

·测试、试验与仿真·

镜面颗粒影响激光散射特性的模拟仿真

孙腾飞¹, 曹增辉¹, 郑田甜¹, 张 骏¹, 吕海兵², 袁晓东²

(1.烟台大学光电信息科学技术学院, 山东 烟台 264005; 2.中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 光学镜面上的激光散射特性对光学系统性能的影响十分重要。利用修正的米氏散射理论模拟计算了光学镜面的双向反射分布函数(BRDF)。结果表明:镜面上的颗粒污染物能够十分明显地影响光的散射特性。此外,入射激光的波长与BRDF的值成反比,波长较短时,散射较复杂。因此,保持镜面的洁净对维护光学镜面的性能十分重要。

关键词: 散射;修正米氏理论;双向反射分布函数;镜面污染物

中图分类号:O436

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-05-0069-04

Simulation about Influence of Mirror Particulate on Laser Scattering Characteristics

SUN Teng-fei¹, CAO Zeng-hui¹, ZHENG Tian-tian¹, ZHANG Jun¹, LU Hai-bing², YUAN Xiao-dong²

(1. Institute of Science and Technology for Opto-electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China;
2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The properties of optical system are affected by laser scattering characteristics of optical mirror significantly. Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of the optical mirror is simulated and calculated by modified Mie theory. The results show that the scattering characteristics of light are affected by particulate contaminants on the surface of a mirror obviously. In addition, the wavelength of a beam of incident laser is inversely proportional to BRDF value and scattering will become very complicated as the wavelength is shorter. Keeping the surface of optical mirror clean is very important for maintaining the properties of optical mirror.

Key words: scattering; modified Mie theory; bidirectional reflectance distribution function (BRDF); mirror contaminant

光学镜面作为光学系统的重要元件之一,它的散射特性具有十分重要的意义。为了满足实际工作的需要,常常将光学系统放置在复杂的外界环境中。悬浮于空气中的污染颗粒附着在光学镜面上,使镜面产生不同的污染水平,成为镜面散射的重要来源。光学镜面的散射特性可以用双向反射分布函数(BRDF)来描述。国内外学者已经在多个领域从理论和实验两方面研究了多种材料表面的双向反射分布函数^[1-10]。研究表明,光学镜面的污染颗粒能够十分显著地影响光学镜面的双向反射分布函数(BRDF)。计算研究光学镜面上颗粒物质

散射特性时,可以利用米氏散射理论^[11]来表征由空中颗粒所导致的光散射及其他电磁辐射。这一理论也适用于预测来自于沉积在光学镜面上的颗粒散射^[12-13]。通过对镜面双向反射分布函数的模拟仿真,可进一步明确镜面上的激光散射特性,以便维护光学系统的性能。

1 双向反射分布函数模型

当远处的光源照射到光学镜面上时,就会产生能量散射。这些能量散射由 Nicodemus 定义为双向

收稿日期:2013-07-19

基金项目:国家自然科学基金(60277023);山东省自然科学基金资助项目(ZR2011FM007)

作者简介:孙腾飞(1987-),男,山东淄博人,硕士研究生,主要从事激光传输特性的研究。

反射分布函数(BRDF)^[14]。美国材料试验学会标准 ASTM Standard E1392-1996《规则反射面或漫射面的光散射测量角度定义》对 BRDF 进行了准确定义:当一束光均匀投射到足够大的均匀且各向同性的材料表面上,材料表面的反射辐亮度与入射辐亮度的比值定义为 BRDF,它是关于入射角、反射角和波长的函数,如图 1 所示。图 1 给出了双向反射分布函数的几何模型。

