

光学表面粒子污染物散射的单层薄膜调控特性

杨伟荣, 潘永强*, 郑志奇

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 为了降低超精密低损耗光学元件表面粒子污染物的光散射损耗, 文中提出通过在光学表面沉积单层薄膜来调控表面场强分布, 从而降低散射损耗的方法。理论分析了 K9 玻璃超光滑光学表面不同厚度单层二氧化硅 (SiO_2) 和单层二氧化钛 (TiO_2) 薄膜表面上方半径为 100 nm 粒子污染物所在处的电场强度, 理论分析结果发现, 当 SiO_2 薄膜厚度为 137.4 nm, TiO_2 薄膜厚度为 12.3 nm 时, 表面粒子污染物所在处的电场强度最小。在此基础上分别计算了光学元件表面沉积厚度为 137.4 nm 的单层 SiO_2 薄膜以及厚度为 12.3 nm 的单层 TiO_2 薄膜, 表面粒子污染物的总散射损耗 (S) 和双向反射分布函数 (BRDF), 计算结果表明, 在波长为 632.8 nm 的光垂直入射时, 单层 SiO_2 薄膜和单层 TiO_2 薄膜可有效降低其表面粒子的 BRDF, 且可将 K9 玻璃表面的总散射分别降低 12.40% 和 25.04%。实验验证了单层 SiO_2 薄膜对于表面粒子污染物散射降低的有效性。

关键词: 光学薄膜; 光散射; 双向反射分布函数 (BRDF); 总散射损耗

中图分类号: O484 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210234

Single-layer film regulation characteristics of particle pollutant scattering from optical surfaces

Yang Weirong, Pan Yongqiang*, Zheng Zhiqi

(School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to reduce the light scattering loss of particle pollutants on the surface of ultra-precision low-loss optical elements, a method of adjusting the surface field intensity distribution by depositing a monolayer film on the optical surface was proposed. The electric field intensity of particle pollutants with a radius of 100 nm above the surface of monolayer SiO_2 and monolayer TiO_2 thin films of different thicknesses on the ultra-smooth optical surface of K9 glass was theoretically analyzed. The theoretical analysis results show that when the thickness of SiO_2 thin film is 137.4 nm and the thickness of TiO_2 thin film is 12.3 nm, the surface particle contaminant has the lowest electric field intensity. On this basis, the total scattering loss (S) and bidirectional reflection distribution function (BRDF) of particle pollutants on the surface of optical element, films for SiO_2 with a thickness of 137.4 nm and TiO_2 with a thickness of 12.3 nm were calculated respectively. The calculated results show that when the light with a wavelength of 632.8 nm is vertically incident, monolayer SiO_2 film and monolayer TiO_2 film can effectively reduce the BRDF of the surface particles, and the total scattering on the surface of K9 glass can be reduced by 12.40% and 25.04% respectively. The effectiveness of single-layer SiO_2 thin film for reducing the scattering of surface particle pollutants is verified by experiments.

收稿日期: 2021-04-11; 修订日期: 2021-07-04

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)

作者简介: 杨伟荣, 男, 硕士生, 主要研究方向为薄膜工艺与薄膜检测技术。

通讯作者: 潘永强, 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为薄膜工艺与薄膜检测技术。

Key words: optical thin film; light scattering; bidirectional reflection distribution function (BRDF); total scattering loss

0 引言

在 高 能 激 光 器 等 高 质 量 光 学 系 统 中, 光 学 元 件 的 散 射 损 耗 会 直 接 影 响 到 光 学 系 统 的 性 能。在 实 际 应 用 中, 光 学 系 统 往 往 暴 露 在 外 界 环 境 中, 而 外 界 环 境 中 的 微 粒 污 染 物 会 落 在 光 学 元 件 表 面 上, 形 成 粒 子 污 染 物, 这 些 粒 子 污 染 物 引 起 的 光 散 射 对 光 学 系 统 的 使 用 有 着 严 重 影 响^[1]。光 学 元 件 表 面 的 污 染 物 造 成 的 光 散 射 会 造 成 高 能 激 光 装 置 光 学 性 能 和 抗 损 伤 能 力 下 降^[2-4]。对 于 空 间 光 学 系 统, 太 空 中 的 尘 埃 和 系 统 本 身 结 构 材 料 的 挥 发 性 可 凝 物 都 会 使 光 学 元 件 表 面 污 染, 光 学 元 件 的 表 面 污 染 物 引 起 的 光 散 射 会 造 成 光 学 表 面 传 输 率 变 化、信 噪 比 降 低、以 及 成 像 质 量 下 降 等 问 题^[5-6]。对 于 红 外 光 学 系 统, 光 学 元 件 表 面 微 粒 污 染 物 的 存 在 将 降 低 红 外 光 学 系 统 的 探 测 性 能, 严 重 时 还 可 能 缩 短 光 学 元 件 的 使 用 寿 命^[7]。因 此, 研 究 超 精 密 光 学 元 件 表 面 污 染 物 光 散 射, 寻 找 降 低 其 光 散 射 的 途 径 显 得 非 常 必 要 且 迫 切。

