

## 低损耗 1064 nm 带通滤光片多层膜的散射特性研究

刘冬梅<sup>1</sup>, 罗云峰<sup>1\*</sup>, 付秀华<sup>1</sup>, 鲍刚华<sup>2</sup>, 张静<sup>1</sup>, 卢成<sup>2</sup><sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>成都国泰真空设备有限公司, 四川 成都 611130

**摘要** 1064 nm Nd: YAG 激光器在医疗领域应用广泛, 而 1064 nm 带通滤光片作为激光器的关键器件对低损耗薄膜提出了更高要求。本文在相同粗糙度的 K9 基底上, 采用 TiO<sub>2</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 两种材料以相同氧分压和不同氧分压的方式借助离子辅助制备了 1064 nm 带通滤光片薄膜。使用分光光度计对薄膜的透过光谱进行表征, 光谱特性显示, 采用相同氧分压制备的薄膜的透过率较好。利用轮廓仪与扫描电镜分别对薄膜粗糙度以及切面形貌进行表征, 结果表明, 采用相同氧分压制备的薄膜具有光滑的表面和较规整的膜层。通过软件拟合分析得到了透过率的降低来源于散射的结论。当两种材料的氧分压不同时, 镀膜过程中真空度交替切换会导致考夫曼离子源离子束流不稳定, 进而导致层间粗糙度增加, 从而引起了散射。基于标量散射理论, 推导了相关和非相关散射情况下多层膜透过率的计算公式, 并利用此公式对两种不同工艺制备的薄膜的透过率进行拟合, 结果发现理论计算曲线与实际测试光谱曲线基本一致。

**关键词** 薄膜; 界面散射; 带通滤光片; 表面粗糙度; 完全相关与非完全相关

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0903004

## 1 引言

光学薄膜的散射损耗是评价薄膜性能的重要指标之一。激光精密测试系统和高精度光学系统的发展对光学薄膜的性能提出了更高要求<sup>[1-4]</sup>, 因此, 众多学者对薄膜的散射进行了大量研究。

薄膜的散射主要包括体散射和界面散射。体散射是由体内缺陷产生的, 而界面散射则是由薄膜柱体顶层的凹凸不平产生的<sup>[5]</sup>。在大多数薄膜中, 界面散射的量级远大于体散射<sup>[6]</sup>。影响薄膜界面散射的主要因素是界面粗糙度。在界面完全相关与非完全相关模型下, 界面粗糙度与基底粗糙度有关, 且与其呈正比关系<sup>[7]</sup>。此外, 界面粗糙度的大小还与镀膜材料有关: 层状生长的 TiO<sub>2</sub> 具有一定的平滑基底的作用, 而岛状生长的 SiO<sub>2</sub> 会增大界面粗糙度, 从而导致散射增加<sup>[8]</sup>。界面粗糙度会随着沉积速率的增加而减小, 并最终趋于平缓<sup>[9]</sup>。界面散射经过多层膜的累积后会影响薄膜的光谱特性<sup>[10]</sup>, 严重时

会导致产品报废。

1064 nm 激光在医疗与美容等领域被广泛应用, 而 1064 nm 带通滤光片在激光器中起着关键作用, 因此制备低损耗滤光片薄膜尤为关键<sup>[11]</sup>。在实际镀膜生产中交替蒸发高低折射率材料时, 通常伴随着真空度的变化, 这种变化可能会加剧薄膜的散射, 影响多层膜的光谱特性<sup>[12]</sup>。但目前有关真空度对散射影响的研究还不够丰富。

本文首先基于标量散射理论, 推导出了相关与非相关散射情况下多层膜透过率的计算公式; 然后分别采用相同氧分压和交替切换氧分压的真空控制方式, 在相同粗糙度的光滑 K9 玻璃基底上, 利用 TiO<sub>2</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 膜料, 采用考夫曼离子源辅助沉积技术制备了 1064 nm 带通滤光片薄膜。

本文使用分光光度计对薄膜的光谱特性进行表征, 然后在排除材料光学常数与膜厚控制误差的影响后, 研究了两种不同工艺下离子源工作状态对薄膜光谱及散射的影响。此外, 本文利用轮廓仪与扫描电镜

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2020-10-19; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项(20190302095GX)

\*E-mail: 2018100212@mails.cust.edu.cn

分别对薄膜的粗糙度与切面进行表征,分析了两种工艺制备的薄膜在粗糙度与切面方面的差异。最后分析了镀膜工艺、粗糙度及散射之间的相关关系,对低损耗多层膜的设计和制备提供了理论指导。

## 2 基于标量散射理论的光谱计算模型

在薄膜的日常生产中,光谱仪测量得到的是反映波长与透过率或反射率关系的数据。如果薄膜中存在散射损耗,则散射对光谱的影响可以用标量散射理论来描述<sup>[13]</sup>。图 1 所示为界面散射光示意图。标量散射理论主要研究总积分散射与均方根粗糙度之间的关系,其中总积分散射定义为总散射能量与总反射能量的比值。

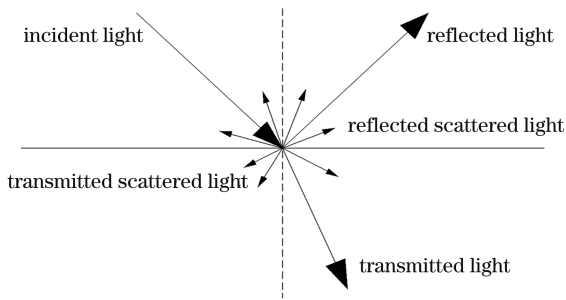


图 1 界面散射光示意图

Fig. 1 Schematic of surface scattered light

对于光滑表面,有以下假设条件:

- 1) 表面均方根粗糙度  $\sigma$  远小于入射波长  $\lambda$ ;
- 2) 相关长度  $L$  远大于入射波长  $\lambda$ 。

当光线垂直入射到薄膜表面时,反射散射损耗  $S_R$  与透射散射损耗  $S_T$  分别为<sup>[14]</sup>

$$S_R = R_0 \left( \frac{4\pi\sigma n_0}{\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

$$S_T = T_0 \left[ \frac{2\pi\sigma}{\lambda} (n_1 - n_0) \right]^2. \quad (2)$$

单个界面的总积分散射  $T_{IS}$  为

$$T_{IS} = S_R + S_T = \left[ n_0 \frac{(n_0 - n_1)^2}{n_0 + n_1} \right] \left( \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2, \quad (3)$$

式中: $R_0$ 、 $T_0$  分别为表面的理想反射率与透过率; $\sigma$  为薄膜表面的均方根粗糙度; $n_0$  为基底的折射率; $n_1$  为空气的折射率。

