

# 漫射光强度涨落测量皮肤烧伤深度的 模拟实验研究

刘 迎 张西芹 马世宁

(天津大学理学院国家教育部光电子信息工程开放实验室 天津 300072)

**提要** 实验研究了背散射光强度相对涨落与模拟皮肤烧伤深度的关系,结果表明随着模拟烧伤层厚度的增加,背散射光强度的相对涨落逐渐减小。该方法为非接触测量皮肤烧伤深度提供了一种新的参考。

**关键词** 烧伤诊断, 散射, 强度涨落, 非接触测量

## 1 引 言

光被生物组织散射所形成的散斑是随时间和空间变化的动态散斑,散斑的光学性质反映了生物组织的内部规律,这对于医学诊断和非接触测量具有重要意义。烧伤深度是确定皮肤烧伤程度的一项至关重要的指标,目前还没有令人满意的技术来精确测量烧伤深度。近来,利用散斑的某些空时性质非接触测量皮肤烧伤深度的研究引起了一些研究者的重视<sup>[1,2]</sup>, Ajay Sadhwani 等研究了散斑直径大小与模拟烧伤深度的关系<sup>[1]</sup>, D. A. Boas 等用漫射光时间相关函数研究了被烧伤的猪皮肤的深度<sup>[2]</sup>。本文用漫射光强度的均方根相对涨落进行了尝试,实验研究了漫射光强度的均方根相对涨落与聚四氟乙烯膜(模拟烧伤组织)厚度的关系,结果表明,随着聚四氟乙烯膜厚度的增加,背散射光强度的相对涨落逐渐减小。

## 2 理论分析

### 2.1 双层组织模型

生物组织是一种强散射随机介质,其光散射特性可以由它的散射参数(散射系数  $\mu_s$ , 吸收系数  $\mu_a$  及各向异性因子  $g$  等)来描述,对于大多数生物组织,波长范围在 600~1300 nm 的红光与近红外光具有强散射而低吸收的特点<sup>[3]</sup>,对于波长为 633 nm 的红光,皮肤组织的散射系数  $\mu_s$  远大于吸收系数  $\mu_a$ ,在本文的模型中,吸收可以忽略不计,散射光的性质主要决定于  $\mu_s$  和  $g$ 。为方便起见,常用有效散射系数  $\mu_s'$  来描述介质, $\mu_s'$  与  $\mu_s$  的关系是  $\mu_s' = (1 - g)\mu_s$ 。此外,无论生物组织还是活体组织,实际生物组织内部微观运动都很复杂,为简单起见,我们用布朗运动来代替生物组织内部的微观运动。皮肤被烧伤后,可以将其视为静止的,未被烧伤的健康组织视为做布朗运动,烧伤组织和健康组织具有不同的散射参数和动力学参数。烧伤皮肤的双层

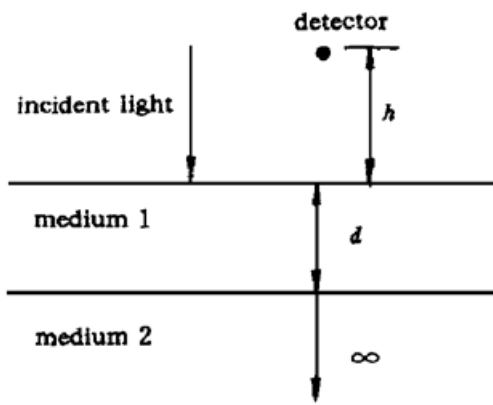


图 1 双层组织模型

Fig. 1 Model of two layered tissues

模型如图 1 所示, 第一层模拟被烧伤的组织, 厚度为  $d$ , 第二层模拟正常组织, 两层的横向尺寸均为无限大, 第二层的厚度趋于无限大, 对于实际生物组织, 组织厚度远远大于一个输运平均自由程  $l^*$  ( $l^* = 1/\mu_s'$ , 光子随机行走的步长)<sup>[2,4]</sup>, 这种假设是合理的。两层介质的有效散射系数分别为  $\mu_{s1}'$  和  $\mu_{s2}'$ , 其动力学参数用布朗漫射系数  $D_{B1}$  和  $D_{B2}$  表示, 由于第一层是静止的, 所以  $D_{B1} = 0$ 。

## 2.2 漫射光强度的均方根相对涨落

如图 1 所示, 一束光垂直入射到被测样品表面, 部分光子未到达第二层, 经第一层直接背散射回样品表面, 另一部分光子经过第一层, 到达第二层, 然后再经过第一层背散射回样品表面。

探测器在距离样品表面高度为  $h$  的地方接收背散射光, 探测器接收到的信号是一随时间变化的量, 其强度用  $I(t)$  表示, 强度的均方根表示为<sup>[5]</sup>

$$\sigma_I = \sqrt{\langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle} \quad (1)$$