国 外, 对 于 光 学 元 件 表 面 污 染 物 散 射 的 研 究 开 始 较 早, 进 行 了 大 量 的 理 论 计 算 和 实 验 研 究^[8-10]。亚 利 桑 那 大 学 光 学 科 学 中 心 的 KieNahm^[11-12] 等 人 假 设 镜 面 上 的 颗 粒 为 圆 球 状, 研 究 了 表 面 颗 粒 污 染 物 的 散 射 特 性, 利 用 米 氏 散 射 理 论 计 算 了 每 个 颗 粒 的 散 射 强 度。该 机 构 的 P.R.Spyak^[13-14] 等 人 从 偏 振 光 入 射 时 颗 粒 污 染 物 表 面 双 向 反 射 分 布 函 数 理 论 入 手, 结 合 实 验 研 究 了 可 见 和 红 外 偏 振 光 入 射 到 颗 粒 污 染 物 表 面 上 的 光 散 射 特 性。国 内, 四 川 大 学 的 黄 聪、游 兴 海^[15] 等 人 采 用 米 氏 散 射 理 论 研 究 了 光 学 元 件 表 面 Al_2O_3 粒 子 污 染 物 的 散 射 特 性, 模 拟 和 分 析 了 元 件 表 面 的 双 向 反 射 分 布 函 数 (BRDF) 随 散 射 角 的 变 化 规 律, 进 而 计 算 了 元 件 表 面 的 总 积 分 散 射 (TIS)。哈 尔 滨 工 业 大 学 的 高 萍 萍 等 人^[16] 从 理 论 和 实 验 两 方 面 研 究 了 光 学 元 件 表 面 上 方 颗 粒 灰 尘 污 染 物 和 表 面 下 方 气 泡 粒 子 两 种 表 面 缺 陷 的 散 射 问 题, 并 设 计 出 一 套 光 学 元 件 表 面 缺 陷 的 识 别 系 统。但 关 于 如 何 减 小 粒 子 污 染 物 造 成 的 散 射 影 响, 目 前 相 关 研 究 较 少, 一 般 是 通 过 尽 量 去 除 表 面 污 染 物 的 方 法 来 减 小 光 学 元 件 表 面 污 染 物 的 散 射^[17-19]。为 减 少 污 染 物 对 光 学 元 件 表 面 散 射 的 影

响, 目 前 常 用 的 两 种 方 法: 一 是 定 期 对 光 学 元 件 表 面 进 行 清 洁, 二 是 对 光 学 元 件 所 在 处 的 环 境 进 行 控 制, 防 止 污 染 物 沉 积 在 光 学 元 件 表 面, 这 两 种 方 式 存 在 着 成 本 较 高、实 现 难 度 较 大 等 问 题。

文 中 通 过 在 超 精 密 光 学 元 件 表 面 设 计 单 层 SiO_2 和 单 层 TiO_2 光 学 薄 膜, 在 保 持 环 境 参 数 (包 括 光 束 的 入 射 角、入 射 光 波 长、基 底 折 射 率、污 染 物 球 状 折 射 率 等) 不 变 的 情 况 下, 探 寻 球 状 粒 子 污 染 物 球 心 处 电 场 强 度 极 小 值 及 其 所 对 应 的 薄 膜 的 最 佳 厚 度, 理 论 分 析 了 最 佳 膜 层 厚 度 对 光 学 表 面 污 染 物 的 散 射 特 性, 并 实 验 验 证 了 单 层 SiO_2 薄 膜 的 对 光 学 元 件 表 面 污 染 物 散 射 降 低 的 有 效 性。

