

多层介质高反膜界面电场强度调控与光散射特性

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 为了降低高精度使用场合下多层介质高反射薄膜的表面散射, 首先从多层介质薄膜双向反射分布函数(BRDF)出发, 理论分析了双向反射分布函数与薄膜界面电场强度的关系。在入射光为正入射且中心波长 632.8 nm 处的反射率大于 99% 的要求下, 采用 SiO_2 、 Ta_2O_5 两种材料设计了膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8/\text{A}$ 和膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8\text{H}/\text{A}$, 并分析了两种膜系界面的电场强度分布。然后以膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8\text{H}/\text{A}$ 界面的电场分布为基础对场强进一步优化, 得到了膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/\text{A}$ 。理论计算了正入射条件下三种膜系的双向反射分布函数, 发现当散射角为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 时, 膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/\text{A}$ 表面的 BRDF 小于膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8/\text{A}$ 和膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8\text{H}/\text{A}$ 。同时计算了三种膜系表面的总散射损耗(S), 与膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8/\text{A}$ 和膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8\text{H}/\text{A}$ 相比, 优化膜系 $\text{G}/(\text{HL})^8\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/\text{A}$ 的 S 降低了 91.44%、37.98%。实验验证了利用膜层界面电场强度调控薄膜表面散射的有效性。

关键词 薄膜; 多层设计; 光散射; 双向反射分布函数; 总散射损耗

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0603001

1 引言

高精度光学仪器中光学元件存在的散射问题是影响仪器使用的重要因素。例如激光陀螺系统的增益系数比较低, 因此要求有极高的反射率, 而高反射镜表面的散射阻碍了反射镜反射率的进一步提高, 同时谐振光路中高反射镜上的损耗对激光陀螺仪闭锁阈值有重要的影响^[1]。为了保证光刻机系统高的分辨率和效率, 要求高反射薄膜具有极低的光学损耗^[2]。在激光系统中, 增加谐振腔高反镜的反射率可以使激光器的输出功率大大增加, 同时低散射损耗可以使系统得到更好的光束质量^[3]。研究光学薄膜表面散射特性具有重要意义, 有利于制备高性能光学薄膜器件和检测光学薄膜抗激光损伤阈值^[4]。

Murotani^[5]对基底、薄膜表面粗糙度进行了深入研究, 并分析了基底、薄膜表面粗糙度对光学表面散射特性的影响, 研究发现, 基底表面粗糙度越大, 在其上镀制的光学薄膜表面粗糙度越大, 薄膜表面

的光散射也会越大。Amra 等^[6]基于双向反射分布函数(BRDF), 利用多层薄膜中各个界面轮廓函数之间的联系, 着重对界面的相关程度进行了研究, 结果表明, 在不同的界面相关特性下散射水平不同, 因此界面间的相关性不容忽视。侯海虹等^[7]采用标量散射理论研究了薄膜散射损耗, 并在理论上提出了分层界面散射模型。潘永强课题组对光学薄膜表面粗糙度与表面散射特性进行了大量研究^[8-12]。2016年, 曹慧等^[13]基于一阶扰动, 建立了具有微粗糙度表面的多层薄膜散射模型, 重点研究了多因素下单层减散射薄膜和多层高反射薄膜的光散射偏振特性。2020年, 刘金泽^[14]理论分析了多层光学薄膜界面粗糙度和界面相关性, 设计了五层高反射膜, 实验研究发现, 在该工艺条件下, 五层高反射薄膜表面散射特性与多层薄膜界面完全非相关模型散射特性十分接近。而关于如何减小多层高反射薄膜表面散射损耗的研究鲜有报道。

本文采用 Ta_2O_5 、 SiO_2 两种材料, 在中心波长 632.8 nm 处的反射率大于 99% 的设计要求下, 在

收稿日期: 2021-07-06; **修回日期:** 2021-07-27; **录用日期:** 2021-08-13

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项目(2018JM6031)

