

文章编号: 0253-2239(2005)09-1254-6

# 不匹配介质三层漫射方程的时间分辨漫反射\*

王喜昌<sup>1</sup> 宋东草<sup>1</sup> 官彦军<sup>1,2</sup> 吴振森<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 烟台大学光电信息技术学院, 烟台 264005)  
(<sup>2</sup> 西安电子科技大学物理系, 西安 710071)

**摘要:** 生物体的表面组织是一个不匹配的多层介质, 大多数研究人员研究匹配介质的漫射方程, 将组织表面看作折射率相同的介质。为更好的理解光在生物体内的传播, 建立了不匹配条件的三层半无限厚频域方程的解; 并对频域进行傅里叶变换, 计算出时域的时间分辨漫反射。为了验证此的理论, 使用蒙特卡罗方法进行仿真研究, 结果表明该理论研究不仅和蒙特卡罗方法高度一致, 而且还可以解决两层不匹配介质模型。

**关键词:** 医用光学和生物技术; 不匹配介质; 漫射方程; 时间分辨漫反射

中图分类号: O439 文献标识码: A

## Time Resolved Diffuse Reflection of Three-Layered Mismatched Media Diffusion Equation

Wang Xichang<sup>1</sup> Song Dongcao<sup>1</sup> Gong Yanjun<sup>1,2</sup> Wu Zhensen<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Yantai University, Yantai 264005)  
(<sup>2</sup> Department of Physics, Xidian University, Xian 710071)

**Abstract:** A tissue is multi-layered mismatched medium, but many investigators only study the diffusion equation of matched medium, they take the tissue as media with the same refractive index. In order to understand the light transport in tissue, the solution of the diffusion equation of a three-layered mismatched medium in frequency domain is set up. Through Fourier transform, the time-resolved reflectance is computed. The time-resolved reflectance between the solution of three-layered mismatched media diffusion equation and Monte-Carlo simulation are compared. The result shows the method not only accords with the Monte-Carlo simulation, but also can solve the problem of a two-layered mismatched turbid media model.

**Key words:** medical optics and biotechnology; mismatched medium; diffusion equation; time resolved diffuse reflection

### 1 引 言

生物组织光学特性的研究对光治疗和诊断有着重要的意义, 如动力学治疗和激光外科手术中都需要了解组织的光学特性, 以便模拟计算光在组织中的分布。

研究中人们采用了半无限厚介质模型、双层介质模型、三层介质模型。由于目前多层介质方程的解析解为近似解, 计算复杂, 所以半无限厚介质模型被广泛采用。Alwin Kienie 等<sup>[1,2]</sup> 给出了稳态和频域的匹配介质两层混浊介质模型漫射方程的精

确解, 为精确研究漫射方程开辟了一条道路。

但是, 人体组织是一个多层组织, 每一层的折射率各不相同, 因而人体组织是一个不匹配的多层介质。Alwin Kienie 等人给出的只是匹配介质两层体系, 匹配介质两层体系不能解决不匹配介质问题, 因而具有一定的局限性。

王建岗等<sup>[3,4]</sup> 进行了光在分层散射介质中传输行为的蒙特卡罗模拟研究。经常用来验证理论是否准确; 程树英等<sup>[5]</sup> 用蒙特卡罗法研究折射率对光在组织中的漫反射率和吸收比的影响; 许棠等<sup>[6]</sup> 使用

\* 国家自然科学基金(60371020)资助课题。

作者简介: 王喜昌(1968~), 男, 烟台大学副教授, 主要从事生物医学和颜色光学等方面的研究。

E-mail: wangxichang@ytu.edu.cn

收稿日期: 2004-11-29; 收到修改稿日期: 2005-01-12

蒙特卡罗模拟研究了连续光在生物组织中能流率分布的漫射近似。但上面的方法中,没有涉及到理论的计算。而且蒙特卡罗模拟存在着计算时间长等问题。

另外,很多人对生物体内的特性进行了研究,如,Shao-Pow Lin 等<sup>[7]</sup>对组织中的光学特性的测量;张智等<sup>[8]</sup>研究了非均匀生物组织中光子迁移的数值方法;魏华江<sup>[9]</sup>研究了 808 nm 近红外激光辐照三种不同的离体人组织的光传输特性;而来建成等<sup>[10]</sup>指出,半无限厚的介质模型如果发生病变,可以转化为三层体系。