1 光散射基本理论及污染物散射调控模型

1.1 表面散射基本理论

双 向 反 射 分 布 函 数 散 射 光 空 间 关 系 如 图 1 所 示, 函 数 被 定 义 为 单 位 立 体 角 $\Delta\Omega$ 内 的 散 射 功 率 ΔP_s 比 入 射 功 率 P_i , 定 义 式 为:

$$BRDF \cdot \cos\theta_s = \frac{\Delta P_s(\theta_s)}{\Delta\Omega_s P_i} \quad (1)$$

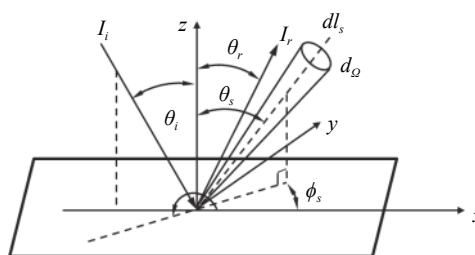


图 1 双向反射分布函数散射光空间关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of space relationship of BRDF scattering light

光 学 薄 膜 表 面 光 散 射, 需 考 虑 干 涉 效 应, 其 双 向 反 射 分 布 函 数 可 表 示 为^[20]:

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

式 中: 功 率 谱 密 度 (PSD) 描 述 了 薄 膜 界 面 粗 糙 度 ($i=j$) 以 及 多 层 薄 膜 不 同 界 面 之 间 的 粗 糙 度 相 关 性 ($i \neq j$); F_j 是 第 j 个 界 面 的 光 学 因 子。如 果 假 设 多 层 膜 中 所 有 界 面 有 相 同 的 PSD, 则 BRDF 完 全 取 决 于 光 学 因 子。

光学因子 F_j 与光照条件、观测条件、膜层折射率、膜层厚度等因素有关。由于光学因子的表达式比较广泛,这里给出了一个简单的表达式:

$$F_j = (\varepsilon_j - \varepsilon_{j-1}) E(z_j, \theta_0) E(z_j, \theta_s) \quad (3)$$

式中: ε_j 和 ε_{j-1} 是第 j 层和第 $j-1$ 层涂层材料的介电常数; $E(z_j)$ 是第 j 层界面的电场振幅; θ_0 为入射角; θ_s 为散射角。根据公式 (3) 可知,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实现减小光学元件存在的光散射问题^[21]。

光学薄膜的特征矩阵为:

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos W_j & iZ_j^{-1} \sin W_j \\ iZ_j \sin W_j & \cos W_j \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $W_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j$, 是相位差; Z 表示修正导纳, $Z_j = n_j \cos \theta_j$ (TE), $Z_j = n_j / \cos \theta_j$ (TM), θ_j 是折射角; j 表示第 j 层膜。 L 层膜的特征矩阵为:

$$M = \prod_{j=1}^L M_j = \begin{bmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由此可得:

$$E_0^+ + E_0^- = (m_{11} + im_{12}Z_s) E_s^+ \quad (6)$$

$$E_0^+ - E_0^- = \left(\frac{im_{21}}{Z_0} + \frac{m_{22}Z_s}{Z_0} \right) E_s^+ \quad (7)$$

式中: E_0^+ 和 E_0^- 分别代表入射界面的入射光和反射光的电场强度; E_s^+ 代表基底内入射光的电场强度; Z_0, Z_s 分别是入射介质和基底的修正导纳,

由公式 (6)、(7) 可得:

$$|E_0^+|^2 = 0.25 \left[\left(m_{11} + \frac{m_{22}Z_s}{Z_0} \right)^2 + \left(\frac{m_{21}}{Z_0} + m_{12}Z_s \right)^2 \right] |E_s^+|^2 \quad (8)$$

$$|E_0^-|^2 = 0.25 \left[\left(m_{11} - \frac{m_{22}Z_s}{Z_0} \right)^2 + \left(\frac{m_{21}}{Z_s} + m_{12}Z_0 \right)^2 \right] |E_s^+|^2 \quad (9)$$

