

# 热蒸发与离子束溅射制备 $\text{LaF}_3$ 薄膜的光学特性

才玺坤\*, 张立超, 梅 林, 时 光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**研究了钼舟热蒸发工艺和离子束溅射方法制备的单层  $\text{LaF}_3$  薄膜的特性。首先,采用分光光度计测量了  $\text{LaF}_3$  薄膜的透射率和反射率光谱,使用不同模型拟合得出薄膜的折射率和消光系数。然后,采用应力仪测量了加热和降温过程中  $\text{LaF}_3$  薄膜的应力-温度曲线。最后,采用 X 射线衍射仪测试了薄膜的晶体结构。实验结果表明,热蒸发制备的  $\text{LaF}_3$  (RH  $\text{LaF}_3$ ) 存在折射率的不均匀性,在 193 nm,其折射率和消光系数分别为 1.687 和  $5 \times 10^{-4}$ ,而离子束溅射制备的  $\text{LaF}_3$  (IBS  $\text{LaF}_3$ ) 折射率和消光系数分别为 1.714 和  $9 \times 10^{-4}$ 。两种薄膜表现出相反的应力状态,RH  $\text{LaF}_3$  薄膜具有张应力,而 IBS  $\text{LaF}_3$  具有压应力,退火之后其压应力减小。热蒸发制备的  $\text{MgF}_2/\text{LaF}_3$  减反膜在 193 nm 透过率为 99.4%,反射率为 0.04%,离子束溅射制备的  $\text{AlF}_3/\text{LaF}_3$  减反膜透过率为 99.2%,反射率为 0.1%。

**关键词:**薄膜; $\text{LaF}_3$ ;热蒸发;离子束溅射;应力;减反膜

中图分类号:O484.41 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140705.0808

## Optical properties of $\text{LaF}_3$ thin films prepared by thermal evaporation and ion beam sputtering

CAI Xi-kun\*, ZHANG Li-chao, MEI Lin, SHI Guang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, China Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: christcxk@126.com

**Abstract:** To meet the requirements for different practical applications, we investigate the properties of single  $\text{LaF}_3$  layer deposited by resistive heating Mo-boat (RH) and ion beam sputtering (IBS) in this paper. First, transmittance and reflectance spectra of  $\text{LaF}_3$  thin films were measured by an UV-visible spectrophotometer, and the refractive indexes and extinction coefficients were obtained by using different models. Second, stress-temperature curves of  $\text{LaF}_3$  thin films during heating and cooling cycles were carried out by a stress measurement system. Finally, the X-ray diffraction (XRD) was used to characterize the microstructure of  $\text{LaF}_3$  layers. Experimental results indicate that  $\text{LaF}_3$  thin film fabricated by thermal evaporation (RH  $\text{LaF}_3$ ) had an inhomogeneous refractive index distribution.

收稿日期:2014-04-15;修订日期:2014-07-18

基金项目:国家重大科技专项(02 专项)基金资助项目(No. 2009ZX02205)

geneous refractive index; the refractive index and extinction coefficient at 193 nm are 1.687 and  $5 \times 10^{-4}$  for RH LaF<sub>3</sub>, and 1.714 and  $9 \times 10^{-4}$  for IBS LaF<sub>3</sub>, respectively. RH LaF<sub>3</sub> and IBS LaF<sub>3</sub> exhibited inverse stress status. RH LaF<sub>3</sub> had a tensile stress and IBS LaF<sub>3</sub> showed a compressive stress, which decreased after annealing. The transmittances are 99.4% and 99.2% for RH deposited MgF<sub>2</sub>/LaF<sub>3</sub> AR coating and IBS deposited AlF<sub>3</sub>/LaF<sub>3</sub> AR coating, and the corresponding measured reflectances are 0.04% and 0.1%, respectively.

