

光度法确定 LaF_3 薄膜光学常数

郭 春^{1,2} 林大伟¹ 张云洞¹ 李斌成¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了满足设计和生产多层膜系时精确确定薄膜材料光学常数的需要, 建立一种基于透射率光谱包络来获取弱吸收光学薄膜光学常数的均匀模型。为消除基底背面反射对光学薄膜光谱性能测量的影响, 给出一种非破坏性的薄膜光学特性校正方法, 校正实测光谱数据获得光学薄膜的单面光谱, 并给出确定基底光学常数的方法。研究钼舟热蒸发工艺制备的沉积在 CaF_2 基底上的 LaF_3 薄膜样品, 并获得了刚沉积的和紫外照射处理 40 min 后的 LaF_3 薄膜以及 CaF_2 基底在 160~340 nm 的光学常数。结果表明, 紫外照射处理可以提高 LaF_3 薄膜的光学特性 (增加折射率和降低消光系数), 并降低 LaF_3 薄膜的物理厚度。

关键词 薄膜; 光学常数; 分光光度法; LaF_3 ; 紫外照射处理

中图分类号 O484.41 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0731001

Determination of Optical Constants of LaF_3 Films from Spectrophotometric Measurements

Guo Chun^{1,2} Lin Dawei¹ Zhang Yundong¹ Li Bincheng¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A homogeneous model for extracting the optical constants of a weakly absorbing film, which is based on the envelope of the transmittance spectrum, has been developed. Expressions are given to correct the spectrum measurements of the thin film to eliminate the effects due to the reflectance from the rear surface of the substrate. Moreover, a simple approach for determining the optical constants of the substrate is also described. For a LaF_3 film deposited on CaF_2 substrate by Mo-boat evaporation, the optical constants of the as-deposited and ultraviolet (UV)-treated 40 min LaF_3 films and CaF_2 substrate in the wavelength region from 160 to 340 nm are obtained. The experimental results indicate that UV-treatment can improve the optical properties (increase the refractive index and reduce the extinction coefficient) and reduce the physical thickness of the LaF_3 film.

Key words thin films; optical constant; spectrophotometric measurement; LaF_3 ; UV-treatment

OCIS codes 310.1620; 310.1860; 310.6860

1 引 言

通常不同工艺条件或者不同实验室相同工艺条件下制备的光学薄膜具有不同的光学常数, 而为了设计制备出满足性能要求的薄膜元件首先必须准确确定薄膜材料的光学常数 (折射率和消光系数)。当前用于确定薄膜材料光学常数的方法有很多, 如分

光光度法^[1~3]、椭圆偏振法^[4,5]、利用波导原理的棱镜耦合法^[6]、表面等离子激元法^[7]和偏振态转换法^[8]等。由于近年来高精度真空紫外/深紫外 (VUV/DUV) 分光光度计的发展^[9], 使得分光光度法成为确定光学薄膜材料在 VUV/DUV 波段光学常数最精确、可靠的方法之一。分光光度法确定薄

收稿日期: 2011-01-17; 收到修改稿日期: 2011-03-11

作者简介: 郭 春 (1986—), 男, 博士研究生, 主要从事真空紫外光学薄膜制备和性能检测等方面的研究。

E-mail: guochunyouxiang@126.com

导师简介: 李斌成 (1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光热技术和光学薄膜制备及检测技术等方面的研究。

E-mail: bcli@ioe.ac.cn

膜材料光学常数,首先必须选择正确的理论模型。若薄膜材料的折射率不随其厚度变化而变化,则选用均匀模型;若薄膜材料的折射率随其厚度增加而增加或减小,则需采用非均匀模型^[10]。其次,由于单层膜光学性能测量不可避免地受到其基底背面反射的影响,为精确获得薄膜光学性能就必须对实测的光谱数据进行单面校正。迄今为止,文献报道的消除基底背面反射对薄膜光谱性能影响的主要技术途径是将基底背面加工成楔形、背面涂黑、背面贴胶带和腐蚀背面等^[11~13]。这些处理不仅校正薄膜光谱数据的精度有限,而且可能对光学薄膜元件带来不利影响甚至破坏,因此研究非破坏性的薄膜光学特性校正方法是非常必要的。

