

·测试、试验与仿真·

光学镜面颗粒污染对激光散射特性影响的实验研究

朱南南, 张 骏

(光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005)

摘 要: 为了研究污染颗粒对光学系统镜面散射的影响, 将光学镜面暴露在室内, 得到三种不同污染程度的镜面, 利用电子显微镜表征三种污染镜面的颗粒分布。使用光束质量分析仪采集洁净镜面和三种不同颗粒污染镜面的镜向散斑图像, 结合双向反射分布函数(BRDF)对其从水平和垂直方向进行分析。研究结果表明, 不同入射角下, 颗粒污染镜面的镜向BRDF值都在同一个数量级; 从水平和垂直方向分析, 颗粒尺寸越大, 颗粒数量越多, 镜向BRDF的中心变化较小, 边缘起伏较大, 镜面散射越严重。

关键词: 双向反射分布函数; 污染镜面; 散射特性; 光束质量分析仪

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-05-0074-05

Experimental Research on Laser Scattering Characteristics Influenced by Particulate-contaminated Optical Mirror

ZHU Nan-nan, ZHANG Jun

(Institute of Opto-Electronic Information of Science & Technology, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: Three different kinds of contaminated mirror exposed to indoor are obtained to study the influence of contaminated particles on mirror surface scattering in optical system. Particulate distributions of three contaminated mirrors are characterized by an electron microscope. A beam quality analyzer is used to collect the specular speckle images of clean mirror and three different contaminated mirrors and the images are analyzed in horizontal and vertical directions with bidirectional reflectance distribution function (BRDF). Research results show that the specular BRDF values of particulate-contaminated mirrors with different incident angles are in the same order of magnitude. From horizontal and vertical directions, the larger is the particle size, the more is the number of particles, the center of the specular BRDF changes slightly, the edge of them are volatile, and the mirror surface scattering will be more serious.

Key words: bidirectional reflectance distribution function (BRDF); contaminated mirror; scattering characteristics; beam quality analyzer

光学元件作为光学系统的重要组成部分, 其表面的散射特性会对系统的性能产生重要的影响。许多光学系统都要求光学元件表面要有尽可能低的散射, 以减少光学元件表面散射对系统性能的影响^[1-4]。光学系统元件表面的散射主要源于表面粗糙度, 而沉积在元件表面的颗粒污染物也会加重其表

面的散射。目前为止, 有关物体表面散射特性的研究已有很多报道, 其中最主要的是双向反射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, BRDF)。国内外学者利用这种方法从理论和实验两方面对物体表面散射特性进行了大量研究, 分析了不同粗糙表面的双向反射分布函数^[5-9]。

收稿日期: 2015-10-07

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2011FM007); 烟台大学研究生科技创新基金(01074)

作者简介: 朱南南(1988-), 女, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事光传输特性的研究。

在复杂的外界环境中,悬浮于空气中的颗粒物如灰尘、尘埃等会沉积在光学镜面上污染表面,进而影响光学镜面的散射特性^[10]。对于光学系统中镜面的污染容限问题,分析镜面污染颗粒对系统散射特性的影响也是极其重要的。文中采用微分散射测量法并结合米氏散射理论^[11]和BRDF理论来研究光学镜面污染颗粒的散射特性,实验中利用光束质量分析仪(Duma Optronics LTD, BeamOn-IR1550)来分析光束的散射特性。

1 散射理论

光学系统中元件表面的散射由双向反射分布函数(BRDF)来描述。镜面的散射由干净镜面的散射和镜面污染物产生的散射两部分组成。总的双向反射分布函数(BRDF)可以认为是这两部分之和,如下式

$$BRDF = BRDF_m + BRDF_p \quad (1)$$

式中,下标‘m’和‘p’分别表示洁净镜面产生的BRDF和镜面污染物产生的BRDF。

根据米氏散射理论^[11],镜面污染颗粒产生的散射的辐射强度可以描述为

$$I_\phi = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 \sin^2 \phi \quad (2)$$

$$I_\theta = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_2 \cos^2 \phi \quad (3)$$