**Key words:** thin films; LaF<sub>3</sub>; thermal evaporation; ion beam sputtering; stress; AR

## 1 引言

近年来,随着激光技术的发展,准分子激光、固体倍频激光以及自由电子激光等紫外光源已广泛应用于半导体工艺、激光泵浦、生物医学以及空间工程等领域<sup>[1-4]</sup>,因此对紫外光学薄膜的性能的要求也不断提高。以193 nm投影光刻为例,其系统具有几十个光学元件,为使系统的透过率达到使用标准,镀膜元件需要实现接近100%的透过率,并具备良好的抗激光损伤能力<sup>[5]</sup>。

在深紫外波段,光子能量已大于多数材料的禁带宽度,能够用于镀膜的材料只有少数几种氟化物和氧化物,由于氧化物材料禁带带宽小,消光系数高于氟化物材料,因此氟化物材料是深紫外波段光学薄膜的最好选择,常用的氟化物高折射率材料有 LaF<sub>3</sub> 和 GdF<sub>3</sub>,低折射率材料有 AlF<sub>3</sub> 和 MgF<sub>2</sub>。氟化物薄膜可使用多种沉积方法制备,包括热蒸发,磁控溅射,离子束辅助沉积,离子束溅射等<sup>[6-9]</sup>。研究表明,热蒸发方法制备的氟化物光学损耗最小<sup>[8,10-11]</sup>,但由于热蒸发沉积粒子的动能小,所制备薄膜的致密性较低,所以抗激光损伤性能差。因此热蒸发方法制备的薄膜存在较大的折射率不均匀性<sup>[12]</sup>,尤其对于大口径曲面元件,蒸发粒子与镀膜元件边缘位置平均入射角较大时,折射率不均匀性更加明显<sup>[13]</sup>。这种不均匀性是指在厚度方向上折射率的变化,通常是由于薄膜填充密度的变化造成的<sup>[14]</sup>。相对而言,溅射方法制备薄膜的致密性高,表面粗糙度低,环境稳定性好<sup>[11]</sup>。溅射方法制备薄膜时基底温度低,可以避免高温对光学元件面形的影响,然而,溅射方法制备的薄膜深紫外波段吸收较大。氟化物的选择性溅射而造成的失氟是吸收的主要原因,因此沉

积过程需要注入含氟的工艺气体,如 F<sub>2</sub>, CF<sub>4</sub> 和 NF<sub>3</sub><sup>[7,9,15]</sup>等, F<sub>2</sub> 和 CF<sub>4</sub> 毒性强, NF<sub>3</sub> 毒性相对较小,而 CF<sub>4</sub> 分解会生产含 C 有机物,因此需要再加入适量 O<sub>2</sub> 以减少薄膜的吸收。

本文采用了热蒸发和离子束溅射方法制备 LaF<sub>3</sub> 薄膜,比较分析了它们的光学常数、折射率的不均匀性、晶体结构和应力,并分别用两种方法制备了 193 nm 减反膜,获得了较好的光学特性。

## 2 实验与装置

### 2.1 薄膜的制备

RH LaF<sub>3</sub> 薄膜样品由 SYRUSpro 1110 型镀膜机制备,材料纯度为 99.9%,沉积温度为 350 °C,沉积速率为 0.2 nm/s,本底真空度为  $5 \times 10^{-4}$  Pa; IBS LaF<sub>3</sub> 薄膜样品由 Veeco 公司 Spector 型镀膜机制备,使用靶材是纯度为 99.9% 的 LaF<sub>3</sub> 靶,本底真空度为  $1 \times 10^{-4}$  Pa, Xe 作为溅射气体, NF<sub>3</sub> 为辅助气体反应溅射,溅射束压为 600 V。设备配备了 16 cm 的溅射源和 12 cm 的辅助源,本实验中仅使用溅射源沉积薄膜,薄膜沉积过程中基底温度低于 40 °C,基底为直径 25 mm,厚度为 1 mm 的单抛和双抛融石英。

### 2.2 薄膜特性的表征

薄膜的透射和反射光谱测量使用美国 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda 1050 型分光光度计及其相对反射附件;应力测量使用 FSM 500TC 薄膜应力仪,测试过程中对样品施加 350 °C 的温度;使用德国 Bruker 公司生产的 D8 DISCOVER X 射线衍射仪测量薄膜的微观结构,采用掠入射方法,入射角为 1°。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 单层膜光学常数和折射率不均匀性

图1给出了热蒸发和离子束溅射制备的单层 $\text{LaF}_3$ 薄膜的透射和反射光谱曲线,在239 nm, RH  $\text{LaF}_3$ 薄膜透过率高于基底透过率,而反射率低于