2 理 论

2.1 均匀薄膜模型

如图1所示的弱吸收均匀光学薄膜系统,是将厚度为 d ,光学常数为 $n-ik$ 的单层薄膜沉积到厚度为 t ,折射率为 n_s 的透明基底上。该光学薄膜的特征矩阵为^[14]

$$F = \begin{bmatrix} \cos \delta & i \sin \delta/n \\ i n \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 δ 为薄膜的相位厚度。光学薄膜的消光系数 k 仅包含于相位厚度 δ 中,即

$$\delta = 2\pi(n-ik)d/\lambda = \alpha - i\beta. \quad (2)$$

定义参数 B 和 C

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & i \sin \delta/n \\ i n \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由于弱吸收光学薄膜其消光系数 $k \ll 1$,那么 $\exp(\beta)$ 可以按一阶展开而忽略更高级次,即 $\exp(\beta) \approx 1 + \beta$, $\exp(-\beta) \approx 1 - \beta$ 。从而有

$$\begin{cases} \cos \delta = \cos \alpha + i\beta \sin \alpha \\ \sin \delta = \sin \alpha - i\beta \cos \alpha \end{cases}, \quad (4)$$

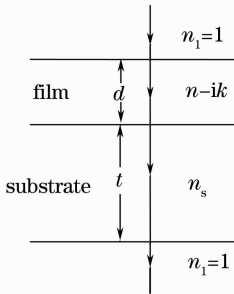


图1 弱吸收光学薄膜示意图

Fig. 1 System of a weakly absorbing thin film on a transparent substrate

整理得

$$n_0 B + C = [(n_0 + n_s) + \beta(n_0 n_s/n + n)] \cos \alpha + i[\beta(n_0 + n_s) + (n_0 n_s/n + n)] \sin \alpha, \quad (5)$$

定义参数

$$\begin{cases} x = n_0 n_s/n + n, \\ p = n_0 + n_s. \end{cases} \quad (6)$$

依据弱吸收光学薄膜特征矩阵,其透射率 T 为

$$T = \frac{4n_0 n_s}{(p + \beta x)^2 \cos^2 \alpha + (x + \beta p)^2 \sin^2 \alpha}. \quad (7)$$

假设计算中 $1/4$ 波长和半波长整数倍的位置对应于 $\alpha = m\pi/2$,同时假设 β 值所对应的极值位置和 α 的一致。 T_{\min} 和 T_{\max} 分别代表薄膜透射率的最小值和最大值,取决于薄膜折射率和基底折射率大小关系,如表1所示。以下理论是基于 $n_s < n$ 的弱吸收薄膜情况推导的。

表1 薄膜透射率光谱取极值条件

Table 1 Conditions for T to take the maximum or minimum

	T_{\min}	T_{\max}
$n_s > n$	Half wave	Quarter wave
$n_s < n$	Quarter wave	Half wave

根据(7)式,其极值点有

$$\begin{cases} (x + \beta p)^2 = 4n_0 n_s/T_{\min}, \\ (p + \beta x)^2 = 4n_0 n_s/T_{\max}. \end{cases} \quad (8)$$

解(8)式,得

$$\begin{cases} x = Y_1 + \sqrt{Y_1^2 + (p^2 - 2pY_2)}, \\ \beta = \frac{Y_1 - \sqrt{Y_1^2 + (p^2 - 2pY_2)}}{p}, \end{cases} \quad (9)$$

式中 $Y_1 = (n_0 n_s/T_{\min})^{1/2}$, $Y_2 = (n_0 n_s/T_{\max})^{1/2}$ 。最终,弱吸收薄膜的消光系数 k 和折射率 n 可分别通过解(2)式和(6)式确定:

$$\begin{cases} n = \frac{x + \sqrt{x^2 - 4n_0 n_s}}{2}, \\ k = \frac{\beta \lambda}{2\pi d}. \end{cases} \quad (10)$$

下文中还要用到的非均匀模型确定弱吸收光学薄膜光学常数,已有文献报道^[1,2]。

2.2 单面校正光谱

到目前为止,光学薄膜光谱特性为薄膜单面透射率。实际测量单层膜光学元件透射率和反射率时,其光谱特性均包含了基底背面反射的影响,为得到薄膜的光谱特性必须对其进行校正。弱吸收光学薄膜元件前后两个表面上非相干光叠加,光波在其前后两个表面上多次反射和透射,反射光和透射光

的强度总和分别为^[1]

$$\begin{cases} T = \frac{T_f T_s}{1 - R_f R_s} \\ R = \frac{R_f + R_s (T_f^2 - R_f^2)}{1 - R_f R_s} \end{cases}, \quad (11)$$