这里, i_1 和 i_2 为强度函数,其表达式分别为

$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right|^2 \quad (4)$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \right|^2 \quad (5)$$

其中, a_n 和 b_n 为米氏散射系数; π_n 和 τ_n 为与散射角有关的米氏散射角度函数^[12]。

若散射平面为 $y-z$ 平面,则 $f = 90^\circ$, 式(2)、式(3)可改为

$$I_\phi = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 \quad (6)$$

$$I_\theta = 0 \quad (7)$$

式(6)定义了自由空间中由极化辐射照射球状颗粒所产生的散射能量,由此可以定义散射颗粒的BRDF为

$$BRDF_p = \frac{\lambda^2 D}{4\pi^2 \cos \theta_r} i_1 \quad (8)$$

上式中 D 为沉积在镜面上的散射颗粒密度; θ_r 为在散射平面内以镜面法线为参考线的反射角;而在实验测量中BRDF可以被定义为

$$BRDF = C \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{V_s}{V_i} \quad (9)$$

式中, C 为系统校正值; ρ 为镜面的反射率; V_s 为散射光强度; V_i 为入射光强度。

2 微分散射测量装置

图1测量装置由波长为 $0.532 \mu\text{m}$ 的半导体激光器、旋转支架、光束质量分析仪(Duma Optronics Ltd.)、计算机软件组成。在激光照射到样品之前先通过一个直径为 5 mm 的孔径,用于限制光束;将待测样品放置在标有刻度的旋转支架上,通过旋转支架可以改变光的入射角度。图像大小为 720×576 像素,水平和垂直方向的分辨率均为 $8.3 \mu\text{m}/\text{pixel}$,实验中最小入射角度约为 10° 。光斑特征利用光束质量分析软件进行分析。

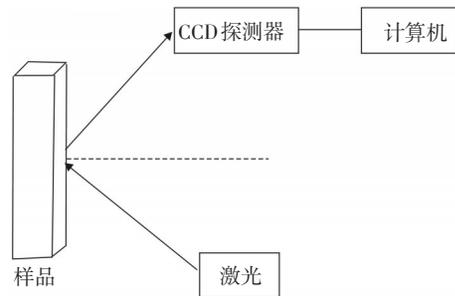


图1 散射测量系统结构示意图

3 镜面散射特性分析

为了检测光学系统中镜面污染对系统性能的影响,下面对洁净镜面和颗粒污染镜面的散射特性分别进行了分析。

3.1 洁净镜面

图2给出了利用光束质量分析仪测量洁净镜面的镜向散斑图像,图像水平和垂直方向上不同像素点的BRDF值。从图中可以看出,无论是水平方向,还是垂直方向,不同入射角下散斑图像的中心变化较小,边缘波动较大,且垂直方向波动比水平方向波动更大;各曲线的峰值都在同一个数量级,

不同曲线之间的差值较小。当入射角分别为 10° 、 30° 和 60° 时,水平方向上测量的标准差分别为0.001 9、0.001 99、0.002,而垂直方向上测量的标准差分别为0.002 12、0.002 18、0.002 23;可知入射角越大,水平和垂直方向的BRDF值越分散,波动越大。

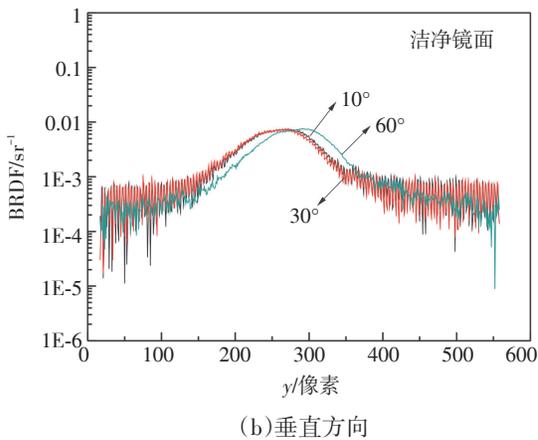
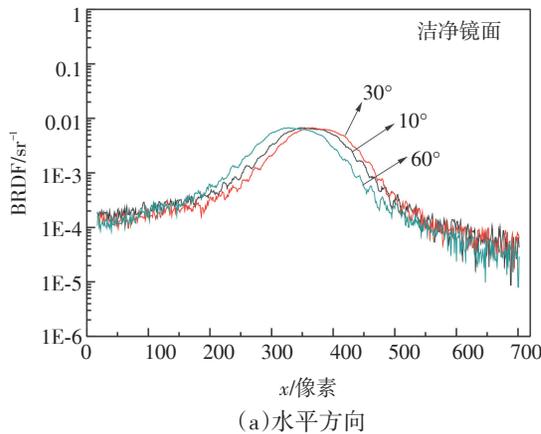


