

文章编号: 0258-7025(2002)12-1113-04

混浊介质线偏振入射光 180° 后向散射特性参数的测定

张大伟, 李国华

(曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165)

摘要 利用生物组织等混浊介质偏振入射光的 180° 后向散射特性, 可以反映该介质的内部结构信息。介绍了把混浊介质“黑箱化”, 用旋光度 α , 保偏度 β , 反射率 r 来表征这种散射特性, 设计了测定特性参数的实验系统, 并对不同浓度的牛奶的去离子水溶液进行了测定, 当浓度为 25% 时, $\alpha = 3^\circ$, $\beta = 0.15$, $r = 0.09$ 。改变样品的浓度, 3 个参数也发生不同程度的改变。

关键词 混浊介质, 后向散射, 米勒矩阵, 生物组织

中图分类号 O 436.2 文献标识码 A

Measurement about Turbid Media 180 Degree Back Scattering Characteristic Parameters for Linear-polarized Incident Light

ZHANG Da-wei, LI Guo-hua

(Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165)

Abstract The 180 degree back scattering character of biologic tissue and other turbid mediae can reflect the media's information inside. Regarding turbid media as a "Black-box", the back scattering characteristic parameters for linear-polarized light in trubid media can be expressed by a polarization plane rotation angle α , polarization maintaining factor β and reflectivity r . A schematic of the measurement about the characteristic parameter was designed. And the milk's deionized water solutions with different concentration were measured. When the concentration is 25%, $\alpha = 3^\circ$, $\beta = 0.15$, $r = 0.09$. When the solution's concentration is changed, the three parameters will be changed, too.

Key words turbid media, back scattering, Muller matrix, biologic tissue

1 引 言

光学不均匀性十分显著的介质能产生强烈的散射现象, 该类介质称为混浊介质。混浊介质的散射现象, 是近年来生物医学光子学的研究热点。主要是因为绝大部分生物组织, 对 600~1300 nm 波段的光波都是高散射和低吸收的混浊介质, 并且, 散射的光子携带了大量的散射体的结构信息。早在 1976 年, Bickel 就宣布了散射光中的偏振信息是一种新的研究生物组织的物理工具^[1]。此后, 人们对混浊介质散射现象进行了广泛的研究, 例如利用散射光中的偏振信息进行细菌或细胞鉴定、多核上层

结构和其他生物结构的研究^[2,3]。以上提到的应用和研究需要在前向散射光中大的范围内测量偏振光的辐照度。然而在实际检测中, 容易得到的是被探测物质的后向散射光, 例如在医学诊断、海洋和大气的探测中。因此, 近年来研究中心开始向后向散射转移。如 Mishchenko 和 Hovenier 对随机分布的非球形颗粒的后向散射光的退偏进行的理论分析^[4]、利用后向散射光中偏振信息对气溶胶颗粒尺寸分布的研究^[5]、混浊介质后向散射光时间相关退偏度研究^[6]、利用 CCD 研究混浊介质的浓度颗粒大小对偏振入射光后向散射的影响^[7]等。

收稿日期: 2001-09-18; 收到修改稿日期: 2001-12-14

作者简介: 张大伟 (1977—), 男, 山东济宁人, 曲阜师范大学激光研究所硕士研究生, 现进行偏振光学测试技术的研究。E-mail: dwzhang@eyou.com

米勒矩阵表示法被称为偏振调制技术三要素之一,是偏振测量系统设计、分析和评价的有力数学工具。本文将把混浊介质“黑箱化”,用旋光度 α , 保偏度 β , 反射率 r 来描述混浊介质的 180° 后向散射特性,运用米勒矩阵这一数学工具,设计测定 α, β, r 的实验系统并实际进行测定。

2 系统构造和测定原理

2.1 系统结构

系统结构如图 1 所示, He-Ne 激光器 L 发出的 632.8 nm 的激光先被斩波器 (ND-1 型可变频率双参考斩光器) 从 0 频调到高频 (实验中, 选定 50 Hz), 经过 P_1 被起偏, 经过分束器 B ($K9$ 玻璃片), 一部分反射, 一部分从 B 出射并入射到样品 S 上 (这里的入射方式为从上到下, 避免了侧向入射时, 器皿的镜面反射所造成的影响)。垂直线偏振光通过混浊介质后 (可用牛奶与去离子水的混合溶液模拟), 180° 后向散射部分将返回并入射到 B 上, 并且一部分将经 B 反射到偏振方向可调的检偏器 P_2 上。从 P_2 出射的线偏光被光电探测器 M (SI-440-UV 型硅探测器) 接收, 光电流经过前置放大器变为电压信号并被放大, 该信号输送到 ND-201 型锁相放大器里, 锁相放大器的输出信号由其面板直接读出。