第一层膜中距离薄膜入射界面下 Δz 处的逆矩阵为:

$$\begin{bmatrix} m'_{11} & m'_{12} \\ m'_{21} & m'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta U & -iZ_1^{-1} \sin \Delta U \\ -iZ_1 \sin \Delta U & \cos \Delta U \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $\Delta U = 2\pi n \Delta z \cos \theta_1 / \lambda$ 。

该点电场的平方为:

$$|E|^2 = \left[(m''_{11})^2 + (Z_s m''_{11})^2 \right] |E_s^+|^2 \quad (11)$$

其中, $\begin{bmatrix} m''_{11} & m'_{12} \\ m'_{21} & m'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{11} & im'_{12} \\ im'_{21} & m'_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} m_{11} & im_{12} \\ im_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$ 。

以此类推可求得膜内任一点处电场强度的平方。

由公式 (8)、(11) 可得电场强度平方相对值的分布为:

$$N = \frac{|E|^2}{|E_0^+|^2} \quad (12)$$

总散射损耗 (S) 与双向反射分布函数之间的关系可表示为^[22]:

$$S = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} BRDF \cdot \cos \theta_s \cdot \sin \theta_s \cdot d\theta_s \quad (13)$$

Bobbert-Vliieger(B-V) 模型基于米氏散射理论,是用来描述光学表面球状粒子的散射^[23],其适用条件为粒子半径与入射光波长相当,并且该模型也可以用来分析薄膜表面球状粒子的光散射^[24]。

1.2 粒子污染物散射模型的建立

光学元件的散射损耗主要来源于光学元件表面粗糙度、划痕、污染物等引起的表面散射以及内部缺陷等引起的体散射。文中的研究重点是降低光学元件表面污染物引起的光散射,因此,在研究中暂不考虑光学元件和光学薄膜表面粗糙度和内部缺陷等引起的光散射,同时将表面粒子污染物等效为球状粒子。

当光在薄膜内部传播时,入射光和反射光会因为干涉效应在光学薄膜内部形成驻波场,而此驻波场分布可通过在光学元件表面设计光学薄膜来进行调控。因此,可通过在光学元件表面设计单层光学薄膜来实现对光学元件表面上方粒子污染物球心处的驻波场场强进行调控,当粒子球心处电场强度最小时,依据公式 (2) 和 (3) 可知,此时可获得最小的粒子散射损耗。其物理模型如图 2 所示。

如图 2 所示,光学表面上各种球体表示大小不一的粒子污染物。左侧为光学元件表面上存在粒子污

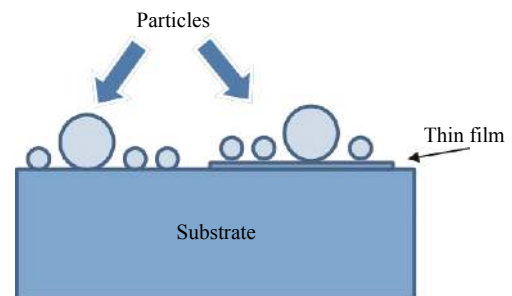


图 2 光学表面具有污染物粒子的物理模型

Fig.2 Physical model of pollutant particles on optical surface

染物时的情况,当入射光束照射在粒子污染物上时,由于表面粒子污染物的存在,会引起一定的光散射损耗。右侧为镀有单层光学薄膜的光学表面,其表面存在与左侧 K9 玻璃基底相同的表面粒子污染物。

为了有效调控污染物粒子球心处的电场强度,笔者选用高折射率 TiO₂ 和低折射率的 SiO₂ 分别作为膜层材料,以 K9 玻璃为基底,分别设计两种不同折射率的单层光学薄膜,通过调整和优化单层薄膜的厚度进而调控粒子污染物所在处的电场强度。为了保证粒子污染物所处电场极小值对应的薄膜厚度的准确性,需要粒子的大小尽可能在入射光波长的二分之一之内,即小于 316.4 nm($\lambda=632.8$ nm),文中选择半径为 100 nm 的球状粒子污染物作为理论分析对象,该尺寸也是千级超净环境下粒子污染物半径的统计值。