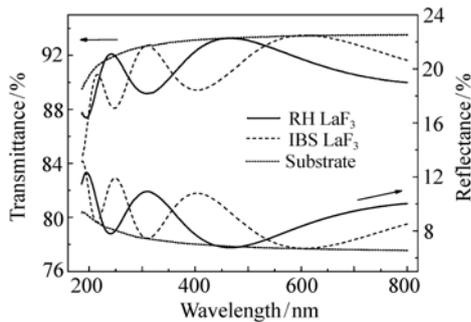


图1 热蒸发与离子束溅射沉积的 $\text{LaF}_3$ 薄膜透射反射曲线

Fig. 1 Transmittance and reflectance spectra of RH  $\text{LaF}_3$  and IBS  $\text{LaF}_3$  thin films

基底反射率,说明 RH  $\text{LaF}_3$ 薄膜在厚度方向上存在折射率的负不均匀性<sup>[16]</sup>; IBS  $\text{LaF}_3$ 薄膜短波处透射光谱峰值略低于基底,说明该波段具有一定的吸收,反射光谱极小值与基底相同,没有出现折射率的不均匀性。

由于热蒸发源为点源,沉积粒子的能量较小(约为0.1~0.3 eV)<sup>[17]</sup>,所制备的薄膜是呈柱状结构生长,所以微观结构中会存在空隙,造成薄膜的填充密度低,容易产生折射率的不均匀性。而离子束溅射沉积粒子相对基底更接近正入射,并且沉积粒子的能量可以达到几个 eV,甚至更高。薄膜的填充密度大,因此膜层折射率不存在梯度分布。将两种方法制备的 $\text{LaF}_3$ 薄膜的反射进行单面光谱校正后<sup>[18]</sup>,分别采用不均匀模型<sup>[19]</sup>和均匀模型对 RH  $\text{LaF}_3$ 透射和单面光谱校正后的反射曲线进行拟合,采用均匀模型对 IBS  $\text{LaF}_3$ 的光谱曲线进行拟合,如图2所示,对于 RH  $\text{LaF}_3$ ,不均匀模型拟合曲线与实测曲线基本吻合,得到薄膜折射率的不均匀性 $\Delta n/n$ 为-1.5%。

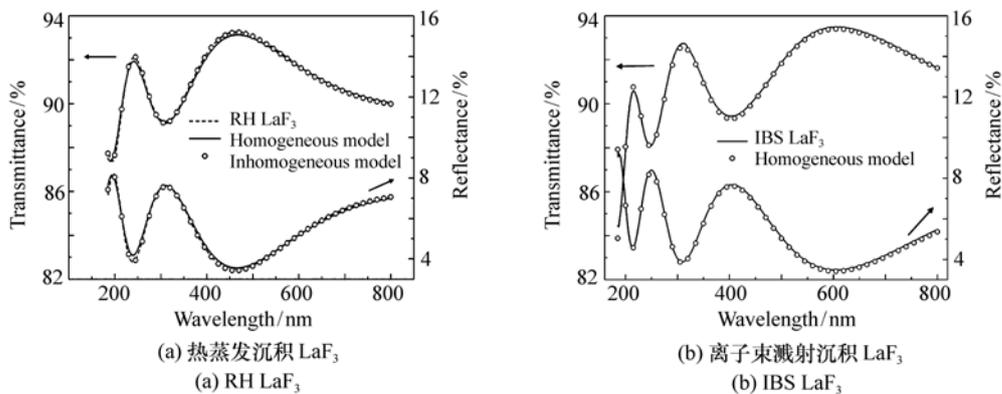
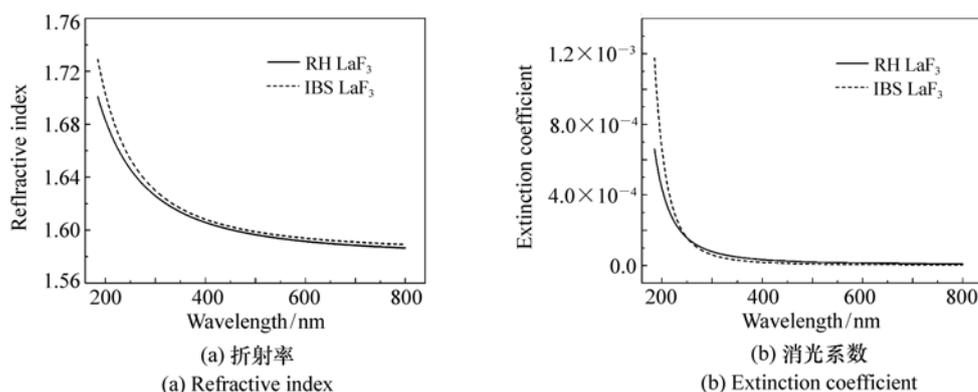