薄膜的总积分散射还可以由矢量散射理论中的角分辨散射对散射角积分得到。角分辨散射  $A_{RS}$  定义为单位立体角内的散射功率与入射功率的比值,即

$$A_{RS} = \frac{dP}{P_0 d\Omega}, \quad (4)$$

式中: $\frac{dP}{d\Omega}$  为单位立体角内的散射功率; $P_0$  为入射功率。

总积分散射与角分辨散射之间的关系为<sup>[14]</sup>

$$R_0 T_{IS} = 2\pi \int_0^{\pi/2} A_{RS} \sin \theta_s d\theta_s, \quad (5)$$

式中: $\theta_s$  为散射角。

多界面的标量散射计算要比单界面的计算复杂得多。根据各膜层界面粗糙度之间的关系,可将多层膜的散射计算分为两种不同的计算模型。制备薄膜的方法不同,对应的计算模型也不尽相同<sup>[15-17]</sup>。

1) 界面粗糙度非完全相关模型。该模型认为薄膜的散射损耗来源于各膜层界面的粗糙度,并且各个界面的粗糙度是独立且随机可变的。假设每个界面的粗糙度在基底粗糙度与薄膜表面粗糙度之间随机变化,界面的均方根粗糙度  $\sigma_k$  满足

$$\sigma_k \propto [\sigma_{sub}, \sigma_{sf}], \quad (6)$$

式中: $\sigma_{sub}$ 、 $\sigma_{sf}$  分别为基底和薄膜表面的均方根粗糙度。

随机变化的粗糙度数据不利于计算,在后续计算中将界面粗糙度非完全相关模型等效为附加界面粗糙度模型进行计算,附加界面粗糙度模型认为下一层界面在复制上一层的基础上还会引入一个新的界面起伏变化。

依据(3)式所示的单界面的总积分散射公式推导出  $k$  层膜  $k+1$  个界面在界面非完全相关模型下的总散射损耗  $S_{Unc}$  为

$$S_{Unc} = 1 - \prod_{i=1}^{k+1} \left\{ 1 - \left( \frac{4\pi\sigma_i}{\lambda} \right)^2 \left[ n_0 \cdot \frac{(n_i - n_{i-1})^2}{n_i + n_{i-1}} \right] \right\}, \quad (7)$$

界面非完全相关模型下带有散射的多层膜透过率  $T_{Unc}$  为

$$T_{Unc} = T_D \cdot \prod_{i=1}^{k+1} \left\{ 1 - \left( \frac{4\pi\sigma_i}{\lambda} \right)^2 \left[ n_0 \cdot \frac{(n_i - n_{i-1})^2}{n_i + n_{i-1}} \right] \right\}, \quad (8)$$

式中: $T_D$  为膜层的理论设计透过率; $n_i$  和  $n_{i-1}$  分别代表界面两侧材料的折射率。

2) 界面粗糙度完全相关模型。该模型认为每一层薄膜界面都会复现基底的面形,薄膜表面的粗糙度和基底的粗糙度相同,界面的均方根粗糙度满足

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_i = \dots = \sigma_{sf} = \sigma_{sub}. \quad (9)$$

为了简化计算, $k$  层膜在界面完全相关模型下的总散射损耗  $S_{Cor}$  可近似为

$$S_{Cor} = 1 - \left\{ 1 - \left( \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \left[ n_0 \cdot \frac{(n_H - n_L)^2}{n_H + n_L} \right] \right\}^{k+1}, \quad (10)$$

界面完全相关模型下带有散射的多层膜透过率  $T_{Cor}$  为

$$T_{\text{Cor}} = T_{\text{D}} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \left[ n_0 \cdot \frac{(n_{\text{H}} - n_{\text{L}})^2}{n_{\text{H}} + n_{\text{L}}} \right] \right\}^{k+1}, \quad (11)$$

式中:  $n_{\text{H}}$  和  $n_{\text{L}}$  分别为两种镀膜材料的折射率。

### 3 薄膜的制备

#### 3.1 基底的选择

依据界面粗糙度完全相关模型所述,薄膜的粗

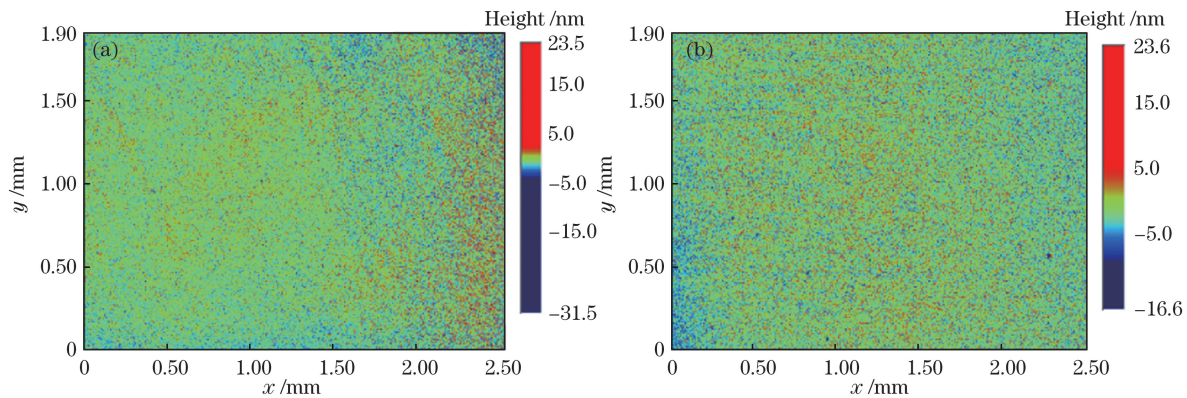


图 2 基底的表面形貌

Fig. 2 Surface morphology of substrate

表 1 基底的表面粗糙度

Table 1 Surface roughness of substrate

Substrate	$R_{\text{a}}/\text{nm}$	$R_{\text{p}}/\text{nm}$
Fig. 2(a)	1.052	1.309
Fig. 2(b)	0.985	1.285

#### 3.2 材料参数拟合

材料的光学常数会影响薄膜的光谱。TiO<sub>2</sub> 在沉积时会出现失氧现象,生成 TiO 和 TiO<sub>2</sub> 的混合物,发生薄膜吸收现象。通过调整 TiO<sub>2</sub> 镀膜工艺可以减弱 TiO<sub>2</sub> 薄膜的吸收现象。本文使用两层膜来模拟镀膜过程中的真空切换,第一层膜为  $2 \times 10^{-2}$  Pa 真空度下沉积的 TiO<sub>2</sub> 薄膜,第二层膜为 SiO<sub>2</sub> 薄膜(分别在  $2 \times 10^{-2}$  Pa 和  $8 \times 10^{-3}$  Pa 的真空度下制备)。