图 3 中,入射光波长 $\lambda=632.8$ nm,在 K9 玻璃基底上设计单层光学薄膜,球状粒子污染物位于薄膜的上表面,且球状底部与薄膜表面的距离为 0。图中不同曲线分别表示半径为 158.2 nm 和半径为 100 nm 粒子污染物球心处的电场强度分布。可以看出粒子球心处的电场强度会随着薄膜厚度的变化而变化。在得到粒子球心处电场强度分布后,可将粒子球心处的电场强度极小值对应的薄膜厚度作为降低粒子污染物球心处电场强度分布的最佳优化膜层厚度,在此基础上,进一步分析表面粒子污染物的散射特性,以及单层光学薄膜对表面粒子污染物散射的调控特性。

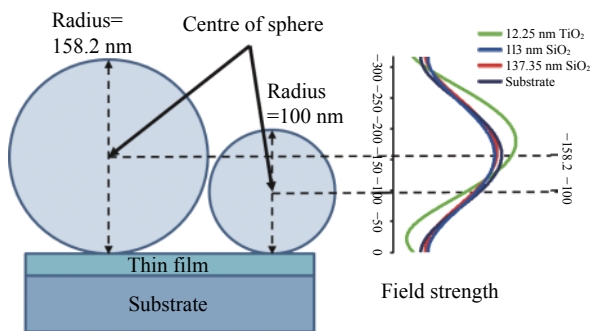


图 3 几种不同薄膜厚度下光学表面上方的电场强度分布

Fig.3 Distribution of electric field intensity above optical surface at several different film thicknesses

2 光学元件表面粒子污染物散射特性分析

为了证明通过单层光学薄膜的优化设计可有效调控光学元件表面粒子污染物球心处的电场强度分

布,进而实现对光学元件表面粒子污染物散射的调控。文中以 K9 玻璃为基底(折射率 $n=1.52$,消光系数 $k=0$),分别采用高折射率 TiO₂(折射率 $n=2.25$,消光系数 $k=0$)和低折射率的 SiO₂(折射率 $n=1.46$,消光系数 $k=0$)作为膜层材料,优化设计了两种不同折射率的单层光学薄膜。理论分析了在入射光波长为 632.8 nm,入射角为 0°的条件下,K9 玻璃基底以及两种单层薄膜在不同厚度情况下,表面上半径为 100 nm 的粒子污染物(污染物球状介质的折射率为 $n=1.3$,消光系数 $k=0$)球心处的电场强度分布。两种单层光学薄膜在不同膜层厚度的情况下,理论计算得到的光学表面粒子污染物球心处归一化电场强度的平方分布如图 4 所示,其中,当膜层厚度为 0 nm 时,表示 K9 玻璃表面的电场强度分布。

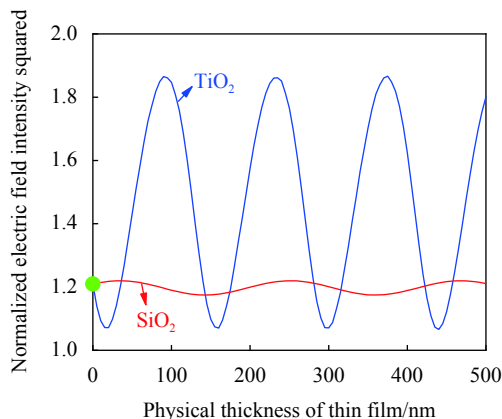


图 4 光学表面粒子污染物球心处归一化电场强度的平方随两种单层薄膜膜层厚度变化的关系曲线

Fig.4 Relationship curves between the normalized electric field intensity squared at the spherical center of particle pollutants on the optical surface and the thickness of two monolayer films

从图中可以看出,无论是低折射率的 SiO₂ 薄膜还是高折射率 TiO₂ 薄膜,光学元件表面粒子污染物(半径为 100 nm)球心处,即表面上方 100 nm 处,归一化电场强度的平方都会随薄膜厚度的增大呈现出周期性变化规律,不同厚度的两种单层薄膜对粒子污染物球心处电场强度均具有较明显的调制作用,且高折射率的单层 TiO₂ 薄膜对表面电场强度的调控效果尤为明显,所能调控的电场强度的极小值也小于单层 SiO₂ 薄膜所能调控的极小值;但同时,虽然单层 SiO₂ 薄膜对光学元件表面电场强度调控的范围有限,但该薄膜几乎在所有厚度下都能降低光学元件表面