通信作者: *pyq_867@163.com

K9 玻璃基底上设计了两种高反射膜系 $G/(HL)^8/A$ (膜系一)和 $G/(HL)^8H/A$ (膜系二, G 为基底材料, H 为高折射率材料, L 为低折射率材料, A 为入射介质空气), 并理论计算了两种膜系内部的电场强度分布。在反射率要求不变的情况下, 基于膜系二 $G/(HL)^8H/A$ 界面电场强度分布, 进一步优化了膜层界面场强, 得到了优化膜系 $G/(HL)^6H0.4L1.6H1.5L0.5H/A$ (膜系三)。理论计算了三种膜系的 BRDF 和总散射损耗(S)。在实验上, 采用相同的薄膜镀制工艺, 分别在超光滑 K9 玻璃上镀制了三种膜系, 实际测试了三种膜系表面的 BRDF, 验证了所提方法的有效性。

2 光学薄膜矢量散射理论

双向反射分布函数的空间关系示意图如图 1 所示, 其中 θ_i 为入射角, I_i 为 θ_i 方向上的入射光强, θ_r 为反射角, I_r 为 θ_r 方向上的反射光强, θ_s 和 φ_s 分别为散射角和散射方位角。当强度为 I_i 的光入射到介质表面上时, 在 (θ_s, φ_s) 方向上发生散射, 立体角 $d\Omega$ 内的光强分布即表面双向反射分布函数(B_R)的表达式^[15]为

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

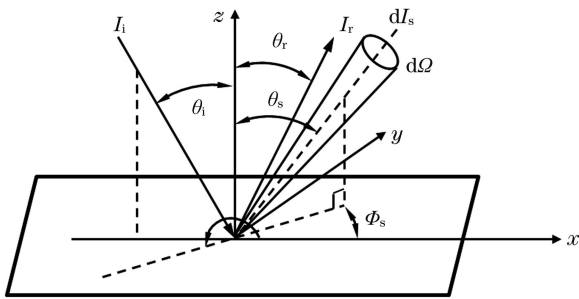


图 1 双向反射分布函数的空间关系示意图

Fig. 1 Schematic of space relationship of BRDF

对于多层薄膜表面的光散射, 需要考虑干涉效应, 多层薄膜的 B_R ^[16] 为

$$B_R \cdot \cos \theta_s = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^N C_i C_j^* g_{ij}(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0), \quad (2)$$

式中: i 表示第 i 个界面; j 表示第 j 个界面; N 表示薄膜总层数; $g_{ij}(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0)$ 表示薄膜表面的功率谱密度函数; \mathbf{k} 和 \mathbf{k}_0 分别表示入射光线和散射光线的波矢量; C_i 表示光学因子, 是与入射光方向、散射光方向、膜层厚度和折射率有关的因子; C_j^* 为光学因子 C_j 的共轭复数。在各向同性表面上, 当入射光垂直入射时, 有 $g(\mathbf{k} - \mathbf{k}_0) = g(\mathbf{k})$ 。Amra^[17] 将(2)式改

写为

$$B_R \cdot \cos \theta_s = \sum_{i=0}^N |C_i|^2 g_{ij}(\mathbf{k}) + \sum_{i=0}^N \sum_{j=0, j \neq i}^N C_i C_j^* g_{ij}(\mathbf{k}). \quad (3)$$

(3)式等号右侧第一项表示不同薄膜界面散射强度的叠加, 第二项表示散射波场的相干叠加。对于多层薄膜界面完全相关模型, 膜层界面间的粗糙度完全相同, 即功率谱密度函数 $g_{ij} = g_{ii} = g$, 则多层膜界面完全相关模型的散射表达式可以表示为

$$B_R \cdot \cos \theta_s = \left| \sum_{i=0}^N C_i \right|^2 g(\mathbf{k}). \quad (4)$$

