

铝高反射镜表面球状微粒散射的单层薄膜调控特性

杨伟荣, 潘永强*, 刘欢, 郑志奇, 李栋, 周泽林

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 为了降低金属高反射薄膜表面微粒污染物的光学散射,分析了金属铝膜表面不同厚度的 SiO_2 保护层薄膜上半径为 100 nm 的球状微粒污染物球心处的电场强度,取电场强度极小值点对应的 SiO_2 薄膜的物理厚度 125 nm 作为 SiO_2 薄膜的优化厚度,理论计算了当波长为 632.8 nm 的光束正入射时,镀有优化 SiO_2 保护层的铝膜表面的双向反射分布函数(BRDF)。研究结果显示,在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 散射角内,与不镀保护层相比,优化后膜层表面污染物的散射得到了显著降低,在反射光传输方向上,镀制保护层前后 $B_R \times \cos \theta_s$ (B_R 为双向反射分布函数, θ_s 为散射角) 分别为 0.00855 和 0.00048。计算了原始膜系与优化膜系表面污染物的总散射损耗,分别为 0.018609 和 6.09264×10^{-4} ,优化膜系使得表面微粒的总散射降低了 96.73%。最后实验镀制了四种薄膜设计,测量了相同污染条件下四种膜系表面的污染物散射情况,证实了优化 SiO_2 薄膜保护层可降低微粒污染物散射。

关键词 薄膜; 光学薄膜; 光散射; 薄膜散射; 双向反射分布函数

中图分类号 O484

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1803101

1 引言

对于高精密光学薄膜器件,光学表面的散射问题越来越受到关注。当光束入射到光学表面上时,光学表面上的颗粒会使入射光发生散射,散射光偏离镜面反射方向,造成系统有效光信号的损失^[1]。同时,散射光通过光学系统到达探测器表面,引起光学系统杂散光的增加,使得噪声对信号的影响不可忽略,降低了光学系统的检测灵敏度^[2-5]。在激光系统中,即使十分微弱的光散射量也会影响薄膜的热吸收水平,进而影响薄膜的激光损伤阈值^[6]。在反射式天文望远镜系统中,光学元件表面的污染物会降低器件的光学性能,甚至会导致光学器件彻底无法使用^[7]。

研究者从 20 世纪 60 年代开始就投入大量精力研究光学镜面污染物的散射问题。Young^[8]利用 Mie 散射理论分析了球形粒子对光学表面散射特性的影响,计算了球形粒子的米氏系数和米氏强度函数,推导出微粒污染镜面的双向反射分布函数(BRDF)表达式,并收集了铝镜表面的颗粒污染物,对不同波长光入射后的污染物散射值进行了分析。美国航空航天局(NASA)为了研究空间环境污染对光学薄膜器件性能的影响,不仅在地面上进行了大量的模拟实验,同时还进行了大量的空间暴露实验,用来分析薄膜器件表面污染物对空间光学系统的性能稳定性和使用寿命的影响^[9-12]。该项研究还发现,在宇宙射线、原子氧的作用

下,薄膜高反镜表面上的污染物呈液滴状,主要成分为 SiO_2 和硅酮。Williams 等^[13]设计了一种测量光学表面散射量的装置,分析了 SiC 反射镜表面颗粒污染物在不同散射角方向上的 BRDF,发现随着光学表面暴露时间的增加,污染物在各个散射角方向上的 BRDF 值逐渐增大。潘永强^[14-18]课题组围绕光学薄膜表面的光散射问题进行了大量研究,不仅分析了光学薄膜表面散射的产生与散射量的大小,还针对不同类型的光学薄膜表面的散射问题提出了有效的减散射薄膜设计方法与光学薄膜镀制工艺。刘冬梅、罗云峰等^[19]研究了 1064 nm 带通滤光片的光散射特性,采用 TiO_2 与 SiO_2 两种膜料研究了氧分压对制备的薄膜表面粗糙度的影响,分析发现,相同氧分压下制备的膜层表面光滑。巩蕾^[20]提出了多体缺陷散射的概念,建立了微粗糙光学表面与掩埋多体缺陷粒子复合模型,基于时域有限差分/时域多分辨(FDTD/MRTD)混合方法研究了单、双气泡微粒和微粗糙光学表面的复合散射。