图2 不同入射角下洁净镜面镜向BRDF分布

3.2 颗粒污染镜面

为了检测镜面污染颗粒对光散射特性的影响,将干净的镜面暴露在室内不同时间,让灰尘自由随意地沉积在镜面上,利用电子扫描镜观察污染镜面,得到镜面上污染颗粒的分布情况,如表1和图3所示。三个污染镜面的平均颗粒尺寸相同,镜面2相较于镜面1和镜面3有大尺寸颗粒,且镜面2的其他尺寸颗粒数量与镜面1相同;而镜面3的颗粒数量不同于其他两个镜面的颗粒数量。

表1 镜面颗粒尺寸分布

平均颗粒尺寸/ μm	颗粒数量/ cm^2		
	镜面1	镜面2	镜面3
1.35	325	325	225
2.70	152	152	105
5.40	23	23	14
13.5	18	18	16
27.0	3	3	2
54.1	2	2	1
115.2	无	1	无

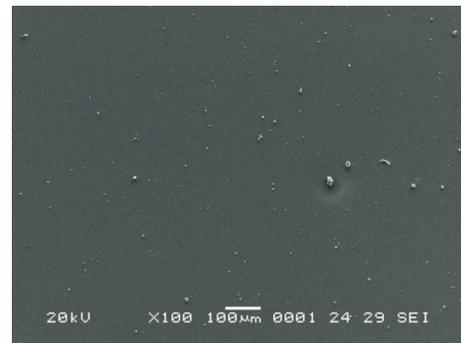
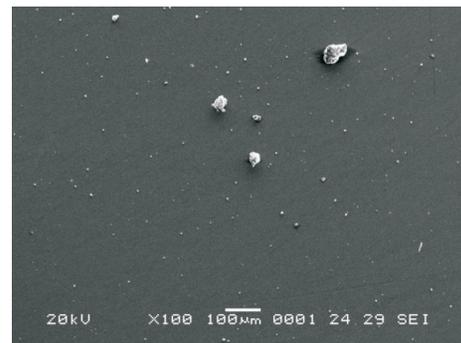
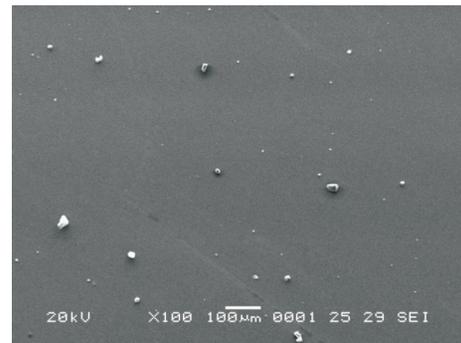


图3 三种污染镜面的颗粒分布

不同颗粒污染镜面镜向 BRDF 分布如图 4 所示。从图中可以看出,无论是水平方向,还是垂直方向,不同入射角下不同污染镜面散斑图像的中心变化较小,边缘波动较大,且垂直方向波动比水平方向波动更大;颗粒尺寸越大,颗粒数量越多, BRDF 值波动越大。各曲线的峰值都在同一个数量级,不同曲线之间的差值较小,这可能是由于 CCD 的分辨率还不够高,无法检测到污染镜面微小的变化。当入射角为 60° 时,水平方向上污染镜面 2 与污染镜面 1 的 BRDF 比值为 0.918 9,污染镜面 1 与污染镜面 3 的 BRDF 比值为 0.698 1;而垂直方向上污染镜面 2 与污染镜面 1 的 BRDF 比值为 0.701 3,污染镜面 1 与污染镜面 3 的 BRDF 比值为 0.885 1;可知不同污染镜面水平和垂直方向的 BRDF 比值相差较大,颗粒尺寸越大,颗粒数量越多,镜面散射越严重。