的电场强度。

为了便于后续对光学元件表面污染物散射特性的进一步研究,文中选用单层 TiO₂ 薄膜将电场强度调控到极小值时所对应的厚度 12.3 nm、单层 SiO₂ 薄膜将电场强度调控至极小值对应的厚度 137.4 nm 分别作为优化膜层,研究两种单层薄膜对光学元件表面粒子污染物散射特性的影响。

基于 B-V 模型分别分析了 K9 玻璃表面以及两种单层薄膜表面粒子污染物引起的散射特性,理论分析中,基底为 K9 玻璃、粒子污染物(折射率为 $n=1.3$, 消光系数 $k=0$) 半径为 100 nm, 粒子污染物的密度为 10^8 个/cm², 入射光波长为 632.8 nm, 入射角为 0°, SiO₂ 薄膜的厚度为 137.4 nm, TiO₂ 薄膜的厚度为 12.3 nm。

图 5 给出了 K9 玻璃表面上半径为 100 nm 的粒子污染物的双向反射分布函数以及在 K9 玻璃表面分别设计了厚度为 137.4 nm 的单层 SiO₂ 薄膜和厚度为 12.3 nm 的单层 TiO₂ 薄膜后表面上半径为 100 nm 的粒子污染物的双向反射分布函数随散射角的变化情况。

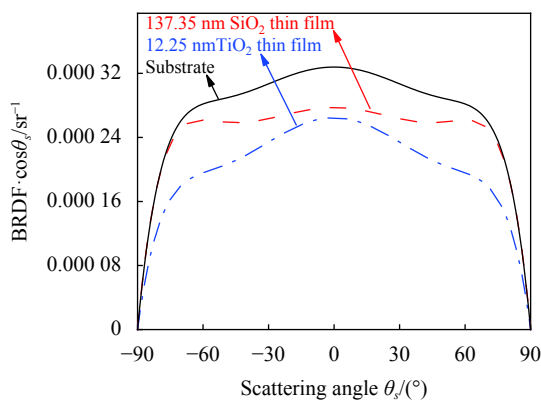


图 5 基底与两种单层薄膜对于半径 100 nm 粒子污染物的 BRDF · cos θ_s 随散射角的变化曲线

Fig.5 BRDF · cos θ_s of substrate and two kinds of monolayer films with a radius of 100 nm particle pollutants as a function of the scattering angle

从图 5 中可以看出,基底表面沉积了单层薄膜后,光学元件表面粒子污染物的双向反射分布函数明显小于 K9 玻璃表面污染物的双向反射分布函数,这充分说明,通过单层光学薄膜的优化设计可有效降低光学元件表面污染物引起的散射。从图中还可以看出,在 TiO₂ 薄膜和 SiO₂ 薄膜均为最佳厚度的情况下,

单层 TiO₂ 薄膜对光学元件表面污染物散射的降低效果优于单层 SiO₂ 薄膜对表面污染物散射的降低效果。

为了进一步验证单层光学薄膜对光学元件表面粒子污染物散射的调控特性,依据关系式(13)分别计算了不同膜层厚度情况下,单层 TiO₂ 薄膜和单层 SiO₂ 薄膜表面粒子污染物(半径 100 nm)的总散射损耗,计算结果如图 6 所示。

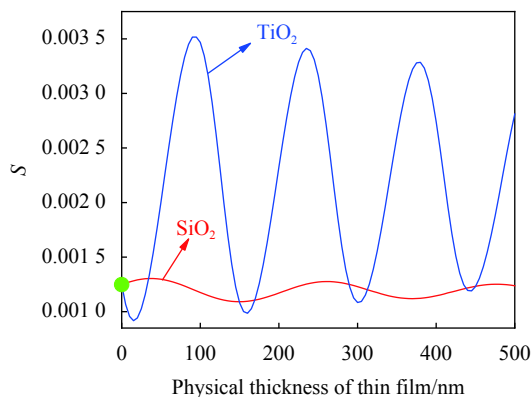


图 6 SiO₂、TiO₂ 薄膜表面半径 100 nm 粒子污染物的总散射损耗 (S) 随薄膜厚度变化曲线

Fig.6 Total scattering loss (S) of particles pollutant with a surface radius of 100 nm on SiO₂ and TiO₂ films varies with the thickness of the films