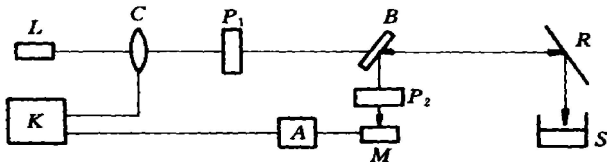


图 1 混浊介质线偏振入射光 180° 后向散射米勒矩阵测定研究系统构造图

L : 激光光源; B : 分束器; C : 斩波器; R : 平面镜; P_1, P_2 : 线偏器;
 S : 混浊介质; M : 光电探测器; A : 前置放大器; K : 锁相放大器

Fig. 1 Schematic representation of the measurement about turbid media 180 degree back scattering characteristic matrix for line polarized incident light

L : laser; B : beam splitter; C : chopper; R : plane mirror; P_1, P_2 : polarizer; S : turbid media; M : detector; A : preamplifier; K : lock-in amplifier

2.2 测定原理

在一般的研究中, 都认为可以由散射系数和散射相关函数来表征散射特性^[8]。该理论是基于这样一种模型: 把光在生物组织中的传播进而有光能分布的物理实体, 用一种粒子传输过程来模拟。粒子

的数密度等价于光能, 同时把生物组织理解为大量无规则分布的散射粒子和吸收粒子。这种模型的散射特性 (散射系数和散射相关函数) 都可以由实验测定, 并能反映出生物组织折射率的空间起伏和涨落。但是这种模型中不再出现偏振等光学概念。实际上, 在混浊介质的散射中, 偏振因素是个不容忽视的参数; 偏振效果也是个非常有研究价值的物理现象^[1-7]。在考虑偏振因素以后, 散射系数和散射相关函数将不再是研究的散射特性, 而是根据唯像的理论^[9], 把混浊介质看作一个“黑箱”, “黑箱”中包括旋光器、退偏器、反射镜等器件, 将表征散射体对入射光作用效果的旋光度、退偏度和反射比作为散射特性。

因此混浊介质的米勒矩阵就可以写为旋光度为 α 的旋光器、退偏度为 d 的退偏器 (为了方便书写, 我们定义保偏度 $\beta = 1 - d$)、反射比为 r 的平面镜三个器件米勒矩阵的乘积。经计算可以得到

$$S_{\text{sample}} = \begin{vmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r\beta\cos 2\alpha & -\beta r\sin 2\alpha & 0 \\ 0 & -\beta r\sin 2\alpha & -\beta\cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta \end{vmatrix} \quad (1)$$

确定出 α, β, r 的值, 则混浊介质线偏振入射光 180° 后向散射的米勒矩阵就可以确定。根据矩阵光学, 如果一个器件的米勒矩阵已知, 则入射光与其作用后的斯托克斯矢量可以由矩阵相乘的方法得到。因此, 确定了 α, β, r 的值, 则线偏振入射光经混浊介质散射后的斯托克斯矢量就可以得到。所以混浊介质对线偏振入射光在 180° 后向方向上的散射特性, 可以由 α, β, r 这三个参数来表征。下面来设计测定这三个参数的实验系统并进行实际测定。

为了简化计算, 设入射至样品之前的偏振光的斯托克斯矢量为 S_{ini} 。这样, 在入射样品之前光线所经过的路程和器件就可以不加考虑。设

$$S_{\text{ini}} = \begin{vmatrix} 1 \\ \cos 2A \\ \sin 2A \\ 0 \end{vmatrix} \quad (2)$$

其中 A 为线偏振光电矢量与水平方位的夹角。

根据文献[10], 分束器 B 的反射矩阵为

$$R = \begin{vmatrix} 1 & \sin 2\gamma & 0 & 0 \\ \sin 2\gamma & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\cos 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos 2\gamma \end{vmatrix} \quad (3)$$

其中 γ 是根据菲涅耳定律计算得出的入射光在分束器里的折射角, 需要说明的是, 该反射矩阵的各元素都省略了一个常数因子。可以证明, 这样的省略对后面的测定没有影响。

偏振器 P_2 的米勒矩阵为(设偏振器的起偏方向与水平方位的夹角为 θ , 在操作中, θ 是不固定的, 随不同情况在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间可调)^[11]

$$P_2 = \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

这样, 入射偏振光 S_{ini} 经过 P_1, B, S, P_2 后, 其斯托克斯矢量 S_{fin} 可以描述如下

$$S_{\text{fin}} = [P_2][R][S_{\text{sample}}]S_{\text{ini}} \quad (5)$$

经矩阵计算, 可以得到斯托克斯矢量的 S_0 大小为

$$S_0 = r(1 + \sin^2 \gamma \cos 2\theta + \beta \cos 2\alpha \sin 2\gamma \cos 2A + \beta \cos 2\alpha \cos 2A \cos 2\theta + \beta \sin 2\alpha \cos 2\gamma \cos 2A \sin 2\theta + \beta \cos 2\alpha \cos 2\gamma \sin 2A \sin 2\theta - \beta \sin 2\alpha \sin 2\gamma \sin 2A - \beta \sin 2\alpha \sin 2A \cos 2\theta) \quad (6)$$