糙度与基底的粗糙度相关。为了在最大程度上削减基底的影响,保证工艺的一致性,基底选择粗糙度相同或相近的 K9 玻璃基底。使用 ContourGT-X3 型表面轮廓仪测试基底的表面形貌,结果如图 2 所示。在基底上随机取 5 点测试其表面粗糙度 ( $R_{\text{a}}$  和  $R_{\text{p}}$ ),取其算数平均值作为最终的测量结果,如表 1 所示。从表 1 中可以看出基底的表面粗糙度值较小且比较接近。

采用 Macleod 软件分别拟合两种材料的光学常数,拟合结果如图 3~4 所示。从图中可以看出:TiO<sub>2</sub> 的消光系数为  $10^{-4}$  量级,且集中于短波范围内,在整个镀膜过程中 TiO<sub>2</sub> 膜层对光谱的影响较小,因此后文在研究散射过程中不考虑 TiO<sub>2</sub> 的体散射与体吸收;SiO<sub>2</sub> 在两种不同制备条件下的光学常数相差不大,且吸收较小。

设计中采用的两种材料的光学常数如表 2 所示。

表 2 设计中采用的两种材料的光学常数

Table 2 Optical constants of two materials used in design

Material	Refractive index @1064 nm	Extinction coefficient @1064 nm
TiO <sub>2</sub>	2.24324	0
SiO <sub>2</sub>	1.45312	0

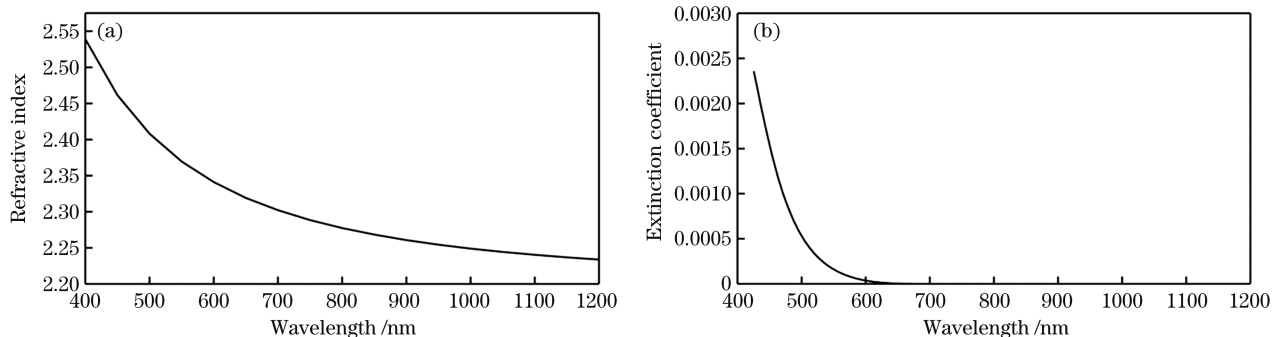


图 3 TiO<sub>2</sub> 材料的光学常数。(a)折射率;(b)消光系数

Fig. 3 Optical constants of TiO<sub>2</sub> material. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient



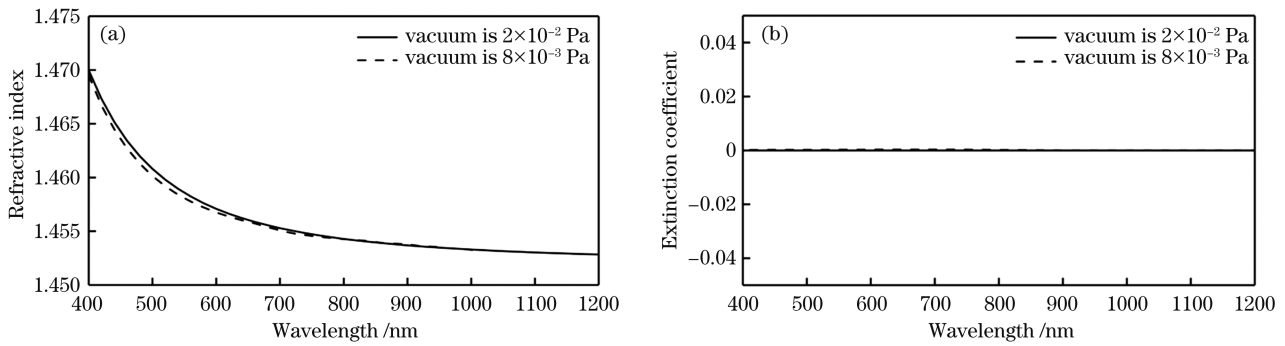


图 4 SiO<sub>2</sub> 材料的光学常数。(a)折射率;(b)消光系数

Fig. 4 Optical constants of SiO<sub>2</sub> material. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

### 3.3 膜系设计

1064 nm 带通滤光片的具体光谱设计要求如表 3 所示。

表 3 光谱设计要求

Table 3 Spectral design requirements

Item	Wavelength / nm	Transmittance / %
Short-wavelength stopband / nm	400–1025	<0.5(ave) <1.5(max)
Centre wavelength / nm	1064	–
Passband / nm	1040–1090	≥95(ave)
Full width at half maximum / nm	55–62	–
Long-wavelength stopband / nm	1105–1300	<0.3(ave) <1(max)

由于短波截止带的带宽较宽,根据带通滤光片

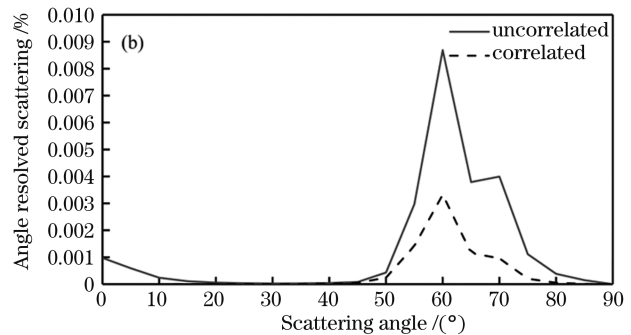
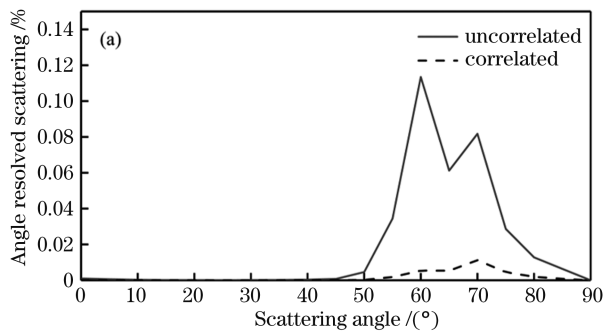