式中 T 和 R 分别为实测透射率和反射率; T_s, R_s, T_f 和 R_f 分别为基底和薄膜的经单面校正后的透射率和反射率。由(11)式可以解得

$$\begin{cases} T_f = \frac{TT_s(1 - RR_s)}{T_s^2 - R_s^2 T^2} \\ R_f = \frac{RT_s^2 - R_s T^2}{T_s^2 - R_s^2 T^2} \end{cases}. \quad (12)$$

基底的单面透射率 T_s 和反射率 R_s 可以通过测量未镀膜基底的透射率和反射率获得。对于未镀膜的基底, 有 $T_f = T_s, R_f = R_s$ 成立。代入(11)式得

$$\begin{cases} T = \frac{T_s^2}{1 - R_s^2} \\ R = \frac{R_s(1 + T_s^2 - R_s^2)}{1 - R_s^2} \end{cases}. \quad (13)$$

解(13)式得

$$\begin{cases} R_s = \frac{R}{1 + T} \\ T_s = \frac{\sqrt{T + 2T^2 + T^3 - TR^2}}{1 + T} \end{cases}. \quad (14)$$

只要精确测量出光学薄膜和基底的透射率和反射率, 就可以使用(12)式和(14)式校正测量光谱, 获得光学薄膜和基底的单面光谱特性。

2.3 基底光学常数

对无吸收的基底, 有 $T_s = 1 - R_s$ 成立。由(13)式可知, 光波在基底前后两个表面上多次透射和反射后, 透射光的强度总和为

$$T_0 = \frac{1 - R_s}{1 + R_s}, \quad (15)$$

如果基底存在吸收, 那么测量透射率将小于由(15)式计算得到的透射率。由于基底的消光系数很小, 那么 R_s 可以直接用于计算弱吸收基底的折射率 n_s ,

$$n_s = \frac{1 + \sqrt{R_s}}{1 - \sqrt{R_s}}, \quad (16)$$

并基于比尔定律, 有

$$k = -\frac{\lambda}{4\pi t} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right). \quad (17)$$

在精确测得基底透射率 T 和反射率 R 后, 可以将(14), (15)式代入(17)式得到弱吸收基底的消光系数,

$$k = -\frac{\lambda}{4\pi t} \ln\left[\frac{T(1 + T + R)}{1 + T - R}\right]. \quad (18)$$

3 LaF₃ 薄膜光学常数确定

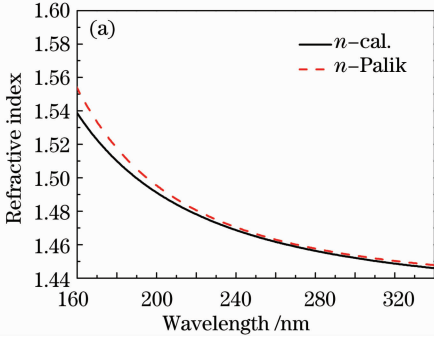
LaF₃ 是一种最常用的深紫外和真空紫外波段高折射率薄膜材料。一般来说, 热蒸发制备的 LaF₃ 薄膜, 其折射率随厚度变化可以是均匀或非均匀的, 取决于 LaF₃ 薄膜的制备条件, 如沉积速率、基底温度、基底材料和基底的晶面取向等^[15~17], 对大数值孔径元件, 还取决于 LaF₃ 蒸气沉积角^[18]。LaF₃ 薄膜样品采用钼舟蒸发工艺制备, 在成都南光机器有限公司生产的 ZZS800-2/G 型箱式真空镀膜机上制备。薄膜沉积时真空度高于 3.0×10^{-4} Pa, 基底温度为 350 °C, 沉积速率和薄膜厚度均采用石英晶振片监控, 薄膜沉积速率控制在 0.04 nm/s。LaF₃ 薄膜膜料采用 Merck 公司产品, CaF₂ 基底直径为一英寸, 厚度为 3 mm, 表面粗糙度为 1.2 nm(采用原子力显微镜测量, 检测区域为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$)。LaF₃ 薄膜沉积前, 首先用乙醇和乙醚的混合液清洗 CaF₂ 基底表面, 接着用紫外(UV)照射处理基底 40 min。紫外照射处理能很好的分解基底表面吸附的碳氢根污染物, 并以易挥发的 CO, CO₂ 和 H₂O 形式排除^[19]。

LaF₃ 薄膜样品透射率和反射率采用美国 McPherson 公司 VUVaS2000 真空紫外分光光度计检测。为了避免空气中氧气在低于 190 nm 波段的强吸收, LaF₃ 薄膜样品光谱测量均在真空中测量, 测量时样品室真空度高于 1.0×10^{-2} Pa。LaF₃ 薄膜样品透射率和反射率测量角度分别为 0° 和 10°, 理论模拟证实垂直入射和 10° 入射测量的薄膜样品反射率差别不大。在沉积 LaF₃ 薄膜样品之前, 测量了紫外照射处理 40 min 后的 CaF₂ 基底透射率和反射率光谱。

