

doi: 10.3788/gzxb20124105.0608

不同波长的散射介质后向散射光偏振度特性

曹先平, 孙萍

(北京师范大学 物理系; 北京市应用光学重点实验室, 北京 100875)

摘 要: 基于 Stokes 矢量, 通过测量以线偏振光和圆偏振光入射时脂肪乳剂后向散射光的偏振度, 研究了 532 nm、650 nm 和 780 nm 三个波长的光与散射粒子粒径为 325 nm 的脂肪乳剂溶液作用后, 其后向散射光的偏振度特性. 研究表明, 对于入射线偏振光, 780 nm 波长后向散射光中的线偏振光成分多于圆偏振光成分, 而 532 nm 波长则相反; 对于入射圆偏振光, 三个波长后向散射光中的圆偏振光成分均多于线偏振光成分; 532 nm 波长的总偏振度高于 650 nm 和 780 nm 两个波长各自的总偏振度; 线偏振光的保偏性优于圆偏振光的保偏性, 但偏振光在散射介质中的穿透深度较小. 因此, 后向散射成像技术适用于物体表层成像, 而且选择波长略大于粒径的线偏振光可以提高成像质量.

关键词: 后向散射; Stokes 矢量; 偏振度; 线偏振光; 圆偏振光; 散射介质

中图分类号: Q631; O436.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)05-0608-6

0 引言

散射效应使得散射介质中的物体成像时的分辨率和对比度下降. 偏振光后向散射成像技术利用散射介质后向漫散射光中没有完全退偏的弹道光 and 蛇形光成像, 从而提高成像的分辨率和对比度^[1-2]. 目前该技术被广泛应用于生物医学、大气和海洋等领域, 特别是在生物医学领域中的应用越来越受到关注^[3-8]. 偏振度 (Degree Of Polarization, DOP) 作为描述偏振光性质的一个重要的物理量, 可用来评价偏振光经过散射介质后的保偏能力. 因此, DOP 的测量对偏振光后向散射成像技术的应用具有重要意义. 目前测量 DOP 的主要方法有斯托克斯 (Stokes) 矢量法^[9-11]、穆勒 (Mueller) 矩阵法^[12] 和偏振正交法^[5]. Stokes^[13] 于 1852 年提出了 Stokes 矢量, 用来描述任意偏振态的光. 由于 Stokes 矢量在实验上可以通过直接测量光束的光强来确定, 实验装置也相对简单, 因此, Stokes 矢量法成为测量 DOP 的重要方法之一. 本文基于 Stokes 矢量, 分别测量以线偏振光和圆偏振光入射时脂肪乳剂 (Intralipid) 后向漫散射光的总偏振度、线偏振光偏振度和圆偏振光偏振度, 研究不同波长的入射光与具有不同散射系数的 Intralipid 溶液作用后偏振度

的变化规律.

1 测量方法

选择空间直角坐标系 (x, y, z) , xy 平面垂直于光的传播方向 z . Stokes 矢量可以表示为^[10]

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ I_x - I_y \\ I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x + I_y \\ 2I_x - S_0 \\ 2I_{45^\circ} - S_0 \\ 2I_R - S_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, I_x 、 I_y 、 I_{45° 和 I_{-45° 分别表示偏振方向与 x 轴夹角为 0° 、 90° 、 45° 和 -45° 的线偏振光强度; I_R 和 I_L 分别表示右旋和左旋圆偏振光强度. 由于 Stokes 矢量是由三组正交方向的强度表示的, 因此, Stokes 矢量又可以简化为式(1)中最后一项. 实验中, 只需测量 I_x 、 I_y 、 I_{45° 和 I_R 这四个强度量就可以得到 Stokes 矢量.