图 5 两种设计膜系的角分辨散射曲线。(a)短波靠近基底;(b)短波靠近空气

Fig. 5 Angle resolved scattering curves of two designed films. (a) Short-wave near substrate; (b) short-wave near air

综上,基础膜系结构采用 Sub|1.465(0.5L H 0.5L)<sup>9</sup>(0.5H L 0.5H)<sup>9</sup>0.75(0.5H L 0.5H)<sup>9</sup>0.52(0.5H L 0.5H)<sup>9</sup>|Air。根据光谱设计要求,使用 Macleod 软件进行设计优化,优化后的膜系结构为 Sub|1.24H 1.55L 1.88H 1.70L 1.35H 1.09L 1.53H 1.20L 1.28H 1.75L 1.77H 1.51L 1.42H 1.21L 1.25H 1.29L 1.31H 1.09L 0.85H 0.84L

薄膜设计理论<sup>[18]</sup>,本文采用长、短波带通滤光片膜系叠加的方式进行膜系设计。在研究散射的过程中,两个膜堆的排列顺序不同,膜层的电场就会不同,电场会影响薄膜的散射:电场强度越大,散射越大。两种不同膜堆的排列顺序分别为 Sub|0.52(0.5H L 0.5H)<sup>9</sup>0.75(0.5H L 0.5H)<sup>9</sup>(0.5H L 0.5H)<sup>9</sup>1.465(0.5L H 0.5L)<sup>9</sup>|Air 与 Sub|1.465(0.5L H 0.5L)<sup>9</sup>(0.5H L 0.5H)<sup>9</sup>0.75(0.5H L 0.5H)<sup>9</sup>0.52(0.5H L 0.5H)<sup>9</sup>|Air,其中 Sub 代表基底,H 代表高折射率材料,L 代表低折射率材料,Air 代表入射介质空气层。利用 Macleod 软件模拟计算两种膜系的角分辨散射随散射角的变化曲线,计算结果如图 5 所示。从图中可以看出,在完全相关与非完全相关模型下,短中心波长膜堆靠近空气侧的角分辨散射值小于靠近基底侧的。这说明短中心波长膜堆靠近空气侧时,多层膜的散射损耗较小。

0.58H 1.16L 1.18H 1.22L 1.03H 1.10L 1.15H 1.10L 0.95H 1.10L 0.72H 1.00L 0.90H 1.02L 0.96H 1.01L 1.18H 0.80L 0.48H 0.78L 0.80H 0.81L 0.91H 0.67L 0.62H 0.88L 0.67H 0.71L 0.93H 0.61L 0.64H 1.00L 0.49H 0.54L 0.58H 0.98L 0.52H 0.57L 0.54H 0.53L 0.43H 0.61L 0.55H 0.52L 0.45H 0.62L 0.49H 0.49L 0.56H



0.67L 0.30H 1.40L | Air, 其光谱曲线如图 6 所示。

本文所有光谱图均考虑了基片的背面效应。

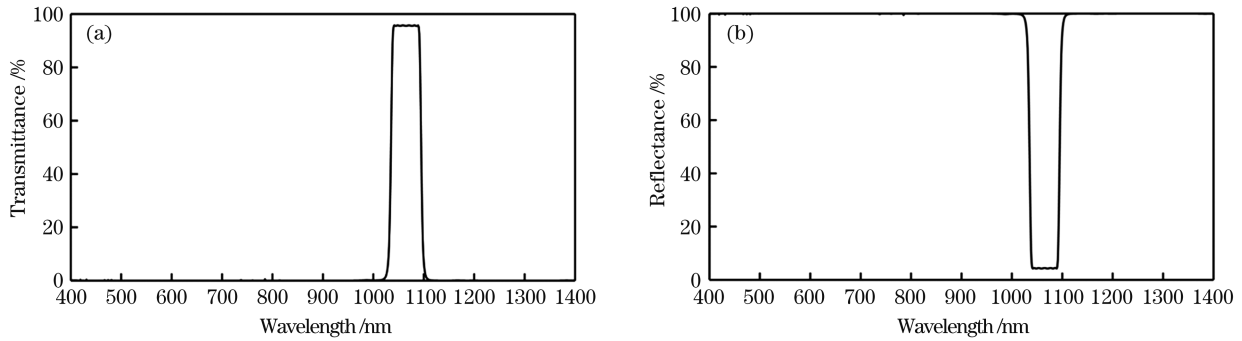


图 6 理论设计曲线。(a)透过率;(b)反射率

Fig. 6 Theoretically designed curve of transmittance. (a) Transmittance; (b) reflectance

### 3.4 多层膜的制备

本实验是在箱式电子束蒸发镀膜机中进行的。薄膜分别采用工艺 A 和 B 制备,两种工艺方法如表

4 所示。两种工艺方法中唯一的变量是 SiO<sub>2</sub> 层的氧分压不同,只改变控制 SiO<sub>2</sub> 的工艺条件不会对 TiO<sub>2</sub> 的光学常数产生影响。

表 4 制备滤光片薄膜的两种工艺

Table 4 Two deposition processes for preparing filter thin film

Process	Substrate temperature / °C	Pressure control vacuum / Pa		Evaporation rate / (nm · s <sup>-1</sup> )		Ion beam source	
		TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Screen voltage / V	Beam / mA
A	150	2 × 10 <sup>-2</sup>	2 × 10 <sup>-2</sup>	0.3	0.6	400	200
B		2 × 10 <sup>-2</sup>	8 × 10 <sup>-3</sup>				

## 4 测试分析与散射研究

### 4.1 光谱测试及分析

使用岛津 UV-3150 分光光度计测试两种工艺下制备的滤光片薄膜的透过率与反射率曲线,测试结果如图 7 所示。从图中可以看出,工艺 B 制备的薄膜的透过率低于工艺 A,且波长越短,低得越明

显,但两种薄膜的反射率相差不大。

造成透过率降低的原因主要有三方面:1)材料的光学常数;2)膜层厚度误差<sup>[19]</sup>;3)薄膜界面粗糙度引起的光散射。前文对材料进行了拟合分析,排除了材料光学常数的影响,后文将对后两个影响因素展开研究。为方便研究,后文将透过率曲线横坐标作放大处理。

