

文章编号: 1002-2082(2008)01-0035-05

# 基于双旋延迟器结构的偏振 BRDF 测量系统的设计

吴云智<sup>1</sup>, 韩裕生<sup>1</sup>, 王 峰<sup>1</sup>, 魏庆农<sup>2</sup>

(1. 炮兵学院 信息工程系, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 偏振双向反射分布函数(BRDF)不仅可以表示物体散射光辐强度的空间分布情况,还包含了丰富的偏振信息。与标量BRDF相比,偏振BRDF可以更加精确地、全面地表示物体表面的光散射情况。设计了基于双旋延迟器结构的偏振BRDF测量系统,通过同步旋转波片调制入射光和散射光的偏振态,得到一系列变化的光强值,再由光强的Fourier分解系数计算获得样品的偏振BRDF值。系统内设计了一对正交反射镜,用以减小系统中器件后向散射光的影响。通过铝板偏振BRDF的测量,说明了该系统具有较高的准确性。

**关键词:** 光散射;偏振双向反射分布函数;米勒矩阵;双旋延迟器结构;傅里叶分解

中图分类号: TN206; O436.2

文献标志码: A

## Design of polarimetric BRDF measurement system based on configuration of dual rotation retarder

WU Yun-zhi<sup>1</sup>, HAN Yu-sheng<sup>1</sup>, WANG Feng<sup>1</sup>, WEI Qing-nong<sup>2</sup>

(1. Department of Information Engineering, Artillery Academy, Hefei 230031, China;

2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Polarization BRDF can be used to describe the space distribution of radiation intensity of objects and it includes plenty of polarization information. Compared with the scalar BRDF, the polarimetric BRDF can show the light scattering of an object surface more accurately and completely. A polarimetric BRDF measurement system based on dual rotating retarder configuration was designed. The polarization state of incident and scattering light was modulated by synchronously rotating wave plates to acquire a series of changing light intensity. The polarimetric BRDF of the sample was obtained by calculating the Fourier decomposition coefficients of the light intensity. A pair of orthogonal mirrors were mounted in the system to minimize the influence of back-scattering light from some other components in the system. The precision of measurement system was demonstrated by the measurement result of the aluminium-plate polarimetric BRDF.

**Key words:** scattering light; polarization BRDF; Mueller matrix; configuration of dual retarder; Fourier decomposition

## 引言

使散射光的偏振态发生变化,这种变化和材料自身的介电常数、粗糙度、表面结构及含水量等因素有

光入射到材料表面上会和材料发生相互作用,

收稿日期:2007-09-22; 修回日期:2007-10-11

作者简介:吴云智(1982-),女,硕士研究生,主要研究方向为材料的光散射偏振特性。E-mail:anroyun@163.com

密切关系<sup>[1]</sup>。材料对散射光偏振态的影响通常用偏振双向反射分布函数(以下简称偏振 BRDF)表示,表征材料对散射光偏振态影响的参数,如衰减(diattenuation)、位相延迟(retardance)、退偏(depolarization)以及偏振(polarization),都包含在材料偏振 BRDF 的信息之中<sup>[2-3]</sup>。测量和分析材料的偏振 BRDF 可以了解不同材料独特的偏振特性,其中提取出的偏振信息可广泛应用于目标识别、材料隐身及目标特征提取等领域。

偏振 BRDF 是一个  $4 \times 4$  的矩阵,表示材料不同方向的偏振散射情况,是样品各个不同散射方向上 Mueller 矩阵的集合。而 Mueller 矩阵是偏振光学中最常用的表示方法之一,一般用  $M(\theta_i, \varphi, \theta_r, \varphi_r)$  表示。因此,偏振 BRDF 可以简单表示为

$$\text{偏振 BRDF} = M(\theta_i, \varphi, \theta_r, \varphi_r)$$

文中根据 Azzam 提出的 Mueller 矩阵测量方法,设计了偏振 BRDF 测量系统。为保证样品偏振 BRDF 测量结果的准确性,测量系统利用一对正交平面反射镜减小各器件后向散射杂散光对测量结果的影响;在算法方面,则采用了最小二乘优化法消除随机误差的影响;另将铝板作为实验样品,成功获得其偏振 BRDF 值,并对其偏振特性进行了定性分析。