本文根据漫射方程,给出了不匹配条件下,三层介质漫射方程频域的准确解,根据傅里叶变换可以算出时域的时间分辨漫反射。根据漫射方程的计算结果,并与蒙特卡罗方法仿真结果进行比较,结果表明我们的理论研究不仅和蒙特卡罗方法高度一致,而且可以兼容 A. Kienle 的两层匹配介质体系和可以解决两层不匹配介质问题。

## 2 理论分析

假设无限细的正弦频率调制的光束垂直照射在

三层混浊介质中,如图 1 所示。

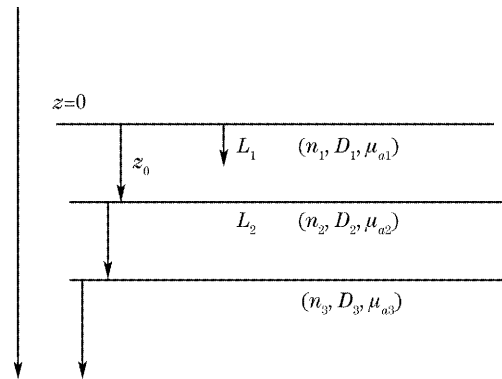


图 1 三层混浊介质

Fig. 1 Model of three-layered mismatched turbid media

光束在深度为  $z = z_0 = 1/(\mu'_{s1} + \mu_{a1})$  的最上层介质被散射。这里  $\mu_{ai}$  是第  $i$  层吸收系数,  $\mu'_{si}$  是第  $i$  层等效各向同性散射系数,其表达式为  $\mu'_s = \mu_s(1 - g)$ ,  $\mu_s$  是散射系数,  $g$  为探测角的平均余弦。初始坐标点  $(0, 0, 0)$  为光束进入混浊介质时,与第一层介质相交的点;  $z$  轴垂直介质表面,  $x, y$  轴平行于介质表面;  $\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}$ ,  $n_i$  是第  $i$  层介质的折射率。

这样,光的漫射方程为<sup>[13]</sup>

$$D_1 \Delta \phi_1(r) - \left( \mu_{a1} + j \frac{\omega}{c} \right) \Phi_1(r) = -\delta(x, y, z - z_0), \quad 0 \leq z < L_1 \quad (1)$$

$$D_2 \Delta \phi_2(r) - \left( \mu_{a2} + j \frac{\omega}{c} \right) \Phi_2(r) = 0, \quad L_1 \leq z < L_2 \quad (2)$$

$$D_3 \Delta \phi_3(r) - \left( \mu_{a3} + j \frac{\omega}{c} \right) \Phi_3(r) = 0, \quad L_2 \leq z \quad (3)$$

其中  $r = (x, y, z)$ ,  $D_i = 1/3(\mu'_{si} + \mu_{ai})$ ,  $\Phi_i$  是第  $i$  层的能流率,  $\omega$  是入射光的脉冲频率,  $c$  是光在介质中的速度。

对  $\Phi_i$  通过二维傅里叶变换,即<sup>[2,3]</sup>

$$\phi_i(\omega, z, s_1, s_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_i(x, y, z) \exp[i(s_1 x + s_2 y)] dx dy, \quad (4)$$

将(4)式代入(1)式~(3)式,我们得到

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \phi_1(\omega, z, s) - a_1^2 \phi_1(\omega, z, s) = -\frac{1}{D_1} \delta(z - z_0), \quad 0 \leq z < L_1 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \phi_2(\omega, z, s) - a_2^2 \phi_2(\omega, z, s) = 0, \quad L_1 \leq z < L_2 \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial z^2} \phi_3(\omega, z, s) - a_3^2 \phi_3(\omega, z, s) = 0, \quad L_2 \leq z < L_3 \quad (7)$$

其中

$$a_i^2 = \left( D_i s^2 + \mu_{ai} + j \frac{\omega}{c} \right) / D_i, \quad s^2 = s_1^2 + s_2^2.$$