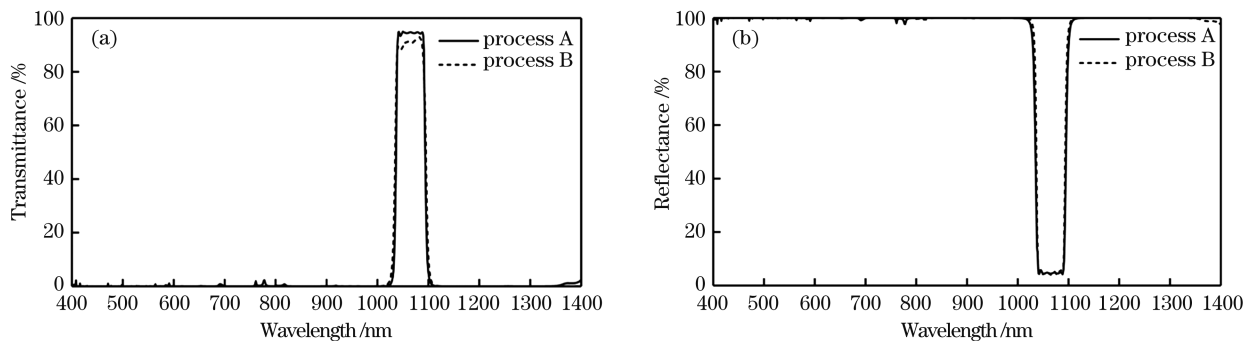


图 7 两种工艺制备的薄膜的光谱测试曲线。(a)透过率;(b)反射率

Fig. 7 Spectral test curve of film prepared at two processes. (a) Transmittance; (b) reflectance

### 4.2 膜厚控制误差分析

模拟膜层的敏感度如图 8 所示,可以看出,第 13、第 19、第 20、第 21、第 31、第 48 层膜层的敏感度较高。设定该 6 层膜的随机误差为 ±5 nm 时,可得

到多条透过率曲线,取其中 3 条与工艺 B 薄膜的测试曲线进行对比,如图 9 所示。两种工艺唯一的不同点是制备 SiO<sub>2</sub> 层时的氧分压不同,所以膜厚误差主要产生于 SiO<sub>2</sub> 膜层。模拟的 SiO<sub>2</sub> 材料 Tooling

增加和减少 5% 情况下的透过率曲线如图 10 所示。从图 9、10 中可以看出,膜层厚度误差拟合均不能复

现工艺 B 情况下的透过率曲线,说明膜厚控制误差并非工艺 B 下透过率光谱降低的主要影响因素。

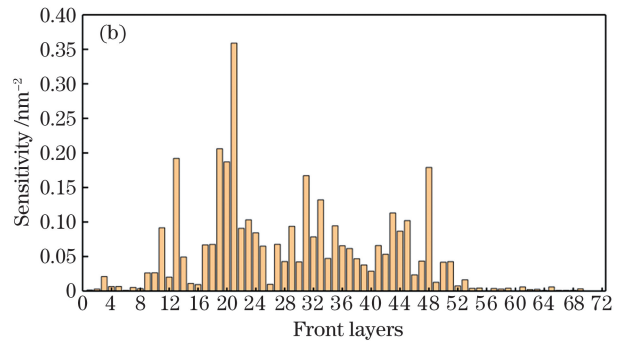
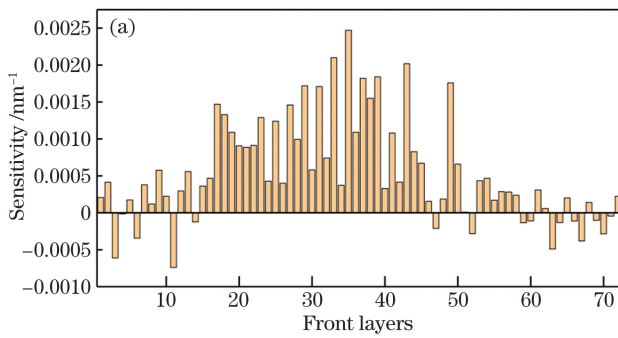


图 8 膜层敏感度。(a)第一阶膜层;(b)第二阶膜层

Fig. 8 Layer sensitivity. (a) First-order layer; (b) second-order layer

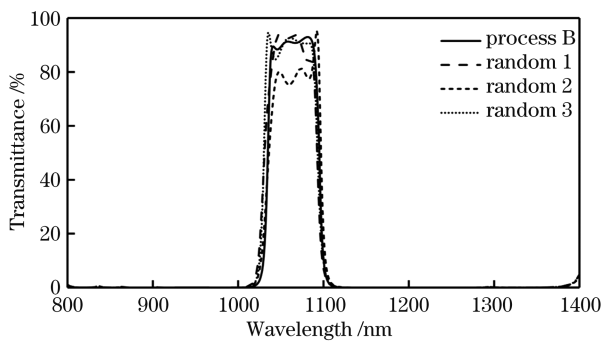


图 9 随机误差影响的透过率曲线

Fig. 9 Transmittance curve influenced by random error

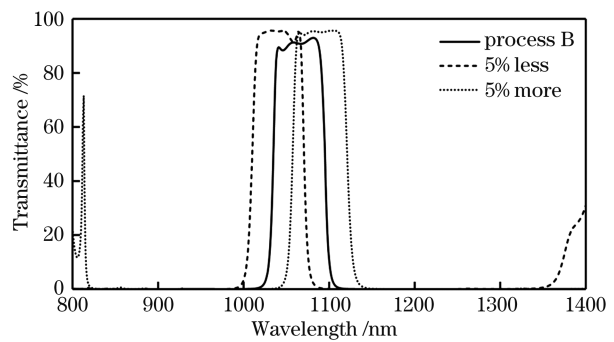


图 10 SiO<sub>2</sub> 材料 Tooling 值影响的透过率曲线

Fig. 10 Transmittance curve influenced by SiO<sub>2</sub> Tooling

### 4.3 粗糙度与散射分析

在排除材料光学常数与膜厚误差对薄膜透过率的影响后,分析薄膜散射对薄膜透过率的影响。使用表面轮廓仪对 A、B 两种不同工艺制备的薄膜的

表面形貌进行表征,图 11 为薄膜的表面形貌图。在薄膜上随机取 5 点测试表面粗糙度( $R_a$  和  $R_p$ ),取其算术平均值作为最终的测量结果,测量结果如表 5 所示。

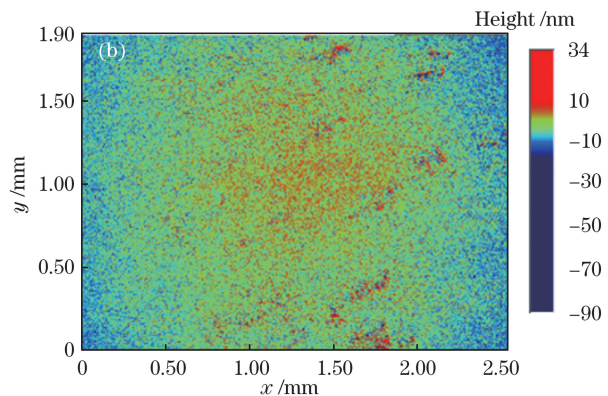
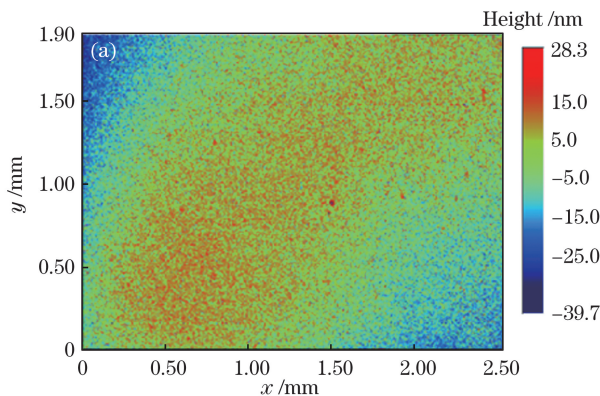