由于任意两层薄膜界面之间的相位差是可以确定的, 因此多层薄膜散射场的振幅是各界面散射场振幅的相干叠加。

对于完全非相关模型, 由于多层薄膜各界面的粗糙度是完全独立和不相关的, 因此(3)式等号右侧第一项可以约掉, 此时多层薄膜各界面的散射场是完全非相关的。而多层薄膜散射场是各界面散射场的叠加, 因此 B_R 可以写成

$$B_R \cdot \cos \theta_s = \sum_{i=0}^P |C_i|^2 g(\mathbf{k}), \quad (5)$$

式中: P 为散射光功率。

假设多层膜中所有界面有相同的功率谱密度函数, 则 B_R 完全取决于光学常数。 C_j 与光照条件、观测条件、多层膜的折射率、膜厚等特性有关, 给出一个简单的表达式:

$$C_j = (\epsilon_j - \epsilon_{j-1}) E(z_j, \theta_i) E(z_j, \theta_s), \quad (6)$$

式中: ϵ_j 和 ϵ_{j-1} 分别为第 j 层和第 $j-1$ 层膜层材料的介电常数; $E(z_j)$ 为第 j 层界面的电场振幅; z_j 为第 j 层薄膜界面的位置。根据(6)式可知, 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, 可以通过设计薄膜来减弱光学元件的光散射^[18]。

总散射损耗的定义为散射光功率除以入射光功率^[19], 对于各向同性散射介质, 总散射损耗与双向反射分布函数之间的关系为

$$S = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_R \cdot \cos \theta_s \cdot \sin \theta_s \cdot d\theta_s. \quad (7)$$

薄膜反射率的评价函数为

$$F_R = \sum_{\lambda} [R(\lambda) - R_c(\lambda)]^2, \quad (8)$$

式中: λ 为入射光中心波长; $R(\lambda)$ 为膜系中心波长处的反射率; $R_c(\lambda)$ 为中心波长处设计的反射率。

薄膜界面电场强度的评价函数为

$$F_E = \sum_z [N(z) - N_c(z)]^2, \quad (9)$$

式中： z 为薄膜界面的位置； $N(z)$ 为膜层界面处的电场强度； $N_c(z)$ 为膜层界面处设计的电场强度。

综合以上两种评价函数，建立综合评价函数：

$$F = K_r \times F_R + K_e \times F_E, \quad (10)$$

式中： K_r 和 K_e 为权重因子。对于已知折射率的膜系结构，在给定膜层厚度搜索范围内，对膜层厚度进行调控，得出综合评价函数的极小值，其对应的膜层厚度即为所求值^[20]。

3 多层薄膜界面电场强度的理论计算与分析

选用 K9 玻璃(材料折射率 $n=1.52$)作为基底，入射介质为空气($n=1$)，高折射率材料 Ta_2O_5 ($n=2.25$) 和低折射率材料 SiO_2 ($n=1.46$) 交替镀制。高反射膜的设计要求为中心波长 632.8 nm 处的反射率高于 99%。

首先设计两种常见高反射膜系 $G/(HL)^8/A$ 和膜系 $G/(HL)^8H/A$ ，分别计算其反射率。两种膜系表面反射率随入射波长的变化曲线如图 2 所示。理论计算两种膜系内部的电场强度分布，并基于膜系二界面电场强度优化设计了膜系三 $G/(HL)^6H0.4L1.6H1.5L0.5H/A$ 。

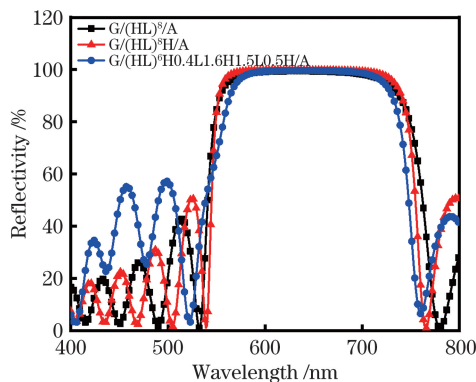


图 2 三种膜系表面反射率随入射波长的变化曲线

Fig. 2 Surface reflectance of three film systems versus incident wavelength

膜系一、二、三中心波长处的反射率分别为 99.4011%、99.8814%、99.6884%，均满足设计要求。但从图 2 我们也可以看出，与前两种常见膜系相比，膜系三的反射带更窄，且在短波区，通带波纹的起伏更加剧烈。