上面的方程通过适当的边界条件可以求解,同样通过对边界条件的傅里叶变换,得到的边界条件为

$$\phi_1(\omega, -z_b, s) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\phi_1(\omega, L_1, s)}{\phi_2(\omega, L_1, s)} = \frac{n_1^2}{n_2^2}, \quad (9)$$

$$D_1 \frac{\partial \phi_1(\omega, z, s)}{\partial z} \Big|_{L_1} = D_2 \frac{\partial \phi_2(\omega, z, s)}{\partial z} \Big|_{z=L_1}, \quad (10)$$

$$\frac{\phi_2(\omega, L_1, s)}{\phi_3(\omega, L_1, s)} = \frac{n_2^2}{n_3^2}, \quad (11)$$

$$D_2 \frac{\partial \phi_2(\omega, z, s)}{\partial z} \Big|_{L_2} = D_3 \frac{\partial \phi_3(\omega, z, s)}{\partial z} \Big|_{z=L_2}, \quad (12)$$

$$\phi_3(\omega, \infty_b, s) = 0, \quad (13)$$

(8) 式是组织与空气交接处的外推边界条件<sup>[11]</sup>, 方程里面的  $z_b$  表达式为<sup>[11]</sup>

$$z_b = \frac{1 + R_{\text{eff}}}{1 - R_{\text{eff}}} 2D_1, \quad (14)$$

其中  $R_{\text{eff}}$  表示光在边界处的内部反射率, 可以根据参考文献[10] 进行计算。(9) 式与(11) 式是不匹配边界条件, 由参考文献[12] 给出。这样, 将不匹配边界条件引入, 可以建立起不匹配条件下  $\phi(\omega, z, s)$  三层体系的解:

$$\phi_1(z, s) = \frac{\sinh a_1(z_b + z_0)}{D_1 a_1} \times \frac{D_1 a_1 n_1^2 l_1 \cosh a_1(L_1 - z) + D_2 a_2 n_2^2 m_1 \sinh a_1(L_1 - z)}{D_1 a_1 n_1^2 l_1 \cosh a_1(L_1 + z_b) + D_2 a_2 n_2^2 m_1 \sinh a_1(L_1 + z_b)} - \frac{\sinh[a_1(z_0 - z)]}{D_1 a_1}, \quad 0 \leq z < z_0 \quad (15)$$

$$\phi_1(z, s) = \frac{\sinh a_1(z_b + z_0)}{D_1 a_1} \times \frac{D_1 a_1 n_1^2 l_1 \cosh a_1(L_1 - z) + D_2 a_2 n_2^2 m_1 \sinh a_1(L_1 - z)}{D_1 a_1 n_1^2 l_1 \cosh a_1(L_1 + z_b) + D_2 a_2 n_2^2 m_1 \sinh a_1(L_1 + z_b)}, \quad z_0 \leq z < L_1 \quad (16)$$

$$\phi_2(z, s) = \frac{n_2^2 l_1 [D_3 a_3 n_3^2 \sinh a_2(L_2 - z) + D_2 a_2 n_2^2 \cosh a_2(L_2 - z)]}{D_1 a_1 n_1^2 \cosh a_1(L_1 + z_b) + D_2 a_2 n_2^2 m_1 \sinh a_1(L_1 + z_b)} \times \frac{\sinh a_1(z_b + z_0)}{D_3 a_3 n_3^2 \sinh a_2(L_2 - L_1) + D_2 a_2 n_2^2 \cosh a_2(L_2 - L_1)}, \quad (17)$$

$$\phi_3(z, s) = \frac{n_3^2 l_1 D_2 a_2 n_2^2 \exp[a_3(L_2 - z)]}{D_1 a_1 n_1^2 l_1 \cosh a_1(L_1 + z_b) + D_2 a_2 n_2^2 m_1 \sinh a_1(L_1 + z_b)} \times \frac{\sinh a_1(z_b + z_0)}{D_3 a_3 n_3^2 \sinh a_2(L_2 - L_1) + D_2 a_2 n_2^2 \cosh a_2(L_2 - L_1)}, \quad (18)$$

其中,

$$l_1 = D_3 a_3 n_3^2 \sinh a_2(L_2 - L_1) + D_2 a_2 n_2^2 \cosh a_2(L_2 - L_1),$$

$$m_1 = D_3 a_3 n_3^2 \cosh a_2(L_2 - L_1) + D_2 a_2 n_2^2 \sinh a_2(L_2 - L_1),$$

将这个解进行傅里叶逆变换<sup>[1,2]</sup>, 可得到能流率的解

$$\Phi_i(\omega, \rho, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \phi_i(z, s) \exp[-i(s_1 x + s_2 y)] ds_1 ds_2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \phi_i(z, s) s J_0(s\rho) ds, \quad (19)$$