从图中可以看出,当两种薄膜的膜层厚度为 0 nm 时,即 K9 玻璃表面污染物的总散射损耗约为 0.00125。当在 K9 玻璃表面沉积厚度为 12.3 nm 的单层 TiO₂ 薄膜后,相同的表面粒子污染物的总散射损耗降低为 9.37×10^{-4} ,即在 K9 玻璃表面沉积 12.3 nm 的单层 TiO₂ 薄膜后粒子污染物引起的散射损耗降低了 25.04%。同样,在 K9 玻璃表面沉积厚度为 137.4 nm 的单层 SiO₂ 薄膜后,相同的表面粒子污染物的总散射损耗降低为 0.001095,可使 K9 玻璃表面粒子污染物的散射降低 12.40%。这充分说明了通过单层薄膜的优化设计,在 K9 玻璃表面沉积单层光学薄膜可以有效降低 K9 玻璃光学表面粒子污染物引起的散射损耗。

3 实验验证

为了验证理论分析的正确性以及单层光学薄膜对 K9 玻璃表面粒子污染物减散射的有效性,实验中选用直径为 25 mm、厚度为 2 mm 超光滑 K9 玻璃作为基底,通过掩模的方式遮挡住基底的一半,采用电

子束热蒸发沉积技术仅在基底未遮挡部分沉积单层 SiO₂ 薄膜。实验中使用成都南光机器厂生产的 ZZS700-1/G 箱式真空镀膜机进行镀膜。镀膜前的本底真空度为 5.0×10⁻³ Pa, 烘烤温度为常温, 采用离子束进行辅助沉积, 镀膜时的工作真空度为 9.0×10⁻³ Pa。镀膜过程中采用石英晶振膜厚仪进行膜层厚度监控, 并将膜层厚度控制在 138 nm。采用德国弗朗霍夫 IOF 研究所研制的 horos 散射仪测试样片的双向反射分布函数^[25]。为了尽可能保证 K9 玻璃基底未镀膜部分和沉积有单层 SiO₂ 薄膜部分有尽可能相同的粒子污染物, 将从真空腔室取出的样片, 在千级超净环境中静置 1 h, 然后用 horos 散射仪分别测试 K9 玻璃表面和沉积了单层 SiO₂ 薄膜表面的双向反射分布函数。测试结果如图 7 所示。

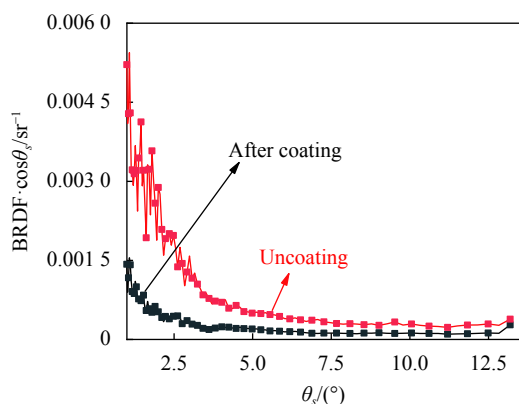


图 7 K9 玻璃表面以及沉积单层 SiO₂ 薄膜后, 表面污染物的双向反射分布函数与散射角的关系

Fig.7 Relationship between the bidirectional reflection distribution function and the scattering angle of the surface pollutants on K9 glass surface and the deposition of a monolayer SiO₂ film

从图 7 可以看出, 在散射角 0°附近, 实际测试污染物的双向反射分布函数明显大于理论计算得到的双向反射分布函数, 这主要是由于实际光学表面污染物的数密度明显大于理论计算时粒子污染物的数密度, 实验中用 NikonL150 光学显微镜观察样品表面的污染物的情况也证实了这一点。同时, 光学表面存在的粗糙度以及各种缺陷也是导致实际测量 BRDF 更大的原因。从未镀膜和镀膜区域散射测试结果可以看出, 在 K9 玻璃表面沉积厚度约为 138 nm 的单层 SiO₂ 薄膜后, 在相同粒子污染物情况下, 薄膜表面的粒子污染物散射明显小于 K9 玻璃表面的粒子污染物

散射, 实验结果表明单层光学薄膜可有效降低 K9 玻璃表面粒子污染物的散射。

4 结 论

(1) 通过在光学元件表面沉积单层光学薄膜可实现对光学元件表面粒子污染物球心处电场强度的有效调控, 且球心电场强度随着膜层厚度呈现出周期性变化规律。

(2) 利用光学元件表面电场强度最小值所对应的光学薄膜厚度, 不仅能够降低光学元件表面污染物球心处的电场强度, 也可以进一步降低光学元件表面粒子污染物引起的双向反射分布函数以及污染物引起的总散射损耗。