当完全偏振光经过散射介质后, 其散射光的偏振态会随介质的不同而发生变化. 散射光会成为部分偏振光, 甚至完全退偏成非偏振光. 偏振度是描述散射光偏振态的重要参量. 由 Stokes 矢量定义的散射光的总偏振度为

$$\text{DOP} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / S_0 \quad (2)$$

而散射光中的圆偏振光和线偏振光的偏振度分别为

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61077007) 和北京市自然科学基金 (No. 4102031) 资助

第一作者: 曹先平 (1984-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为信息光学. Email: 200921140049@mail.bnu.edu.cn

导师 (通讯作者): 孙萍 (1963-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为信息光学和生物光学. Email: pingsun@bnu.edu.cn

收稿日期: 2011-09-27; **修回日期:** 2011-11-28

$$DOP_c = |S_3/S_0| \quad (3)$$

$$DOP_L = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}/S_0 \quad (4)$$

由偏振度的定义可知

1) DOP 、 DOP_c 和 DOP_L 都是 $0 \sim 1$ 之间的数,当数值为 1 时,散射光为完全偏振光;当数值为 0 时,散射光为非偏振光,即入射的偏振光经过散射介质后完全退偏;

2) $DOP \geq DOP_c$ 和 $DOP \geq DOP_L$; 当 $DOP_c \geq DOP_L$ 时,散射光中的圆偏振光成分居多,反之,线偏振光成分居多。

选取 Intralipid_20% 溶液(山东鲁抗辰欣药业有限公司生产)作为散射介质,用去离子水将浓度为 20% 的 Intralipid 溶液,分别稀释至浓度为 0.005%、0.01%、0.02%、0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.5%、0.7%、1.0%、1.5%。用动态光散射粒度分析仪(LB-550, HORIBA)测得 Intralipid 溶液中的散射粒子的粒径满足高斯分布,粒径均值为 $d = 325 \text{ nm}$ 。用扫描电镜(S-4800 HITACHI)分析得到 Intralipid 溶液中的散射粒子呈球形。本文研究 532 nm、650 nm 和 780 nm 三个波长的光与散射介质的相互作用规律,由于散射粒子的粒径与波长同数量级,因此可以采用 Mie 散射理论^[14] 计算得到对应上述 11 个浓度的散射系数,散射系数随波长的增加而减小。

实验装置如图 1。波长分别为 532 nm、650 nm 和 780 nm 的半导体激光器(北京雷神光电科技开发有限公司)发出的光束直径为 0.8 mm,三个波长的出射功率都调节在 6 mW。偏振片 P_1 置于激光器前端,使得出射光成为线偏振光。若在 P_1 后面置一快轴与 P_1 的偏振方向成 45° 角的 $1/4$ 玻片 Q_1 (石英零级),则出射光将成为圆偏振光。将 180 mL 的 Intralipid 溶液盛放在石英样品池(10 cm×10 cm×2 cm)中,并将样品池固定在竖直方向上。线偏振光或圆偏振光以 30° 角入射到样品池的前表面。入射光线与被接收的散射光线处于同一水平面上。激光

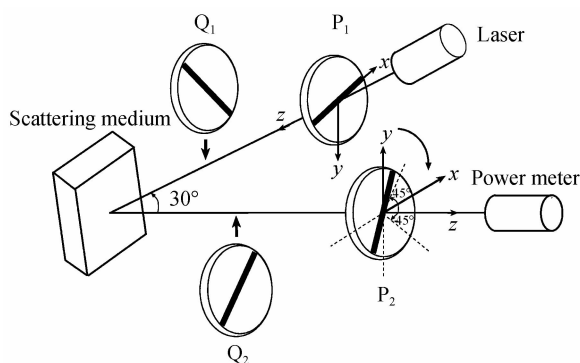


图 1 偏振度测量装置

Fig. 1 Measuring setup of degree of polarization

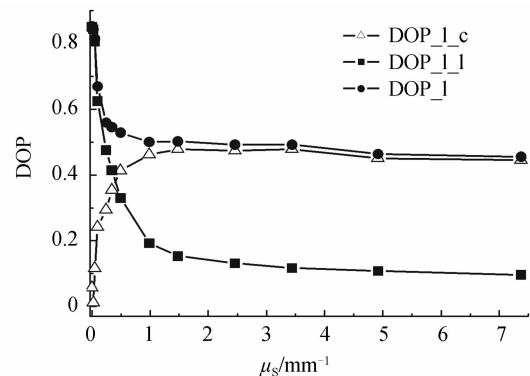
功率计(LM-200A, 中国计量科学研究院)接收垂直于样品池前表面的后向散射光光强,若在功率计前端置一偏振片 P_2 ,则功率计接收到的是散射光中的线偏振光的光强,若再在 P_2 前置一快轴与 P_2 的偏振方向成 45° 角的 $1/4$ 玻片 Q_2 (石英零级),则功率计接收到的是散射光中的圆偏振光光强。

