

基于Mach-Zehnder干涉装置的散射体偏振特性研究*

徐美芳^{1,2}, 张敏娟^{1,2}, 王浩全²

(1. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051; 2. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 根据偏振度测量原理推导了相干矩阵中各个参数的测量公式, 主要是复参量的实部与虚部。基于Mach-Zehnder干涉装置搭建了散射体偏振度测试平台, 并对同一粒径不同浓度散射体的偏振特性进行了测试。结果表明: 浓度为0.006 25%的聚苯乙烯(Polystyrene, PS)散射介质光散射较弱, 偏振度值高达0.992, 散射体具有良好的保偏特性; 随着聚苯乙烯散射介质浓度增大到0.025%, 光散射增强, 偏振度值降至0.545, 散射体的退偏效果显著。

关键词: Mach-Zehnder干涉装置; 偏振度; 光散射

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2022.05.27.0003

中图分类号: Q63; O436.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2023)01-0057-04

引文格式: 徐美芳, 张敏娟, 王浩全. 基于Mach-Zehnder干涉装置的散射体偏振特性研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 40(1): 57-60.

英文引文格式: XU Meifang, ZHANG Minjuan, WANG Haoquan. Research on polarization properties of scatterers based on Mach-Zehnder interference[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2023, 40(1): 57-60.

Research on Polarization Properties of Scatterers Based on Mach-Zehnder Interference

XU Meifang^{1,2}, ZHANG Minjuan^{1,2}, WANG Haoquan²

(1. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China; 2. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051, China)

Abstract: In this paper, the measurement formula of each parameter in the coherent matrix is derived according to the principle of polarization measurement, which is mainly the real part and the imaginary part of the complex parameter. Based on the Mach-Zehnder interference, the platform is built to measure the degree of polarization of the scatterers, at which the polarization properties of the scatterers of the same particle size and different concentrations are tested. The experimental results show that the light scattering of the polystyrene medium with a concentration of 0.006 25% is weak, and the value of the degree of polarization is as high as 0.992, and the scatterers has good polarization-maintaining properties. As the concentration of the polystyrene scattering medium increased to 0.025%, the light scattering was enhanced. When the value of the degree of polarization decreased to 0.545, the depolarization effect of the scatterers was remarkable. The measurement method and device provide an idea for directly measuring the degree of polarization by using a coherence matrix.

Key words: Mach-Zehnder interference; degree of polarization; light scattering

0 引言

光束在散射物质中传输时会因散射物质自身特性影响其偏振特性, 这一特点被广泛应用于气/液溶胶的检测^[1-2]、环境监测^[3]、资源勘探^[4]、生物医学^[5]和航海航空^[6]等领域。常通过检测传输光束的偏振信息而获得被测体的相关信息, 一般用偏振度(Degree of Polarization, DoP) P 值($0 \leq P \leq 1$)来直观定量描述传输光束的偏振特性, $P=0$ 表示光束为完全退偏光, $P=1$ 表示光束为线偏光, 其它情况下的光束为部分偏振光。目前国内外

* 收稿日期: 2022-05-27

基金项目: 国家自然科学基金“弹光调制干涉仪稳定控制及快速光谱重建方法研究”(61505180); 山西省自然科学基金“基于相控聚集阵列的光声层析成像技术研究”(201801D121160)、“气溶胶散射单站红外目标被动测距技术研究”(201901D111145)。

作者简介: 徐美芳(1974-), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光散射成像的研究, E-mail: 50578426@qq.com.

文献中绝大多数获取偏振信息的方法为斯托克斯(Stokes)矢量法^[7-9],该方法实现简单且测量方便,但需要分别对4个Stokes强度参量进行测试.也有文献采用Mueller矩阵法^[10],一般和Stokes矢量结合使用.另外基于洛匈棱镜的偏振度测量法^[11]局限性较大.

本文针对Jarry等^[12]提出的基于Mach-Zehnder干涉装置的偏振正交测量法,在装置和理论两方面进行了论证和完善.装置上将1/2波片(Half-Wave Plates, HWP)与1/4波片(Quarter-Wave Plates, QWP)调换了位置;理论上基于测试装置对相干矩阵中复参数的实部和虚部进行了推导,结论与文献有所不同.该方法以与偏振度相关的相干矩阵中4个参量为被测对象,仅通过旋转检偏器的方向与各支路光束偏振方向一致即可测得相干矩阵主对角上代表两路光强的元素.针对相干矩阵副对角上代表两支路光场叠加的元素为复数而无法测量,我们将检偏器与1/4波片结合使用,简单方便地测得复参数的实部和虚部,这一点是其它方法无法实现的,弥补了采用其它方法测量偏振特性的不足.实验中,我们通过测量同一粒径不同浓度的散射体(由去离子水稀释的PS制成的小球构成)对入射激光偏振态的影响,对该方法进行了应用.