## 1 测量原理

调制入射光、散射光的偏振态是测量 Mueller 矩阵最基本的方法。1978 年, Azzam 在前人研究的基础上提出利用双旋延迟器结构对材料的 Mueller 矩阵进行测量<sup>[4-6]</sup>。该方法具有测量装置结构简单等优点,利用固定检偏器避免了探测器的偏振敏感性误差。

Azzam 提出的 Mueller 矩阵测量方法采用双旋转延迟器结构,实验装置主要由光源、起偏系统、检偏系统和探测器组成(如图 1 所示)。起偏系统和

检偏系统分别由一对偏振片和  $1/4$  波片组成,固定起偏系统与检偏系统的偏振片,只通过 2 个  $1/4$  波片以  $1:5$  的角度同步旋转来调制入射光和出射光的偏振态。在对入射光和出射光偏振态的调制过程中,探测器将探测到一系列变化的光强值,由这些光强的 Fourier 分解系数即可计算出样品的 Mueller 矩阵。

该系统中,入射光的 Stokes 向量是一个  $1 \times 4$  的列向量,记作  $S^{\text{inc}}$ ;偏振片  $P_1$  和  $P_2$  的透振方向均固定在水平方向,其 Mueller 矩阵分别记作  $P_1$  和  $P_2$ ;  $1/4$  波片  $C_1$  和  $C_2$  的快轴和水平方向夹角分别为  $\theta$  和  $5\theta$ ,它们的 Mueller 矩阵分别记作  $C_1$  和  $C_2$ ;样品的 Mueller 矩阵记作  $M$ ;出射光的 Stokes 向量记作  $S^{\text{out}}$ 。分别表征如下:

$$M = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

$$S^{\text{out}} = P_2 * C_2 * M * C_1 * P_1 * S^{\text{inc}} \quad (2)$$

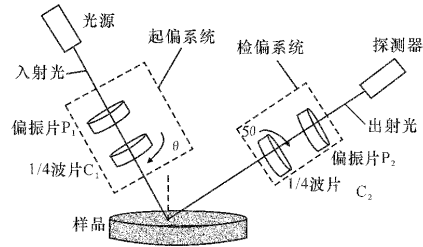


图 1 双旋延迟器结构

Fig. 1 Structure of dual rotating retarder

假定入射光经过起偏器  $P_1$  后的透射光是单位强度的水平线偏振光。探测器的探测光强  $I$  是出射光 Stokes 向量  $S^{\text{out}}$  的第 1 个分量  $S_0^{\text{out}}$ ,将偏振片和波片的 Mueller 矩阵代入(2)式就可得到探测光强的表达式:

$$I = \frac{1}{2} (m_{00} + m_{01} \cos^2 2\theta + m_{02} \sin 2\theta \cos 2\theta + m_{03} \sin 2\theta + m_{10} \cos^2 10\theta + m_{11} \cos^2 10\theta \cos^2 2\theta + m_{12} \cos^2 10\theta \sin 2\theta \cos 2\theta + m_{22} \sin 10\theta \cos 10\theta \cos 2\theta + m_{23} \sin 10\theta \cos 10\theta \sin 2\theta - m_{30} \sin 10\theta - m_{31} \sin 10\theta \cos^2 2\theta - m_{32} \sin 10\theta \sin 2\theta \cos 2\theta - m_{33} \sin 10\theta \sin 2\theta) \quad (3)$$

再利用倍角与积化和差公式,将探测光强  $I$  转换成如下的 Fourier 级数形式:

$$I = a_0 + \sum_{i=1}^{12} (a_i \cos 2i\theta + b_i \sin 2i\theta) \quad (4)$$

式中  $a_0, a_i, b_i (i=1, 2, 3, \dots, 12)$  是光强  $I$  的 Fourier 分解系数。如(5)式所示,即样品 Mueller 矩阵的 16 个分量就可以用光强的 Fourier 分解系数来表示:

