

文章编号: 0258-7025(2003)08-0747-03

# 混浊介质的浓度对其 180° 后向散射特性的影响

张大伟<sup>1,2</sup>, 李国华<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165; <sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 根据“黑箱化”唯像理论, 利用混浊介质 180° 后向散射特性的系统对不同浓度的牛奶与去离子水的混合溶液的后向散射特性参数进行了测定, 得到了浓度对散射特性的影响关系。

**关键词** 应用光学; 散射特性; 混浊介质; 后向散射; 浓度

**中图分类号** O 436.2 **文献标识码** A

## Influence of Concentration on Turbid Media 180° Back Scattering Characteristic

ZHANG Da-wei<sup>1,2</sup>, LI Guo-hua<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laser Research Institute of Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China

<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

**Abstract** According to “black-box” theory, the measurement system of turbid media 180° back scattering characteristic was designed. Using the system, the back scattering characteristic parameters for different mixtures with different concentration milk and de-ionized water were determined. As a result, the relationship between concentration and scattering characteristic was deduced.

**Key words** applied optics; scattering characteristic; turbid media; back-scattering; concentration

## 1 引 言

混浊介质中散射问题的研究一直是大气光学和海洋光学的研究重点。自 20 世纪 70 年代起, 人们又发现大部分生物组织对于 600~1300 nm 波段的光都是高散射低吸收的, 类似于混浊介质, 因此该问题的研究又成为生物光学和激光医学的热点<sup>[1]</sup>。开始时研究的重点是前向散射<sup>[2]</sup>, 但人们逐渐认识到研究后向散射的实用价值<sup>[3,4]</sup>。我们进行的混浊介质 180° 后向散射光的探测研究, 较一般后向散射光更容易探测, 且该方向上的散射光具有较好的保偏能力等优点<sup>[5]</sup>。为了进一步研究该方向上的散射特性, 使用了测定混浊介质 180° 后向散射特性参数的实验系统<sup>[6]</sup>。本文拟利用该系统研究浓度对混浊介质 180° 后向散射特性的影响。

## 2 测定系统

系统的工作原理、设计原理和测定原理已在我们的以前的文章中进行过较详细的阐述<sup>[6]</sup>, 这里只作简单陈述。

入射的偏振光经过混浊介质的后向散射、分束器反射、检偏器的检偏后被光电探测器探测的光斯托克斯矢量为

$$S_p = [P_2][R][Sam]S_{ini} \quad (1)$$

斯托克斯矢量的  $S_0$  的物理意义是被检测光的光强大小。计算可得

$$S_0 = r(r_p^2 + r_s^2)(1 + \sin\phi\cos2\theta + \beta\cos2a\sin\phi\cos2A + \beta\cos2a\cos2A\cos2\theta - \beta\sin2a\cos\phi\cos2A\sin2\theta + \beta\cos2a\cos\phi\sin2A\sin2\theta + \beta\sin2a\sin\phi\sin2A + \beta\sin2a\sin2A\cos2\theta) \quad (2)$$

收稿日期: 2002-05-10; 收到修改稿日期: 2002-06-20

作者简介: 张大伟(1977—), 男, 2002 年毕业于曲阜师范大学激光研究所, 现在中国科学院上海光机所攻读博士学位。E-mail: dwzhang7@yahoo.com.cn

上式中  $\phi$  的值由分束器决定;  $\theta$  是检偏器  $P_2$  的偏振方向和水平方向的夹角, 可任意取值, 实验中, 取  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  三个特殊值; 参数  $\alpha, \beta, \phi$  是待测定的量; 根据光电探测器所探测的值来定出不同  $\theta$  下的  $S_0$  的大小, 由解方程组的方法可得出三个待测定参数的大小。对不同浓度的混浊介质进行测量, 就得到了浓度与混浊介质散射特性的关系。

### 3 浓度对散射特性的影响

实验中, 采用牛奶与去离子水的混合溶液模拟混浊介质。测定不同浓度的牛奶去离子水的混合溶液的三个散射特性参数的值, 研究其变化规律。这里所说的浓度是指体积比, 浓度为 90% 是指 10 体积的水和 90 体积的牛奶混合。对浓度为 100%,

90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20%, 10% 以及 0% (纯净的去离子水) 的模拟混浊介质分别测量。测定的数据见表 1。