目前,大多数研究专注于光学表面污染物散射的理论模型建立与污染物散射量值的测试,而关于降低光学表面污染物散射的方法研究较少,常用的方法主要是保持光学表面的清洁,减少光学表面污染物。然而,不恰当的清洁可能会损伤光学表面,增加额外的光散射,同时增加环境污染控制的成本。在光学薄膜蒸镀工艺中,膜料微粒随膜料分子一起被蒸镀到基材表

收稿日期: 2021-11-18; 修回日期: 2021-12-31; 录用日期: 2022-02-15

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS054)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2018JM6031)

通信作者: *pyq_867@163.com

面,在基材表面上形成点状凸起,导致光学元件表面散射增大。此种情况下的表面微粒散射是无法通过清洁与环境保持消除的。

本文通过优化设计金属高反射铝膜表面 SiO₂ 保护层薄膜的厚度来调控光学表面上半径为 100 nm 的球状微粒污染物球心处的电场强度,采用 Bobbert-Vliieger(B-V)模型^[21]分析了不同厚度 SiO₂ 薄膜表面微粒污染物的散射值,最后实验比较了镀制 SiO₂ 优化膜层的 Al 膜表面与不镀保护层的 Al 膜表面的散射量。

2 光学薄膜散射原理

当强度为 I_i 的光入射到薄膜表面上时,散射光在 $d\Omega$ 立体角内的光强分布(I_s)满足

$$B_R \cdot \cos \theta_s = \frac{1}{I_i} \left(\frac{dI_s}{d\Omega} \right), \quad (1)$$

式中: B_R 为双向反射分布函数; θ_s 为散射角。

图 1 为 BRDF 中散射光空间关系示意图,其中 θ_i 为入射角, θ_r 为反射角, I_r 为反射光强, φ_s 为散射方位角。研究光学薄膜表面的光散射时,需要考虑干涉效应,其双向反射分布函数^[22]可表示为

$$B_R \times \cos \theta_s = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^N F_i F_j^* P_{ij}(f_x, f_y), \quad (2)$$

式中:功率谱密度 P_{ij} 描述第 i 个界面与第 j 个界面之间的粗糙度相关性; F_j 是第 j 个界面的光学因子; N 是薄膜层数; f_x 、 f_y 是薄膜表面 x 、 y 方向上的空间波数。假设多层膜中所有界面有相同的功率谱密度(PSD),则 $B_R \times \cos \theta_s$ 完全取决于光学因子。

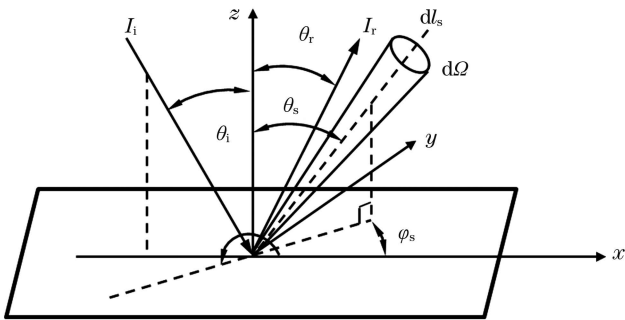


图 1 BRDF 中的空间关系示意图

Fig. 1 Schematic of space relationship in BRDF

光学因子与入射光波长、入射角、膜层折射率、膜层厚度等有关:

$$F_j = (\epsilon_j - \epsilon_{j-1}) E(z_j, \theta_i) E(z_j, \theta_s), \quad (3)$$

式中: ϵ_j 和 ϵ_{j-1} 分别是第 j 层和第 $j-1$ 层层层材料的介电常数; $E(z_j, \theta_i)$ 是入射场第 j 层界面的电场振幅; $E(z_j, \theta_s)$ 是散射场第 j 层界面的电场振幅。根据式(3)可知,利用介电常数的差值和界面处的电场强度可以调控光学因子。因此,可以通过薄膜设计来解决光学元件存在的光散射问题^[23]。