依据测量的 CaF₂ 基底透射率和反射率光谱, 紫外照射处理 40 min 后的 CaF₂ 基底的光学常数通过解(16)式和(18)式获得。计算得到的 CaF₂ 基底折射率如图 2(a) 实线所示, 图 2(a) 中所示的破折线数据为 Palik^[20] 报道的 CaF₂ 材料折射率, 计算得到的 CaF₂ 基底折射率与 Palik 报道的数据偏差并不大。在 160~230 nm 波段, 两者偏差是单调递减函数, 最大的偏差为 0.015 对应于 160 nm 波长, 最小的偏差为 0.002 对应于 230 nm 波长; 在 230~340 nm 波段, 两者偏差均低于 0.002。计算得到 CaF₂ 基底消光系数如图 2(b) 所示。

对 LaF₃ 薄膜样品, 首先测量刚沉积的 LaF₃ 薄膜样品透射率和反射率, 将该样品紫外照射处理 40 min 后再次测量。为减小光谱测量的系统误差,

在运用光谱数据前对其进行光滑处理,这里测量的光谱数据均采用二项式分布光滑算法处理^[21]。测量的 LaF₃ 薄膜和 CaF₂ 基底的光谱曲线如图 3(a) 所示。这些测量光谱数据包含有基底背面反射的影响,为准确确定薄膜样品的光学常数必须对其进行单面光谱校正。利用(12)式和(14)式分别获得



LaF₃ 薄膜和 CaF₂ 基底单面校正后的光谱曲线如图 3(b) 所示。从图 3(a) 可知,紫外照射处理 LaF₃ 薄膜提高了薄膜在真空紫外波段的透射率。另外,图 3(a) 中刚沉积的 LaF₃ 薄膜的反射率小于经紫外照射处理后的反射率,这主要是因为刚沉积的 LaF₃ 薄膜中有更高的吸收损耗,如后面的测量结果所示。

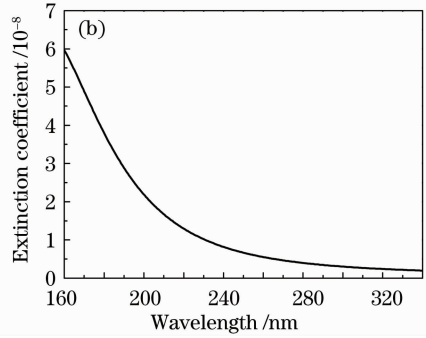


图 2 CaF₂ 基底光学常数。(a) 折射率,(b) 消光系数

Fig. 2 Optical constants of the CaF₂ substrate. (a) Refractive index, (b) extinction coefficient

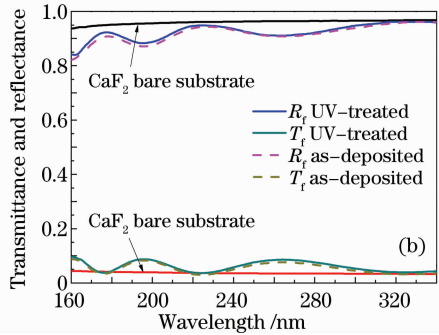
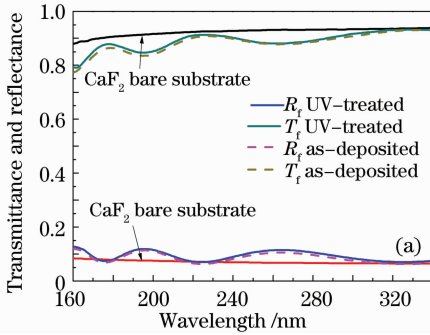


图 3 LaF₃ 薄膜和 CaF₂ 基底的光谱曲线。(a) 实测光谱曲线;(b) 单面校正后的光谱曲线

Fig. 3 Transmittance and reflectance of sample. (a) Measured data; (b) corrected single-surface data