其中  $J_0$  是零阶贝塞尔函数, 通过数值计算, 可以得到具体结果。(15) 式~(19) 式为三层半无限厚频域方程。

### 3 时域研究和蒙特卡罗方法的比较

为了验证给出的漫射方程, 将漫射方程转化为实际可以测量的量——反射率。Haskell<sup>[11]</sup> 给出了在表面计算反射率的办法, 其方程为

$$R(\omega, \rho) = \int_{2\pi} d\Omega [1 - R_{\text{Fres}}(\theta)] \times \frac{1}{4\pi} \left[ \Phi_1(\omega, \rho, z=0) + 3D_1 \frac{\partial \Phi_1(\omega, \rho, z=0)}{\partial z} \cos \theta \right] \times \cos \theta, \quad (20)$$

式中  $R_{\text{Fres}}(\theta)$  是非涅耳反射系数, 对于第一层介质的折射率,  $\theta$  为入射角。对于不同的折射率  $n_1$ , (20) 式可以写为

$$R(\rho) = C_1 \Phi_1(\rho, z=0) + C_2 D_1 \frac{\partial}{\partial z} \Phi_1(\rho, z) \Big|_{z=0}, \quad (21)$$

式中  $C_1$  和  $C_2$  是与第一层折射率  $n_1$  有关的常数。按照相关文献<sup>[11]</sup>进行了计算, 并给出表 1 的计算结果。

表 1  $C_1, C_2$  与  $n_1$  的关系

Table 1 Relationship of  $C_1, C_2$  and  $n_1$

$n_1$	$C_1$	$C_2$
1.1	0.2014	0.4560
1.33	0.1320	0.3359
1.55	0.0938	0.2510

将频域转化为时域, 按照 Kienle 方法, 采用频率为 ( $\omega=195.31 \text{ M}, 195.31 \times 2 \text{ M}, \dots, 195.31 \times 512 \text{ M}$ ) 计算, 进行傅里叶变换, 可以得到时域曲线图形。

### 3.1 三层时域方程的验证

目前, 蒙特卡罗方法已经成为研究光与强散射介质相互作用的常用方法和非实验检验标准。蒙特卡罗模拟过程中主要有光子的发射、光子步长的计算和在组织中的传输、光子的吸收和散射、确定光子被散射后新的运动方向、判断光子在组织边界是透射还是发生全发射, 判断光子的权重若小于某一阈值则终止光子的追踪, 开始对第二个光子的重复。

通过大量光子的统计, 确定光在生物体内的传输特性。按照相应的文献<sup>[4]</sup>, 自行编制了蒙特卡罗方法程序。下面的每个例子我们发射 1 百万个光子进行模拟。

图 2(a) 显示了三层体系光学参量为  $n_1=1.55$ ,  $\mu_{a1}=0.01 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s1}=1.3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_1=1 \text{ mm}$ ,  $n_2=1.4$ ,  $\mu_{a2}=0.01 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s2}=1.0 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_2=1 \text{ mm}$ ,  $n_3=1.2$ ,  $\mu_{a3}=0.01 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s3}=0.7 \text{ mm}^{-1}$  的表面时间分辨率曲线, 上面的两个曲线为  $\rho=7.5 \text{ mm}$  的理论值(实线)和蒙特卡罗方法(点线), 下面的两个曲线为  $\rho=15.5 \text{ mm}$  的理论值(点线)和蒙特卡罗方法(实线)。为了更清楚地表示蒙特卡罗方法, 将  $\rho=7.5 \text{ mm}$  的理论值(实线)全部乘以 10, 使其与  $\rho=15.5 \text{ mm}$  的蒙特卡罗方法彻底分离。

图 2(b) 显示了三层体系光学参量为  $n_1=1.55$ ,  $\mu_{a1}=0.01 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s1}=2.0 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_1=1 \text{ mm}$ ,  $n_2=1.4$ ,  $\mu_{a2}=0.01 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s2}=1.5 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_2=2 \text{ mm}$ ,  $n_3=1.1$ ,  $\mu_{a3}=0.01 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s3}=1.0 \text{ mm}^{-1}$  的表面时间分辨率曲线, 上面的两个曲线为  $\rho=7.5 \text{ mm}$  下面的两个曲线为  $\rho=15.5 \text{ mm}$ , 将  $\rho=7.5 \text{ mm}$  的理论值(实线)全部乘以 10, 使其与  $\rho=15.5 \text{ mm}$  的蒙特卡罗方法彻底分离。

