

文章编号: 1001-3806(2003)02-0110-03

混浊介质 180° 后向散射特性参数测定系统的原理

张大伟 李国华

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜, 273165)

摘要: 根据“黑箱化”唯象理论, 设计了研究混浊介质 180° 后向散射特性的系统, 对该测定系统的工作原理和测定原理进行了阐述。

关键词: 混浊介质; 后向散射; 米勒矩阵

中图分类号: Q63; Q436.2 文献标识码: A

Principle of the determination system for 180° back scattering characteristic of the turbid media

Zhang Dawei, Li Guohua

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

Abstract: According to black box theory, a system was designed to study 180° back scattering characteristic of the turbid media. The operation and determination principles are formulated in the paper.

Key words: turbid media; back scattering; Muller matrix

引 言

大气和海洋中都悬浮有微小的颗粒, 当光在其中传播时, 会发生散射现象。因此, 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。近年来, 人们又发现大部分生物组织对于 600nm~1300nm 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^[1]。开始时研究的重点是前向散射^[2], 但人们逐渐认识到研究后向散射的实用价值^[3,4]。例如在对人体的医疗检测中, 容易得到的是后向散射光, 相对而言, 前向散射光则是很难探测到的。文中进行的混浊介质 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^[5]。为了进一步研究该方向上的散射特性, 设计了测定混浊介质 180° 后向散射特性参数的实验系统, 拟对其工作原理和测定原理进行阐述。

1 测定系统

测定系统如图 1 所示, 其中, L 为激光光源, C

为斩波器, P₁, P₂ 为线偏器, B 为分束器, R 为平面镜, S 为混浊介质, M 为光电探测器, A 为前置放大器, K 为锁相放大器。

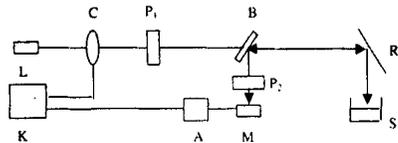


Fig 1 The measurement schematics for the 180° back scattering characteristic matrix of the turbid media with linear polarized incident light

该系统的工作原理是: HeNe 激光器 L 发出的 632.8nm 的激光先被斩波器(ND-1 型可变频率双参考斩光器)从零频调到高频(实验中选定为 50Hz), 经过 P₁(本所生产的格兰-泰勒棱镜)被起偏, 经过分束器 B(K9 玻璃片, 由我所加工车间打磨抛光), 一部分反射, 一部分从 B 出射并入射到样品 S 上。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 P₂(本所生产的格兰-泰勒棱镜)上。从 P₂ 出射的线偏光被光电探测器 M(SF-440 UV 型硅探测器, ARC 公司生产)接收, 光电流经过前置放大器(自制)变为电压信号并被放大, 该信号输送到锁相放大器(ND-201 型)里, 锁相放大器的输出信号由其面板直接读出。

作者简介: 张大伟, 男, 1977 年 6 月出生。硕士研究生。主要从事偏振光学测试技术方面的研究。

收稿日期: 2002-05-14; 收到修改稿日期: 2002-07-08

2 测定原理

2.1 散射特性

散射特性在一般的研究中都认为可以由散射系数和散射相函数表征^[6]。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。但该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。研究表明,偏振势是信息的重要携带者,是全息术的一个重要方面,所以,这是个非常有研究价值的物理现象^[3]。在考虑偏振因素以后,散射系数和散射相函数将不再是所研究的散射特性,而是根据唯象的理论^[5],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。

2.2 被探测光的斯托克斯矢量

激光器 L 发出的 632.8nm 的光经 P₁ 起偏后,被分束器 B 反射一部分,透射一部分。一般情况下,经分束器透射后,光的偏振态势会发生变化。为了保证入射至混浊介质中的光为线偏振光,实验系统中的 P₁ 偏振方向固定在 0°(与水平方位夹角),从而使入射到分束器 B 上的偏振光的偏振方向平行于入射面,这样就保证了由分束器透射的光的偏振态与原入射光偏振方向一致,而且不必考虑布儒斯特角等限制。

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,定义保偏度 $\beta = 1 - d$)、反射比为 r 的平面镜 3 个器件米勒矩阵的乘积。由于矩阵的乘法不满足 $AB \neq BA$,因此,混浊介质的米勒矩阵形式是个值得探讨的问题。此外,分束器的反射米勒矩阵形式未见有文献报道,因此,笔者对这两个米勒矩阵形式进行了探讨,用下式表示:

混浊介质的米勒矩阵:

$$[S_{am}]_1 = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta r \cos 2\alpha & \beta r \sin 2\alpha & 0 \\ 0 & \beta r \sin 2\alpha & -\beta r \cos 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta r \end{bmatrix} \quad (1)$$

分束器的米勒矩阵:

$$[R] = (r_p^2 + r_s^2) \begin{bmatrix} 1 & \sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\sin \varphi = (r_s^2 - r_p^2) / (r_s^2 + r_p^2)$ (3)
 r_p, r_s 大小由菲涅耳公式决定:

$$\begin{aligned} r_p &= \tan(i_1 - i_2) / \tan(i_1 + i_2) \\ r_s &= \sin(i_1 - i_2) / \sin(i_1 + i_2) \end{aligned} \quad (4)$$

检偏器的米勒矩阵在一般的光学文献中都可查到:

$$[P_2] = \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, θ 是检偏器 P₂ 的偏振方向和水平方向的夹角。在本系统中,检偏器 P₂ 放置在具有刻度的旋转支架上,其偏振方向可以根据实验需要调节。

入射至混浊介质的光是线偏光,设其斯托克斯矢量为:

$$S_{ini} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2A \\ \sin 2A \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

该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检测的光斯托克斯矢量为:

$$S_p = [P_2][R][S_{am}]S_{ini} \quad (7)$$

斯托克斯矢量 S_0 的物理意义是被探测光的光强大小,它与光电探测器所探测的值之间有一定的对应关系。这里,只计算(7)式中 S_0 的大小。

$$\begin{aligned} S_0 = & r(r_p^2 + r_s^2)(1 + \sin \varphi \cos 2\theta + \beta \cos 2\alpha \sin \varphi \cos 2A + \\ & \beta \cos 2\alpha \cos 2A \cos 2\theta - \beta \sin 2\alpha \cos \varphi \cos 2A \sin 2\theta + \\ & \beta \cos 2\alpha \cos \varphi \sin 2A \sin 2\theta + \beta \sin 2\alpha \sin \varphi \sin 2A + \\ & \beta \sin 2\alpha \sin 2A \cos 2\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, θ 是检偏器 P₂ 的偏振方向和水平方向的夹角,可任意取值,实验中,取 0°, 45°, 90° 3 个特殊值;参数 α, β, φ 是待测定的数;只要根据光电探测器所探测的值来定出不同 θ 下的 S_0 的大小,就可以由解方程组的方法得出 3 个待测定参数的大小。

2.3 光电转换系统转换系数 C 的值

在测量中从锁相放大器所得到的是电压信号 V ,而不是硅探测器所接收的光强的大小。它们之间的关系是 $V = CS_0$ 。C 是光电转换系统的转换系数,其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。这里,采用了比值的方法来获得该转换系数的值。

实验中,首先把样品换为光洁度很好的平面镜,其反射比 r 可近似为 1,并且,平面镜的 $\alpha=0$, $\beta=1$ 。同时调整 P_1 和 P_2 ,使 $A=0^\circ$, $\theta=0^\circ$,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 与水平方位夹角也是 0° 。被混浊介质后向散射的光以 45° 角入射在分束器上, $i_1=45^\circ$ 。根据《光学手册》,取 $n_1=1.516$, i_2 由菲涅耳公式 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ 计算得到: $i_2=27.8^\circ$ 。根据(3)式,(4)式得: $r_p=0.0958$, $r_s=0.309$, $(r_s^2+r_p^2)=0.105$; $\sin \varphi=0.825$, $\cos \varphi=0.565$ 。

当 $A=0^\circ$ 时,(8)式可简化为:

$$S_0 = r(r_p^2 + r_s^2)(1 + \sin \varphi \cos 2\theta + \beta \cos 2\alpha \sin \varphi + \beta \cos 2\alpha \cos 2\theta - \beta \sin 2\alpha \cos \varphi \sin 2\theta) \quad (9)$$

对于平面镜, $\alpha=0$, $\beta=1$, $r=1$,并且此时 $\theta=0$,将数据代入(9)式可得: $S_{01} = r(r_p^2 + r_s^2)(2 + 2\sin \varphi) = 0.383$ 。

需要说明的是,这里 S_{01} 的数值是一个相对值。 $S_{01}=0.383$ 是指:如果把入射至样品前的光强定为单位 1,则此时由光电探测器所探测的光强 S_{01} 的大小就是 0.383。

