

# 透射光偏振度与散射次数关系的研究\*

贺忠海 徐可欣 苏翼雄

(精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津大学 300072)

**摘要** 偏振态与散射次数的关系对于提取深入组织内部的后向散射光有很重要的价值.本文分析了透射光的偏振度与光在介质中的散射次数的关系,给出了偏振光完全失去偏振态所需的散射次数,并用直接散射的实验方法进行了验证,得出当散射次数为14次时偏振光将失去其偏振特性的结论.

**关键词** 偏振度;散射次数;失偏

**中图分类号** R318.51 **文献标识码** A

## 0 引言

随着生物医学光学技术的发展,偏振光在组织中的传输特性引起了越来越多的关注.通常认为,偏振光进入组织中,由于组织对光的多次散射作用,偏振光将会迅速地丧失其原有的偏振特性,称为失偏现象.而表面的反射光由于只是经过了单次反射事件,在入射面周围还是保持偏振特性.偏振光此特性在皮肤癌的早期诊断之中已有应用<sup>[1,2]</sup>.

由于光在组织中传输的复杂性,因此光在组织中的迅速失偏现象的研究只有少量的报道,如纽约大学的 K. M. Yoo 和 R. R. Alfano<sup>[3]</sup>从散射次数出发,理论分析得出了线偏振光在混浊介质中传输时,经过20次的散射事件后,将丧失原有偏振态的结论,同时以飞秒激光测量法进行实验验证.法国的 D. Biocout 和 C. Brosseau<sup>[4]</sup>以格林函数  $G(n, d)$  出发,在一定的假设条件下,利用蒙特卡罗模拟和实验,也得到了相同的结论.本文直接用散射的实验方法对散射次数与偏振态进行研究,得到了二者的关系.

## 1 理论分析

假设入射光偏振态为水平( $//$ ),入射光能量为  $I$ ,发生  $n$  次散射事件后,在水平方向的能量权重为<sup>[3]</sup>

$$I^// (n) = \frac{1 + 2(0.7)^n}{2 + (0.7)^n} I \quad (1)$$

垂直方向的能量权重为

$$I^\perp (n) = \frac{1 - (0.7)^n}{2 + (0.7)^n} I \quad (2)$$

由偏振度<sup>[5]</sup>的定义,可以得

$$P(n) = \frac{I^// (n) - I^\perp (n)}{I^// (n) + I^\perp (n)} = \frac{2(0.7)^n + (0.7)^n}{2 + (0.7)^n} \quad (3)$$

由式(3),可以得到线偏振光入射时,偏振度的变化与散射次数  $n$  之间的关系如图1.

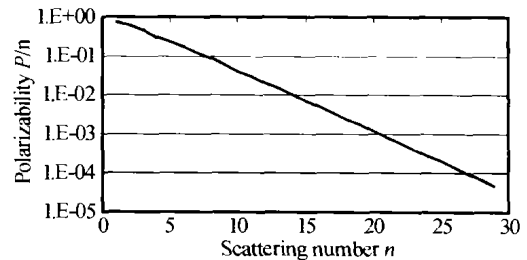


图1 偏振度与散射次数的关系

Fig. 1 Relationship of polarizability vs scattering number

通常,  $P(n) < 0.001$  时,就可以认为偏振光已经完全失偏.因此,当散射次数为22次,偏振光将完全丧失其偏振态.

## 2 实验验证

实验系统如图2.图中激光器发出的光线经透镜和光阑后透射过散射介质,经过偏振片后被光电倍增管接收,转换成电信号后被输入数据采集卡.通过改变偏振片的角度并观察接收信号的改变就可求出光的偏振度.分束器和光功率计的作用是作为参考光路,并与测量光路相比较从而消除光源变化对测量结果的影响.

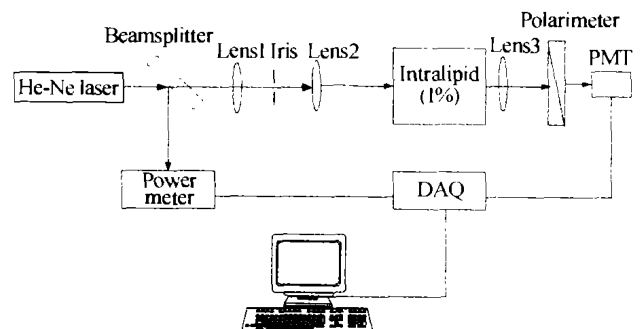


图2 透射光偏振度测试实验装置系统简图

Fig. 2 Diagram of transmitted light polarizability experimental setup

\*国家自然科学基金(30170261)资助  
Tel:022-27409446 Email: zhhe@eyou.com  
收稿日期:2004-03-09

偏振度  $P_L$  是用于定量分析光束中偏振成分和非偏振成分的一个参数. 一般定义为  $P_L = \left| \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}} \right|$ , 式中  $R_{\max}$  为测量待评价光时, 旋转检偏器, 光透射的能量最大值,  $R_{\min}$  为光透射能量的最小值.