从图 2 可以看出漫射理论值与蒙特卡罗方法很好的一致, 说明给出的不匹配介质的三层漫射理论的时间分辨漫反射是正确的。

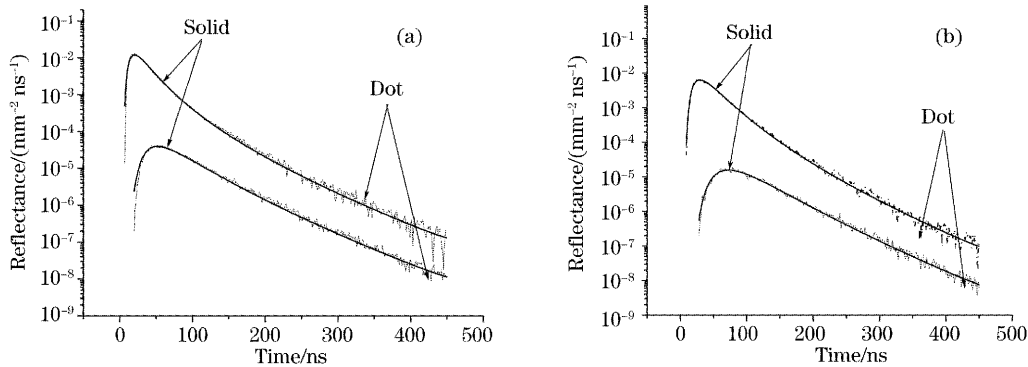


图 2 时间分辨曲线(实线)与蒙特卡罗方法(点线)比较。(a)  $\mu'_{s1}=1.3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s2}=1.5 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_1=1 \text{ mm}$ ,  $n_3=1.2$ ,  $\mu'_{s3}=0.7 \text{ mm}^{-1}$ , (b)  $\mu'_{s1}=2.0 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s2}=1.5 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_1=1 \text{ mm}$ ,  $n_3=1.1$ ,  $\mu'_{s3}=1.0 \text{ mm}^{-1}$

Fig. 2 Comparison of the time-resolved reflectance calculated with the diffusion theory (solid line) to Monte Carlo simulation (dot line). (a)  $\mu'_{s1}=1.3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s2}=1.5 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_1=1 \text{ mm}$ ,  $n_3=1.2$ ,  $\mu'_{s3}=0.7 \text{ mm}^{-1}$ , (b)  $\mu'_{s1}=2.0 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s2}=1.5 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_1=1 \text{ mm}$ ,  $n_3=1.1$ ,  $\mu'_{s3}=1.0 \text{ mm}^{-1}$

### 3.2 解决两层问题

首先, 证明三层漫射方程可以包括 Alwin Kienle 的两层体系方程。在三层体系匹配介质中,

令  $D_1=D_2$ ,  $\alpha_1=\alpha_2$ ,  $L_1+L_2=L_2$ ,  $n_1=n_2=n_3$ , 那么三层体系匹配介质变成两层体系匹配介质, 根据 (15) 式~(18) 式, 我们有

$$\phi_1(z,s) = \frac{\sinh a_1(z_b + z_0)}{D_1 a_1} \times \frac{D_1 a_1 \cosh a_1(L_2 - z) + D_3 a_3 \sinh a_1(L_2 - z)}{D_1 a_1 \cosh a_1(L_2 + z_b) + D_3 a_3 \sinh a_1(L_2 + z_b)} - \frac{\sinh[a_1(z_0 - z)]}{D_1 a_1},$$

$0 \leq z < z_0$  (22)

$$\phi_1(z,s) = \frac{\sinh a_1(z_b + z_0)}{D_1 a_1} \times \frac{D_1 a_1 \cosh a_1(L_2 - z_- + z_0) + D_3 a_3 \sinh a_1(L_2 - z)}{D_1 a_1 \cosh a_1(L_2 + z_b) + D_3 a_3 \sinh a_1(L_2 + z_b)},$$

$z_0 \leq z$  (23)

$$\phi_2(z,s) = \frac{\sinh a_1(z_b + z_0)}{D_1 a_1} \times \frac{D_1 a_1 \cosh a_1(L_2 - z) + D_3 a_3 \sinh a_1(L_2 - z)}{D_1 a_1 \cosh a_1(L_2 + z_b) + D_3 a_3 \sinh a_1(L_2 + z_b)},$$