根据锁相放大器的原理, 从面板读出的数值  $V$  和光电探测器输出的电压信号  $V_s$  之间的关系为

$$V_s = V_{fs}V/k \quad (3)$$

根据式(3)可得到表 1 中  $V$  数值所代表的光电探测器输出的电压值。由文献[6]中得到的式子

$$S_{0\theta} = V_\theta/C = V_\theta S_{01}/V_1 \quad (\text{其中 } \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ) \quad (4)$$

可以得到不同浓度不同  $\theta$  值情况下被探测器所探测的光斯托克斯矢量的  $S_0$  的值。其中  $S_{01}$  代表当样品为平面镜时由式(2)得到的计算值,  $V_1$  代表此时光电探测器探测的电压信号。 $C$  代表光电转换系统的转换系数。

表 1 不同浓度下的牛奶去离子水混合溶液的测定数据

Table 1 Determined data of mixtures with different concentration milk and de-ionized water

Sample	$\theta / (^\circ)$	$V_{fs} / \text{mV}$	$V$	Sample	$\theta / (^\circ)$	$V_{fs} / \text{mV}$	$V$
Plane mirror	0	1000	0.304	50%	0	10	2.57
100%	0	10	3.16	50%	45	10	1.30
100%	45	10	1.68	50%	90	1	1.91
100%	90	1	2.39	40%	0	10	2.28
90%	0	10	3.14	40%	45	10	1.20
90%	45	10	1.68	40%	90	1	1.67
90%	90	1	2.39	30%	0	10	1.85
80%	0	10	3.11	30%	45	1	9.85
80%	45	10	1.66	30%	90	1	1.34
80%	90	1	2.36	20%	0	10	1.35
70%	0	10	3.02	20%	45	1	7.07
70%	45	10	1.60	20%	90	0.001	7.46
70%	90	1	2.27	10%	0	10	1.02
60%	0	10	2.82	10%	45	1	5.26
60%	45	10	1.50	10%	90	0.1	3.26
60%	90	1	2.11	0%	45	1	3.04
0%	0	1	6.03	0%	90	0.01	6.35

$\theta$ : azimuth angle of  $P_2$ ;  $V_{fs}$ : sensitivity of  $K$ ;  $V$ : relative voltage (azimuth angle of  $P_1$   $A = 0^\circ$ ,  $K_{\text{gain}} = 1000$ ).

当  $A = 0^\circ$  时, 同一浓度不同  $\theta$  值下, 用三个特性参数表示的  $S_0$  表示为

$$\begin{aligned} S_{00} &= 0.105r(1 + 0.825 + 0.825\beta\cos 2a + \beta\cos 2a) \\ S_{045} &= 0.105r(1 + 0.825\beta\cos 2a - 0.565\beta\sin 2a) \\ S_{090} &= 0.105r(1 - 0.825 + 0.825\beta\cos 2a - \beta\cos 2a) \end{aligned} \quad (5)$$

联立式子(4), (5)并求解方程组可得同一浓度下的三个特性参数的大小。

由表 2 可以得到牛奶去离子水混合溶液的  $180^\circ$  后向散射特性随浓度变化的关系曲线, 如图 1(a),

(b), (c) 所示。

根据图 1(a), (b), (c) 可以看出:

1) 混浊介质的浓度对三个散射特性参数有不同程度的影响。随着混浊介质的浓度由 0 逐渐增大, 三个特性参数由变化幅度较大变为变化幅度不大, 在接近 1 的区间, 几乎没有变化。

2) 三个散射特性参数中, 保偏度  $\beta$  受混浊介质的浓度影响最大, 当浓度较小时, 其值稍加大则保偏度  $\beta$  迅速减小。浓度大于 30% 之后, 保偏度  $\beta$  变化减弱, 浓度大于 0.8 后, 保偏度  $\beta$  基本不再变化。当浓

表 2 不同浓度下的牛奶去离子水混合溶液的 180° 后向散射特性参数的值

Table 2 180° back scattering characteristic parameters of mixtures with different concentration milk

Concentration	$\alpha$	$\beta$	$r$
0%	0	0.8	0.022
10%	0.9	0.5	0.045
20%	2.1	0.27	0.07
30%	3.7	0.14	0.107
40%	4.0	0.136	0.132
50%	4.20	0.13	0.15
60%	4.50	0.125	0.165
70%	4.65	0.122	0.177
80%	4.72	0.119	0.183
90%	4.83	0.118	0.185
100%	4.90	0.118	0.186