偏振度  $P_L$  的范围在 0 到 1 之间, 当  $P_L = 1$ , 光束为完全偏振光; 当  $P_L = 0$ , 光束为完全非偏振光; 在其他情况, 光束为部分偏振光.

## 2.1 实验样品制备

实验样品采用浓度为 1% 的 Intralipid 溶液, Intralipid 原浆使用华瑞公司生产的 Intralipid-10% 母液, 稀释 10 倍得到 1% Intralipid 溶液. 经我们的实验测定, 实验方法采用文献[6]中所述的方法, 测得溶液的散射系数为  $3.84 \text{ mm}^{-1}$ . 根据散射系数的定义, 它表示单位光程长上一个光子被散射的几率, 或者散射事件发生的概率. 可以认为单个光子在通过 1 mm 的该溶液时, 将会发生 3.84 次的散射事件.

## 2.2 实验方法

以线偏振光入射, 当样品池中无样品时, 旋转测量光路检测器前的偏振片, 测量此时的透射光能量的极大值为 8.78, 最小值为 0.01, 由偏振度的定义, 此时入射光的偏振度  $P_L \approx 1$ . 加入样品, 从 0.5 mm 至 4.5 mm, 以 0.1 mm 的间隔变化样品池的长度, 旋转偏振片, 分别测量透射光的能量极值, 得到如图 3 和图 4 的测量结果.

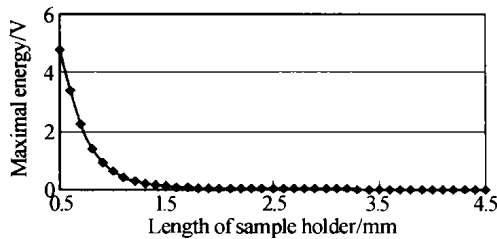


图 3 透射光中极大值能量与样品池长度关系  
Fig. 3 Relationship of maximum energy in transmitted light vs cell length

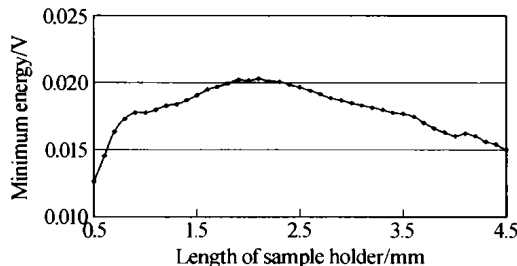


图 4 透射光中极小值能量与样品池长度关系  
Fig. 4 Relationship of minimum energy in transmitted light vs cell length

## 3 实验结果与讨论

在如图 2 的实验装置中, 旋转偏振片, 使得透射

光能量达到极大值, 此时, 偏振片的偏振方向与入射光偏振方向一致. 图 3 给出了透射光能量随着样品池长度变化的曲线, 该能量呈指数衰减形式.

同样, 在图 2 的实验装置中, 旋转偏振片, 使得透射光能量达到极小值, 此时, 偏振片的偏振方向与入射光偏振方向垂直. 图 4 给出了透射光能量随着长度变化的曲线. 其能量的变化规律是先增加, 后减少. 光子在溶液中的传输, 既有散射事件也有吸收事件, 两种事件都会降低光子的能量值, 此外, 散射事件还会破坏光子的偏振度. 初始阶段, 偏振光子的能量很高, 因散射而被破坏偏振态的光子数目大于由于样品池长度增加而被吸收的光子数目, 此时利用垂直于入射光偏振态的偏振片所检测出的能量值是逐渐增大的; 增大到一定的阶段, 二者的光子数目达到平衡, 然后过渡到因为吸收的光子数目占主要地位, 导致的结果是随样品池的长度进一步增大, 接收光能量而降低.