对紫外照射前后的 LaF₃ 薄膜样品光学常数分别采用非均匀模型和均匀模型两种方法确定。这两种模型均采用寻找计算和测量光谱数据之间的偏差最小值,从而同时确定薄膜样品光学常数和厚度。对非均匀模型由于要解一个超越方程组,无法给出精确的解析解,需采用迭代算法寻优。非均匀模型确定 LaF₃ 薄膜样品光学常数时,迭代的初始值(n , k)和 d 通过包络法确定^[2]。而第 2 节中给出的均匀模型,一旦知道薄膜透射率的上下包络,便可以通过解(9)式和(10)式给出光学薄膜光学常数(n , k)的精确解。为了便于非均匀和均匀模型确定 LaF₃ 薄膜样品光学常数结果的比较,使用的评价函数为

$$\Delta = \left[\frac{1}{l} \sum_{i=1}^l (z_i - \bar{z})^2 \right]^{1/2}, \quad (19)$$

式中 $z_i = T_{\text{meas}}(\lambda_i) - T_{\text{cal}}(\lambda_i)$, $\bar{z} = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l z_i$, $T_{\text{meas}}(\lambda_i)$ 和 $T_{\text{cal}}(\lambda_i)$ 分别为 LaF₃ 薄膜样品实测透射

率和计算数据, l 为评价函数计算时所取波长个数。

无论非均匀还是均匀模型确定 LaF₃ 薄膜样品光学常数,都必须准确获取 LaF₃ 薄膜样品光谱曲线的最大值和最小值包络。对于非均匀模型,需要同时知道样品透射率和反射率的上下极值包络曲线;而对均匀模型,仅需要获取样品透射率的上下极值包络曲线。LaF₃ 薄膜样品光谱曲线的包络线均采用三次样条插值法计算机编程提取,计算机获取包络曲线算法已由 Minkov 等^[22] 充分研究。紫外照射处理前后 LaF₃ 薄膜样品透射率和反射率上下极值包络曲线如图 4 所示。

不同模型计算的紫外照射处理前后 LaF₃ 薄膜样品透射率与测量数据如图 5 所示。从图 5(a) 可知,刚沉积的 LaF₃ 薄膜样品采用非均匀模型计算的透射率与测量结果的偏差比采用均匀模型计算的偏差小;而从图 5(b) 可见,紫外照射处理 40 min 后的 LaF₃ 薄膜样品采用非均匀模型计算的透射率与

测量数据的偏差比采用均匀模型计算的偏差大。不同模型下 LaF₃ 薄膜样品评价函数值对比如图 6 所示。刚沉积的 LaF₃ 薄膜样品采用非均匀模型和均匀模型的评价函数值分别为 0.00165 和 0.00578；紫外照射处理 40 min 后的 LaF₃ 薄膜样品采用非均匀和均匀模型的评价函数值分别为 0.00528 和

0.00164。结果显示非均匀模型适合描述刚沉积的 LaF₃ 薄膜，而均匀模型适合描述紫外照射处理后的 LaF₃ 薄膜。要确定紫外照射处理后膜层是否更均匀，需要对紫外照射处理前后的 LaF₃ 薄膜做更多的研究。

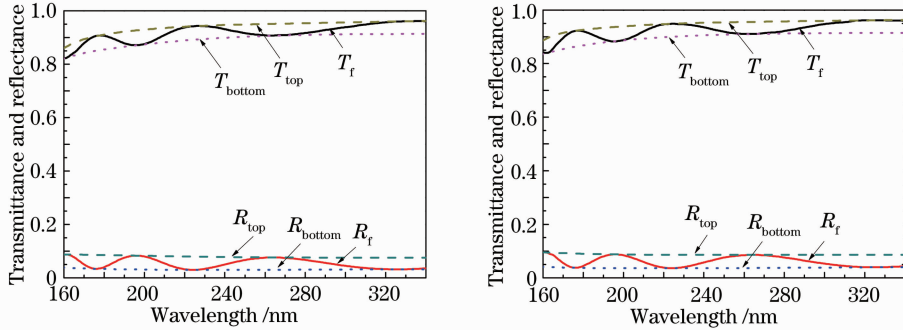


图 4 LaF₃ 薄膜光谱包络曲线。(a)刚沉积的 LaF₃ 薄膜样品；(b) 紫外照射处理后的 LaF₃ 薄膜样品

Fig. 4 Envelope curves of the LaF₃ single layer coatings. (a) As-deposited sample; (b) UV-treated sample