1 偏振度测量原理

根据Goodman理论^[13],两个正交的光场分量在空间 Q 点处的偏振特性由一个 2×2 的相干矩阵描述:

$$J = \begin{bmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $J_{xx} = \langle E_x^*(Q, \omega) E_x(Q, \omega) \rangle$, $J_{yy} = \langle E_y^*(Q, \omega) E_y(Q, \omega) \rangle$, $J_{xy} = \langle E_x^*(Q, \omega) E_y(Q, \omega) \rangle$, $J_{yx} = \langle E_y^*(Q, \omega) E_x(Q, \omega) \rangle$,其中 $E_x(Q, \omega)$ 和 $E_y(Q, \omega)$ 是光场 $E(Q, \omega)$ 在两相互正交 x 和 y 方向的分量.显然,矩阵 J 的主对角元素是 x 和 y 偏振分量的平均强度,副对角元素为这两偏振分量的交叉相关.

用相干矩阵表示光场在 Q 点处的偏振度 P 值,有

$$P = \left[1 - 4 \frac{\det(J)}{(\text{tr}(J))^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: $\det(\cdot)$ 表示行列式, $\text{tr}(\cdot)$ 表示求迹运算, $\text{tr}(J) = J_{xx} + J_{yy}$.

由式(1)和式(2)可知,欲正确求出光场在 Q 点处的偏振度 P 值,需要测量 J_{xx} 、 J_{yy} 、 J_{xy} 和 J_{yx} 四个参数,其中: J_{xx} 和 J_{yy} 是实数,可在检偏器的帮助下直接测量获得; J_{xy} 和 J_{yx} 是复数,且 $J_{xy}^* = J_{yx}$,需进行两次测量.

1) J_{xy} 实部 $\text{Re}[J_{xy}]$ 的测量

将检偏器放置在与 X 轴成 45° 方向,对于入射光为 $[E_x(\omega) \ E_y(\omega)]'$ 的光束经 45° 检偏器后,光束在空间 Q 点处的Jones矩阵为:

$$E_1(Q, \omega) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_x(Q, \omega) + E_y(Q, \omega) \\ E_x(Q, \omega) + E_y(Q, \omega) \end{bmatrix} \quad (3)$$

与 $E_1(Q, \omega)$ 对应的光强为:

$$J_1 = |E_1(Q, \omega)|^2 = \frac{1}{2} (J_{xx} + J_{yy} + J_{xy} + J_{xy}^*) = \frac{1}{2} (J_{xx} + J_{yy}) + \text{Re}[J_{xy}] \quad (4)$$

2) J_{xy} 虚部 $\text{Im}[J_{xy}]$ 的测量

通过一个1/4波片在 y 分量上引入一个相对 x 分量的相位延迟 $\pi/2$ 弧度,同样将检偏器放置在与 X 轴成 45° 方向,则在相同点 Q 处光束的Jones矩阵为:

$$E_2(Q, \omega) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\frac{\pi}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} E_x(Q, \omega) + jE_y(Q, \omega) \\ E_x(Q, \omega) + jE_y(Q, \omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

同理可得 $E_2(Q, \omega)$ 对应的光强为:

$$J_2 = |E_2(Q, \omega)|^2 = \frac{1}{2} [J_{xx} + J_{yy} - j(J_{xy} - J_{xy}^*)] = \frac{1}{2} (J_{xx} + J_{yy}) + \text{Im}[J_{xy}] \quad (6)$$

可见,在 J_{xx} 和 J_{yy} 的测量基础上,仅需再测得 J_1 和 J_2 就可顺利求得 $\text{Re}[J_{xy}]$ 和 $\text{Im}[J_{xy}]$,即获得 J_{xy} 和 J_{yx} 的值.