根据图 3 和图 4 的实验数据, 可以得到的透射光偏振度与样品池长度的关系, 如图 5. 图中可看出, 当样品池长度为 3.5 mm 时, 透射光的偏振度为 0.032, 基本为零. 按散射系数的定义, 此时光子发生的散射事件次数接近 14 次, 这与 K. M. Yoo 的结论 20 次略有差距, 我们认为这是由于采用的样品粒子大小的不一致所造成的. 同时, 受偏振度测量精度的限制, 我们采用的偏振度的数值 (0.032) 略大于 K. M. Yoo 采用的数值 (0.001), 所以导致二者的偏振次数不同.

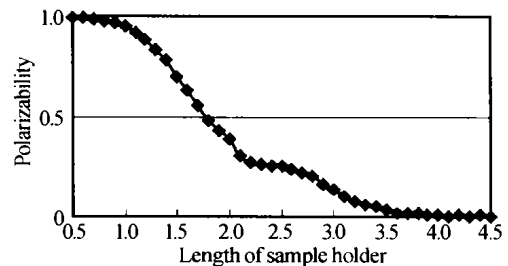


图 5 透射光偏振度与样品池长度的关系  
Fig. 5 Relationship of polarizability in transmitted light vs cell length

## 4 结论

线偏振光经过将近 14 次散射事件后, 会丧失其原有偏振态. 皮肤的组成: 最外层组织为表皮层, 入射光波长为 632.8 nm, 其散射系数为  $45 \text{ mm}^{-1}$ , 然后为散射系数  $18.8 \text{ mm}^{-1}$  的真皮层<sup>[7]</sup>. 根据散射系数的定义和上述的实验结果, 线偏振光仅在表皮层中进入 0.25 mm 甚至更小的深度之后, 将因为多次散射事件导致光完全失偏. 对于后向散射光, 仅从数学角度上考虑, 此进入深度还要减半.

## 参考文献

- 1 Konstantin Sokolov, Rebekah Drezek, Kirk Gossage, *et al.* Reflectance spectroscopy with polarized light: is it sensitive to cellular and nuclear morphology. *Optics Express*, 1999, **5** (13): 302 ~ 317
- 2 Backman V, Gurjar R, Badizadegan K, *et al.* Polarized light scattering spectroscopy for quantitative measurements of epithelial cellular structures in situ. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, **5**(4): 1019 ~ 1026
- 3 Yoo K M, Alfano R R. Time resolved depolarization of multiple backscattered light from random media. *Physics Letters A*, 1989, **142**(11): 531 ~ 536
- 4 Bicout D, Brosseau C, Martinez A S, *et al.* Depolarization of multiply scattered waves by spherical diffusers: Influence of the size parameter. *Physics Review E*, 1994, **49**(2): 1767 ~ 1770
- 5 胡玉禧, 安连生. 应用光学. 合肥: 中国科技大学出版社, 1996  
Hu Yuxi, An Liansheng. Applied optics. Hefei: Press of university of science and technology of China, 1996
- 6 Hugo J van Stavereen, Christian J. M. Mores, Jan van Marle, *et al.* Light scattering in intralipid-10% in the wavelength range of 400 ~ 1100 nm. *Applied Optics*, 1991, **30**(31): 4507 ~ 4514
- 7 谢树森, 郑蔚, 黄禄华. 激光医学中的组织光学. 光电子·激光, 1994, **5**(2): 65 ~ 71  
Xie S S, Zheng W, Huang L H. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 1994, **5**(2): 65 ~ 71

## Study on the Relationship of Polarizability of Transmitted Light and Scattering Number

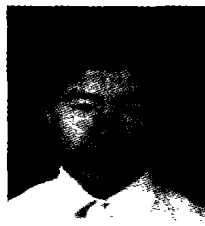
He Zhonghai, Xu Kexin, Su Yixiong

*State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072*

Received date: 2004-03-09

**Abstract** The relationship of polarizability and scattering number has great value to extract the backscattering light deeply into the tissue. The relationship of polarizability of transmitted light and the scattering number of light in medium is analyzed. The scattering number that purely depolarization needed is given. And the result is validated by directly scattering experiment. The conclusion can be made that when the scattering number is 14, the polarization light will be depolarized.

**Keywords** Polarizability; Scattering number; Depolarization



**He Zhonghai** was born in Hebei Province, China in 1973. He graduated from department of precision instrument, Hefei University of Technology in 1994. He received master degree in 1999 and doctor degree in 2002 from Tianjin University. Now he is a postdoctor in college of precision instrument and opto-electronics engineering, Tianjin University. His major research field is biomedical optics.