$$m_{00} = 2 * (a_0 - a_2 + a_8 - a_{10} + a_{12})$$

$$m_{01} = 4 * (a_2 - a_8 - a_{12})$$

$$m_{02} = 4 * (b_2 - b_8 - b_{12})$$

$$m_{03} = 2 * (b_1 + b_9 - b_{11})$$

$$m_{10} = -4 * (a_8 - a_{10} + a_{12})$$

$$m_{11} = 8 * (a_8 + a_{12})$$

$$m_{12} = 8 * (b_8 + b_{12})$$

$$\begin{aligned}
 m_{13} &= 8 * (-b_9 + b_{12}) \\
 m_{20} &= -4 * (b_8 - b_{10} + b_{12}) \\
 m_{21} &= 8 * (b_8 + b_{12}) \\
 m_{22} &= 8 * (a_8 - a_{12}) \\
 m_{23} &= 4 * (a_9 - a_{11}) \\
 m_{30} &= 2 * (b_3 - b_5 + b_7) \\
 m_{31} &= -4 * (a_3 + b_7) \\
 m_{32} &= -4 * (a_3 - a_7) \\
 m_{33} &= 4 * (a_6 - a_4)
 \end{aligned} \quad (5)$$

## 2 测量系统的设计

### 2.1 测量系统的原理

为实现对样品上半空间的偏振BRDF测量,测量系统中3个步进电机(A,B,C)按照一定规律旋转样品,将复杂三维空间的变角光度测量简化到二维平面上来实现,完成不同入射角和探测角下的Mueller矩阵测量,从而得到样品的偏振BRDF。在前人提出的理论方法基础上,根据现有实验条件设计了样品偏振BRDF的测量系统,如图2所示。

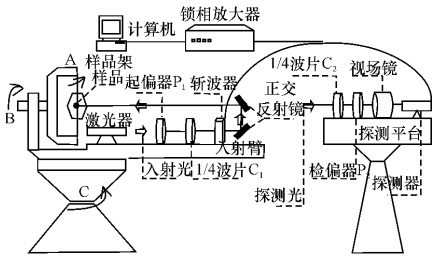


图2 偏振BRDF测量系统装置图

Fig. 2 Schematic diagram of polarization BRDF measurement system

本测量系统利用3个电机带动样品和光源转动来实现半球空间反射特性的测量,其原理可概括为:在合理地选择1个三轴系统的数学坐标系的前提下,通过一定的规律来旋转样品,将如图3所示的三维空间的变角光度测量简化到二维平面上实现。

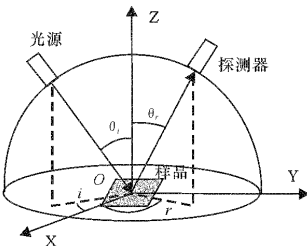


图3 空间半球散射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of space hemispherical scattering

### 2.2 测量系统的结构

在图2中,样品架(直径为15 cm)可以前后调节,保证3个步进电机的轴相交于样品面上。电机C带动入射臂、电机B和电机A及样品在水平面内转动;电机B带动电机A和样品在垂直面内转动;电机A带动样品转动。在转动过程中,电机C的转轴方向保持不变,电机B和电机A的转轴方向在空间是变化的。

测量时,探测器固定在探测平台上,光源方向始终与B轴一致,并在水平面中转动。电机A的转动范围是 $0^\circ \sim 90^\circ$ ,电机B和C的转动范围是 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 。全套系统由计算机控制,电机的转动精度由码盘确定,码盘的精度为 $0.1^\circ$ 。3个电机的控制方式为

$$\begin{cases}
 \theta_i = a \\
 \varphi_i = 90^\circ - \varphi_0 \\
 \cos \theta_r = \cos a \cdot \cos c - \sin a \cdot \cos b \cdot \sin c \\
 \cos \varphi_0 = \sin b \cdot \sin c / \sin \theta_r \\
 \varphi_r = \varphi_0 - \varphi_0
 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $a, b, c$ 为3个电机转动的角度; $\theta_i$ 是入射天顶角; $\theta_r$ 是接收天顶角; $\varphi_i$ 是入射方位角; $\varphi_r$ 是接收方位角; $\varphi_0$ 是A轴正向与样品标志线的夹角,一旦样品装上之后, $\varphi_0$ 的大小就保持不变。

此外,光路中的激光器采用长春新产业有限公司生产的1064 nm MIL-1064型半导体泵浦连续激光器。在环境温度为 $21^\circ\text{C}$ 与湿度为37%的测量条件下,使用美国相干公司生产的Fieldmaster GS型功率计对其进行测量。测量时间为4 h,取样点2000个,测得最大功率值是618 mW,最小功率值是603 mW,平均功率值是612 mW,峰峰值功率的平均浮动是2 mW,激光器的稳定性为0.72%。