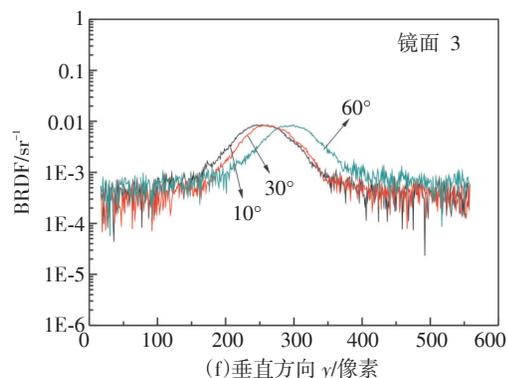
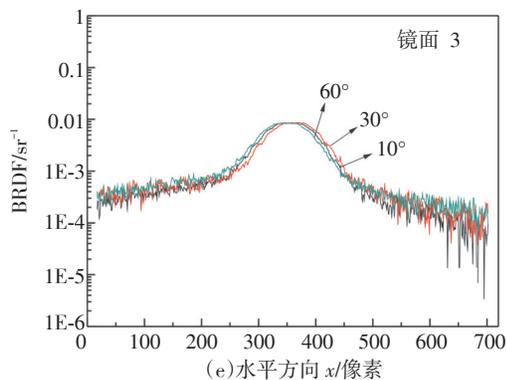
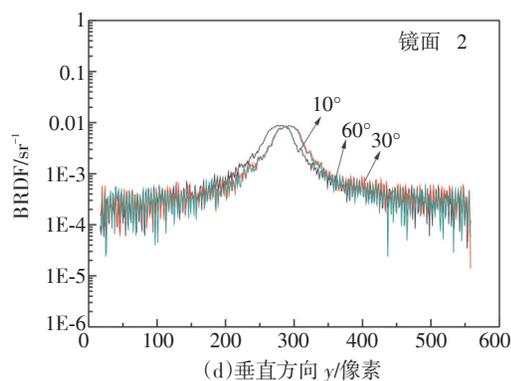
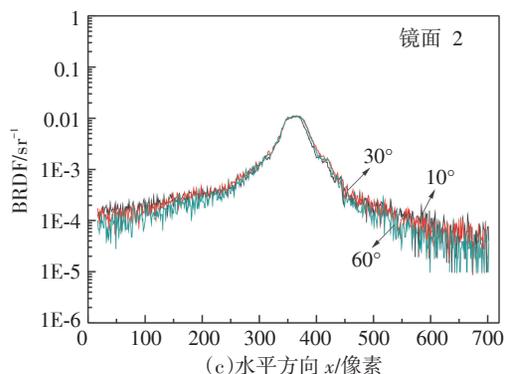
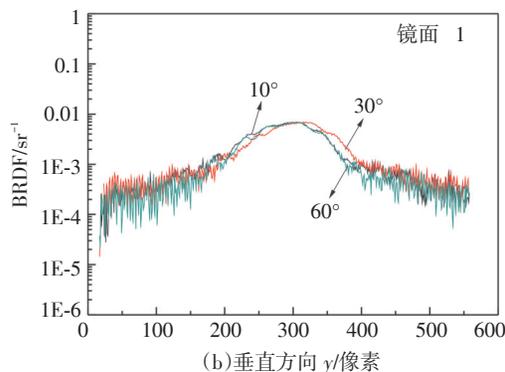
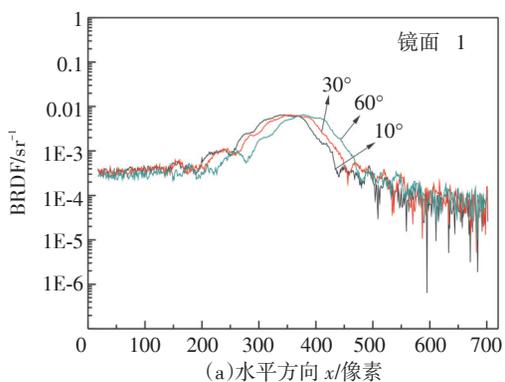