(24)

$$\phi_3(z,s) = \frac{\sinh a_1(z_b + z_0)}{D_1 a_1} \times \frac{D_1 a_1 \exp[a_3(L_2 - z)]}{D_1 a_1 \cosh a_1(L_2 + z_b) + D_3 a_3 \sinh a_1(L_2 + z_b)},$$

(25)

这个方程是 Alwin Kienle 的两层体系方程, 从而在理论上证明, 三层方程包含两层体系: 如果设两层体系的某一层设置成光学参量相同的两层, 并且三层介质的折射率都相同, 可以用三层不匹配介质体系解决两层匹配介质体系的问题。

图 3(a) 显示了二层体系光学参量为  $n_1 = 1.55$ ,  $\mu_{a1} = 0.005 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s1} = 1.3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_1 = 6 \text{ mm}$ ,  $n_2 = 1.3$ ,  $\mu_{a2} = 0.022 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s2} = 1.0 \text{ mm}^{-1}$  的时间分辨漫反射曲线, 上面的两个曲线为  $\rho = 7.5 \text{ mm}$  的理论值(实线)和蒙特卡罗方法(点线), 下面的两个曲线为  $\rho = 15.5 \text{ mm}$  的理论值(点线)和蒙特卡罗方法(实线)。为了使更清楚的表示蒙特卡罗方法,

将  $\rho = 7.5 \text{ mm}$  的理论值(实线)全部乘以 10, 使其与  $\rho = 15.5 \text{ mm}$  的蒙特卡罗方法彻底分离。

图 3(b) 显示了二层体系光学参量为  $n_1 = 1.33$ ,  $\mu_{a1} = 0.005 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s1} = 1.3 \text{ mm}^{-1}$ ,  $L_1 = 6 \text{ mm}$ ,  $n_2 = 1.4$ ,  $\mu_{a2} = 0.01 \text{ mm}^{-1}$ ,  $\mu'_{s2} = 1.0 \text{ mm}^{-1}$  的时间分辨漫反射曲线, 上面的两个曲线为  $\rho = 7.5 \text{ mm}$ , 下面的两个曲线为  $\rho = 15.5 \text{ mm}$ 。同样将  $\rho = 7.5 \text{ mm}$  的理论值(实线)全部乘以 10, 使其与  $\rho = 15.5 \text{ mm}$  的蒙特卡罗方法彻底分离。

从图 3 可以看出, 三层不匹配介质的时域研究完全可以解决两层体系问题, 从而进一步说明我们推出的三层体系时域的漫射研究是正确的。

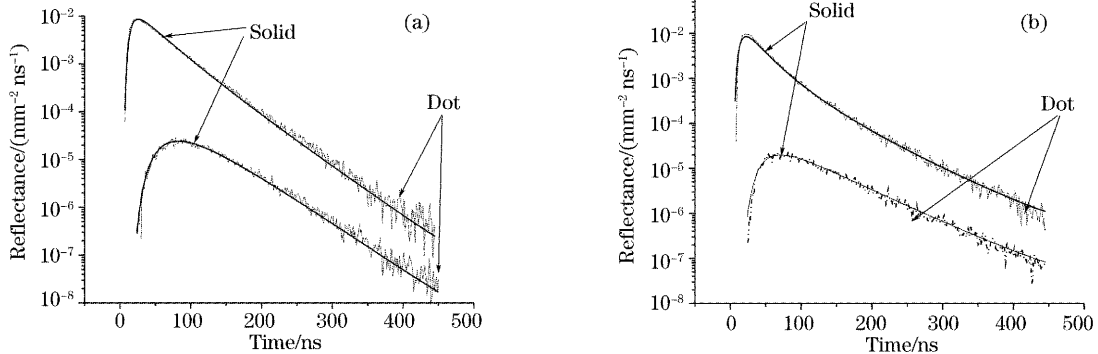


图 3 时间分辨曲线(实线)与蒙特卡罗方法(点线)比较。(a)  $n_1 = 1.55, n_2 = 1.3, \mu_{a2} = 0.022 \text{ mm}^{-1}$ ,  
(b)  $n_1 = 1.33, n_2 = 1.4, \mu_{a2} = 0.01 \text{ mm}^{-1}$

