

光学镜面污染对激光传输特性的影响

孙腾飞¹, 张 骏¹, 吕海兵², 袁晓东², 曹增辉¹, 郑田甜¹

(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: 光学镜面的散射对光学系统的性能有十分重要的影响。选用可见光 0.632 8 μm 、近红外光 1.053 μm 和热红外光 10.6 μm 三种激光波长, 利用修正的米氏理论和光学表面的双向反射分布函数(BRDF)研究光学镜面在不同污染条件下激光的传输特性。研究结果表明: 当镜面粗糙度远远小于入射光波长($\sigma \ll \lambda$)时, 干净镜面的散射强度与 σ 成正比, 与 λ 成反比。污染镜面散射强度与污染颗粒的尺寸和数量有关, 颗粒分布越复杂, 散射越显著。另外, 波长越短, BRDF 越大, 散射越复杂。

关键词: 散射; 双向反射分布函数; 修正米氏理论; 颗粒污染镜面

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1444-05

Influence of optical mirror surface contaminants on laser transmission characteristics

Sun Tengfei¹, Zhang Jun¹, Lv Haibing², Yuan Xiaodong², Cao Zenghui¹, Zheng Tiantian¹

(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: Scattering of optical mirror surface makes a very important impact on properties of optical system. Laser transmission characteristics with different pollution conditions on optical mirror surface had been researched by using modified Mie theory and Bidirectional Reflectance Distribution Function(BRDF) of optical mirror surface, under three laser wavelengths of the visible light 0.632 8 μm , near infrared light 1.053 μm and thermal infrared light 10.6 μm . The results show that if mirror surface roughness is much smaller than the incident wavelength ($\sigma \ll \lambda$), scattering magnitude of clean mirror surface is proportional to σ and inversely proportional to λ . Scattering magnitude of particulate-contaminated mirror surface relates to size and quantities of particles on the mirror surface. The more complex particles distribute, the more significant scattering will be. In addition, when wavelength is shorter, BRDF will be greater, and scattering becomes very complicated.

Key words: scattering; Bidirectional Reflectance Distribution Function(BRDF); modified Mie theory; particulate-contaminated mirror surface

收稿日期: 2013-09-05; 修订日期: 2013-10-10

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

作者简介: 孙腾飞(1987-), 男, 硕士生, 主要从事激光传输特性方面的研究。Email: stf19871213@163.com

导师简介: 张骏(1965-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光电信息获取与处理方面的研究。Email: jzhang@ytu.edu.cn

0 引言

采用双向反射分布函数(BRDF)来描述目标的空间散射分布特性和光谱特性,可广泛用于航天遥感、地理信息、海洋开发、自然灾害检测、气候研究、军工信息等领域。国内外学者从理论和实验两方面对双向反射分布函数进行了大量的研究,分析了多种材料表面的双向反射分布函数^[1-6]。

光学应用系统要求光学元件要有尽可能低的散射,光学元件表面污染可对光学系统产生较大的影响^[7-8]。这对于光学元件的制造及清洁提出了更高的要求,因此这项研究工作长期以来一直处在领域研究的前沿。研究表明,沉积在光学镜面上的颗粒污染物能够十分显著的影响光学镜面的双向反射分布函数(BRDF)。计算研究物质散射特性时,可以利用米氏散射理论^[9]来表征由空中颗粒所导致的光散射及其他电磁辐射。这一理论也适应用在预测来自于沉积在光学镜面上的颗粒散射^[10],可用人造污染物污染镜面来模拟镜面的灰尘污染^[10]。

文中用 BRDF 来研究光学镜面颗粒污染的散射特性。利用 BRDF 来研究光学镜面散射特性只取决于材料表面本身的特性,而和其他测量因素无关。模拟计算时需作如下假定:(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。

1 散射理论

光学镜面的能量散射由 Nicodemus^[11]定义为双向反射分布函数 (BRDF)。远处光源照射光学镜面时,其 BRDF 被定义为:

$$BRDF = dN_r / dH_i \quad (1)$$

式中: N_r 为光学镜面反射的辐射量; H_i 为入射到镜面上的辐照度。

污染镜面的散射可分成两部分,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之和。

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

式中:下标“m”和“p”分别代表干净镜面和镜面污染物的 BRDF。

1.1 干净镜面的散射

光入射到光学镜面后,如果光学镜面绝对光滑,

那么再辐射就仅仅发生在镜面反射的方向上。但是,每一镜面都具有或大或小的粗糙度,粗糙度的存在导致了入射光产生的再辐射的一部分发生在了非镜面散射的方向上。

对于干净镜面,如果 $\sigma \ll \lambda$,那么镜面的 BRDF 为:

$$BRDF_m = \frac{k^4 \sigma^2}{\pi^2} g\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta - \beta_0}{\lambda}\right) \quad (3)$$