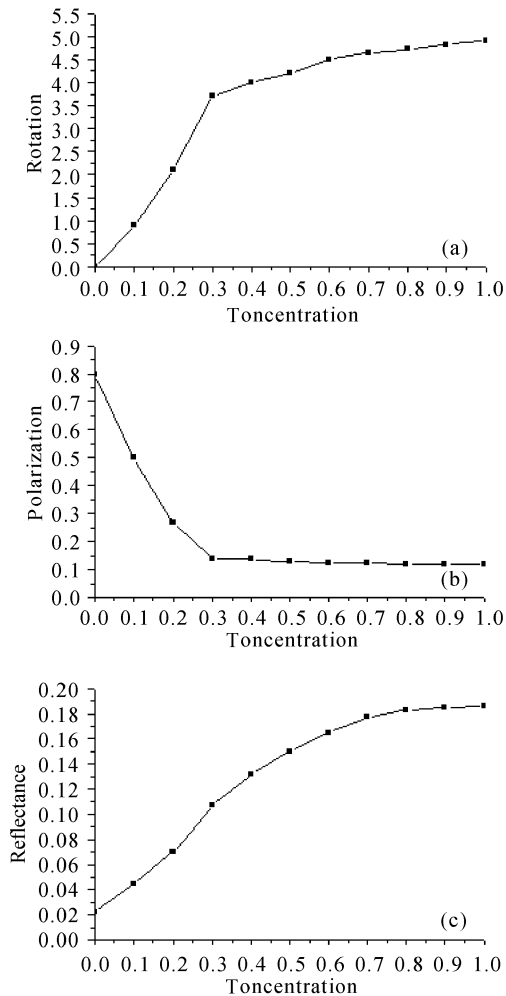


图 1 混浊介质的浓度对散射特性参数旋光度(a), 保偏度(b)和反射比(c)的影响曲线

Fig. 1 Influence of turbid media concentration on scattering characteristic parameters

(a) rotation; (b) polarization; (c) reflectance

度为 1 时, 保偏度  $\beta = 0.118$ 。可见, 即使很浓的混浊介质, 其偏振入射光的 180° 后向散射光仍具有相当程度的保偏能力。

3) 特性参数旋光度随混浊介质浓度的增加而增加。牛奶不是一种旋光物质, 因此, 旋光度的增加不是由于旋光物质浓度的增加引起的, 而是由于混浊介质浓度的变化使 180° 后向散射方向上的散射效果发生变化而引起的。

4) 特性参数反射比  $r$  随混浊介质浓度的增加而增加。需要说明的是, 散射特性参数反射比  $r$  并不是通常意义上的镜反射比, 而是一个表征在所研究的 180° 方向上后向散射能力的物理量。把反射比  $r$  作为一个不随浓度变化的物理量的做法<sup>[5]</sup>, 我们认为是不合理的。

## 4 结 论

实验数据表明, 三个散射特性参数都随浓度的变化作不同程度的改变, 在散射的 180° 后向方向, 有较好的保偏能力。国外仅对混浊介质的浓度和退偏度之间的关系进行过讨论, 其结论和本文的结果一致<sup>[5]</sup>, 但混浊介质的浓度对旋光度和反射比影响的讨论未见报道, 我们对此进行了初步的研究。该系统与国外研究类似课题的系统比较, 没有使用 PEM 等昂贵仪器, 因此也便于推广和实用化。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Jianguang, Yang Lisong, Wang Guiying *et al.*. Photon migration and imaging in a scattering medium [J]. *Laser and Optoelectronics Progress* (激光与光电子学进展), 2000, (1):14~21 (in Chinese)
- 2 Christian J. M. Moes, Martin J. C. van Germert, Willern M. Star *et al.*. Measurements and calculations of the energy fluence rate in a scattering and absorbing phantom at 633 nm [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(12): 2292~2296
- 3 Andreas H. Hielscher, Judith R. Mourant, Irving J. Bigio. Influence of particle size and concentration on the diffuse backscattering of polarized light from tissue phantoms and biological cell suspensions [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1):125~135
- 4 K. M. Yoo, R. R. Alfano. Time resolved depolarization of multiple backscattered light from random media [J]. *Phys. Lett. A*, 1989, **142**(8,9):531~535
- 5 Byan C. N. Studinski, Alex Vitkin. Methodology for examining polarized light interactions with tissues and tissuelike media in the exact backscattering direction [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2000, **5**(3):330~337
- 6 Zhang Dawei, Li Guohua. Measurement about turbid media 180° degree back scattering characteristic parameters for linear-polarized incident light [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(12):1113~1116 (in Chinese)