Fig. 3 Comparison of the time-resolved reflectance calculated with the diffusion theory (solid line) to Monte Carlo simulation (dot line). (a)  $n_1 = 1.55, n_2 = 1.3, \mu_{a2} = 0.022 \text{ mm}^{-1}$ , (b)  $n_1 = 1.33, n_2 = 1.4, \mu_{a2} = 0.01 \text{ mm}^{-1}$

### 4 结 论

给出了三层体系频域状态下漫射方程的解, 通过很多频域的傅里叶变换, 转化成时域。使用蒙特卡罗方法来验证理论是正确的。而且可以包含两层体系的漫射方程, 还可以用来解决两层介质问题。三层不匹配介质的时域研究, 可以模拟组织表面的不匹配介质, 可以更好的模拟人组织表面, 从而更好

的研究光在组织中传输。

### 参 考 文 献

- 1 Alwin Kienle, Thomas Glanzmann, Georges *et al.*. Investigation of two-layered turbid media with time-resolved reflectance[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(28): 6852~6862
- 2 Alwin Kienle, Michael S. Patterson, Nora Dognitz *et al.*. Noninvasive determination of the optical properties of two-layered turbid media[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(4): 779~791

- 3 Wang Jiangan, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte-Carlo simulation for light propagation in striated scattering medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 346~350 (in Chinese)  
王建岗, 王桂英, 徐至展. 光在分层介质中传输行为的蒙特卡罗模拟研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 346~350
- 4 Wang Jiangan, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Monte Carlo simulations for time characteristics of light propagation in scattering medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(2): 155~157 (in Chinese)  
王建岗, 王桂英, 徐至展. 散射介质中光传输行为时间特性的蒙特卡罗模拟研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(2): 155~157
- 5 Cheng Shuying, Shen Hongyuan, Chen Meifeng. Research on the influence of refractive index on diffuse reflectance and absorbance in tissue by Monte Carlo method [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(2): 169~172 (in Chinese)  
程树英, 沈鸿元, 陈美锋. 用蒙特卡罗法研究折射率对光在组织中的漫反射率和吸收比的影响[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 169~172
- 6 Xu Tang, Zhang Chunping, Wang Xinyu *et al.*. Diffusion approximation and modeling for fluence rate distribution of the CW2 light in biological[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5): 571~575 (in Chinese)  
许 棠, 张春平, 王新宇 等. 连续光在生物组织中能流率分布的漫射近似和模拟[J]. *光子学报*, 2003, **32**(5): 571~575
- 7 Shao-Pow Lin, Lihong Wang, Steven L. Jacques *et al.*. Measurement of tissue optical properties by the use of oblique-incidence optical fiber reflectometry [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 136~143
- 8 Zhang Zhi, Luo Qingming, Zeng Shaoqun. A numerical method for photon migration in heterogeneous bio-tissue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7): 860~863 (in Chinese)  
张 智, 骆清铭, 曾绍群 等. 非均匀生物组织中光子迁移的数值方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7): 860~863
- 9 Wei Huajiang, Xing Da, Wu Guoyong *et al.*. Optical transport characteristics of human tissues in vitro at 808 nm linearly polarized laser irradiation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 305~309 (in Chinese)  
魏华江, 邢 达, 巫国勇 等. 808 nm 近红外激光辐照三种不同的离体人组织的光传输特性[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 305~309
- 10 Lai Jiancheng, Li Zhenhua, Wang Chunyong *et al.*. Angular distribution of backscattered light from locally pathological tissue irradiated by pencil light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1402~1408 (in Chinese)  
来建成, 李振华, 王春勇 等. 线光束照射下局部病变组织背景散射场角分布研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1402~1408
- 11 Richard C. Haskell, Lars O. Svaasand, Tsong-Tseh Tsay *et al.*. Boundary conditions for the diffuse equation in radiative transfer [J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1994, **11**(10): 2727~2741
- 12 J. M. Schmitt, G. X. Zhou, E. C. Walker *et al.*. Multilayer model of photon diffusion in skin[J]. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1990, **7**(11): 2141~2153
- 13 Brian W. Pogue, Troy O. McBride, Ulf L. Osterberg *et al.*. Comparison of imaging geometries for diffuse optical tomography of tissue[J]. *Opt. Exp.*, 1999, **4**(8): 270~286