具体测量方法是:将 P_1 的偏振方向置于如图 1 所示的直角坐标系的 x 轴方向,旋转 P_2 ,当 P_2 的偏振方向分别在 x 、 y 、 45° 方向时,功率计探测的分别是入射线偏振光时的散射光中的三个方向的线偏振光光强 I_x 、 I_y 、 I_{45° 。同理,当 Q_1 和 P_1 一起构成圆偏振光发生器时,功率计探测的分别是入射圆偏振光时的 I_x 、 I_y 、 I_{45° ; 当将 Q_2 和 P_2 一起构成圆偏振光检偏器时,功率计探测的是入射线偏振光或圆偏振光时的散射光中的右旋圆偏振光光强 I_R 。最后依据式(2)~(4)计算出偏振度。

2 实验结果

首先检测实验装置的可靠性及测量准确度。依据本文所提出的测量方法测量线偏振光和圆偏振光在空气中传播时的偏振度,结果为:对应线偏振光的 $DOP \approx 1$, $DOP_L \approx 1$, $DOP_c \approx 0$; 对应圆偏振光的 $DOP \approx 1$, $DOP_L \approx 0$, $DOP_c \approx 1$ 。结果表明,光学系统可靠,可以用于实际测量。

当波长为 532 nm 时,测量结果如图 2,图中符号 DOP_L 和 DOP_c 、 DOP_{L_c} 和 DOP_{c_c} 、 DOP_{L_l} 和 DOP_{c_l} 表示分别以线偏振光和圆偏振光入射时,后向散射光的总偏振度、圆偏振光偏振度和线偏振光偏振度。对于入射线偏振光情形(图 2(a)),当 $\mu_s \leq 0.50 \text{ mm}^{-1}$ 时, DOP_L 和 DOP_{L_l} 随 μ_s 的增加呈 e 指数衰减,而 DOP_{L_c} 呈 e 指数增加;当 $\mu_s > 0.50 \text{ mm}^{-1}$ 时, DOP_L 和 DOP_{L_l} 随 μ_s 的增加呈缓慢减小趋势,而 DOP_{L_c} 却缓慢增加,最后逐渐趋于与 DOP_L 相近的稳定值。当 $\mu_s \geq 0.50 \text{ mm}^{-1}$ 时, DOP_{L_c} 始终大于 DOP_{L_l} ,表明此时后向散射光



(a) Linearly polarized incident light

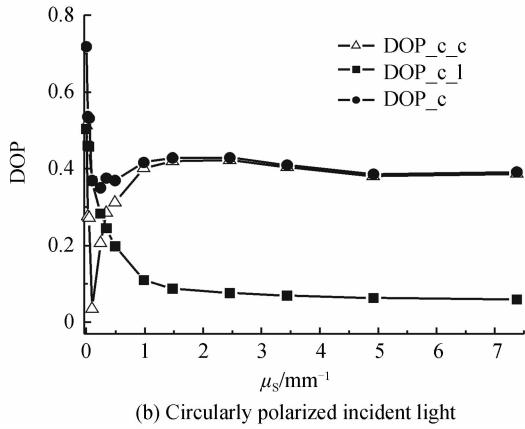


图 2 532 nm 线偏振光和圆偏振光入射时偏振度的测量结果
 Fig. 2 Results of degree of polarization at 532 nm for linearly polarized incident light and circularly polarized incident light

中圆偏振光成分反而更多;对于入射圆偏振光情形(图 2(b)),DOP_c 和 DOP_{c_c} 的变化规律相同,在 $\mu_s \approx 0.10 \text{ mm}^{-1}$ 这一点都存在极小值. DOP_{c_l} 仍按指数规律衰减,当 $\mu_s \geq 0.36 \text{ mm}^{-1}$ 时, DOP_{c_c} 始终大于 DOP_{c_l},表明此时后向散射光中圆偏振光成分居多.