总散射损耗(S)与双向反射分布函数 B_R 之间的

关系^[24]可表示为

$$S = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_R \cdot \cos \theta_s \sin \theta_s \cdot d\theta_s. \quad (4)$$

Bobbert-Vliieger(B-V)模型^[25-26]基于米氏散射理论,用于描述光学表面球状粒子的光散射。它的适用条件是粒子半径与入射光波长接近。如图 2 所示, E_{inc} 表示入射场(包括基片入射场 E_{i1} 和粒子入射场 E_{i2}), E^{IR} 表示被基片表面反射的反射场, E_s 表示总散射场。总散射场为粒子直接的散射场 E_{S1} 与 E_{SR} (入射光在粒子内部产生的散射场)经基片反射后的散射场 E_{S2} 的和。

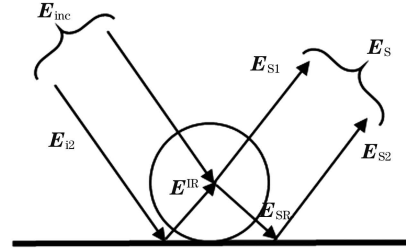


图 2 光学表面上粒子散射示意图

Fig. 2 Schematic of particle scattering on optical surface

根据 T 矩阵理论引入矩阵 A ,即引入一个散射传输矩阵,此矩阵只与粒子的大小、形状、折射率及空间取向有关,而与入射场和散射场无关。因此,只要粒子给定,无论入射场和散射场如何变化,只需计算一次粒子的散射传输矩阵。矩阵 A 反映的是基片的散射特性。

根据经典 Mie 理论,引入矩阵 B 。此理论的粒子有效尺寸为波长量级。矩阵 B 反映的是粒子的散射特性。

$$E_{SR} = A \cdot E_s, \quad (5)$$

$$E_s = B \cdot (E_{inc} + E^{IR} + E_{SR}), \quad (6)$$

结合式(5)、(6),有

$$E_s = (I - B \cdot A)^{-1} \cdot B(E_{inc} + E^{IR}), \quad (7)$$

式中: I 为单位矩阵;琼斯矩阵 S 表示光振幅散射矩阵。则

$$E_s = \frac{\exp(ikr)}{-ikr} S E_i, \quad (8)$$

式中: k 为波矢大小; r 为参考点的位置矢量大小; $S = (I - B \cdot A)^{-1} \cdot B$; $E_i = E_{inc} + E^{IR}$ 。

3 理论计算

选择球状微粒半径为 100 nm,折射率为 1.45。基底折射率为 1.52。Al 膜折射率为 1.15,消光系数为 6.75,物理厚度为 100 nm,Al 膜表面保护层 SiO₂ 薄膜的折射率为 1.46,入射光波长为 632.8 nm。计算位于光学表面粒子污染物球心处的归一化电场强度平方($|E^2/E_0^2|$)分布,结果如图 3 所示,其中 E 为微粒球心处的电场, E_0 为入射光波的电场。

可以发现,Al 膜表面单层 SiO₂ 保护层薄膜能够

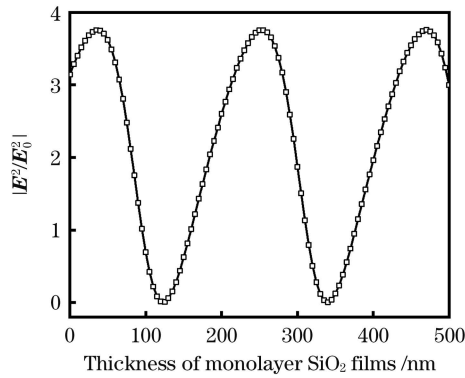


图 3 $|E^2/E_0^2|$ 随单层 SiO₂ 薄膜厚度的变化曲线

Fig. 3 $|E^2/E_0^2|$ versus thickness of monolayer SiO₂ films

有效调控粒子球心处的电场强度。随着 SiO₂ 薄膜物理厚度的增大, $|E^2/E_0^2|$ 呈周期性变化。从图 3 中还可以发现, 镀保护层后微粒球心处归一化电场强度的极大值(对应 SiO₂ 薄膜的物理厚度为 40 nm)大于不镀保护层时微粒球心的归一化电场强度, 说明在 Al 膜表面加镀 40 nm 厚的 SiO₂ 薄膜会增大半径为 100 nm 的球状微粒物球心处的电场强度。同时可以发现, 微粒球心处的归一化电场强度的极小值对应的 SiO₂ 薄膜厚度(125 nm)可以降低半径为 100 nm 的微粒污染物球心处的电场强度。因此选择 125 nm 作为 SiO₂ 薄膜的优化厚度。