图2 不同模型下 $\text{LaF}_3$ 薄膜光谱拟合曲线

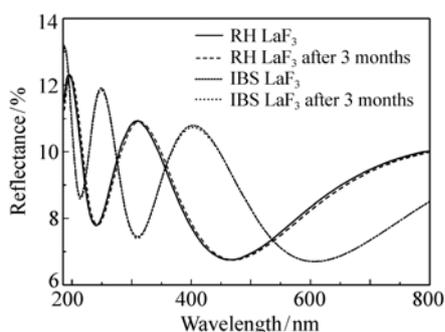
Fig. 2 Measured transmittance/reflectance spectra and fitting curves with different models of  $\text{LaF}_3$  thin films

图3为两个薄膜的光学常数曲线,从图中可以看出, RH  $\text{LaF}_3$ 薄膜折射率略低于 IBS  $\text{LaF}_3$ ,在193 nm,两种薄膜折射率分别为1.687和1.714。而 IBS  $\text{LaF}_3$ 薄膜消光系数较大,这是由于氟化物

中存在氟元素优先溅射现象,导致薄膜偏离理想化学计量比,引起短波处吸收,在193 nm,两种薄膜消光系数分别为 $5 \times 10^{-4}$  (RH  $\text{LaF}_3$ )和 $9 \times 10^{-4}$  (IBS  $\text{LaF}_3$ )。

图3 LaF<sub>3</sub>薄膜光学常数Fig. 3 Optical constants of LaF<sub>3</sub> thin films

实验比较了两种 LaF<sub>3</sub> 薄膜的环境稳定性,在相同环境中放置 3 个月后, RH LaF<sub>3</sub> 薄膜的反射曲线向长波方向偏移约 2 nm,其可能原因是空气中的水进入 RH LaF<sub>3</sub> 薄膜的空隙中,导致膜层的光学厚度增加,而 IBS LaF<sub>3</sub> 薄膜反射曲线没有变化,如图 4 所示。由此可见,IBS LaF<sub>3</sub> 薄膜的环境稳定性更好。

图4 刚制备与放置 3 个月后的 LaF<sub>3</sub> 薄膜的反射光谱曲线Fig. 4 Reflectance spectra of RH LaF<sub>3</sub> and IBS LaF<sub>3</sub> thin films

### 3.2 薄膜的应力与晶体结构

薄膜中的应力可以分为本征应力、热应力和外应力。外应力是由外部影响导致的薄膜结构变化产生的,热应力是由于薄膜与基底热膨胀系数不同,以及成膜时的基底温度与环境温度的差异而产生的,本征应力与薄膜的结构及内部缺陷等因素有关,因此薄膜的总应力可以表述为:

$$\sigma = \sigma_{\text{int}} + \sigma_{\text{th}} + \sigma_{\text{ex}}, \quad (1)$$

其中热应力为<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_{\text{th}} = \left( \frac{E_f}{1 - \nu_f} \right) (\sigma_f - \sigma_{\text{sub}}) (T_d - T), \quad (2)$$

式中:  $E_f$  和  $\nu_f$  分别是薄膜的杨氏模量和泊松比,  $\sigma_f$  和  $\sigma_{\text{sub}}$  分别为薄膜和基底的热膨胀系数,  $T_d$  和  $T$  分别为薄膜沉积和测量时的环境温度。可通过测量镀膜前后基底的曲率半径  $R_d$  和  $R_0$ , 利用 stoney 公式, 计算薄膜的应力, 如式(3)所示,  $h$  和  $d$  分别为基底和薄膜的厚度, 测量过程中对基底施加 350 °C 的温度, 分析了薄膜的应力-温度曲线。

$$\sigma = \frac{Eh^2}{(1 - \nu)6d} \left( \frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_0} \right). \quad (3)$$