根据锁相放大器读数得出电压信号 V_1 ,从而就得到了光电转换系统转换系数 C 的值:

$$C = V_1/S_{01} = V_1/0.383 \quad (10)$$

2.4 3 个特性参数大小的求解

换上样品,记录锁相放大器的读数并得到电压信号 V_{00} ;使 P_2 方位角再分别为 45° , 90° ,读出锁相放大器的示数并得到电压信号 V_{045} , V_{090} 。根据(10)式给出的 C 值的大小,分别得到当 P_2 方位角

为 3 个特殊值时,被光电探测器所检测的光的斯托克斯矢量 S_0 的大小:

$$S_{00} = V_0/C = V_0 S_{01}/V_1 \quad (\text{其中 } \theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ) \quad (11)$$

再由(9)式可以得到,当 $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时,用 3 个特性参数表示的 S_{00} :

$$\left. \begin{aligned} S_{00} &= 0.105r(1 + 0.825 + 0.825\beta\cos 2\alpha + \beta\cos 2\alpha) \\ S_{045} &= 0.105r(1 + 0.825\beta\cos 2\alpha - 0.565\beta\sin 2\alpha) \\ S_{090} &= 0.105r(1 - 0.825 + 0.825\beta\cos 2\alpha - \beta\cos 2\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

联立(11)式,(12)式并求解方程组可得到 3 个特性参数的值。对不同情况下的混浊介质测定特性参数,就可以研究特性参数的变化规律。

3 小 结

利用微弱信号检测和偏振光学测试技术,设计了研究混浊介质 180° 后向散射特性的系统,重点对该系统的原理进行了阐述。混浊介质的后向散射特性研究有着潜在的巨大价值,该系统同国外通用的研究系统相比,由于没有使用昂贵的 PEM,因此,具有实用化和便于推广的优点。

参 考 文 献

- [1] 王建岗,杨莉松,王桂英 *et al.* 激光与光电子学进展,2001(1): 14.
- [2] Moes C J M, Van Germert M J C. *Appl Opt*, 1989, 28(12): 2292 ~ 2296.
- [3] Hielscher A H, Mourant J R, Bigio I J. *J Appl Opt*, 1997, 36(1): 125~ 135.
- [4] Cameron B D, Rakovic M J. *Opt Lett*, 1998, 23(7): 485~ 487.
- [5] Vikiin A, Studinski B C N. *J Biomedical Opt*, 2000, 5(3): 330~ 337.
- [6] 李 晖,谢树森,陆祖康 *et al.* 光学学报,1999,19(12): 1662.
- [2] Chiu M, Lee J, Su D. *Appl Opt*, 1999, 38(9): 4047~ 4052.
- [3] Cheng Y Y, Wyant J C. *Appl Opt*, 1985, 24(6): 804~ 807.
- [4] 张奇志. 单层 SiN_x 衰减型相移掩膜研究. 四川大学博士论文, 2001: 93~ 113.
- [5] Leveque G, Villachoir Renard Y. *Appl Opt*, 1990, 29(22): 3207~ 3212.
- [6] Khawaja E E, Bouamrane F. *Appl Opt*, 1993, 32(7): 1168 ~ 1172.
- [7] Cisneros J L. *Appl Opt*, 1998, 37(22): 5262~ 5270.
- [8] Aqili A K S, Maqsood A. *Appl Opt*, 2002, 41(1): 218~ 214.
- [9] Kirkpatrick S, Gelatt C D Jr, Vecchi M P. *Science*, 1983, 220(4598): 671~ 680.
- [10] 廖清君. 单波长消光椭圆仪的数据处理研究. 四川大学硕士论文, 2002: 76~ 79.

参 考 文 献

- [1] Jakopic G, Papousek W. *Appl Opt*, 2000, 39(16): 2727~ 2732.

(上接第 96 页)

几乎不依赖初始值,且可把搜索范围设得较大,这就为在不太了解薄膜参数的情况下解决此问题提供了可靠有力的计算工具。用该方法可以同时确定薄膜的 3 个光学常数,避开了分别求解 3 个参数所带来的人为误差。加之,用分光光度计测量透过率时操作简单、测试方便、实验数据波动性小。这就使得此方法具有非破坏性、测试过程简单、计算收敛速度快、收敛性好、精度高等优点。