图 4 不同入射角下三种不同颗粒污染镜面镜向 BRDF 分布

4 结 论

暴露在空气中的光学镜面会被空气中的灰尘、尘埃等颗粒污染,这会严重影响光学镜面的散射特性,甚至会缩短光学系统的寿命。利用光束质量分析仪并结合米氏理论和双向反射分布函数(BRDF)对不同颗粒污染镜面的散射特性进行了研究。研究表明,污染颗粒会加重镜面的杂散射,进而影响微弱信号的提取和分析,因此在实际工作中要尽可能地使光学镜面洁净无污染。

参考文献

- [1] 肖静,张彬. 光学元件污染对红外光学系统信噪比的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 1010-1016.
- [2] 孙腾飞,张骏,吕海兵,等. 光学镜面污染对激光传输特性的影响[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1444-1448.
- [3] 孙腾飞,曹增辉,郑田甜,等. 镜面颗粒影响激光散射特性的模拟仿真[J]. 光电技术应用, 2013, 28(5): 69-72.
- [4] SUN Teng-fei, ZHANG Jun, LV Hai-bing, et al. Influence of optical mirror surface cleanliness levels on laser transmission characteristics[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 1-5.
- [5] Mcguire A F, Hapke B W. An experimental study of light scattering by large irregular particles[J]. Icarus, 1995, 113(1): 134-155.
- [6] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 1: theory and experiment for polystyrene spheres and $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1746-1756.
- [7] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 2: theory and experiment for dust and $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1757-1763.
- [8] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 3: theory and experiment for dust and $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ [J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1764-1774.
- [9] SPYAK P R, WOLFE W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 4: properties of scatter from dust for visible to far-infrared wavelengths[J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1775-1784.
- [10] Yong R P. Low-scatter degradation by particle contamination[J]. Optical Engineering, 1976, 15(6): 516-520.
- [11] KERKER M. The scattering of light and other electromagnetic radiation[M]. Academic Press, New York, 1969.
- [12] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.

(上接第66页)

参考文献

- [1] 蔡晓峰. 基于相移光栅的掺铒光纤的掺铒光纤激光器研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2010.
- [2] 闫东川. 基于相移光栅的掺铒光纤激光器研究[D]. 北京:北京交通大学, 2011.
- [3] 姜俊英. 基于相移光栅双波长窄线宽光纤激光器的研究[D]. 天津:天津理工大学, 2012.
- [4] 朱清,陈小宝,陈建平. 相位掩模板移动法制作DFB光纤激光器[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2006, 1(1): 17-21.
- [5] 王利,陈柏,陈嘉琳. 一种制作掺Yb相移光纤光栅激光器的实验方法[J]. 中国激光, 2007, 12(34): 1617-1620.
- [6] CHEN Xu-xing, Painchaud Yves. Phase shifts induced by the piezoelectric transducers attached to a linearly chirped fiber Bragg grating[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(14): 2017-2022.
- [7] XIAN Lun-lun, LI Hong-pu. Calibration of a phase-shift formed in a linearly chirped fiber Bragg grating and its thermal effect[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(8): 1185-1190.
- [8] LU S H, XU O, FENG S, et al. Design and application of optical filters based on chirped phase-shifted fiber gratings [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1675-1680.
- [9] L Shao-hua, X Ou, D Xiao-wei, et al. Analysis for the reflective spectrum characteristics of chirped phase-shifted fiber gratings[J]. Chinese J. Lasers, 2008, 35(4): 577-581.
- [10] 陈根祥. 光纤通信技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 234.

本刊声明

《光电技术应用》期刊因故通信地址变更为天津市空港经济区纬五道9号, 300000。因相关手续正在办理中, 现暂用旧的通信地址和邮发代号, 即辽宁省锦州市31号信箱19分箱, 121000, 原邮发代号8-314。

特此声明。

《光电技术应用》编辑部