图 4 所示是四种不同厚度的 SiO₂ 薄膜表面微粒污染物的双向反射分布函数。入射光波长为 632.8 nm, 光束正入射; 基底材料为 K9 玻璃, 折射率为 1.52, 消光系数为 0; Al 膜厚度为 100 nm, 折射率为 1.15, 消光系数为 6.75; Al 膜表面的保护层材料为 SiO₂, 折射率为 1.46, 消光系数为 0; 球体污染物粒子的折射率为 1.45, 消光系数为 0, 粒子半径为 100 nm。光学表面 1 μm² 面积内的球体微粒个数为 1。

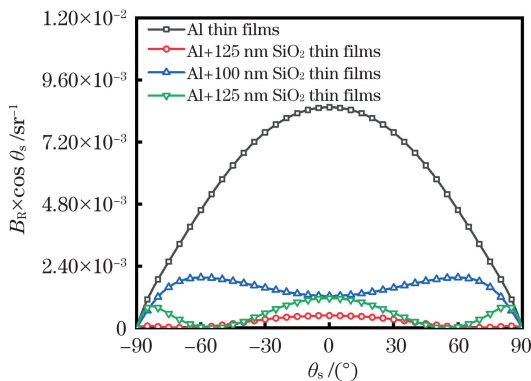


图 4 理论计算的不同二氧化硅薄膜厚度下 $B_R \times \cos \theta_s$ 随散射角变化的曲线

Fig. 4 Theoretically calculated $B_R \times \cos \theta_s$ versus θ_s under different thicknesses of SiO₂ films

从图 4 可以看出, 与 SiO₂ 物理厚度为 100, 150, 0 nm 相比, 当保护层 SiO₂ 取优化物理厚度 125 nm 时, 在 -90°~90° 的散射角范围内, $B_R \times \cos \theta_s$ 最小。

在反射光传输方向上, 不镀保护层的 Al 薄膜、镀有 125 nm 厚 SiO₂ 薄膜保护层的 Al 薄膜、镀有 100 nm 厚 SiO₂ 薄膜保护层的 Al 薄膜和镀有 150 nm 厚 SiO₂ 薄膜保护层的 Al 薄膜的 $B_R \times \cos \theta_s$ 分别为 0.00855、0.00048、0.00124、0.00115。可见优化膜层降低散射的效果十分显著。

为了分析不同物理厚度 SiO₂ 膜层表面的总散射损耗, 依据式(4)进行理论计算, 得到的光学表面上半径为 100 nm 的球状污染物的 S 随 SiO₂ 薄膜物理厚度变化的曲线如图 5 所示。

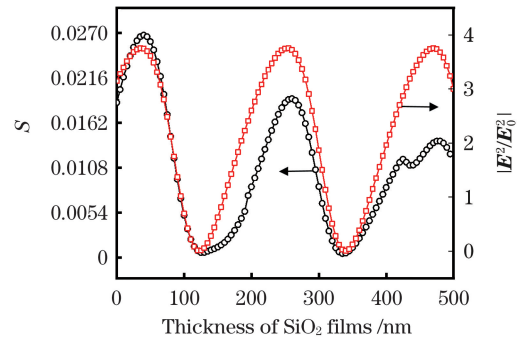


图 5 理论计算的 S 与 $|E^2/E_0^2|$ 随 SiO₂ 薄膜厚度变化的曲线

Fig. 5 Theoretically calculated S and $|E^2/E_0^2|$ versus thickness of SiO₂ films