偏振片选用的是德国CODIXX公司生产的colorPol<sup>®</sup>VISIR型偏振片。偏振片的波长响应范围是550 nm~1500 nm,具有极高的偏振比和较高的振幅透过率。图4中,偏振比曲线的实线部分是实验测量值;当偏振比大于5000000:1时,将无法再利用实验测量偏振片的偏振比,偏振比曲线的虚线部分是理论计算结果。对于非偏振光,其振幅透过率约为偏振光的一半。偏振片的温度适应范围是 $-50^\circ\text{C}$ 至 $400^\circ\text{C}$ ,接受入射光的角度范围是 $\pm 20^\circ$ 。

波片选用曲阜师范大学激光研究所生产的1/4云母波片。此波片的透射比高,自然透射比大于90%;抗损伤能力强(对于连续激光器,抗光损伤阈值为 $30\text{ W/cm}^2$ ;对于脉冲激光器,其抗损伤阈值为

300 W/cm<sup>2</sup>);位相延迟偏差<5%。

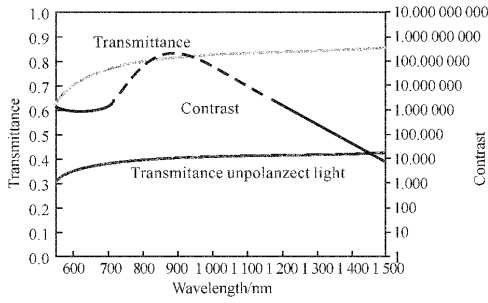


图4 ColorPol<sup>®</sup>VISIR 型偏振片的光谱响应图

Fig. 4 Spectral response of ColorPol<sup>®</sup> VISIR polarization plate

探测器采用日本滨松R632-01型光电倍增管,其响应波段范围为400 nm~1 200 nm。选择稳定的光电倍增管和合适的工作电压,从而使光电倍增管工作在低噪声和高动态范围,以满足测量重复性和精确性的要求。光电倍增管输出的模拟信号经锁相放大器转换为数字信号后,通过串口进入计算机。锁相放大器选用美国EG&G公司的5210型。该锁相放大器具有自动灵敏度调整、自动相位调整、自动规范输出调整及自动参考频率调整等功能。

### 3 样品测量结果及讨论

测量时,光源发出的激光经过起偏器P<sub>1</sub>,1/4波片C<sub>1</sub>,斩波器和一对正交的反射镜照射到样品表

面;样品的散射光经过1/4波片C<sub>2</sub>,检偏器P<sub>2</sub>和视场镜,由探测器接收后转换成电信号,经串口送往计算机。完成当前角度的测量后,计算机控制步进电机带动旋转台移至下一个测量角度,重复上述测量过程。

为消除背景光的影响,系统中利用斩波器对入射光进行频率调制。此外,为了尽可能减小起偏器、波片C<sub>1</sub>和斩波器的后向散射光对探测光强值的影响,测量系统中设置了一对正交反射镜,其作用是改变起偏器、波片C<sub>1</sub>和斩波器后向散射光的方向和样品表面散射光的方向。由于任何光经过一对正交反射镜反射后,光的偏振态不会发生变化,所以这对正交反射镜在系统中只起到改变光传播方向从而减小测量误差的作用,并不改变光的偏振态。

实验选用表面经喷砂处理的铝板作为样品。在入射平面内( $\varphi_i=0^\circ, \varphi_r=180^\circ$ )对样品的偏振BRDF进行测量,其中入射天顶角 $\theta_i=45^\circ$ ,接收天顶角 $\theta_r$ 的取值范围是 $30^\circ\sim 60^\circ$ 。测量过程中不断改变 $\theta$ 和 $5\theta$ 的值, $\theta$ 值取30个,分别为 $0^\circ, 6^\circ, 12^\circ, \dots, 174^\circ$ ,已知30个探测光强值时,就可以通过优化求解超定方程组,得到光强的25个Fourier分解系数,减小随机误差对测量结果的影响;再由25个Fourier分解系数计算,获得样品的Mueller矩阵F。