2 测试平台

基于上述原理,我们在Mach-Zehnder干涉装置的基础上搭建了应用于散射体偏振度测试的平台,如图1所示.光源采用的是功率为5 mW、波长为632.8 nm、线偏振态的He-Ne激光器,经偏振片1起偏后,由分光比为1:1的分束镜分成两路.支路1的光束经反射镜1改变方向后,保持该光束的偏振方向;为了实现正确测量,在支路2中置入由课题组自行研制的双压电石英驱动的二角对称结构的弹光调制器,谐振频率为49.86 kHz,调制电压幅值设置为 $V_{pp}=6.092$ V,受弹光调制器调制过的光束由反射镜2改变方向,通过被测物,再经1/2波片将该支路的偏振方向调整到与支路1的方向垂直;这两路光束由合束比为1:1的合束镜合束,经偏振片3检偏后由带宽为150 MHz、探测面积为 0.8 mm^2 的PIN探测器(THORLABS PDA10A-EC)检测后,由示波器显示并获取其电压的峰值 V_{pp} (mV).

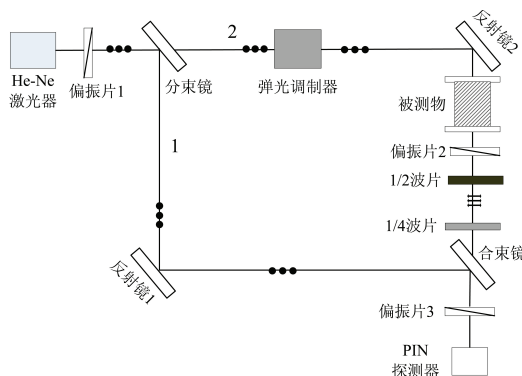


图1 测试装置

被测物由粒径为300 nm、浓度为2.5%的PS小球与去离子水均匀混合配制成浓度 c 分别为0.025%、0.012 5%和0.006 25%的PS小球溶液,将其装入仅有四侧透光的比色皿(长1 cm×宽1 cm×高3 cm)中构成散射体.

3 结果分析与讨论

把装有浓度为0.006 25%的PS小球溶液放入图1中的相应位置.第1步:将偏振片1的快轴调至与入射光束偏振方向平行,偏振片2的快轴分别调至与支路1和支路2中光束偏振方向平行,测得支路1的光强 J_{xx} 和支路2的光强 J_{yy} ;第2步:偏振片1保持不动,将偏振片2的快轴调至与入射光束成 45° 方向,测得 J_1 ;第3步:偏振片1和偏振片2保持不动,在支路2中1/2波片之后放置1/4波片,用于引入 $\pi/2$ 的相位延迟,测得 J_2 ;重复上述3个步骤对该浓度测试3次,取各个量的平均值记录在表1中.用相同方式测试浓度为0.012 5%和0.025%的PS小球溶液,将测试结果补充到表1中,并分别运用式(4)和式(6)计算出复数 J_{xy} 和 J_{yx} ,再代入式(1)和式(2)中计算出PS小球溶液在三种不同浓度下对线偏激光的退偏程度 P .

表1 不同浓度下测得的各种参数

c	J_{xx}	J_{yy}	J_1	J_2	P
0.006 25%	870	65	636	624	0.992
0.012 5%	870	131	681	669	0.887
0.025%	870	304	704	680	0.545

从表1最后一列偏振度 P 值可以看出:随着被测物PS小球的浓度逐渐增加,它对光束偏振特性的影响是显而易见的.当支路1中参考光束的偏振态保持不变、而支路2中被测物PS小球的浓度最大时,透光率最低,也就是光束在被测物中散射最严重,导致光束经被测物后基本丢失了入射光束的偏振特性,故该装置测得的偏振度主要反映支路1中光束的偏振态;随着被测物PS小球的浓度降低,透光率增大,光散射减弱,该装置测得的偏振度中支路2的光束参与增强.理论上当被测物的透光率达到90%时,光束经过该被测物传播基本保偏,该装置获得的偏振度为0.992,实验结果中最小 P 值能达到0.545,略低于理论值,可见0.006 25%的PS悬浮体对线偏光基本没影响.

4 结论

偏振度测量原理普遍应用于散射体或散射介质环境中偏振特性的测量.本文采用一种不同于常见斯托克斯

参量测定偏振度法,直接将相干矩阵中的参量与便捷测量相结合,从原理上推导了如何获得各个参量,尤其是指明了复参量中实部与虚部的测量.基于理论,搭建Mach-Zehnder干涉装置对不同浓度PS散射体的偏振特性进行了测试,实验可知散射体浓度的增大导致光束散射增强,从而会影响传播光束的偏振态.所提方法与搭建的装置为直接利用相干矩阵测量偏振度提供了新思路.