两种膜系内部的电场强度分布如图 3(a)、(b) 所示。可以看出，在最外层薄膜界面上，膜系 $G/(HL)^8/A$ 界面的归一化电场强度的平方为 3.9880，膜系 $G/(HL)^8H/A$ 最外层界面的归一化电场强度的平方为 0，同时归一化电场强度平方取

最大值 3.9975 的位置位于空气中，可以预测膜系二的表面散射小于膜系一。

由于薄膜界面粗糙度的存在，通过将膜层内部驻波场场强的极值点从薄膜界面移开，可以降低薄膜的表面散射。为了进一步降低膜系界面的电场强度，基于膜系二的膜层电场分布优化最外四层薄膜厚度，得到了优化膜系三 $G/(HL)^6H0.4L1.6H1.5L0.5H/A$ ，其内部电场强度分布如图 3(c) 所示。膜系三与膜系二相比，膜层内部驻波场场强的最大值点和次大值点均不在膜层界面上。比较了三种膜系靠近空气侧的四个界面的归一化电场强度的平方，结果如表 1 所示。

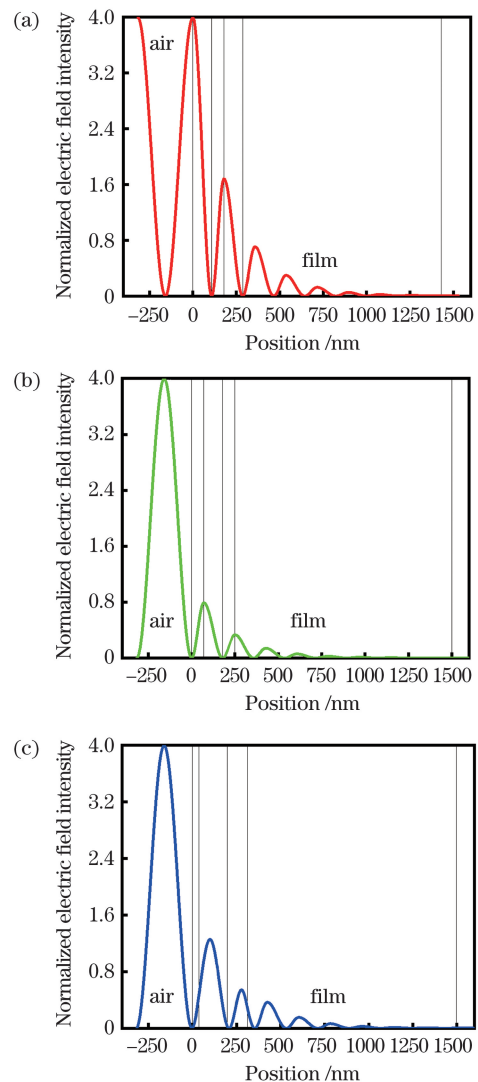


图 3 不同膜系内部的归一化电场强度的平方。(a) $G/(HL)^8/A$ ；(b) $G/(HL)^8H/A$ ；(c) $G/(HL)^6H0.4L1.6H1.5L0.5H/A$

Fig. 3 Square of normalized electric field intensity for three film systems. (a) $G/(HL)^8/A$ ；(b) $G/(HL)^8H/A$ ；(c) $G/(HL)^6H0.4L1.6H1.5L0.5H/A$

在表 1 中,界面 1、2、3、4 分别表示从空气侧开始的第一、二、三、四个界面。可以看出,在膜系三中,界面 2、4 处的电场强度低于膜系二,界面 1、3 处的归一化电场强度的平方高于膜系二,但界面 1、3

处的归一化电场强度的平方相比于界面 2、4 较小,且其值趋近于零,可以认为膜系三在保证界面 1、3 处的电场不发生较大变化时,降低了界面 2、4 处的电场强度。因此膜系三比膜系二有更小的表面散射。

表 1 不同膜系界面的归一化电场强度的平方

Table 1 Square of normalized electric field intensity for different film system interfaces

Interface	$G/(HL)^8/A$	$G/(HL)^8 H/A$	$G/(HL)^6 H0.4L1.6H1.5L0.5H/A$
Interface 1	3.9880	0	0.0044
Interface 2	0	0.7897	0.4549
Interface 3	1.6791	0	0.0244
Interface 4	0	0.3325	0.2727