根据斯托克斯矢量的定义, S_0 就是被探测偏振光的光强大小, 也就是硅探测器所反映出的光强数值。在本系统中, 得到的数据是由锁相放大器读出的电压信号 V , 它与硅探测器所接收的光强大小的关系是 $V = CS_0$, 其中, C 是硅探测器、前置放大器组成的光电转换系统的转换系数, 数值大小是硅探测器的辐照响应度、前置放大电路的流压转换系数和电压放大倍数的乘积。为了减小误差, 在测定中, 我

们采用比值的方法获得该转换系数的值。

下面具体计算样品的各待定参数。

首先, 把样品换为光洁度很好的平面镜, 其反射率 r 可近似为 1。同时, 平面镜的 $\alpha = 0, \beta = 1$ 。当 $A = 0^\circ, \theta = 0^\circ$, 即入射光为偏振方向与水平方位是 0° 的线偏振光, 检偏器 P_2 与水平方位角为 0° 时, 根据式(6)得

$$S_{01} = 2 + 2\sin^2 \gamma \quad (7)$$

由于当分束器方位固定以后, γ 值就已确定, 根据式(7)计算出 S_{01} 大小。读出并记录此时锁相放大器读数 V_{01} 。

换上样品, 保持 $A = 0^\circ$, 则式(6)变为

$$S_{01} = r(1 + \sin^2 \gamma \cos 2\theta + \beta \cos 2\alpha \sin 2\gamma + \beta \cos 2\alpha \cos 2\theta + \beta \sin 2\alpha \cos 2\gamma \sin 2\theta) \quad (8)$$

调整 P_2 方位角, 使其分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$, 读出和记录锁相放大器的示数 V_x 。由 $V = CS_0$ 可以得到

$$S_{0x} = V_x S_{01} / V_1 \quad (9)$$

并由式(9)得到 P_2 方位角分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 三种情况下相对应被探测光的斯托克斯矢量 S_0 的大小。将这三个值分别代入式(8), 得到三个方程, 联立求解则可以得到三个未知数 α, β, r 的值。

3 测定

混浊介质选用市售的牛奶和去离子水的混合溶液。对牛奶用电位颗粒径仪测定, 得其直径为 1.4 μm , 满足米氏散射条件。牛奶装在 1 cm \times 1 cm \times 3 cm 的石英皿内。测定的数据如表 1。

表 1 25% 牛奶去离子水溶液的 180° 后向散射特性参数的测定数据

Table 1 Measured data of back scattering characteristic parameters of 25% milk's deionized water solution

Order	Sample	P_1 angle	P_2 angle	Gain factor	Sensibility V_{fs}	Reading V
1	Plane mirror	0°	0°	1000	1000 mV	0.304
2	25% (density) milk	0°	0°	1000	100 mV	0.157
3	25% (density) milk	0°	45°	1000	10 mV	0.848
4	25% (density) milk	0°	90°	1000	10 mV	0.112

根据 $V_s = V_{fs} V/k$, 计算得锁相放大器所测的光电流信号分别为

$$V_1 = 0.304 \text{ mV}; V_2 = 0.157 \times 10^{-1} \text{ mV};$$

$$V_3 = 0.848 \times 10^{-2} \text{ mV}; V_4 = 0.112 \times 10^{-2} \text{ mV}$$

取 K9 玻璃对 632.8 nm 的折射率为 1.516, 光波入射角为 45° 时, 折射角 γ 满足

$$\sin \gamma = \sin 45 / 1.516; \sin 2\gamma = 0.825$$

由式(7)可得 $S_{01} = S_{01} = 2 + 2\sin^2 \gamma = 3.65$

根据式 $S_{0x} = V_x S_{01} / V_1$, 可以得当 P_2 方位角 θ 为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时, 180° 后向散射光斯托克斯矢量的 S_0 为 S_{02}, S_{03}, S_{04} 的数值分别为 0.191, 0.103 和 0.0131。将数据代入方程(8), 可以得到如下方程组

$$r(1 + 0.828 + 0.828\beta \cos 2\alpha + \beta \cos 2\alpha) = 0.188$$

$$r(1 + 0.828\beta \cos 2\alpha + 0.561\beta \sin 2\alpha) = 0.1018$$

$r(1 - 0.828 + 0.828\beta\cos 2\alpha - \beta\cos 2\alpha) = 0.0134$
 联立方程组并利用数学软件 MATHCAD 7 求解得
 $r = 0.09; \quad \beta = 0.15; \quad \alpha = 3^\circ$