参考文献:

- [1] 褚金奎,王威,崔岩,等.气溶胶对天空偏振辐射影响的测量[J].光学精密工程,2012,20(3):520-526.
- [2] NATHAN J P, JOSEPH A S. Wavelength dependence of the degree of polarization in cloud-free skies: simulations of real environments[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 15559-15568.
- [3] 王新强,孙晓兵,张丽娟,等.可见/近红外土壤湿度的光谱偏振特性实验研究[J].红外与激光工程,2015,44(11):3288-3292.
- [4] 叶松,孙旭霞,汪杰君,等.可见光波段的矿石多角度反射偏振特性研究[J].激光技术,2017,41(1):85-90.
- [5] LI X, JANAKA C R, YAO G. Polarization-sensitive reflectance imaging in skeletal muscle[J]. Optics Express, 2008, 16(13): 9927-9935.
- [6] CHU J K, ZHAO K C, ZHANG Q, et al. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation[J]. Sensors and Actuators, 2008, 148(1): 75-82.
- [7] 王羿,洪津,骆冬根,等.视场重合程度对分时偏振测量精度的影响[J].红外与激光工程,2015,44(2):606-610.
- [8] 李翠丽,孙晓兵,王涵,等.基于偏振分束组件的同时偏振探测精度分析[J].光学学报,2014,34(4):123-127.
- [9] 王耀利,张瑞,王志斌,等.LCVR和AOTF的光谱偏振测量新策略[J].光谱学与光谱分析,2015,35(8):2362-2367.
- [10] DEBOO B J, SASIAN J M, CHIPMAN R A. Depolarization of diffusely reflecting man-made objects[J]. Applied Optics, 2005, 44(26): 5434-5445.
- [11] 罗云瀚,王芳,葛菁华,等.基于洛匈棱镜的偏振度测量与空间退偏度分析方法研究[J].光子学报,2014,43(9):141-145.
- [12] JARRY G, STEIMER E, DAMASCHINI V, et al. Coherence and polarization of light propagating through scattering media and biological tissues[J]. Applied Optics, 1998, 37(31): 7357-7367.
- [13] JOSEPH W G. Speckle phenomena in optics theory and application[M]. Englewood: Roberts and Company Publishers, 2007.

责任编辑:张自强

(上接第56页)

- [3] RAHMAN M S, RAHMAN M L. Media and education play a tremendous role in mounting AIDS awareness among married couples in Bangladesh[J]. AIDS Research and Therapy, 2007, 4(1): 1-7.
- [4] SCHWITZER G, MUDUR G, HENRY D, et al. What are the roles and responsibilities of the media in disseminating health information?[J]. PLoS Medicine, 2005, 2(7): 576-582.
- [5] SPRINGBORN M, CHOWELL G, MACLACHLAN M, et al. Accounting for behavioral responses during a flu epidemic using home television viewing[J]. BMC Infectious Diseases, 2015, 15(1): 1-14.
- [6] 郭文丹,聂麟飞.基于人口流动的COVID-19传播动力学模型研究[J].新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2022,39(2):161-168.
- [7] FERGUSON N. Capturing human behaviour[J]. Nature, 2007, 446(7137): 733.
- [8] FUNK S, KNIGHT G M, JANSEN V A. Ebola: the power of behaviour change[J]. Nature, 2014, 515(7528): 492.
- [9] WAKEFIELD M A, LOKEN B, HORNIK R C. Use of mass media campaigns to change health behaviour[J]. The Lancet, 2010, 376(9748): 1261-1271.
- [10] YANG W, SUN C J, ARINO J. Effect of media-induced modification of travel rates on disease transmission in a multiple patch setting[J]. Journal of Applied Analysis and Computation, 2020, 10(6): 2682-2703.
- [11] VAN DEN DRIESSCHE P, WATMOUGH J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission[J]. Mathematical Biosciences, 2002, 180(1/2): 29-48.
- [12] ZHAO X Q. Uniform persistence and periodic coexistence states in infinite-dimensional periodic semiflows with applications[J]. Canadian Applied Mathematics Quarterly, 1995, 3(4): 473-495.
- [13] 罗名海,秦思娴,谭波,等.基于大数据的武汉封城效果与疫后恢复分析[J].地理空间信息,2020,18(9):5-14.

责任编辑:赵新科