如图 5 所示, 可以看出, 两曲线的极值点有较好的吻合。当 Al 膜表面没有保护层时, 污染物的总散射损耗为 0.018609。当 SiO₂ 薄膜厚度为 40 nm 时, 表面微粒污染物的总散射损耗达到极大值, 为 0.02673。可见不恰当厚度的保护层会使表面微粒污染物的散射增大。当 SiO₂ 保护层薄膜的物理厚度为 125 nm 时, 微粒污染物的总散射损耗为 6.09264×10^{-4} , 比 Al 膜表面不镀保护层时污染物的总散射损耗降低了 96.73%, 比保护层厚度为 40 nm 时表面微粒污染物的光散射损耗降低了 97.72%。

4 实验验证

选用直径为 20 mm、厚度为 2 mm 的超光滑 K9 玻璃基底来验证理论仿真的正确性。采用热蒸发技术进行镀膜, 实验中使用的是成都兴南科技有限责任公司生产的 ZZS800 型真空镀膜机, 镀膜前真空腔内本底真空度为 5.0×10^{-3} Pa。基片温度为常温, 采用考夫曼离子源进行辅助沉积, 镀膜时的工作真空度为 9.5×10^{-3} Pa。将所有基片放置在工件架的同一维度上, 首先在玻璃基底表面镀制 100 nm 厚的金属 Al 膜, 取出样品进行掩模处理, 即遮挡样品的一半, 再进行 SiO₂ 保护膜层的镀制。利用石英晶振法监控膜厚, 分别将 SiO₂ 薄膜厚度控制为 123, 98, 151 nm。使用分光光度计测试四种样品表面的反射率, 结果如图 6 所示, 当入射光波长为 632.8 nm 时, 不镀保护层的 Al 薄膜、镀有 125 nm 厚 SiO₂ 薄膜保护层的 Al 薄膜、镀有 100 nm 厚 SiO₂ 薄膜保护层的 Al 薄膜和镀有

150 nm 厚 SiO_2 薄膜保护层的 Al 薄膜的反射率分别为 90.78%、85.02%、81.98% 和 88.41%。

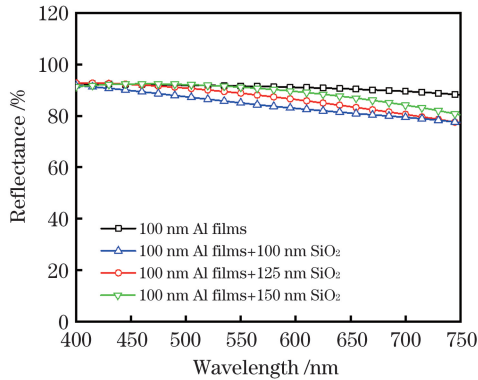


图 6 不同二氧化硅薄膜厚度下样品的反射率

Fig. 6 Reflectances of samples under different thicknesses of SiO_2 films

为了保证实际微粒污染物的大小与理论仿真微粒的大小相接近,将制备好的样品放置在千级超净室中静置 48 h,然后使用散射仪测量样片表面的双向反射分布函数,结果如图 7 所示。

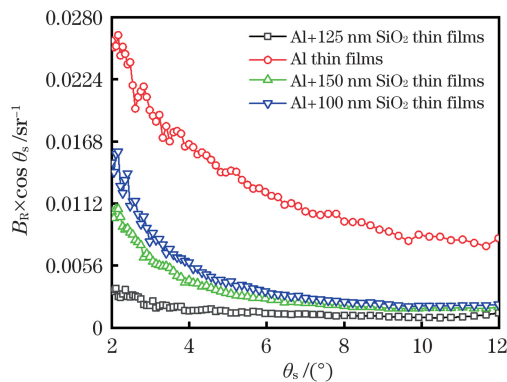


图 7 实验测得的不同二氧化硅薄膜厚度下 $B_R \times \cos \theta_s$ 随散射角变化的曲线

Fig. 7 Experimentally measured $B_R \times \cos \theta_s$ versus θ_s under different thicknesses of SiO_2 films