4 散射仿真计算

采用界面粗糙度完全非相关模型分别计算三种膜系的双向反射分布函数。选择 K9 玻璃 ($n = 1.52$) 作为实验基底,高折射材料光学常数为(材料的折射率为 2.25,材料的消光系数为 0),低折射率材料光学常数为(材料的折射率为 1.46,材料的消光系数为 0),入射光波长为 632.8 nm,入射光正入射,界面粗糙度为 1.5 nm,相关长度为 1000 nm,散射角为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 。在基底上分别设计膜系 $G/(HL)^8/A$ 、膜系 $G/(HL)^8 H/A$ 和膜系 $G/(HL)^6 H0.4L1.6H1.5L0.5H/A$,计算双向反射分布函数。

图 4 为三种膜系的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 随散射角的变化曲线。可以看出,在反射光方向上,膜系一、二、三的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 值分别为 0.02104, 0.00292, 0.00178,膜系二 $G/(HL)^8 H/A$ 的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 比膜系一 $G/(HL)^8/A$ 降低了 86.12%,优化膜系三 $G/(HL)^6 H0.4L1.6H1.5L0.5H/A$ 的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 比膜系一降低了 91.54%,膜系三的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 比膜

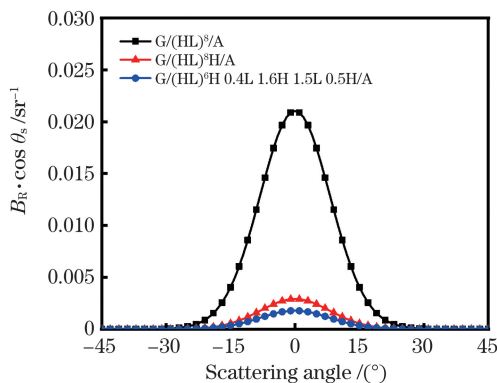


图 4 三种膜系的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 随散射角的变化曲线

Fig. 4 $B_R \cdot \cos \theta_s$ versus scattering angle for three film systems

系二降低了 39.04%。

为了进一步验证利用优化膜层界面电场强度可以有效降低多层高反射薄膜表面的光散射,根据(7)式计算了三种膜系的总散射损耗,结果如图 5 所示。

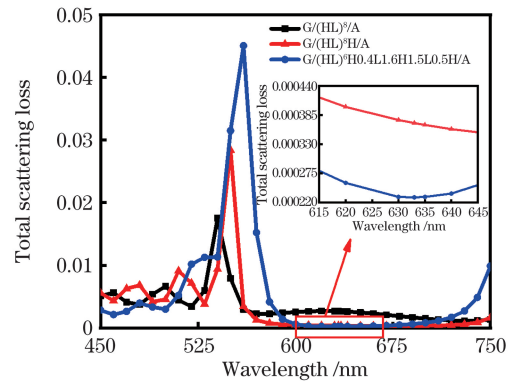


图 5 不同薄膜表面的总散射损耗随入射光波长的变化曲线

Fig. 5 Total scattering loss versus incident light wavelength for different film surfaces

膜系一、二、三在中心波长 632.8 nm 处的总散射损耗分别为 0.00268, 0.00037, 0.00023。与膜系一相比,膜系二表面的总散射损耗降低了 86.20%,优化膜系三表面的总散射损耗降低了 91.44%;同时,优化膜系三表面的总散射损耗比膜系二减少了 37.98%。由此可以看出,膜层界面电场强度优化后的膜系三的表面散射情况优于前两种膜系,理论计算证实了利用优化多层薄膜界面电场强度调控多层薄膜表面散射的有效性。

5 实验验证

由上述理论分析可知,界面电场强度优化后的膜系能够在满足高反射膜系反射率设计要求的情况下,有效降低高反射薄膜的表面散射。本节通过膜系镀制以及散射测量,从实验的角度验证所提方法

