介质的厚度  $t$  分别取 4、6 和 8 mm, 计算的结果用标有 4、6 和 8 的曲线表示,标有 a、b 的曲线是半无限均匀散射介质的计算结果,曲线 a 的光学参数与上层介质相同,曲线 b 与下层介质相同。从图中可以看出:当接收器靠近激光器时( $\rho$  比较小),双层介质的漫反射率曲线靠近曲线 a;随着接收器远离激光

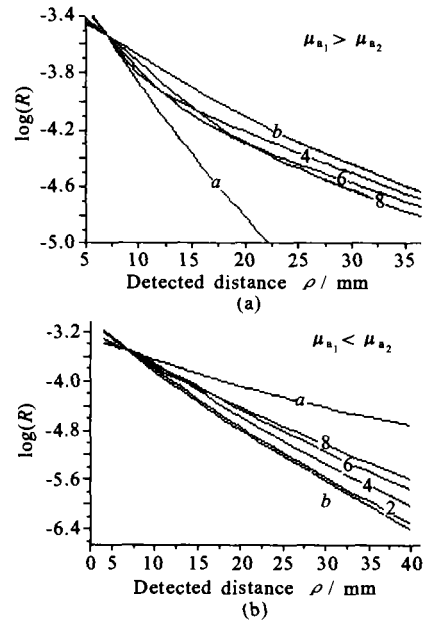


图 5 双层散射介质的空间漫反射率  
Fig. 5 Reflectivity of two-layered scattering medium

器,双层介质的漫反射率曲线开始向曲线 b 靠近,并趋向与曲线 b 平行。这种平行的趋势表明,当激光器与接收器的距离较大时,探测信号主要来自分布在下层介质中光子的贡献,此时上层介质对探测信号起衰减作用,衰减程度近似正比于上层介质的厚度。

图 5(b)是上层介质的吸收系数小于下层介质的吸收系数的情况,  $\mu_{a_1} = 0.003 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{a_2} = 0.0375 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s_1} = 1.0 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu_{s_2} = 1.49 \text{ mm}^{-1}$ ,  $g_1 = g_2 = 0.9$ , 上层介质的厚度  $t$  分别取 2、4、6 和 8。从图中可以看出: 当  $\rho$  较小时, 双层介质的漫反射率曲线靠近曲线  $a$ , 随着接收器远离激光器, 漫反射率曲线开始向曲线  $b$  靠近, 但是由于上层介质的吸收系数较小, 使得仅在上层介质的厚度小于 2 mm 时, 曲线 2 与曲线  $b$  平行, 其他曲线仅仅接近曲线  $b$ , 并不与之平行, 此时上层介质对探测信号起加强作用。

另外, 从图 5(a)、(b)还可以看出: 上、下层介质吸收系数的关系也会影响漫反射率曲线与下层介质漫反射率曲线  $b$  的近似关系, 当  $\mu_{a_1} > \mu_{a_2}$  时, 由于上层介质的吸收系数较大, 对位于其中的光子吸收作用较强, 因此上层介质的漫反射率较小, 相应地对双层介质的漫反射影响也较小; 当  $\mu_{a_1} < \mu_{a_2}$  时, 由于上层介质的吸收系数较小, 对位于其中的光子吸收作用较弱, 因此对双层介质的漫反射影响较大, 此时上层介质的厚度范围仅在较小范围内, 上层介质的作用才可以认为是一种稳定的加强作用。上述的讨论结果与其他文献的研究结果一致<sup>[5~7]</sup>。

### 3 讨论

给出了计算具有分层结构的生物组织表面漫反射率的理论模型。虽然这种理论模型具有一定的近似性, 但是, 由于其简单的数学形式大大地简化了计

算过程, 因此, 在非精确计算情况下, 对研究生物组织的表面漫反射率具有一定的启发作用。

### 参考文献:

- [1] Schmitt J M, Zhou G X, Walker E C. Multiplayer model of photon diffusion in skin[J]. J Opt Soc Am (A), 1990, 7(11): 2046-2055.
- [2] Niwayama M, Lin L, Shao J, et al. Quantitative measurement of muscle oxygenation by NIRS: analysis of the influence of a subcutaneous fat layer and skin[A]. In Optical Tomography and Spectroscopy of Tissue III, Proc SPIE[C]. 1999, 3597: 291-299.
- [3] She-chao Feng, Fan-an Zeng, Britton Chance. Photon migration in the presence of a single defect: a perturbation analysis[J]. Applied Optics, 1995, 34(19): 3826-3837.
- [4] Alwin Kienle, Michael S Patterson. Improved solution of the steady state and the time-resolved diffusion equation for reflectance from a semi-infinite turbid medium[J]. J Opt Soc Am (A), 1997, 14(1): 246-254.
- [5] Andreas H Hielscher, Han-li liu, Britton Chance, et al. Time-resolved photon emission from layered turbid media[J]. Applied Optics, 1996, 35(4): 719-728.
- [6] Maria Angela Franceschini, Sergio Fantini, Adelina Paunescu L, et al. Influence of a superficial layer in the quantitative spectroscopic study of strongly scattering media[J]. Applied Optics, 1998, 37(31): 7447-7458.
- [7] Thomas J Farrell, Michael S Patterson, Matthias Essenpreis. Influence of layered tissue architecture on estimates of tissue optical properties obtained from spatially resolved diffuse reflectometry[J]. Applied Optics, 1998, 37(10): 1958-1972.

## 更正 启 示

因本编辑部工作失误, 将 2003 年第 6 期第 609 页中的图 2 排错, 在此向该文的作者及读者深表歉意。更正后的图 2 如下所示:

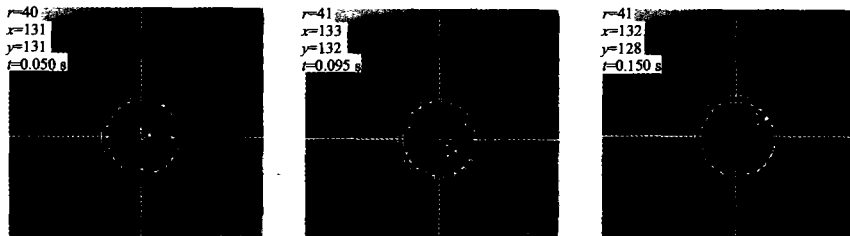


图 2 选取不同的伪圆心, 用 snake 法定位的结果

Fig. 2 The location results of snake method according to different pseudo-center (the center of small triangle composed of three small cross) placed manually