干净镜面的 BRDF 还可以用下面的经验公式来表示:

$$BRDF_m = \frac{2}{\pi} \frac{k^4 \sigma^2 l^2}{1 + [kl(\beta - \beta_0)]^2} \quad (4)$$

上述公式(3)和公式(4)中相应的参量分别为: θ_0 为入射极角; θ_s 为散射极角; ϕ_s 为散射方位角; l 为自相关长度; σ 为有效表面粗糙度; $k = 2\pi/\lambda$ 为波矢, λ 为波长; $\alpha = \sin\phi_s$ 为 x 轴向上的方向余弦; $\beta = \sin\theta_s$ 为 y 轴向上的方向余弦; $\beta_0 = \sin\theta_0$ 为入射角的方向余弦; $\sigma^2 g(\alpha/\lambda, (\beta - \beta_0)/\lambda)$ 为镜面的功率谱。

1.2 镜面颗粒污染物的散射

颗粒污染引起镜面散射的大小可由米氏散射来描述。当单色平面极化波照射到任意尺寸的各向同性同质球时引起了米氏散射^[9]。图 1 给出了用于散射模型的几何图像: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。 a 为散射颗粒的半径; r 为颗粒到观测点的径向距离。

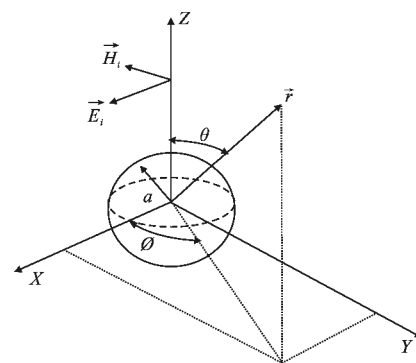


图 1 颗粒散射的几何模型

Fig.1 Geometry for particle scattering

散射的辐射强度能够被定义为两种情况:

$$I_{\phi} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 \sin^2 \phi \quad (5)$$

及

$$I_{\theta} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_2 \cos^2 \phi \quad (6)$$

这里 i_1 和 i_2 为强度函数。由米氏理论可知：

$$i_1 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right|^2 \quad (7)$$

$$i_2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \right|^2 \quad (8)$$

上述公式(7)和公式(8)中, a_n 与 b_n 为米氏散射系数, 它们是散射颗粒介质折射率和颗粒尺寸参量 x ($x=2\pi a/\lambda$) 的函数, 可以用半整数阶贝塞尔函数和第二类汉开尔函数表示; π_n 与 τ_n 为与散射极角 θ_s 有关的综合勒让德函数, 详细的表示方法见参考文献[12]。

如果 Y-Z 平面变成散射平面, 则 $\phi=90^\circ$, 此时:

$$I_{\phi} = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} i_1 \quad (9)$$

及

$$I_{\theta} = 0 \quad (10)$$

公式(9)定义了来自自由空间由极化辐射照射的球状颗粒的散射能量。假设上述公式可以预测镜面上的颗粒散射, 并且散射到前向方向上并由镜面反射的辐射不被存在的颗粒所影响。为了获取颗粒散射(定义在公式(2)中的 $BRDF_p$), $BRDF$ 被重新定义为:

$$BRDF_p = \frac{\lambda^2 D}{4\pi^2 \cos \theta_r} i_1 \quad (11)$$

式中: D 为镜面上的颗粒密度; θ_r 在散射平面(Y-Z, 图 1)内并且以镜面法线为参考。

2 结果及分析

2.1 干净镜面

图 2 给出了 $\sigma \ll \lambda$ 时, 干净镜面的 $BRDF$ 在指定的参数下随角度变化的情况。图 2(a)给出了三种激光波长 $0.6328 \mu\text{m}$ 、 $1.053 \mu\text{m}$ 和 $10.6 \mu\text{m}$ 照射在镜面上时, 镜面的 $BRDF$ 随角度的变化情况。计算结果显示: 波长越长, $BRDF$ 越小; 随着 $|\theta_s - \theta_i|$ 增大, $BRDF$ 变小, 波长越大, $BRDF$ 的衰减幅度逐渐减小, $10.6 \mu\text{m}$ 波长下的 $BRDF$ 衰减幅度最小。图 2(b)给出了不同镜面粗糙度 0.1 nm , 0.5 nm 和 1 nm 情况下, 镜面 $BRDF$ 随角度的变化。图中显示镜面越粗糙, $BRDF$ 越大, 且三种情况下的 $BRDF$ 曲线走势相同。当 $|\theta_s - \theta_i|$ 小于 1° 时, 镜面的 $BRDF$ 变化曲线平缓; 当 $|\theta_s - \theta_i|$ 大于 1° , $BRDF$ 迅速衰减, 三种情形下衰减曲线的趋势相同。