图 11 两种工艺制备的薄膜的表面形貌。(a)工艺 A;(b)工艺 B

Fig. 11 Surface morphologies of film prepared at two processes. (a) Process A; (b) process B

表 5 两种工艺制备的薄膜的表面粗糙度

Table 5 Surface roughness of film prepared at two processes

Process	$R_a$ / nm	$R_p$ / nm
A	1.127	1.485
B	6.751	8.252

如图 11 和表 5 所示,工艺 A 制备的薄膜表面更加平坦光滑。本文测试的  $R_a$  值为 nm 级算术平均偏差,在数值上可近似于均方根粗糙度,后续计算使用的粗糙度为  $R_a$  值。工艺 B 制备的薄膜的均方根粗糙度为 6.751 nm,远大于工艺 A 的 1.127 nm。

A、B 两种工艺制备的薄膜分别符合界面完全相关与非完全相关模型: 氧分压相同时的粗糙度与基底接近, 更符合界面完全相关模型; 氧分压不同时, 薄膜表面粗糙度比基底的表面粗糙度大得多。造成这种结果的主要原因是层与层之间的氧分压不同时, 真空度切换导致考夫曼离子源电离室内的气体分布不稳定, 进而导致离子束流不稳定, 薄膜界面的粗糙度增加, 使界面趋向于非完全相关模型。

依据文献[20]中模型所述, 界面散射的大小可

用界面粗糙的散射层的厚度来表征。使用 XL-30ESEM 扫描电镜对 A、B 两种工艺制备的滤光片薄膜的截面形貌进行表征, 结果如图 12 所示, 图中平整的深色层为  $\text{SiO}_2$  膜层, 浅色层为  $\text{TiO}_2$  膜层。从图中可以看出, 工艺 A 制备的薄膜相较于工艺 B 制备的薄膜截面更规整, 膜层更均匀, 散射层的厚度更小。这主要是氧分压不同时, 层与层之间真空度切换时  $\text{TiO}_2$  与  $\text{SiO}_2$  两种薄膜的沉积不稳定导致的。

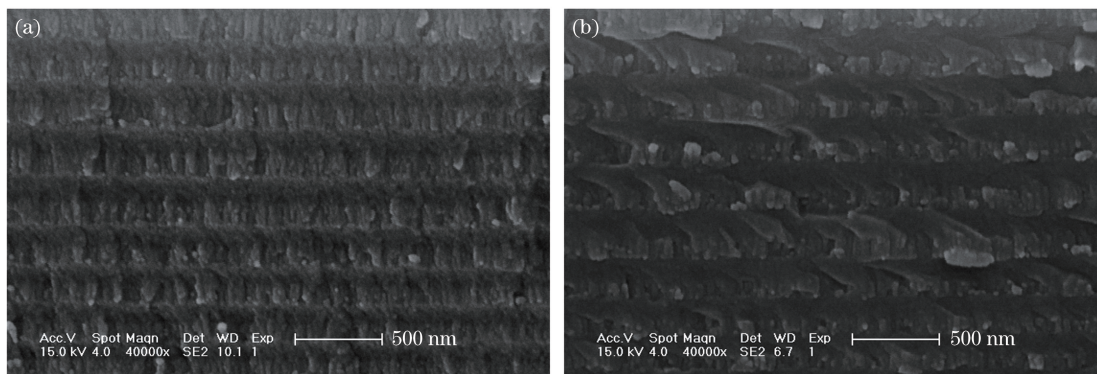


图 12 薄膜的扫描电镜图。(a)工艺 A;(b)工艺 B

Fig. 12 SEM images of film. (a) Process A; (b) process B

为验证薄膜的透过率降低来源于散射, 使用 UV-1800(积分球)分光光度计对两种工艺制备的薄膜的积分透过率进行表征, 结果如图 13 所示, 其中: 实线所示为使用积分球后得到的透过率, 为薄膜的透过率+积分散射率; 虚线为不使用积分球测试的

薄膜的实际透过率。对比后可以看出来, 工艺 B 制备的薄膜的散射明显大于工艺 A 制备的薄膜。综合轮廓仪、扫描电镜以及分光光度计的测试结果, 可以判断工艺 B 制备的薄膜透过率下降是膜层界面散射导致的。

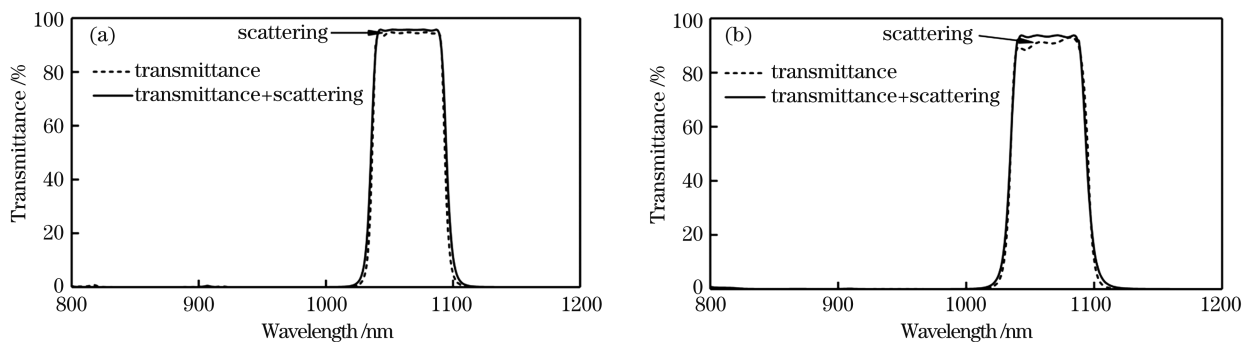


图 13 薄膜的积分散射。(a)工艺 A;(b)工艺 B

Fig. 13 Integral scattering of film. (a) Process A; (b) process B

利用(8)式计算工艺 B 制备的薄膜在非完全相关模型下的透过率曲线。薄膜的测试曲线与拟合曲线对比如图 14 所示, 可以看出, 非相关模型下拟合的透过率曲线与实际测试透过率曲线拟合良好。这说明透过率降低的主要原因是薄膜的散射。拟合曲线相较于测试曲线稍有偏差的原因是非相关模型认为各个界面的粗糙度是随机可变的, 模型计算中使用的粗糙度数据与实际膜层的界面粗糙度存在