的正确性。

本次实验选用表面粗糙度为 1.5 nm、厚度为 2 mm 的超光滑 K9 玻璃基底 ($n=1.52$) 作为实验基底,低折射率介质材料选用 SiO_2 ($n=1.46$),高折射率介质材料选用 Ta_2O_5 ($n=2.25$),采用高、低折射率材料交替镀制高反射薄膜,采用电子束热蒸发技术镀制膜系,离子源采用西安工业大学自主研制的宽束冷阴极离子源,实验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。实验基本工艺参数:镀膜前的本底真空度为 5.5×10^{-3} Pa,充氧后的工作真空度为 1.0×10^{-2} Pa,监控波长为 633 nm,离子源能量为 800 eV,采用 Ta_2O_5 与 SiO_2 两种材料交替镀制高反射膜系 $G/(\text{HL})^8/\text{A}$ 、 $G/(\text{HL})^8\text{H}/\text{A}$ 与 $G/(\text{HL})^6\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/\text{A}$ 中的高低折射率层。在镀制优化膜系 $G/(\text{HL})^6\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/\text{A}$ 的过程中,镀制前 12 层时使用光电极值法对膜厚进行监控,镀制最外四层时采用石英晶振法对膜厚进行监控,这样可保证膜层厚度的精准控制。图 6 所示为实测的不同膜系的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 与散射角的关系。

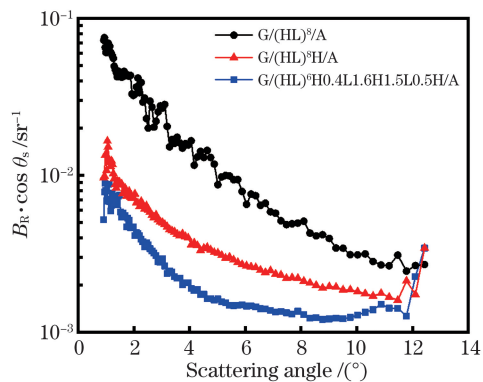


图 6 实测的不同膜系的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 与散射角的关系

Fig. 6 Measured $B_R \cdot \cos \theta_s$ versus scattering angle for different film systems

可以看出,随着散射角的增大, $B_R \cdot \cos \theta_s$ 呈逐渐减小的趋势。实际实验镀制的多层高反射薄膜的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 大于理论计算的 $B_R \cdot \cos \theta_s$,分析原因是实际镀制的薄膜界面粗糙度大于理论设计值 (1.5 nm)。实验中测量散射所用的散射仪有效测量的散射角范围为 $1^\circ \sim 12^\circ$ 。图 6 中 12° 处的 $B_R \cdot \cos \theta_s$ 值的误差较大,属于粗大误差。

从三种膜系散射测量的结果可以看出,在满足设计光谱要求的条件下,优化后的多层高反射膜系的表面散射明显小于初始高反射膜系表面的散射。实验结果表明:优化设计多层高反射膜系可以有效