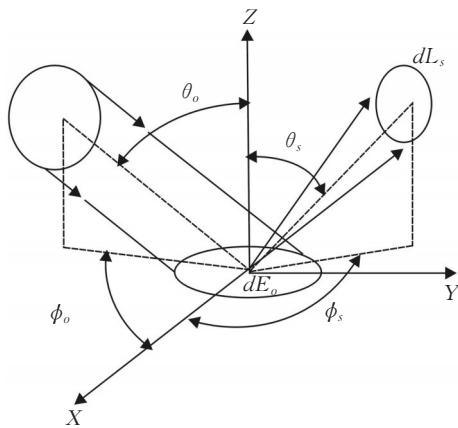


图1 BRDF 散射几何模型

BRDF 被定义为

$$BRDF(\theta_o, \phi_o; \theta_s, \phi_s) = \frac{dL_s(\theta_s, \phi_s)}{dE_o(\theta_o, \phi_o)} \quad (1)$$

式中,下标 o 代表入射量; s 代表散射量; θ 和 ϕ 为球坐标下的天顶角和方位角; $dL_s(\theta_s, \phi_s)$ 为 (θ_s, ϕ_s) 方向的散射辐亮度; $dE_o(\theta_o, \phi_o)$ 为 (θ_o, ϕ_o) 方向的入射辐照度。

BRDF 的取值在 $0 \sim \infty$ 之间变化,量纲为 sr^{-1} 。

污染镜面的散射被分成两部分,一部分来自干净镜面,而另一部分来自镜面的污染物。镜面总的 BRDF 可以被认作是这两部分散射的加和。

$$BRDF = BRDF_m + BRDF_p \quad (2)$$

式中,下标“ m ”和“ p ”分别代表干净镜面和镜面污染物的 BRDF。

其中镜面污染物引起的散射是主要的研究对象。

1.1 镜面颗粒污染物的散射

镜面污染颗粒引起的散射可由米氏散射来表述。图 2 提供了用于散射函数的几何图像。入射波沿着 z 轴方向传输,并且入射波的电矢量极化沿着 x 轴方向。在 θ, ϕ 方向上观察到了散射波。这个方

向与入射波组成了散射平面。

图 2 中, a 为散射颗粒的半径; r 为颗粒到观测点的径向距离

$$BRDF_p = \frac{\lambda^2 D}{4\pi^2 \cos \theta_r} i_1 \quad (3)$$

式中, i_1 为米氏强度函数, D 为镜面上的颗粒密度, θ_r 在散射平面($Y-Z$,图 2)内并且以镜面法线为参考。

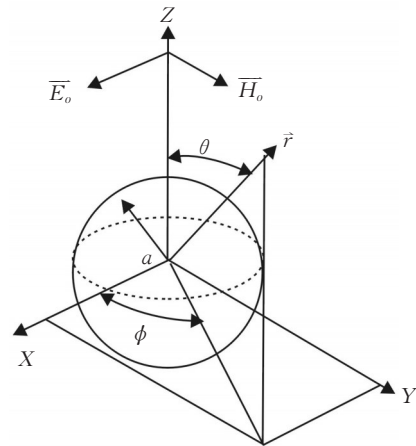


图2 颗粒散射几何模型

1.2 镜面洁净度

光学镜面的污染程度常常用表面“洁净度”来表示。一般采用 MIL-STD-1246C 等标准来进行物体表面微粒分布的近似描述^[15]

$$\lg N_a = 0.926 \left[(\lg X_1)^2 - (\log X)^2 \right] \quad (4)$$

式中, N_a 为每平方英尺中直径大于或者是等于 X (微米量级)的污染颗粒数目; X_1 为表面洁净度。

为了便于研究分析,计算时假定:(1)所有污染微粒在镜面上均匀分布;(2)所有污染微粒互不重叠,微粒之间的间隔大于微粒半径的 3 倍。

2 模拟仿真结果

根据 MIL-STD-1246C 等标准,光学镜面的洁净度为 200 时镜面上主要尺寸颗粒污染物的大致分布情况如表 1 所示。

利用 Matlab 软件进行模拟,假设相应的镜面为 320×320 (相对于颗粒尺寸),所有颗粒均随机地落在镜面上,没有落在镜外的颗粒。图 3 为镜面洁净度为 200 时,颗粒污染物随机沉降在光学镜面上时的大致