从图 7 中可以看出,随着散射角的增大,薄膜表面污染物的 $B_R \times \cos \theta_s$ 逐渐减小。与理论计算结果相比,实验测得的污染物微粒的散射值更大,这是因为实验样品在千级超净室中被污染。千级超净室中污染物粒子半径的统计值约为 100 nm,在样品表面上仍收集到半径大于 100 nm 的污染物微粒,半径较大粒子的存在以及单位面积(μm^2)上污染物微粒数大于 1 导致了实验测得的污染物粒子散射值大于理论仿真结果。同时,从图 7 中可以发现,在相同微粒污染条件下,Al 膜表面镀制 125,100,150 nm 厚的 SiO_2 保护膜可以有效降低污染物的散射,其中镀有 125 nm 厚 SiO_2 薄膜保护层的 Al 薄膜的减散射效果最好。

5 结 论

研究了金属高反射铝膜表面 SiO_2 保护层薄膜的厚度对光学表面上半径为 100 nm 的球状微粒污染物

球心处的电场强度的影响,结果显示,与 Al 膜表面不镀保护层相比,优化厚度的 SiO_2 薄膜保护层可以使粒子球心处的归一化电场强度的平方实现有效降低。以球状微粒污染物球心归一化电场强度平方的大小为评价指标,取该指标的极小值点对应的 SiO_2 薄膜的物理厚度 125 nm 作为 SiO_2 薄膜的优化厚度,该优化 SiO_2 厚度可显著降低光学表面半径为 100 nm 的污染物的光散射。

在镀制金属 Al 高反射镜时, SiO_2 保护层薄膜的厚度是不可忽视的物理量,它关系着金属反射镜表面散射量的大小。合适厚度的 SiO_2 保护层薄膜对于降低金属反射镜表面散射具有重要意义,不当的保护层薄膜厚度甚至会增大金属反射镜表面的散射。

参 考 文 献

- [1] 徐君. 颗粒污染光学反射镜面散射特性建模与验证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
Xu J. Modeling and verification of scattering properties of particulate-contaminated optical mirror [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [2] Tribble A, Boyadjian B, Davis J, et al. Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community—results [C] // Space Programs and Technologies Conference, September 24-26, 1996, Huntsville, AL. Virginia: AIAA Press, 1996: 4375.
- [3] 赵雪, 周彦平, 刘海刚. 空间污染对光学系统的影响分析[J]. 光学技术, 2004, 30(1): 113-115, 118.
Zhao X, Zhou Y P, Liu H G. Effect of optical system caused by space organism pollution[J]. Optical Technique, 2004, 30(1): 113-115, 118.
- [4] 马晶, 朱福南, 周彦平, 等. 星地两用光学表面污染检测装置[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1878-1883.
Ma J, Zhu F N, Zhou Y P, et al. Detection device of optical surface pollution for satellite and ground [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1878-1883.
- [5] 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.
Sun T F, Zhang J, Lü H B, et al. Influence of optical mirror surface contaminants on laser transmission characteristics [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1444-1448.
- [6] 卜铁坤, 赵丽, 郑权, 等. 高损伤阈值激光反射镜的设计方法[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 183-186, 215.
Bu Y K, Zhao L, Zheng Q, et al. Design method of high damage threshold laser mirror [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2): 183-186, 215.
- [7] 罗坤. 空间环境中污染对光学薄膜性能影响研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2015.
Luo K. Effects of contamination on performance of optical coatings for space applications [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [8] Young R P. Low-scatter mirror degradation by particle contamination[J]. Optical Engineering, 1976, 15: 516-520.
- [9] Havey K A, Mustico A W, Vallimont J F. Effects of long-term space environment exposure on optical substrates and coatings [J]. Proceedings of SPIE, 1992, 4774: 234-245.
- [10] Rantanen R, Gordon T, Finckenor M M, et al. Comparison of contamination model predictions to LDEF surface measurements [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3427: 260-271.
- [11] Zwiener J M, Kamenetzky R R, Vaughn J A, et al. Contamination observed on the Passive Optical Sample Assembly-I (POSA-I) experiment [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3427: 186-195.