当波长为 650 nm 时,测量结果如图 3. 对于入

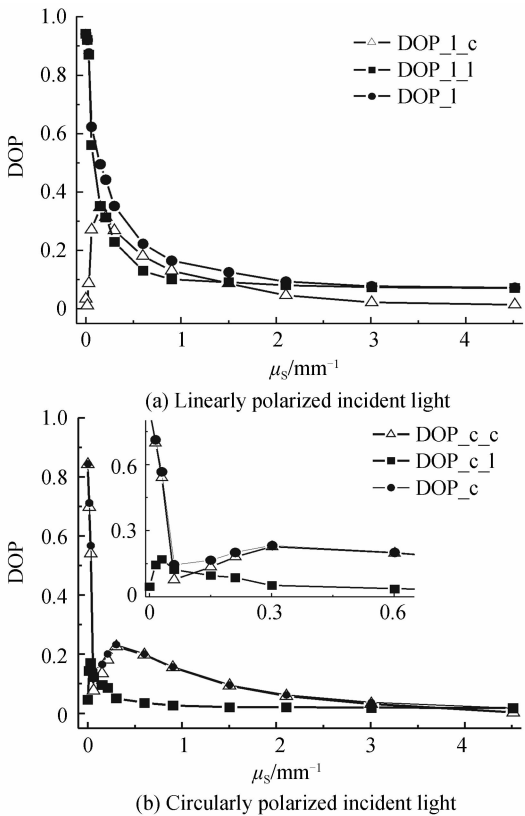


图 3 650 nm 线偏振光和圆偏振光入射时偏振度的测量结果
 Fig. 3 Results of degree of polarization at 650 nm for linearly polarized incident light and circularly polarized incident light

射线偏振光情形(图 3(a)),DOP_l 和 DOP_{l_l} 随 μ_s 的增加仍呈 e 指数衰减,而 DOP_{l_c} 在 $\mu_s = 0.15 \text{ mm}^{-1}$ 时存在极大值,散射光中的线偏振光与圆偏振光成分相差不多;对于入射圆偏振光情形(图 3(b)),DOP_c 和 DOP_{c_c} 变化规律依然相同,在 0.06 mm^{-1} 这一点存在极小值. DOP_{c_l} 不再呈现 e 指数衰减趋势,而是在 0.03 mm^{-1} 出现了极大值,并且当 $\mu_s \geq 0.10 \text{ mm}^{-1}$ 时, DOP_{c_c} 大于 DOP_{c_l},表明此时后向散射光中的圆偏振光居多.

当波长为 780 nm 时,测量结果如图 4. 结果表明:对于入射线偏振光(图 4(a)),DOP_l 和 DOP_{l_l} 随 μ_s 的增加呈 e 指数衰减,且曲线十分接近. 而 DOP_{l_c} 在 0.04 mm^{-1} 这一点有极大值. DOP_{l_l} 始终大于 DOP_{l_c},表明散射光中的线偏振光占主导地位;对于入射圆偏振光(图 4(b)),DOP_c 和 DOP_{c_c} 都服从 e 指数规律衰减, DOP_{c_l} 在 0.16 mm^{-1} 这一点有极大值,且始终小于 DOP_{c_c},表明散射光中的圆偏振光占主导地位.

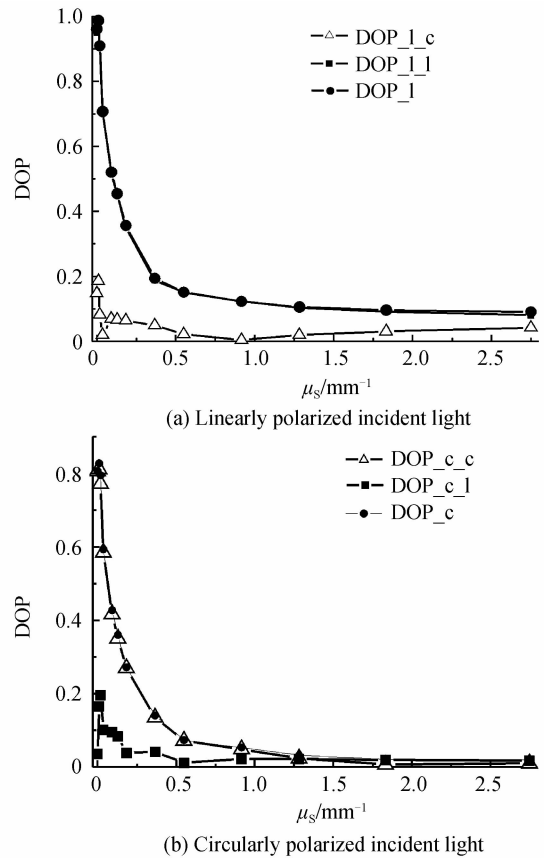


图 4 780 nm 线偏振光和圆偏振光入射时偏振度的测量结果
 Fig. 4 Results of degree of polarization at 780 nm for linearly polarized incident light and circularly polarized incident light