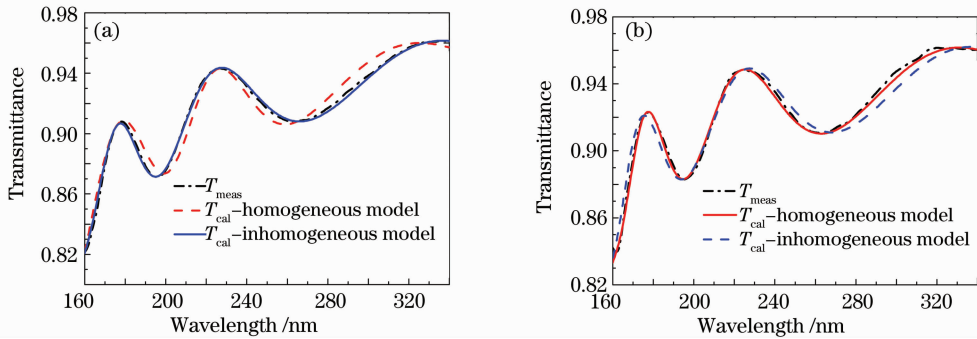


图 5 LaF₃ 薄膜理论透射率光谱和实测数据比较。(a)刚沉积的 LaF₃ 薄膜；(b) 紫外照射处理后的 LaF₃ 薄膜

Fig. 5 Transmittance of the LaF₃ films. (a) As-deposited sample; (b) UV-treated sample

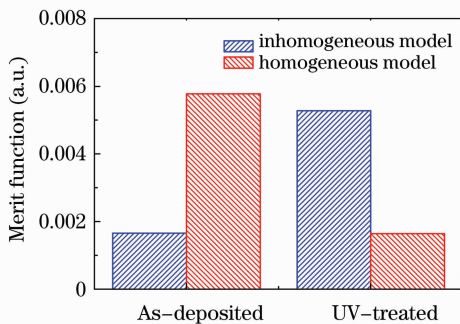


图 6 不同模型下 LaF₃ 薄膜样品评价函数值

Fig. 6 Merit function values of LaF₃ film using different models

非均匀模型确定刚沉积 LaF₃ 薄膜样品和均匀模型确定紫外照射处理 40 min 后 LaF₃ 薄膜样品的光学常数如图 7 所示。紫外照射处理能提高 LaF₃

薄膜折射率，降低其消光系数。刚沉积的 LaF₃ 薄膜样品在 193 nm 的平均折射率、折射率非均匀性和消光系数分别为 1.656，-5.4% 和 3.7×10^{-3} 。紫外照射处理后 LaF₃ 薄膜样品在 193 nm 的折射率和消光系数分别为 1.688 和 1.9×10^{-3} 。

通常影响热蒸发工艺制备光学薄膜光学常数的因素主要有热蒸发工艺参数(基底温度、沉积速率和真空度等)和基底质量(材料、表面粗糙度、几何尺寸、晶面取向和表面清洁情况等)。表 2 总结了不同实验室采用钨舟热蒸发工艺制备的沉积在 CaF₂ 基底上的 LaF₃ 单层膜在 193 nm 的折射率。当前钨舟热蒸发制备的沉积在 CaF₂ 基底上的 LaF₃ 薄膜折射率一般在 1.63~1.70 之间，与本实验结果较符合。

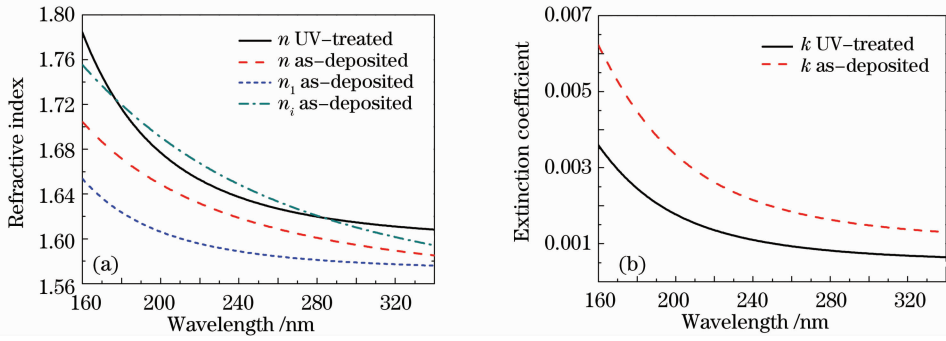


图 7 LaF₃ 薄膜样品光学常数。(a)折射率;(b)消光系数

Fig. 7 Optical constants of LaF₃ films. (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

表 2 钼舟热蒸发制备的沉积在 CaF₂ 基底上 LaF₃ 薄膜在 193 nm 波长处的折射率

Table 2 Refractive index of LaF₃ films on CaF₂ deposited by Mo-boat evaporation at 193 nm