- [12] Pippin H G, Finckenor M M. Measurements of optically transparent and mirrored specimens from the POSA, LDEF A0034, and EOIM-III space flight experiments[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 1761: 2-13.
- [13] Williams V L, Lockie R T. Optical contamination assessment by bidirectional reflectance-distribution function (BRDF) measurement[J]. Optical Engineering, 1979, 18(2): 182152.
- [14] 潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 光学元件亚表面缺陷偏振双向反射分布函数[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(1): 139-142.
Pan Y Q, Wu Z S, Hang L X. Polarized bidirectional reflectance distribution function by subsurface defects of optical component[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(1): 139-142.
- [15] 潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 银薄膜对光学基底表面粗糙度及光散射的影响[J]. 光子学报, 2009, 38(5): 1197-1201.
Pan Y Q, Wu Z S, Hang L X. Influence of Ag thin films on surface roughness and light scattering of optical substrate[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(5): 1197-1201.
- [16] 潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 表面上方微粒及微粗糙度偏振光散射特性[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 611-614.
Pan Y Q, Wu Z S, Hang L X. Polarized light scattering of particle above a surface and surface microroughness[J]. Optical Technique, 2009, 35(4): 611-614.
- [17] 刘金泽, 潘永强, 张达, 等. TiO₂ 薄膜表面粗糙度与散射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 033101.
Liu J Z, Pan Y Q, Zhang D, et al. Surface roughness and scattering characteristics of TiO₂ thin film [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 033101.
- [18] 潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 光学薄膜界面粗糙度互相关特性与光散射[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 916-920.
Pan Y Q, Wu Z S, Hang L X. Optical thin films interfaces roughness cross-correlated properties and light scattering [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 916-920.
- [19] 刘冬梅, 罗云峰, 付秀华, 等. 低损耗 1064 nm 带通滤光片多层膜的散射特性研究[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0903004.
Liu D M, Luo Y F, Fu X H, et al. Scattering properties of low-loss 1064 nm bandpass filter multilayer films [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0903004.
- [20] 巩蕾, 吴振森, 葛城显, 等. 微粗糙光学表面与掩埋多体粒子复合光散射特性[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1203001.
Gong L, Wu Z S, Ge C X, et al. Composite light scattering properties between slightly rough optical surface and multi-body particles[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1203001.
- [21] Bobbert P A, Vlieger J. Light scattering by a sphere on a substrate [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1986, 137(1/2): 209-242.
- [22] Trost M, Herfurth T, Schröder S, et al. Scattering reduction through oblique multilayer deposition [J]. Applied Optics, 2014, 53(4): A197-A204.
- [23] Zhang J L, Wu H, Jiao H F, et al. Reducing light scattering in high-reflection coatings through destructive interference at fully correlated interfaces[J]. Optics Letters, 2017, 42(23): 5046-5049.
- [24] 杨琛, 潘永强. 三层宽带减反射膜散射特性研究[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(1): 11-15.
Yang C, Pan Y Q. Light scattering properties of three layers broadband anti-reflective films [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(1): 11-15.
- [25] Bobbert P A, Vlieger J. Light scattering by a sphere on a substrate [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1986, 137(1/2): 209-242.
- [26] Bobbert P A, Vlieger J, Greef R. Light reflection from a substrate sparsely seeded with spheres-comparison with an ellipsometric experiment [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1986, 137(1/2): 243-257.

Regulation Characteristics of Globular Particle Scattering on Aluminum High Reflector Surface by Monolayer Film

Yang Weirong, Pan Yongqiang*, Liu Huan, Zheng Zhiqi, Li Dong, Zhou Zelin
School of Opto-Electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract

Objective For high-precision optical thin film devices, the scattering of optical surfaces has attracted widespread attention. When the beam enters the optical surface, the particles on the optical surface scatter the incident light and the scattered light deviates from the specular reflection direction, resulting in the loss of the effective optical signal of the system. Furthermore, when the scattered light reaches the detector surface through the optical system, it increases the stray light of the optical system, so that the influence of noise on the signal cannot be ignored and reduces the detection sensitivity of the optical system. In a high-energy laser system, even very weak light scattering influences the thermal absorption level and laser damage threshold of the film. In the reflective astronomical telescope system, the pollutants on the surface of optical elements reduce the optical performance of the devices and make the optical devices completely unusable.