图 5 是三个不同波长的总偏振度曲线. 由曲线可知,对于这三个波长都是线偏振光入射时的总偏振度大于圆偏振光入射时的总偏振度. 另外,不论以

何种偏振光入射,532 nm 的总偏振度都要高于另外两个波长各自的总偏振度.

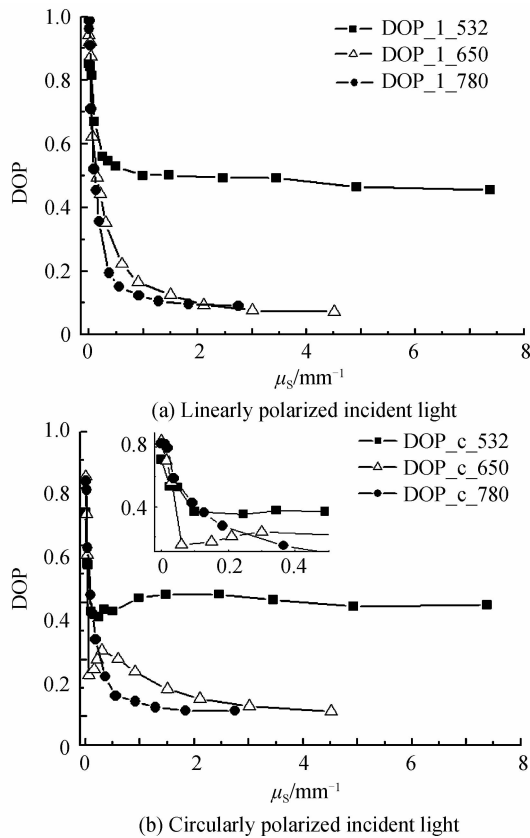


图 5 不同波长的入射线偏振光和圆偏振光的总偏振度曲线 Fig. 5 Curves of degree of polarization at different wavelengths for linearly polarized incident light and circularly polarized incident light

3 结果分析

由图 2~4 的结果可知,在散射系数较小时,后向散射光中圆偏振光的偏振度会发生由小到大的变化,或者存在极小或极大值,并且圆偏振光成分在后向散射光中会居多.如图 6,一束圆偏振光入射到散射介质后,在介质中会形成三种类型的光:介质表面的旋向跃变光、靠近表面的保偏光和介质内部的退偏光^[15].旋向跃变是指圆偏振光的旋向由原来的右旋变成了左旋^[16-17],表现为后向散射光中的右旋圆偏振光强 I_R 与左旋圆偏振光强 I_L 发生变化,致使圆偏振光的偏振度曲线出现极值.线偏振光入射到散射介质后只有两种光,即表层的保偏光和内部的退偏光^[15].线偏振光在介质中会改变偏振态,除了线偏振光之外,还有圆偏振光和部分偏振光,其中圆偏振光由介质表面散射出去时也会发生旋向的改变,致使后向散射光中的圆偏振光偏振度曲线由小到大变化或出现极值.线偏振光退偏仅表现为振动方向的随机性,但是,圆偏振光退偏却表现为方向和旋向两方面的随机性,而旋向比方向的保持性要强,

因此,圆偏振光成分在后向散射光中会居多.圆偏振光的偏振度曲线出现极值时对应的散射系数较小,说明旋向的改变只在低浓度的散射介质中发生.