分布情形。

表1 洁净度为200时颗粒分布情况

洁净度	颗粒尺寸/ μm	颗粒数/ (ft^{-2})
200	15	4 189
	25	1 240
	50	170
	100	16
	200	1.0

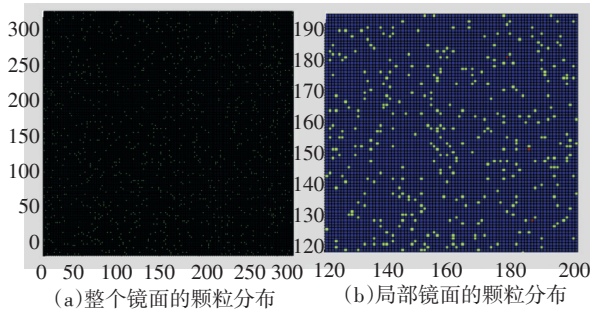


图3 镜面洁净度为200时,颗粒污染物分布

图4为入射激光垂直入射到光学镜面上时,整个镜面上各处的单个颗粒污染物引起的BRDF分布情形。由于颗粒随机分布在镜面上,故镜面上BRDF的分布非常复杂。此外,镜面上各处随机分布的颗粒污染物的尺寸各不相同,而且小尺寸颗粒的数量明显多于大尺寸的颗粒,因而镜面上较大的BRDF分布较少,较小的BRDF分布较多。

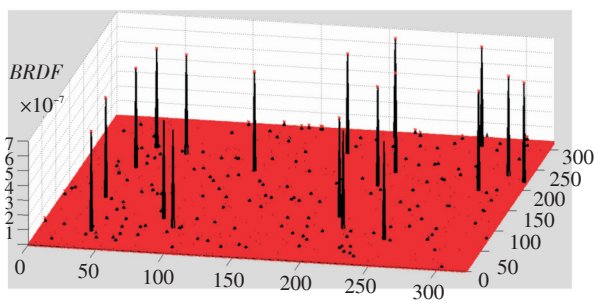


图4 入射光垂直入射时,镜面上各处的BRDF

图5为入射激光分别以 $0.6328\ \mu\text{m}$ 、 $1.053\ \mu\text{m}$ 、 $10.6\ \mu\text{m}$ 三种波长入射时,在镜面洁净度为200的光学镜面上,所有的颗粒污染物产生的BRDF总和随着散射角度变化的情况。显而易见,散射角度越大,BRDF曲线的波动越剧烈,散射越复杂。从图5中可以看出,在镜面洁净度为200的情况下,三种波长下BRDF曲线均随着散射角度的增大而逐渐衰减,但热

红外光 $10.6\ \mu\text{m}$ 的情况下衰减明显缓和。对于可见光 $0.6328\ \mu\text{m}$ 、近红外光 $1.053\ \mu\text{m}$ 这两种波长情况,散射角非常小(大约小于 5°)时,BRDF迅速衰减,衰减幅度能达到三个数量级左右,达到一定角度后,BRDF衰减明显变缓。两种波长下的BRDF值在各个散射角度下都差别不大。而对于热红外光 $10.6\ \mu\text{m}$ 的情况,整个BRDF曲线的衰减情形没有明显的变化,衰减曲线在各个散射角处的斜率大致相同。此时的BRDF值与可见光和近红外光的BRDF值有较为明显的差别。此外,随着入射波长的增大,BRDF值变小,且BRDF曲线的衰减趋势变缓,曲线的波动也越来越小,这说明波长较小时,镜面的散射情况比较复杂。由上述可见,镜面上的颗粒污染物对激光的散射特性有明显的影