这样, 就可以写出

$$S_{\text{sample}} = \begin{vmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r\beta\cos 2\alpha & -\beta\sin 2\alpha & 0 \\ 0 & -\beta\sin 2\alpha & -\beta\cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta \end{vmatrix} =$$

$$\begin{vmatrix} 0.09 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0134 & -0.00141 & 0 \\ 0 & -0.00141 & -0.149 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0135 \end{vmatrix}$$

至此, 我们得到了混浊介质线偏振入射光 180° 后向散射的特性矩阵。

当牛奶浓度为 50% 时, 测定的数据如表 2。

表 2 50% 牛奶去离子水溶液的 180° 后向散射特性参数的测定数据

Table 2 Measured data of back scattering characteristic parameters of 50% milk's deionized water solution

Order	Sample	P_1 angle	P_2 angle	Gain factor	Sensibility V_{fs}	Reading V
1	Plane mirror	0°	0°	1000	1000 mV	0.304
2	50% (density) milk	0°	0°	1000	100 mV	0.206
3	50% (density) milk	0°	45°	1000	10 mV	1.112
4	50% (density) milk	0°	90°	1000	10 mV	0.152

根据同样的方法, 可以计算得到该浓度下, 当 P_2 方位角 θ 为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时, 180° 后向散射光斯托克斯矢量的 S_0 为 S_{02}, S_{03}, S_{04} 的数值分别为 0.2472, 0.1340 和 0.01830, 混浊介质的三个特性参数的值分别为 $r = 0.12; \beta = 0.13; \alpha = 4.2^\circ$ 。

由以上数据可以看出, 当改变混浊介质的浓度后, α, β, r 这三个特性参数也发生了不同程度的改变, 这也说明这三个参数能反映混浊介质的内部信息, 把其作为散射特性也是合理的。

影响测量精度的因素主要有: 1) 偏振镜方位角的精确度; 2) 微弱信号检测中的噪声干扰; 3) 光电转换系统的转换系数 C 数值的偏差。为了使偏振镜的方位角精确, P_1, P_2 均放置在日本岛津公司生产的旋转调节支架上, 可以精确将其方位角固定在某个位置, 特别是整刻度上; 为了减小检测中的噪声干扰, 光路部分全部放置在暗箱中, 锁相放大器使用的是 ND-201 型, 主机具有高通、低通滤波器及自动跟踪带通滤波器, 前置放大器为超低噪声前置放大器, 输入阻抗为 $5 \text{ M}\Omega/40\text{pF}$, 为抑制共模信号, 将其“接地”“浮地”开关置“浮地”, 使共模抑制比达到 80 dB 以上。为了减小读数误差, 在读取数据时, 将显示面板方式设置为“VX-VY, 模拟-数字”方式, 并使 VX 即模拟表示数为 0, 信号大小全部由数字表读出; 在处理光电转换系统的转换系数 C 时, 采用了比值法, 而没有采用传统的根据硅探测器的辐照响应度、前置放大电路的流压转换系数和电压放大倍数的乘积计算的方式。实验数据显示, 这些措施使测量误差减小到了一个可以接受的程度。

参 考 文 献

- 1 W. S. Bickel, J. F. Davidson, D. R. Huffman *et al.*. Application of polarization effects in light scattering: a new biophysical tool [C]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1976, **73**: 486~ 490
- 2 Willem P. van De Merwe, Donald R. Huffman, Burt V. Bronk. Reproducibility and sensitivity of polarized light scattering for identifying bacterial suspensions [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(23): 5052~ 5057
- 3 Burt V. Bronk, Stephen D. Druger, Willem P. van De Merwe. Measuring diameters of rod-shaped bacteria in vivo with polarized light scattering [J]. *Biophysical Journal*, 1995, **69**(9): 1170~ 1177
- 4 M. I. Mishchenko, J. W. Hovenier. Depolarization of light backscattered by randomly oriented nonspherical particles [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(12): 1356~ 1358
- 5 N. J. McCormick. Particle size distribution retrieval from backscattered polarized radiation measurements: a proposed method [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, (7): 1811~ 1816
- 6 A. Dogariu, C. Kutsche, P. Likamwa *et al.*. Time-domain depolarization of waves retroreflected from dense colloidal media [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(9): 585~ 587
- 7 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~ 134
- 8 Li Hui, Xie Shusen, Lu Zukang *et al.*. A new model of the light scattering in biological tissue for visible and near infrared region [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(12): 1662~ 1666 (in Chinese)
- 9 Ryan C. N. Studinski, L. 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
- 10 E. Collett. *Polarized Light: Fundamentals and Applications* [M]. New York: Marcel Dekker, 1993
- 11 Li Guohua. *Optics* [M]. Jinan: Shandong Education Publishing Company, 1990. 459~ 462 (in Chinese)