地降低传统规整多层高反射膜系的表面散射。

6 结 论

基于矢量散射理论,以双向反射分布函数及总散射损耗为评价指标,从理论和实验两方面分析和验证了多层高反射薄膜界面电场强度对光学表面散射特性的影响。采用 Ta_2O_5 和 SiO_2 两种膜料设计了中心波长 632.8 nm 处的反射率 $>99\%$ 的两种多层介质高反射薄膜,分析了表面反射率和膜系内部电场强度的分布,并提出了一种界面电场强度优化膜系。最后从理论和实验两个角度验证了所提方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Tian H F, Li L Q. Losses and phase-shift measurement of a laser gyroscope cavity[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S1): 180-182. 田海峰,李路且.激光陀螺谐振腔损耗与相位差测量[J].红外与激光工程,2008,37(S1):180-182.
- [2] Cao J Z, Xu P, Li J Z. Thin film optics and thin film technology[M]. Beijing: Science Press, 2014. 曹建章,徐平,李景镇.薄膜光学与薄膜技术基础[M].北京:科学出版社,2014.
- [3] Wang P. Theoretical investigation of the loss of high-reflection films [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. 王鹏.高反射膜损耗的理论研究[D].成都:电子科技大学,2015.
- [4] Meng L Q, Wang Q, Zhang L P, 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. 孟令强,王青,张莉萍,等.基于光散射及灰度值作为判据的光学薄膜激光损伤阈值测量系统[J].光学仪器,2016,38(6):534-538.
- [5] Murotani H. Influence of the surface-roughness of the substrate on the light scattering of optical thin films[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2014, 80(6): 519-523.
- [6] Amra C, Deumie-Raviol C. Light scattering from optical substrates and multilayers[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5647: 72-77.
- [7] Hou H H, Shen J, Shen Z C, et al. Stratified-interface scattering model for multilayer optical coatings[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 1102-1106. 侯海虹,沈健,沈自才,等.光学薄膜的分层界面散射模型[J].光学学报,2006,26(7):1102-1106.
- [8] 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.
- 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.
- [9] Pan Y Q, Wu Z S, Hang L X. Light scattering properties of multilayer dielectric high-reflection films [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(10): 12-16.
- 潘永强, 吴振森, 杭凌侠. 多层介质高反射膜的散射特性研究[J]. 光电工程, 2008, 35(10): 12-16.
- [10] Yang C. Interface roughness control of optical thin films and anti-scattering properties[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018: 34-45.
- 杨琛. 光学薄膜界面粗糙度调控及减散射特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018: 34-45.
- [11] 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.
- 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.
- [12] 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.
- 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.
- [13] Cao H, Gao J, Wang L M, et al. Polarization modeling and analysis of light scattering properties of multilayer films on slightly rough substrate [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(3): 640-647.
- 曹慧, 高隽, 王玲妹, 等. 微粗糙基底上多层涂层光散射偏振建模与特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(3): 640-647.
- [14] Liu J Z. Study on scattering characteristics of multilayer optical thin films [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2020.
- 刘金泽. 多层光学薄膜散射特性研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2020.
- [15] Trost M, Herffurth T, Schröder S, et al. Scattering reduction through oblique multilayer deposition [J]. Applied Optics, 2014, 53(4): A197-A204.
- [16] Elson J M. Theory of light scattering from a rough surface with an inhomogeneous dielectric permittivity [J]. Physical Review B, 1984, 30(10): 5460-5480.
- [17] Amra C. Light scattering from multilayer optics. I. Tools of investigation [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(1): 197.
- [18] Zhang J, Wu H, Jiao H, et al. Reducing light scattering in high-reflection coatings through destructive interference at fully correlated interfaces [J]. Optics Letters, 2017, 42(23): 5046-5049.
- [19] Yang C, Pan Y Q. Light scattering properties of three layers broadband anti-reflective films [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2018, 16(1): 11-15.
- 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.
- [20] Kong M D, Li R J, Zhou J L, et al. An new method to design high reflectivity film [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2000, 11(1): 62-64.
- 孔明东, 李瑞洁, 周九林, 等. 高反射率光学薄膜的一种新设计方法[J]. 光电子·激光, 2000, 11(1): 62-64.

Regulation of Electric Field Intensity at Interface and Light Scattering Characteristics of Highly Reflective Multilayer Dielectric Films

Yang Weirong, Pan Yongqiang^{*}, Zheng Zhiqi

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract

Objective Scattering of optical elements in high-precision optical instruments is an important factor influencing the use of instruments. For example, because the gain coefficient of the high mirror in the laser gyro system is relatively low, which requires the system to have extremely high reflectivity, the surface scattering of the high mirror hinders the further improvement of the reflectivity of the mirror. Thus the loss on the high mirror in the resonant light path has an important influence on the determination of the locking threshold of the laser gyro. Another example is the high reflective film in the lithography system. In order to ensure the high resolution and efficiency of the lithography

system, it is necessary to require a very low optical loss of the high reflective film. In high-energy laser system, the laser output can be greatly increased by increasing the reflectivity of the high mirrors in the resonant cavity, and the low scattering loss can make the system get a better beam quality. The study on the surface scattering characteristics of optical thin films is not only beneficial to the preparation of high-performance optical thin film devices, but also can be used to detect the laser damage threshold of optical thin films according to their surface scattering characteristics. How to reduce the scattering loss of high mirrors in high-precision instruments is a big problem that puzzles optical film designers. A large number of scholars at home and abroad have done a lot of detailed researches. Most researchers have focused on reducing the roughness of the multilayer film interface from the perspective of coating process and have made a lot of research results. However, reducing the roughness of the multilayer film interface by regulating the coating process has reached a certain limit. If we want to further reduce the roughness, we need to pay a huge price, thus it is urgent to acquire a new method to reduce the surface scattering of multilayer optical films.