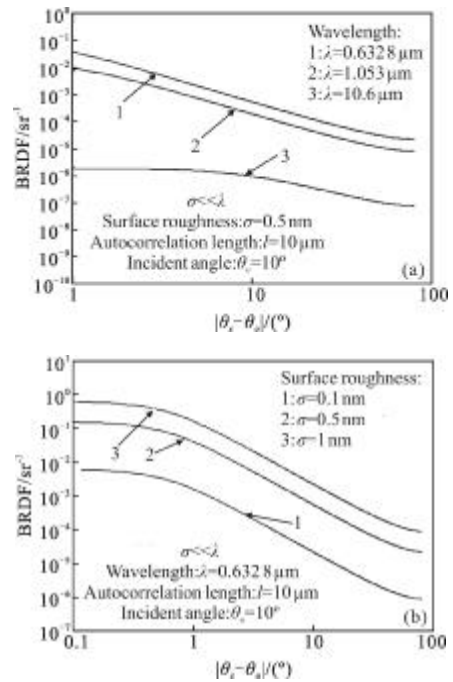


图 2 $\sigma \ll \lambda$, 干净镜面的 $BRDF$ 在指定的参数下随角度变化情况

Fig.2 $\sigma \ll \lambda$, $BRDF$ of clean mirror surface varies as angle with specified parameters

2.2 颗粒污染镜面

将干净镜面长时间暴露在室内, 灰尘自由随意的落在镜面上, 假设镜面上污染颗粒的分布情况为表 1 与表 2 中记录的情形。

表 1 样品(a)颗粒尺寸分布

Tab.1 Particle size distribution of sample(a)

Particle size/ μm	Quantity/ cm^2	
	Situation 1	Situation 2
1.1	480	1 000
2.2	450	785
3.3	100	160
5.5	87	80
8.3	14	148
11.0	17	39
13.8	3	40
16.5	4	9
19.3	5	20
22.0	6	7
27.5	3	22
33.0	5	15
38.6	1	8
44.1	2	7
55.1	5	4
66.1	1	1
77.1	1	5
82.6	1	2

表 2 样品(b)颗粒尺寸分布

Tab.2 Particle size distribution of sample(b)

Average particle diameter/ μm	Quantity/ cm^2	
	Situation 1	Situation 2
9.0	659	659
14.1	57	57
21.8	12	12
34.5	3	3
56.0	1	1
Large particles (112.0)	None	2

表 1 为样品(a)镜面的两种不同情况。两种情况下颗粒尺寸相同,但颗粒数量不同,情况 2 下的颗粒数量要明显多于情况 1 下的颗粒数量。表 2 为样品(b)镜面的两种不同情况。两种情况下小颗粒的尺寸及相应的颗粒数量均相同,但大颗粒的情况不同:情况 1 下镜面上不存在大尺寸颗粒,而情况 2 下镜面上存在大尺寸颗粒。

当入射光的波长分别为 $0.6328 \mu\text{m}$, $1.053 \mu\text{m}$, $10.6 \mu\text{m}$ 时,它们所对应的颗粒的复折射率分别为 $1.5+0.000001 \cdot i$, $1.5+0.0001 \cdot i$, $0.8+0.005 \cdot i$ 。

图 3 为样品(a)的 BRDF 情况。显然,镜面上的颗粒数量越大,BRDF 值就越大。三种波长下的 BRDF 曲线变化趋势相同,BRDF 值的大致范围相同,但曲线的波动情况不同。波长越长,BRDF 曲线越平滑,这说明小波长情形下,镜面的散射情况比较复杂。