相对涨落

$$\frac{\sigma_I}{\langle I(t) \rangle} = \frac{\sqrt{\langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle}}{\langle I(t) \rangle} \quad (2)$$

其中  $\langle \rangle$  表示时间平均。强度的相对涨落与两层组织的散射系数及布朗运动情况有关, 由于第一层是静止的, 从第一层背散射回来的光是稳态的, 不随时间改变; 从第二层背散射回来的光是时变的, 这是由于第二层中散射粒子的布朗运动所致。当第一层的厚度增加时, 一方面能够到达第二层的光子数减少, 另一方面能够到达并从第二层背散射回来的光子, 被第二层散射的次数减少, 动态性减弱, 所以从第一层背散射回来的光子数增加, 光强增强, 从第二层背散射回来的光子数减少, 光强减弱, 涨落减小, 也就是说, 随着第一层厚度的增加, 强度的相对涨落减小。

## 3 实验系统

实验中用聚四氟乙烯膜来模拟被烧伤的组织<sup>[1,2]</sup>, 其有效散射系数  $\mu_{s1}' = 79 \text{ cm}^{-1}$ , 用浓度为 3.75% 的内类脂 (intralipid) 溶液模拟健康组织, 其有效散射系数  $\mu_{s2}' = 55 \text{ cm}^{-1}$ 。实验装置如图 2 所示, 内类脂溶液盛在圆柱形玻璃容器中, 在溶液上方覆盖聚四氟乙烯膜, 波长为 633 nm 的 He-Ne 激光束垂直入射到被测样品上, 探测器在距离样品表面 30 cm 处接收背散射光, 经光电倍增管放大后, 流压转换器将电流信号转变为电压信号, 经过滤波器滤掉高频噪声, 再经 A/D 转换将电压信号转变为数字信号, 然后用计算机进行数据处理。

## 4 实验结果

### 4.1 平均强度与有效散射系数的关系

散射光强度分布与散射介质的散射系数和布朗运动情况有关, 本文测量了不同有效散射系数情况下背散射光的平均强度, 有效散射系数的改变是通过改变内类脂溶液的浓度来实现的, 不同浓度的溶液其布朗漫射系数相同, 实验结果如图 2 所示, 随着有效散射系数的增大,

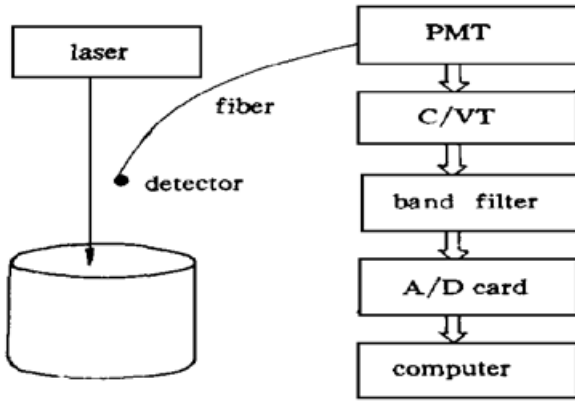


图 2 实验系统

PMT: 光电倍增管; C/VT: 流压转换器

Fig. 2 Setup of the experimental diagram

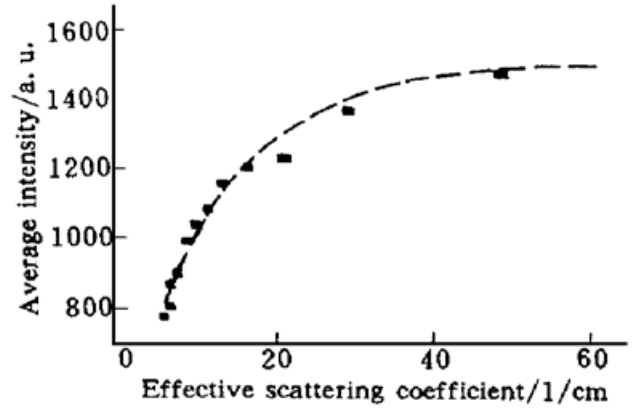


图 3 平均强度与有效散射系数的关系

Fig. 3 Average intensity versus effective scattering coefficient

平均强度逐渐增强, 也就是说, 随着有效散射系数的增大, 光子被散射的次数增加, 被背散射回来的概率增加。在烧伤模拟实验中, 静止层(模拟烧伤组织)的散射系数大于布朗运动层(健康组织), 随着静止层厚度的增加, 背散射回来的光子被静止层散射的概率增大, 即被有效散射系数较大的介质散射的概率增加, 如果把双层介质作为整体考虑, 整体的有效散射系数增大, 因此平均强度增加。