偏差。

在工艺 A 中, 氧分压相同。利用(11)式计算界面完全相关模型下薄膜的透过率曲线, 薄膜测试曲线与拟合曲线的对比如图 15 所示。可以看出, 完全相关模型下的拟合曲线与实际测试曲线基本一致。在完全相关模型下拟合的散射较小, 透过率曲线也更好, 这说明为了减小薄膜的界面散射, 应通过工艺调整使薄膜界面面形尽可能接近基底的面形。



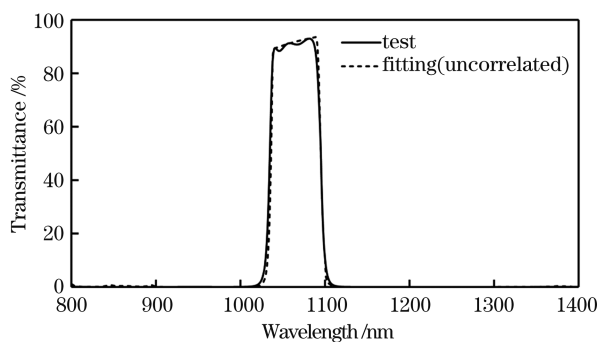


图 14 氧分压不同情况下薄膜的测试与拟合曲线

Fig. 14 Test and fitting curves of film prepared at different oxygen partial pressures

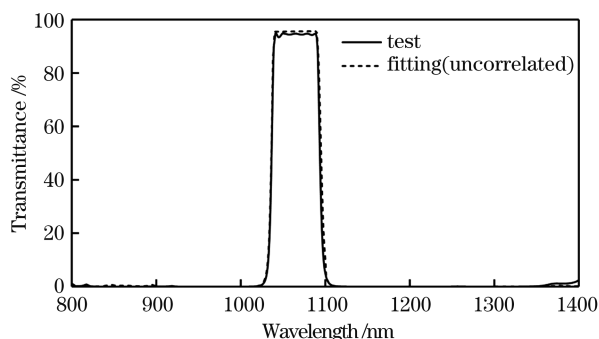


图 15 氧分压相同情况下薄膜的测试与拟合曲线

Fig. 15 Test and fitting curves of film prepared at same oxygen partial pressure

采用工艺 A 双面镀制的薄膜的测试曲线与设计曲线的对比如图 16 所示,可知测试曲线满足技术指标要求。测试曲线比设计曲线偏低一些的原因是膜层较多,随机误差会对光谱产生一定影响,并且散射与吸收量级虽然很小,但多层累积也会造成光能量损失。

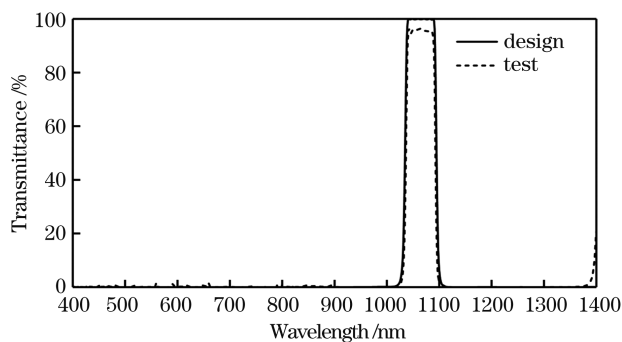


图 16 设计曲线与测试曲线的对比

Fig. 16 Comparison of design and test curves

## 5 结 论

基于单界面标量散射理论,推导出了多层膜在散射情况下的光谱特性表达式。基于此理论,设

计了低损耗的 1064 nm 带通滤光片,并在 K9 基底上,采用  $\text{TiO}_2$  与  $\text{SiO}_2$  两种材料,分别以固定氧分压和交替切换氧分压的方式,制备了 1064 nm 带通滤光片薄膜。讨论了采用交替切换氧分压时,考夫曼离子源不稳定导致的薄膜散射问题。采用恒定氧分压交替沉积膜层时,考夫曼离子源更稳定,引起的散射更小;交替切换氧分压时,考夫曼离子源的离子束流不稳定,使得初始沉积的薄膜具有不均匀的结构特性。其他工艺参数对散射的影响,后续将继续进行研究。

## 参 考 文 献

- [1] Christian W R, Mandel L. Investigation of backscattering effects on the correlation properties of a He-Ne ring laser[J]. JOSA B, 1988, 5(7): 1406-1411.
- [2] Niu Y B. Scatter properties study of reflector substrate in laser gyro[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 1-7.  
牛玉宝. 激光陀螺反射镜基片的光学散射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 1-7.
- [3] Wang J Y, Zhang J L, Jiao H F, et al. Study on high reflective film in 121.6 nm far ultraviolet[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0931001.  
王金艳, 张锦龙, 焦宏飞, 等. 121.6 nm 远紫外高反射薄膜研究[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0931001.
- [4] Caron B, Dominjon A, Drezen C, et al. The VIRGO interferometer for gravitational wave detection[J]. Nuclear Physics B, 1997, 54(3): 167-175.
- [5] Amra C. From light scattering to the microstructure of thin-film multilayers[J]. Applied Optics, 1993, 32(28): 5481-5491.
- [6] 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.
- [7] Zhang X X. Study on surface quality of optical components base on optical loss[D]. Sichuan: University of Chinese Academy of Science, 2016: 25-28.  
张兴鑫. 基于损耗特性的光学元件表面质量表征研究[D]. 四川: 中国科学院研究生院, 2016: 25-28.
- [8] Pan Y Q, Wu Z S, Hang L X, et al. Investigation of interface roughness cross-correlation properties of optical thin films from total scattering losses[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(11): 3503-3507.
- [9] Liu J Z, Pan Y Q, Zhang D, et al. Surface roughness and scattering characteristics of  $\text{TiO}_2$  thin film[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 033101.