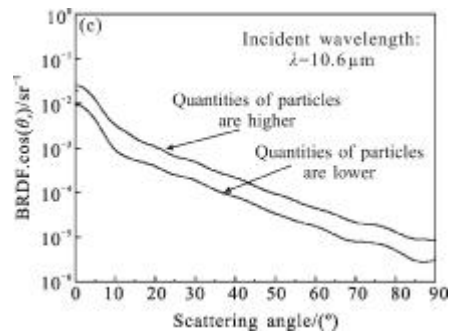
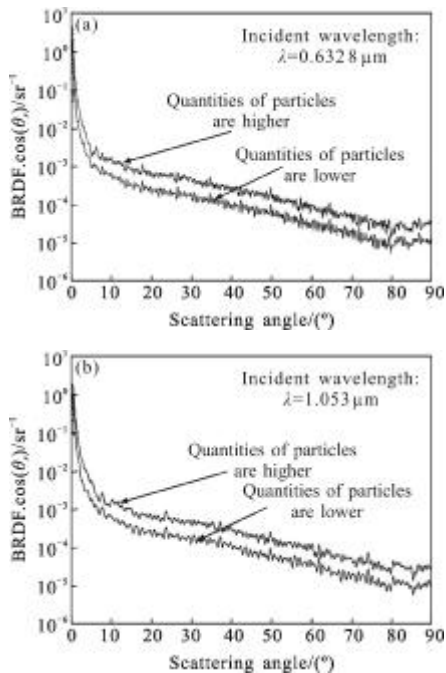


图 3 不同波长下样品(a)BRDF 的比较

Fig.3 Comparison between BRDF of different wavelengths for sample(a)

图 4 为样品(b)的 BRDF 情况。三种波长下的 BRDF 曲线大致走势相同,BRDF 值的大致范围相同,但曲线的波动情况不同。波长越长,BRDF 曲线越平滑。在存在大颗粒的情形下,BRDF 曲线走势与没有大颗粒的情形下走势相同,但是 BRDF 曲线的波动变的十分的明显,这说明大颗粒污染物的存在对镜面的散射产生了十分明显的影响。

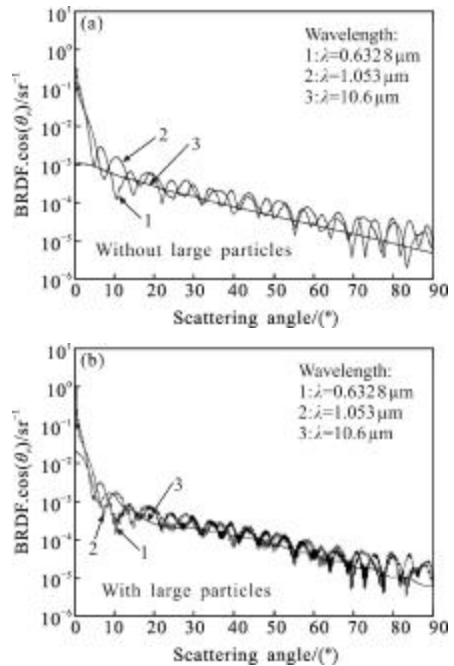


图 4 不同颗粒尺寸下样品(b)BRDF 的比较

Fig.4 Comparison between BRDF of different particle size for sample(b)

3 结论

光学镜面的粗糙度及镜面上污染颗粒的数量与尺寸均能够显著地影响光的散射特性。在镜面的制

作加工过程中,要尽可能的降低镜面的粗糙度。而在清洁镜面时,要尽可能的降低镜面上的颗粒数量并及时的清除大尺寸的污染颗粒。

参考文献:

- [1] Renhorn G E I, Boreman D G. Analytical fitting model for rough-surface BRDF [J]. *Optics Express*, 2008, 16 (2): 12892-12898.
- [2] Mcguire A F, Hapke B W. An experimental study of light scattering by large irregular particles[J]. *Icarus*, 1995, 113(1): 134-155.
- [3] Spyak P R, Wolfe W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 1: theory and experiment for polystyrene spheres and [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[J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(8): 1757-1763.
- [5] Spyak P R, Wolfe W L. Scattering from particulate-contaminated mirrors. Part 3: theory and experiment for dust and[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] Xiao Jing, Zhang Bin, Yao Xiuwen. Influence of contaminated mirror on the stray radiation performance of infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 402-407. (in Chinese)
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.
- [8] Xiao Jing, Zhang Bin. Influence of the optical components contamination on the signal to noise ratio in infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1010-1016. (in Chinese)
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.
- [9] Kerker M. *The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation*[M]. New York: Academic Press, 1969.
- [10] Yong R P. Low-scatter degradation by particle contamination [J]. *Optical Engineering*, 1976, 15(6): 516-520.
- [11] Nicodemus F E. Directional reflectance and emissivity of opaque surfaces[J]. *Applied Optics*, 1964, 3(7): 867-871.
- [12] Bohren C F, Huffman D R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.