Substrate temperature / °C	Deposited rate / (nm/s)	Vacuum / Pa	Refractive index	References
150	0.2	10 ⁻⁴	1.69	[15]
Room temperature	0.1		1.654	
	0.06		1.665	
250	0.1	<2×10 ⁻⁴	1.661	[23]
	0.8		1.631	
300	0.1		1.696	
320	0.15	<2×10 ⁻³	1.63	[24]
350	0.4	5×10 ⁻⁴	1.675	[25]
400	0.6	2×10 ⁻⁴	1.701	[26]

对于弱吸收光学薄膜,其光谱极值点满足

$$\frac{4\pi nd}{\lambda} = m\pi, \quad (20)$$

式中 m 为对应于各个极值波长处光学薄膜的干涉级次。当知道光学薄膜各个极值点的干涉级次 m 和对应的折射率 n 时,就可以利用(20)式解光学薄膜厚度 d 。通常薄膜厚度由(20)式确定各个极值点处的厚度取平均获得,该方法精度有限。通过对尽可能多的波长数据点进行全局优化,可获得更准确的薄膜厚度。评价函数值随厚度取值变化曲线将能

很好地证实这一点。全局优化时当评价函数最小时所对应的厚度为薄膜厚度。紫外照射前后 LaF₃ 薄膜样品评价函数值随厚度的变化曲线如图 8 所示。刚沉积的 LaF₃ 薄膜样品,其极值点厚度平均值为 208.43 nm,最小评价函数值对应的厚度为 208.79 nm;紫外照射处理 40 min 后 LaF₃ 薄膜的极值点厚度平均值为 197.08 nm,最小评价函数值对应的厚度为 204.11 nm。可见紫外照射处理降低了 LaF₃ 薄膜的物理厚度。

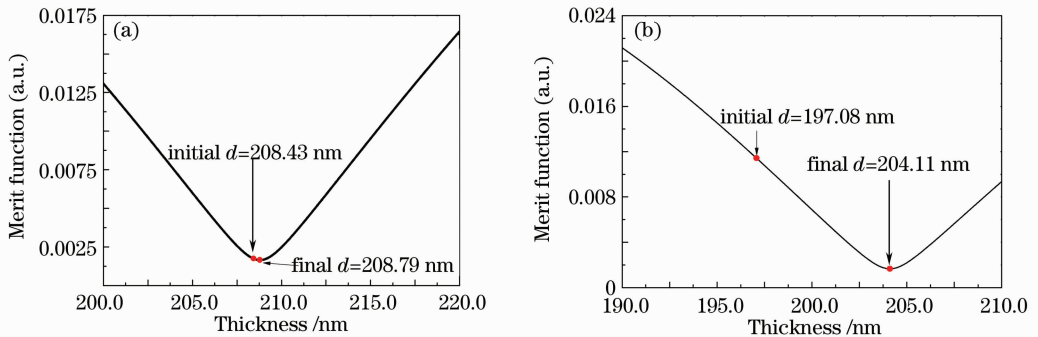


图 8 评价函数值随厚度变化关系。(a)刚沉积的 LaF₃ 薄膜样品,(b)紫外照射处理的 LaF₃ 薄膜样品

Fig. 8 Merit function values of the LaF₃ film sample. (a) As-deposited sample, (b) UV-treated sample

4 结 论

研究钼舟热蒸发制备的沉积在 CaF₂ 基底上的 LaF₃ 薄膜样品,并确定刚沉积的和紫外照射处理 40 min 后的 LaF₃ 薄膜以及 CaF₂ 基底在 160~340 nm 的光学常数。结果表明,紫外照射处理可以提高 LaF₃ 薄膜的光学性能(增加折射率和降低消光系数)并减少薄膜的物理厚度。刚沉积的 LaF₃ 薄膜样品高吸收损耗是否来源于 f 色心的产生、局部化学计量比失衡或者结构缺陷,以及紫外照射处理降低 LaF₃ 薄膜的物理厚度是否由于样品的结构重组、聚集密度变化或者表面粗糙度变化引起的,需要对 LaF₃ 薄膜样品做更深入的研究。