- 刘金泽, 潘永强, 张达, 等.  $\text{TiO}_2$  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.
- [10] Bennett H E, Porteus J O. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence[J]. JOSA, 1961, 51(2): 123-129.
- [11] Wu W J, Li D, Xing L Z, et al. Dynamic characteristics of vascular morphology after 1064 nm laser exposure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(3): 0304001.  
吴文娟, 李东, 邢林庄, 等. 1064 nm 激光照射下血管形态的动态变化[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0304001.
- [12] Yu Z, Zhang W L, Zhu R, et al. Structural, optical, chemical and laser damage resistant properties of  $\text{HfO}_2$  films deposited by reactive electron beam evaporation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0403002.  
余振, 张伟丽, 朱瑞, 等. 反应电子束蒸发  $\text{HfO}_2$  薄膜的结构、光学、化学和抗激光损伤特性[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0403002.
- [13] Hou H H, Fan Z X, Shao J D, et al. Scalar scattering theory of optical surfaces [J]. Laser & Optronics Progress, 2005, 42(11): 35-38, 44.  
侯海虹, 范正修, 邵建达, 等. 光学表面的标量散射理论[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(11): 35-38, 44.
- [14] Zhang K P. Assessing surface quality for optical components by light scattering measurement [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 24-32.  
张科鹏. 基于散射测量的光学元件表面质量评估方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 24-32.
- [15] Azougui S, Silvestri Z, Zerrouki C, et al. Angle resolved scattering as a tribological investigation tool for surface characterization [J]. Wear, 2015, 326/327: 58-67.
- [16] Amra C, Apfel J H, Pelletier E, et al. Role of interface correlation in light scattering by amultiplayer [J]. Applied Optics, 1992, 31(16): 3134-3151.
- [17] Fan Z X, Shao J D, Yi K, et al. Optical films and their applications[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014: 15-36.  
范正修, 邵建达, 易葵, 等. 光学薄膜及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2014: 15-36.
- [18] Xie Z T, Yu G Y. Optimization design method for high performance tunable filter [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0831001.  
谢钟涛, 余桂英. 高性能可调谐滤波片的优化设计方法[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0831001.
- [19] Zhu R, Tao C X, Yu Z, et al. Design and fabrication of a 248-nm near-linearly graded transmittance optical film[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0603001.  
朱瑞, 陶春先, 余振, 等. 248 nm 透过率线性渐变光学薄膜的设计与制备[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0603001.
- [20] 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.

## Scattering Properties of Low-Loss 1064 nm Bandpass Filter Multilayer Films

Liu Dongmei<sup>1</sup>, Luo Yunfeng<sup>1\*</sup>, Fu Xiuhua<sup>1</sup>, Bao Ganghua<sup>2</sup>, Zhang Jing<sup>1</sup>, Lu Cheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Chengdu Guotai Vacuum Equipment Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611130, China

### Abstract

**Objective** The scattering loss of optical thin film is an important index to evaluate the performance of optical thin films. With the development of sophisticated laser test systems and high-precision optical systems, the optical industry has established high requirements for the performance of low-loss optical thin films. The scattering of thin films mainly arises from two aspects: bulk scattering and interface scattering, and the amount of interface scattering is much greater than that of bulk scattering. The scattering of single-layer films has been studied in detail by many scholars in China and other countries, but the scattering of multilayer films is more complex and difficult to study. The 1064 nm Nd : YAG solid laser has been used widely in laser medical treatment, laser beauty, and distance

measurement. Because the 1064 nm bandpass filter is an important part of the laser, it is particularly important to study the scattering of a 1064 nm multilayer film bandpass filter. Alternating evaporation of high- and low-refractive-index materials is usually accompanied by a change in vacuum degree, and this change may aggravate the scattering of thin films and affect the spectral characteristics of multilayer films. In this study, we deposited a 1064 nm bandpass filter film by two different vacuum control methods, tested the effects of two different processes on the film scattering and spectrum, and analyzed the influence mechanism of scattering under two different processes. By analyzing the process and scattering, we hope to present a manufacturing method for depositing low-scattering-loss bandpass filter films.

**Methods** First, we designed a 1064 nm bandpass filter by using the theory of film design with scattering. Second, on K9 substrate with the same roughness, the 1064 nm bandpass filter film was deposited via ion-assisted deposition with  $\text{TiO}_2$  and  $\text{SiO}_2$ , which were deposited under the same oxygen partial pressures and different oxygen partial pressures. Third, the film's spectrum was characterized using a spectrophotometer, which showed that the transmittance of the film deposited at the same oxygen partial pressure was better. Then, the effects of material parameters and random errors were eliminated by fitting. After that, by profilometer, scanning electron microscope, and integrating sphere, we concluded that the spectral difference mainly comes from scattering. Finally, the scattering formulas of the multilayer films under the model of complete and incomplete correlation were derived from scalar scattering theory, and the formulas were used to fit the transmittance curve with scattering under the two manufacturing methods, thus verifying the conclusion.

**Results and Discussions** The influences of various manufacturing factors on the scattering of multilayer films of 1064 nm bandpass filters and their spectral properties are the main focus of this work. First, we calculated the angular resolution scattering of two films with different permutation stacks (Fig. 5), which can provide guidance for the design of the less-scattering film (Fig. 6). Second, a 1064 nm bandpass filter film was deposited by two different methods of oxygen partial pressure control (Table 4), leading to the conclusion that the spectrum of films at the same oxygen partial pressure is better than that of films at different oxygen partial pressures (Fig. 7). Then, we analyzed the influence factors and mechanism of transmittance under two manufacturing methods, excluding the influences of the material's optical constant (Figs. 3–4) and film thickness control error (Figs. 8–10) and regarding the interface roughness and light scattering as the main causes of the transmittance reduction, and verified the accuracy of judgment through a roughness test (Fig. 11, Table 5), scanning electron microscope test (Fig. 12) and integral scattering test (Fig. 13). Third, based on the single-interface scalar scattering theory, we derived a model to calculate the total scattering loss and transmittance of multilayer films with complete and incomplete correlation, and used the roughness and spectral data of the films prepared under two different processes to verify the accuracy of the calculation model (Figs. 14–15).

**Conclusions** Based on the scalar scattering theory, we designed a low-scattering-loss 1064 nm bandpass filter film, which was deposited using fixed and alternating oxygen partial pressures for  $\text{TiO}_2$  and  $\text{SiO}_2$  materials on K9 substrates with the same roughness. The spectra of the films deposited under a fixed oxygen partial pressure were better than those of films deposited under alternating oxygen partial pressures. According to the profilometer test, scanning electron microscope test, and integrating sphere test, the main reason for this situation was that the change of the oxygen partial pressure caused instability of the gas distribution within the ionization chamber of the Kaufman ion source, causing an unstable ion beam. The unstable ion beam produced an uneven structure in the initial thin-film deposition and increased the film-interface roughness, both of which induced the scattering that affected the film's transmittance. Finally, the transmittance curves of the films deposited under the two manufacturing methods were fitted by the spectral calculation formula with scattering, which fit well with the actual transmittance test curves.

**Key words** thin films; interface scattering; bandpass filter; surface roughness; complete correlation and incomplete correlation

**OCIS codes** 290.4210; 290.5880; 310.3840; 310.6860