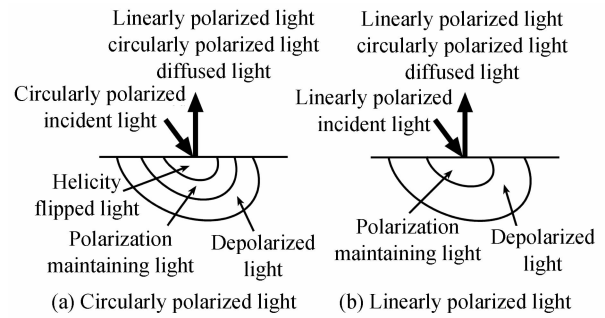


图 6 线偏振光入射和圆偏振光入射时散射介质和后向散射中不同类型的光 Fig. 6 Different types of light emerging from the scattering medium and back scattering for linearly polarized incident light and circularly polarized incident light

图 5 表明:当粒径小于波长时,发生前向散射和后向散射的几率相同,后向散射会使得圆偏振光的旋向发生改变,导致圆偏振光偏振态发生变化.但是,线偏振光的振动方向不受后向散射的影响,因此,线偏振光的偏振态不易改变,也就是说线偏振光比圆偏振光保偏性好^[15-16],因此线偏振光入射时的总偏振度要大于圆偏振光入射时的总偏振度.文献^[17-18]也报道了类似的实验结果.根据 Mie 散射理论计算 Intralipid 溶液的散射光强与散射角的关系表明,三个波长都是前向散射增强,后向散射减弱,但是,在 90°角(接收角)的后向散射方向上,532 nm、650 nm、780 nm 三个波长的光强之比为 15 : 13 : 1.如图 7 所示,532 nm 的后向散射光强大,那么散射光中所含的偏振光多,总偏振度就高一些.

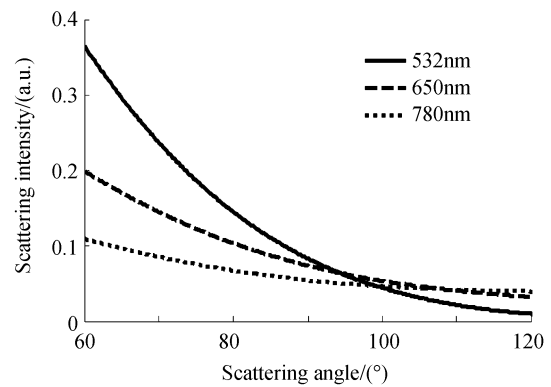


图 7 根据 Mie 散射理论计算的不同波长的散射光强与散射角度的关系曲线

Fig. 7 Curves of relationship between scattering intensity and angle for different wavelengths according to Mie theory

当 $\mu_s \geq 0.85 \text{ mm}^{-1}$,并以线偏振光和圆偏振光入射时,532 nm 波长的总偏振度都不低于 0.4,此时对应的偏振光在介质中的穿透深度约为

1. 18 mm,表明偏振光后向散射成像技术仅适用于物体表层成像.

4 结论

基于 Stokes 矢量方法,研究了三个不同波长后向散射光的偏振度特性,得到如下结论:

1)当以线偏振光入射时,780 nm 波长的后向散射光中的线偏振光成分多于圆偏振光成分,而 532 nm 波长则相反,650 nm 波长没有明显的差别;

2)当以圆偏振光入射时,532 nm、650 nm 和 780 nm 三个波长的后向散射光中的圆偏振光成分均多于线偏振光成分;

3)532 nm、650 nm 和 780 nm 三个波长,线偏振光入射时的总偏振度均大于圆偏振光入射时的总偏振度,即线偏振光的保偏性优于圆偏振光的保偏性;

4)以线偏振光和圆偏振光入射时,532 nm 波长的总偏振度均高于 650 nm 和 780 nm 两个波长各自的总偏振度;

5)偏振光在散射介质中的穿透深度较小.

由此可以推断,后向散射成像技术适用于物体表层成像,如皮肤和口腔表层组织,并且选择波长略大于散射粒子粒径的线偏振光源,既可精简成像装置,又能提高成像质量.