### 4.2 背散射光强的时间信号

在内类脂溶液上覆盖聚四氟乙烯膜, 改变其厚度, 探测器所接收到的背散射光强的时间信号如图 4 所示, *a* 为无静止层时所接收到的强度信号, 直线为平均强度; *b* 为静止层厚度为 0.85 mm 时所接收到的强度信号, 直线为平均强度。比较两条曲线可知, 加静止层后平均强度增大, 强度涨落变小, 平均强度增大是由于整体的有效散射系数增大, 强度涨落变小是由于被布朗运动层散射的概率减少, 散射回来的光子数也减少。

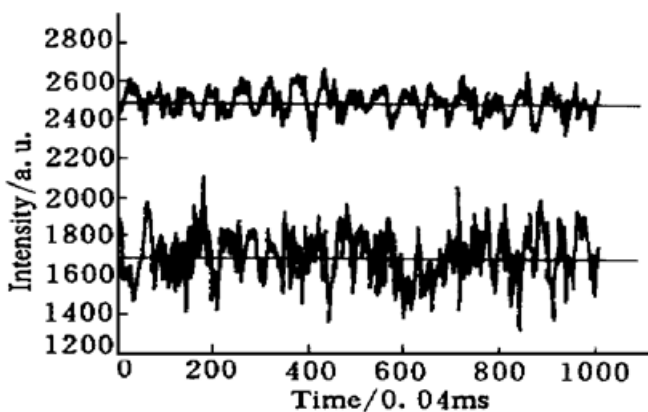


图 4 背散射光强的时间序列信号

Fig. 4 Intensity of backscattering light versus time

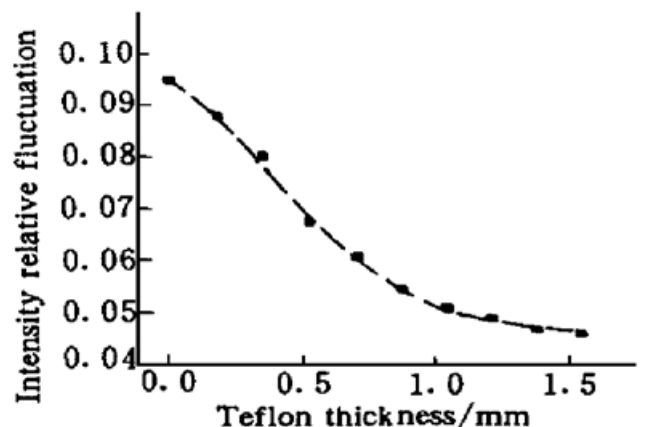


图 5 强度相对涨落与模拟烧伤层厚度关系

Fig. 5 Relative intensity fluctuation versus Teflon thickness

### 4.3 强度相对涨落与模拟烧伤深度的关系

强度相对涨落与静止层厚度的关系如图 5 所示。圆点所示为实验测量结果, 虚线为高斯拟合结果, 两者符合得很好。当没有静止层时,  $\frac{\sigma_I}{\langle I(t) \rangle}$  的值最大, 随着厚度 *d* 的增加, 强度相对涨

落逐渐减小,当  $d$  很大时,曲线趋于平坦,也就是说,当  $d$  很大时,探测器接收到的基本上都是从静止层背散射回来的光子,从布朗运动层背散射回来的光子数很少,强度相对涨落变化不大。在本文的双层介质模型中,静止层的布朗漫射系数  $D_{B1} = 0$ ,从静止层背散射回来的光其强度无涨落,有效散射系数  $\mu_{s1}' > \mu_{s2}'$ ,静止层厚度的增加使平均强度增加;强度涨落与布朗运动层有关,在其散射参数和动力学参数一定的情况下,随静止层厚度的增加,强度涨落减小,所以强度相对涨落亦减小。

### 参 考 文 献

- 1 Ajay Sadhwani, Kevin T. Schomacker, Guillermo J. Tearney *et al.*. Determination of Teflon thickness with laser speckle. Potential for burn depth diagnosis. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5727~ 5735
- 2 D. A. Boas, A. G. Yodh. Spatially varying dynamical properties of turbid media probed with diffusing temporal light correlation. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(1): 192~ 215
- 3 W. F. Cheong, S. A. Prahl. A review of the optical properties of biological tissues. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(12): 2166~ 2185
- 4 D. J. Durian. Accuracy of diffusing-wave spectroscopy theories. *Phys. Rev.*, 1995, **51**(4A-B): 3350~ 3358
- 5 Akira Ishimaru. *Wave Propagation and Scattering in Random Media*. New York: Academic, 1978. 445~ 446

## Experimental Simulation Study of Skin Burn Depth with Intensity Fluctuation of Backscattering Light

Liu Ying Zhang Xiqin Ma Shining

(*Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072*)

**Abstract** The relation between the relative intensity fluctuation of the backscattering light and the Teflon thickness that mimics burn skin was experimentally studied. The results show that the relative intensity fluctuation decreases as the Teflon thickness increases. The experimental results reported here might be useful in the skin burn diagnosis.

**Key words** burn diagnosis, scattering, intensity fluctuation, non-invasive measurement