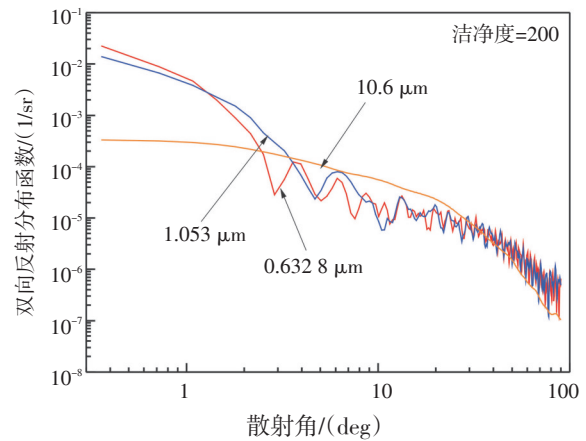


图5 洁净度为200时,不同波长下的镜面BRDF

3 结论

通过对光学镜面洁净度为200的情形进行模拟仿真,进一步明确了光学镜面上激光的散射情况,镜面上的颗粒污染物对镜面上激光的散射特性具有十分重要的影响。在维护光学系统性能方面,在光学镜面已经确定的情况下,要十分注重光学镜面的清洁工作。改进、发展新的清洁技术及方法,尽可能地清除镜面上的污染物,降低镜面的污染程度。

参考文献

- [1] 柳丹,赵永强,陈超,等. 土壤偏振光谱二向反射影响研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 293-298.
- [2] 肖静,张彬,姚秀文,等. 镜面污染对红外光学系统杂散辐射性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 402-407.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Spyak P R, Wolfe W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part3: theory and experiment for dust and $\lambda=10.6\ \mu\text{m}$ [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(8): 1764-1774.
- [6] 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.
- [7] 谢鸣,李颖,穆猷,等. 复合材料表面双向反射分布函数实验研究[J]. *材料科学与工艺*, 2007, 15(6): 819-822.
- [8] Renhorn G E I, Boreman D G. Analytical fitting model for rough-surface BRDF [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 12892-12898.
- [9] Mcguire A F, Hapke B W. An experimental study of light scattering by large irregular particles [J]. *Icarus*, 1995, 113(1): 134-155.
- [10] 王安祥,张涵璐,吴振森,等. 目标表面可见光谱BRDF的实验测量及优化建模[J]. *光学技术*, 2008, 34(5): 655-658.
- [11] Kerker M. The scattering of light and other electromagnetic radiation[M]. Academic Press, New York, 1969.
- [12] Yong R P. Low-scatter degradation by particle contamination[J]. *Optical Engineering*, 1976, 16(6).
- [13] Yong R P. Mirror scatter degradation by particulate contamination[C]//SPIE, 1990, 1329: 246-254.
- [14] Nicodemus F E. Directional reflectance and emissivity of opaque surfaces[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(7): 867-871.
- [15] Military Standard 1246C, Product cleanliness levels and contamination control program[S]. US: Department of Defense, 1994.

《光电技术应用》期刊简介

《光电技术应用》期刊是中国电子科技集团公司主管,东北电子技术研究所主办,公开发行的学术性中文科技期刊。

《光电技术应用》期刊以光电系统技术为主要专业特色,传播光电子技术、光电系统应用技术专业领域的先进科技信息,报道新型科技成果,推动工程技术交流,促进行业科技进步与发展。

《光电技术应用》秉承“科学严谨,求实创新,服务读者,促进发展”的办刊方针,竭诚为国内光电系统技术研究、教学、开发及其应用领域的广大科研人员、工程技术人员、科技管理人员、高等院校师生等读者服务。特色栏目包括:综述,光电系统技术,光学设计技术,红外技术,激光技术,光电探测技术,光电器件与材料,信号与信息处理,电路与控制,测试、试验与仿真技术等。

期刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊、波兰《哥白尼索引》收录期刊。竭诚欢迎广大读者踊跃投稿。