参考文献

- [1] SHAO H, HE Y H, LI W, *et al.* Polarization-degree Imaging contrast in turbid media: a quantitative study[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(18): 4491-4496.
- [2] SHUKLA P, PRADHAN A. Polarization-gated imaging in tissue phantoms: effect of size distribution [J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(32): 6099-6104.
- [3] DEMOS S G, ALFANO R R. Optical polarization imaging [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(1): 151-155.
- [4] JACQUES S L, JESSICA C. R-R, LEE K, Imaging skin pathology with polarized light [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2002, **7**(3): 329 - 340.
- [5] LI X, JANAKA C R, YAO G, Polarization-sensitive reflectance imaging in skeletal muscle [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(13): 9927-9935.
- [6] ZHU Q, STOCKFORD I M, JOHN A, *et al.* Experimental and theoretical evaluation of rotating orthogonal polarization imaging [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2009, **14**(3): 034006 -1-10.
- [7] SANKARAN V, WALSH J T Jr, MAITLAND D J, Comparative study of polarized light propagation in biological tissues [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2002, **7**: 300-306.
- [8] LI Wei, HE Yong-hong, MA Hui, Polarization gating imaging in turbid medium: monte carlo simulation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 518-522.
李伟,何永红,马辉,偏振门用于对散射介质成像的蒙特卡罗模拟研究 [J]. *光子学报*, 2008, **37**(3): 518-522.
- [9] DENG Yong, LU Qiang, LUO Qing-ming, Diffuse backscattering characteristic of linearly and circularly polarized light from turbid media [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(3): 525-529.
邓勇,鲁强,骆清明,混浊介质中线偏振光和圆偏振光后向漫散射特征 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(3): 525-529.
- [10] LU S Y, CHIPMAN R A, Mueller matrices and the degree of polarization [J]. *Optics Communications*, 1998, **146**: 11-14.
- [11] SCHAEFER, COLLETT B E, SMYTH R, *et al.* Measuring the stokes polarization parameters [J]. *American Journal of Physics*, 2007, **75**(2): 163-168.
- [12] DEBOO B J, SASIANH J M, CHIPMAN R A, Depolarization of diffusely reflecting man-made objects [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(26): 5434-5445.
- [13] STOKES G G. Composition and resolution of streams of polarized light from multiple sources [J]. *Transactions Cambridge Philosophical Society*, 1852, **9**: 399-416.
- [14] Van de HULST H C. Light scattering by small particles [M]. New York: Dover Publications, 1981.
- [15] MORGAN S P, RIDGWAY M E, Polarization properties of light backscattered from a two layer scattering medium [J]. *Optics Express*, 2000, **7**(12): 395-402.
- [16] BICOUT D, BROSSEAU C, MARTINEZ A S, *et al.* Depolarization of multiply scattered waves by spherical diffusers: Influence of the size parameter [J]. *Physical Review E*, 1994, **49**(2): 1767-1770.
- [17] MACKINTOSH F C, ZHU J X, PINE D J, *et al.* Polarization memory of multiply scattered light [J]. *Physical Review E*, 1989, **40**(3): 9342-9345.
- [18] SANKARAN V, SCHÖNENBERGER K, WALSH J T, *et al.* Polarization discrimination of coherently propagating light in turbid media [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(19): 4252-4261.

Characteristics of Degree of Polarization of Backscattering Light in Scattering Medium at Different Wavelengths

CAO Xian-ping, SUN Ping

(*Department of Physics; Beijing Area Major Laboratory of Applied Optics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: The degree of polarization (DOP) of backscattering light in intralipid were measured based on Stokes vector. The characteristics of DOP were investigated when the interaction between polarized light and scattering medium were taken into account. The polarized light included three different wavelengths of 532 nm, 650 nm and 780nm. The diameter of scattering particle was 325 nm. Experimental results show that the circularly polarized component in backscattering light is more than the linearly polarized component for linearly polarized incident light of wavelength of 532 nm. However, this conclusion is reverse for wavelength of 780 nm. In addition, the circularly polarized component is more than the linearly polarized component for three different wavelengths when circularly polarized incident light was used. Furthermore, the total DOP value of 532 nm was larger than that of 650 nm and 780 nm respectively. Linearly polarized light maintained polarization better than circularly polarized light, however, the penetrating depth through scattering medium of polarized light was short. So the imaging used backscattering light can be applied to image superficial objects. Besides, the imaging quality can be improved if the wavelength of incident light is a little bigger than the diameter of scattering particle.

Key words: Backscattering; Stokes vector; Degree of polarization; Linearly polarized light; Circularly polarized light; Scattering medium