(3) K9 玻璃基底上厚度约为 138 nm 的单层 SiO₂ 薄膜的实验结果进一步证实了单层光学薄膜可有效降低光学元件表面污染物引起的散射损耗。

参考文献:

- [1] Tribble A C, Boyadjian B, Davis J, et al. Contamination control engineering design guide-lines for the aerospace community[C]//Proceedings of the SPIE, 1996, 2864: 4-15.
- [2] Sun Tengfei, Zhang Jun, Lv Haibing, et al. Influence of optical mirror surface contaminants on laser transmission characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1444-1448. (in Chinese)
- [3] Meng Lingqiang, Wang Qing, Zhang Liping, et al. Laser-induced damage threshold test system based on light scattering and grey level of image [J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(6): 534-538. (in Chinese)
- [4] Duan Lihua. Study on laser damage and scattering detection of optical thin films[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)
- [5] Zhao Xue, Zhou Yanping, Liu Haigang. Effect of optical system caused by space organism pollution [J]. *Optical Technology*, 2004(1): 113-115, 118. (in Chinese)
- [6] Ma Jing, Zhu Funan, Zhou Yanping, et al. Detection device of optical surface pollution for satellite and ground [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1878-1883. (in Chinese)
- [7] 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)

- [8] Murotani H. Influence of the surface-roughness of the substrate on the light scattering of optical thin films [J]. *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, 2014, 80(6): 519-523.
- [9] Young R P. Mirror scatter degradation by particulate contamination[C]//Proceedings of the SPIE, Optical System Contamination: Effects, Measurement, Control II, 1990, 1329: 246-254.
- [10] Facey T A, Nonnenmacher A L. Measurement of total hemispherical emissivity contaminated mirror surfaces[C]//Proceedings of the SPIE, 1989, 967: 308-313.
- [11] Nahm K, Spyak P R, Wolfe W L. Scattering from contaminated surfaces[C]//33rd Annual Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1990: 294-305.
- [12] Nahm K. Light scattering by polystyrene spheres on a conducting plane[D]. Arizona: The University of Arizona, 1985.
- [13] Spyak P R, Wolfe W L. Scatter 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.
- [14] Spyak P R. A cryogenic scatterometer and scatter from particulate contaminants on mirrors[D]. Arizona: The University of Arizona, 1990.
- [15] Huang Cong, You Xinghai, Zhang Bin. Influence of surface cleanliness of optical element on its surface scattering characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0120002. (in Chinese)
- [16] Gao Pingping, Lu Min, Wang Zhile, et al. Differentiation of polarization scattering characteristics of surface nanoparticle defects [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 975-987. (in Chinese)
- [17] Kim H W, Reif R. Ex situ wafer surface cleaning by HF dipping for low temperature silicon epitaxy [J]. *Thin Solid Films*, 1997, 305(1-2): 280-285.
- [18] Zhang Zhiguo. Research on clean air knife rinse technology for optical component surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 41-50. (in Chinese)
- [19] Wang Zemin, Zeng Xiaoyan, Huang Weiling. Status and prospect of laser cleaning procedure [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(2): 68-73. (in Chinese)
- [20] Trost M, Herffurth T, Schröder S, et al. Scattering reduction through oblique multilayer deposition [J]. *Appl Opt*, 2014, 53(4): 197-204.
- [21] Zhang Jinlong, Wu Han, Jiao Hongfei, et al. Reducing light scattering in high-reflection coatings through destructive interference at fully correlated interfaces [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 5046.
- [22] Yang Chen, Pan Yongqiang. Light scattering properties of three layers broadband anti-reflective films [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2018, 16(1): 11-15. (in Chinese)
- [23] 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.
- [24] Kim J H, Ehrman S H, Mulholland G W, et al. Polarized light scattering by dielectric and metallic spheres on oxidized silicon surfaces [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(3): 585-591.
- [25] Pan Y, Liu J, Lei G, et al. Reducing light scattering of single-layer TiO_2 and single-layer SiO_2 optical thin films [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2021, 231: 166380.