Presently, commonly used methods for reducing the scattering of particulate pollutants on the surface of optical elements mainly require keeping the optical surface clean and reducing pollutants on the optical surface. However, improper cleaning may fail to remove pollutants from the optical surface, damage the optical surface and increase additional light scattering. Furthermore, the material cost of pollution control for the environment where the optical elements are located is also huge. In the optical thin film evaporation process, the film particles are evaporated to the substrate surface together with the film molecules, and dot protrusions are formed on the substrate surface. This results in increasing scattering on the surface of the optical element. Here, the scattering of surface particles cannot be eliminated by cleaning and environmental maintenance. From the thin film vector scattering theory, this paper reduces the scattering amount of particulate pollutants on the optical surface by optimizing the film design, which does not require

keeping the optical surface clean and can effectively reduce the frequency of optical surface cleaning to maintain the optical performance of the optical surface.

Methods This study is based on the vector scattering theory. First, we theoretically calculate the electric field intensity at the center of the spherical particle on the surface of SiO₂ film with different thicknesses on Al film surface. Second, we obtain the SiO₂ film thickness corresponding to the minimum value of electric field intensity at the spherical particle center and set it as the optimized thickness of the SiO₂ film protective layer. Then, the bidirectional reflection distribution function and total scattering loss of spherical particulate pollutants on the Al film surface without a protective layer and with an optimized SiO₂ film protective layer are analyzed. Next, we compare the scattering amount of spherical particle pollutants on the surface of aluminum film without a designed protective layer and with an optimized SiO₂ protective layer. Finally, we conduct experiments to verify the effectiveness of this method.

Results and Discussions To reduce the optical scattering of particulate pollutants on the surface of metal with highly reflective films, first, we analyze the electric field intensity at the center of spherical particulate pollutants on the surface of SiO₂ protective film with different thicknesses on the surface of the metal aluminum film (Fig. 3). Next, we take the physical thickness (125 nm) of the SiO₂ film corresponding to the minimum value of electric field intensity as the optimized thickness of SiO₂ film. Then, we theoretically calculate the bidirectional reflection distribution function (B_R) of the aluminum film coated with the optimized SiO₂ protective film when the beam is normally incident (Fig. 4). The results show that in the scattering angle of -90° – 90° , the pollutant scattering on the surface of the optimized coating is effectively reduced, and $B_R \times \cos \theta_s$ in the reflected light direction without and with the optimized coating is 0.00855 and 0.00048, respectively, where θ_s is the scattering angle. Furthermore, the total scattering losses of pollutants on the surfaces of the original and optimized membrane systems are calculated as 0.018609 and 6.09264×10^{-4} (Fig. 5), respectively, and the total scattering of particles on the surface of the optimized membrane system is reduced by 96.73%. Finally, four coatings are prepared experimentally, and the scatterings of pollutants on the surfaces of the four coatings are measured under the same pollution conditions. The results also confirm the effectiveness of the optimized SiO₂ film protection layer in reducing the scattering of particulate pollutants (Fig. 7).

Conclusions The conclusions drawn from this paper are as follows. 1) The electric field intensity of particulate pollutants can be changed by changing the thickness of the SiO₂ film protective layer on the surface of the metal Al film. Compared with that without coating on the Al film surface, the square of the normalized electric field intensity at the center of the particle is effectively reduced using the optimized thickness of the SiO₂ film protective layer. 2) Taking the square of the normalized electric field intensity at the center of the spheroidal particle pollutant as the evaluation index and the physical thickness of SiO₂ film corresponding to the minimum value of this index as the optimized thickness of SiO₂ film, the light scattering of the pollutant with radius of 100 nm can be reduced significantly. 3) When plating a metal Al high reflector, the thickness of the SiO₂ protective film is a physical quantity that cannot be ignored and is related to the scattering amount of the metal reflector surface. The appropriate thickness of the SiO₂ protective film is greatly significant to reduce the surface scattering of metal mirrors, whereas improper thickness increases the surface scattering of metal mirrors.

Key words thin films; optical films; light scattering; thin film scattering; bidirectional reflection distribution function