Methods In this paper, based on the vector scattering theory of optical thin films, the relationship between the optical factor in the bidirectional reflection distribution function and the electric field intensity at the interface of multilayer thin films is theoretically analyzed. First, under the requirement that the reflectivity at the center wavelength of 632.8 nm is higher than 99%, two commonly used multilayer dielectric high reflection films, $G/(\text{HL})^8/A$ and $G/(\text{HL})^8\text{H}/A$, are designed, respectively. In addition, the electric field intensity distributions inside the two films are calculated. Second, based on the distribution of electric field intensity at the interface of $G/(\text{HL})^8\text{H}/A$, the film system $G/(\text{HL})^6\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/A$ is obtained. Third, the bidirectional reflection distribution function (B_R) of each film is calculated theoretically, and then the total scattering loss (S) of each film is calculated. Finally, Ta_2O_5 and SiO_2 are used to deposit three kinds of films, and the bidirectional reflection distribution functions of the three films are tested and compared.

Results and Discussions First, under the condition of meeting the requirement that the reflectivity at the center wavelength of 632.8 nm is larger than 99%, the electric field intensity distributions in two commonly used multilayer dielectric high reflection film systems $G/(\text{HL})^8/A$ and $G/(\text{HL})^8\text{H}/A$ are calculated (Figs. 3(a) and (b)). Second, based on the distribution of electric field intensity at the interface of the film system $G/(\text{HL})^8\text{H}/A$, the film system $G/(\text{HL})^6\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/A$ is obtained (Fig. 3(c)), and the electric field intensities at the interface of the three film systems are analyzed and compared (Table 1). Third, the $B_R \cdot \cos \theta_s$ of three kinds of films are calculated theoretically (Fig. 4), in which θ_s is scattering angle. It is found that the $B_R \cdot \cos \theta_s$ of the optimized film system $G/(\text{HL})^6\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/A$ is smaller than those of the film system $G/(\text{HL})^8/A$ and the film system $G/(\text{HL})^8\text{H}/A$. At the same time, the total scattering losses of three kinds of films are calculated (Fig. 5). The calculated results show that the total scattering loss of the optimized film system $G/(\text{HL})^6\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/A$ can be reduced by 91.44% and 37% compared with those of the film systems $G/(\text{HL})^8/A$ and $G/(\text{HL})^8\text{H}/A$. Three films are actually deposited with Ta_2O_5 and SiO_2 , and $B_R \cdot \cos \theta_s$ of the three films are tested (Fig. 6). It is found that $B_R \cdot \cos \theta_s$ of the optimized film system $G/(\text{HL})^6\text{H}0.4\text{L}1.6\text{H}1.5\text{L}0.5\text{H}/A$ is smaller than that of the other two films.

Conclusions Based on the vector scattering theory and with bidirectional reflection distribution function and total scattering loss as evaluation indexes, the influence of interface electric field intensity on light scattering characteristics of multilayer highly reflective thin films is analyzed and theoretically and experimentally verified. The reflectivity at the center wavelength of 632.8 nm is required to be larger than 99%. Two kinds of multilayer dielectric high-reflectivity films are designed by using Ta_2O_5 and SiO_2 films on the premise of meeting the spectral design requirements. The surface reflectivity and the distribution of electric field intensity in the film system are analyzed, and a film system with an optimized interface electric field intensity is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed method for reducing scattering caused by interface roughness of multilayer dielectric films by adjusting the interface electric field intensity of multilayer dielectric films is verified from the theoretical calculation and experiments.

Key words thin films; multilayer design; light scattering; bidirectional reflection distribution function; total scattering loss