参 考 文 献

- 1 D. P. Arndt, R. M. A. Azzam, J. M. Bennett *et al.*. Multiple determination of the optical constants of thin-film coating materials[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(20): 3571~3596
- 2 Xue Chunrong, Yi Kui, Wei Chaoyang *et al.*. Optical constants of DUV/UV fluoride thin films[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 449~451
- 3 Xue Chunrong, Yi Kui, Qi Hongji *et al.*. Optical constants of film materials for deep ultraviolet/ultraviolet [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2135~2139
薛春荣, 易 葵, 齐红基 等. 深紫外/紫外薄膜材料的光学常数研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2135~2139
- 4 Zhou Yi, Wang Aiyang. Determination of optical constants and thickness of diamond-like carbon films by a multiple sample method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2468~2473
周 毅, 汪爱英. 多样品法确定类金刚石薄膜的光学常数与厚度 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2468~2473
- 5 S. Y. Kim. Simultaneous determination of refractive index, extinction coefficient, and void distribution of titanium dioxide thin film by optical methods[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(34): 6703~6707
- 6 J. L. Cardin, D. Leduc. Determination of refractive index, thickness, and the optical losses of thin films from prism-film coupling measurements[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(7): 894~900
- 7 Y. J. Jen, C. H. Hsieh, T. S. Lo. Optical constant determination of an anisotropic thin film via surface plasmon resonance: analyzed by sensitivity calculation [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **244**(1-6): 269~277
- 8 Y. J. Jen, C. Y. Peng, H. H. Chang. Optical constant determination of an anisotropic thin film via polarization conversion[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 4445~4451
- 9 H. Blaschke, J. Kohlhaas, P. Kadkhoda *et al.*. DUV/VUV spectrophotometry for high precision spectral characterization [C]. *SPIE*, 2003, **4932**: 536~543
- 10 A. Tikhonravov, M. Trubetskov, T. Amotchkina *et al.*. Reliable determination of wavelength dependence of thin films refractive index[C]. *SPIE*, 2003, **5188**: 331~342
- 11 S. Humphrey. Direct calculation of the optical constants for a thin film using a midpoint envelope[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(21): 4660~4666
- 12 M. F. Al-Kuhaili, E. E. Khawaja, S. M. A. Durrani. Determination of the optical constants (*n* and *k*) of inhomogeneous thin films with linear index profiles[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(19): 4591~4597
- 13 H. Niederwald, L. Deisenroth, S. Nunnendorf. Off axis microspectrophotometer for optical coating characterization on complex surfaces[C]. *SPIE*, 2005, **5965**: 59651S
- 14 A. H. Macleod. *Thin-Film Optical Filters* [M]. London: Institute of Physics Publishing, 2001. 37~40
- 15 M. Bischoff, D. Gäbler, N. Kaiser *et al.*. Optical and structural properties of LaF₃ thin films[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(13): C157~C161
- 16 C. C. Lee, M. C. Liu, M. Kaneko *et al.*. Influence of thermal annealing and ultraviolet light irradiation on LaF₃ thin films at 193 nm[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(32): 6921~6926
- 17 Y. Taki, K. Muramatsu. Hetero-epitaxial growth and optical properties of LaF₃ on CaF₂ [J]. *Thin Solid Films*, 2002, **420-421**: 30~37
- 18 P. Kelkar, B. Tirri, R. Wilklow *et al.*. Deposition and characterization of challenging DUV coatings[C]. *SPIE*, 2008, **7067**: 706708
- 19 Li Bincheng, Lin Dawei, Han Yanling *et al.*. Antireflective fluoride coatings for widely tunable deep-ultraviolet diode-pumped solid-state laser applications[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(4): 044201
- 20 E. D. Palik. *Handbook of Optical Constants of Solids II*[M]. Boston: Academic Press, 1998. 830~831
- 21 P. Marchand, L. Marmet. Binomial smoothing filter: a way to avoid some pitfalls of least-squares polynomial smoothing[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, **54**(8): 1034~1041
- 22 D. Minkov, R. Swanepoel. Computerization of the optical characterization of a thin dielectric film[J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(12): 3333~3337
- 23 M. C. Liu, C. C. Lee, M. Kaneko *et al.*. Microstructure related properties of lanthanum fluoride films deposited by molybdenum boat evaporation at 193 nm[J]. *Thin Solid Films*, 2005, **492**(1-2): 45~51
- 24 H. Uhlig, R. Thielsch, J. Heber *et al.*. Lanthanide trifluorides: a survey of the optical, mechanical and structural properties of thin films with emphasis of their use in the DUV-VUV-spectral range[C]. *SPIE*, 2005, **5963**: 59630N
- 25 D. Ristau, S. Günster, S. Bosch *et al.*. Ultraviolet optical and microstructural properties of MgF₂ and LaF₃ coatings deposited by ion-beam sputtering and boat and electron-beam evaporation [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(16): 3196~3204
- 26 R. Götzelmann, D. H. Hagedorn, A. Zöllner *et al.*. Oxide and fluoride coatings for the excimer wavelength 193 nm[C]. *SPIE*, 2005, **5963**: 59630L