如(6)式所示, Mueller矩阵F是一个 $4\times 4$ 的矩阵,具有16个分量。图5是铝板偏振BRDF各分量的测量结果。

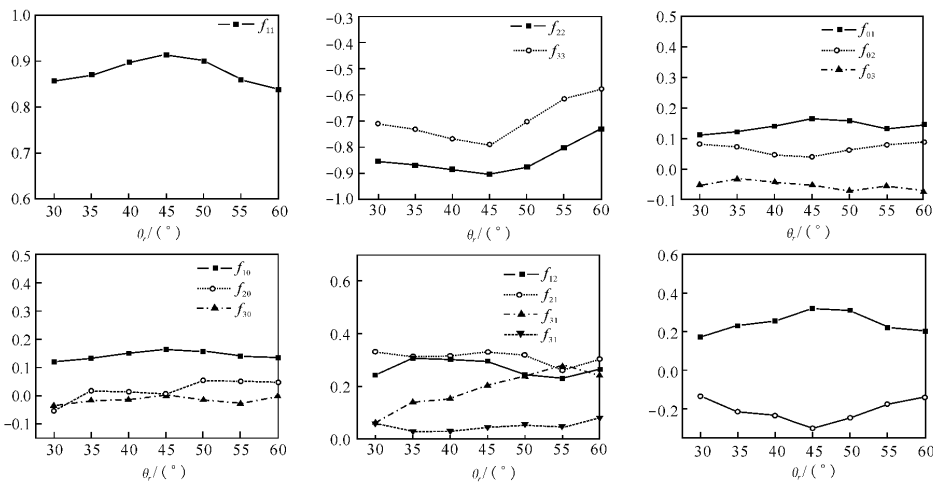


图5 样品偏振BRDF 测量结果

Fig. 5 Measured results of polarization BRDF for samples

$$F = \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} & f_{03} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{30} & f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

测量结果清楚地表明,铝板偏振 BRDF 分量  $f_{11}, f_{22}, f_{33}$  的曲线在探测角为  $45^\circ$  处都出现了最大值。这说明铝板在镜向方向保偏能力最强,越偏离镜向方向,保偏能力越差。

对于铝板,水平线偏振光的反射率大于垂直线偏振光的反射率,所以  $f_{01}$  分量基本上都大于零。矩阵分量  $f_{12}$  和  $f_{21}$  的大小基本相同,说明入射光的  $45^\circ/135^\circ$  偏振分量参与产生散射光的水平/垂直偏振分量的情况与入射光的水平/垂直偏振分量参与产生散射光的  $45^\circ/135^\circ$  偏振分量的情况相近。矩阵分量  $f_{13}$  和  $f_{31}$  的值接近零,可见入射光和散射光的水平/垂直偏振分量和右旋/左旋偏振分量之间基本不存在相互转化关系。

## 4 结论

文中设计了基于双旋转延迟器结构的测量系统。通过多次有规律旋转波片调制入射光和散射光的偏振态,得到一系列探测光强值,再由光强的 25 个 Fourier 分解系数计算得到铝板样品的偏振 BRDF 值。

从实验结果中可知,粗糙的铝板在镜向方向反射最强,并具有一定的漫反射特性,其他偏振 BRDF 分量也呈现出一定的漫射特征。这为材料的偏振特性分析、目标的偏振识别等方面提供了有力的参考依据。

参考文献:

- [1] MUJAT M, DOGARIU A. Realtime measurement of the polarization transfer function [J]. Applied Optics, 2001, 40(1): 34-44.
- [2] LU S Y, CHIPMAN R A. Generalized diattenuation and retardance for inhomogeneous polarization elements [J]. SPIE, 1992, 1746: 197-200.
- [3] NEE SOE-MIE F. Depolarization and principal mueller matrix measured by null ellipsometry [J]. Applied Optics, 2001, 40(28): 4933-4939.
- [4] AZZAM R M A. Photopolarimetric measurement of the mueller matrix by fourier analysis of a single detected signal [J]. Optics Letters, 1978, 2(6): 148-150.
- [5] HAUGE P S. Mueller matrix ellipsometry with imperfect compensators [J]. Journal of the optical Society of America, 1978, 68: 1519-1528.
- [6] JIN L, KOWA H, OTANI Y. Mueller matrix polarimeter 157 nm [J]. SPIE, 2003, 5188: 146-153.