为避免膜厚差异对应力测试的影响, 采用与 3.1 中相同的工艺, 分别用两种方法在单抛融石英基底上制备厚度近似相同的 LaF<sub>3</sub> 薄膜, IBS LaF<sub>3</sub> 厚度为 386.4 nm, RH LaF<sub>3</sub> 厚度为 399.3 nm。图 5 为两种 LaF<sub>3</sub> 薄膜的升温及降温过程中的应力-温度曲线。从图中可以看出, 刚制备的 IBS LaF<sub>3</sub> 薄膜具有压应力, 此时薄膜中存在的应力主要为本征应力, 应力大小为 -908 MPa。融石英基底的热膨胀系数为  $0.55 \times 10^{-6}/\text{K}$ , LaF<sub>3</sub> 体材料热膨胀系数分别为  $11 \times 10^{-6}/\text{K}$ <sup>[21]</sup>, 由于薄膜的热膨胀系数大于融石英基底, 测量温度高于薄膜沉积温度, 因此对于 IBS LaF<sub>3</sub> 薄膜, 热应力为负, 而升温过程中, IBS LaF<sub>3</sub> 薄膜总应力随温度的升高而变大, 应力-温度曲线在达到 220 °C 位置出现拐点, 这是由于薄膜的本征应力开始释放, 导致薄膜总应力减小<sup>[20]</sup>。温度在 220 °C 以下升温与降温过程应力-温度曲线基本平行, 说明薄膜中没有热应力的残留。经过加热和降温循环后, IBS

LaF<sub>3</sub>薄膜的压应力降低为-538 MPa。

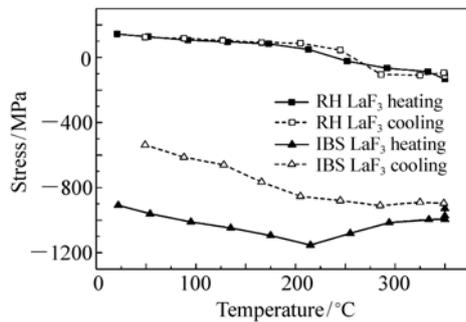


图5 热蒸发与离子束溅射沉积的LaF<sub>3</sub>薄膜应力-温度曲线

Fig. 5 Stress-temperature curves of RH LaF<sub>3</sub> and IBS LaF<sub>3</sub> thin films during heating and cooling cycle

RH LaF<sub>3</sub>薄膜表现为张应力,总应力为143 MPa,随着测量温度的升高,测量温度与薄膜沉积温度差异减小,薄膜中残余热应力变小,因此总应力减小。当温度达到薄膜的沉积温度350 °C时,RH LaF<sub>3</sub>薄膜的应力主要为本征应力,数值为-116 MPa,经过加热降温循环之后,RH LaF<sub>3</sub>薄膜的应力恢复至初始状态。由此可知,热蒸发制备的LaF<sub>3</sub>薄膜应力由热应力和本征应力组成,其中热应力占主导。

薄膜的晶体结构采用X射线衍射仪测量,图6给出了两种方法制备的LaF<sub>3</sub>薄膜的XRD图谱,同时给出了标准卡片的衍射峰峰位,两种LaF<sub>3</sub>薄膜均为六方结构(JCPDS 32-483),RH LaF<sub>3</sub>衍射峰数目要多于IBS LaF<sub>3</sub>,其中衍射峰(110),

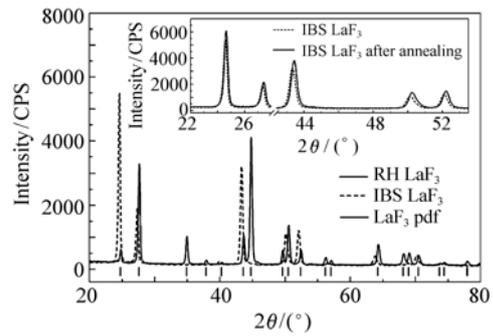


图6 LaF<sub>3</sub>薄膜的XRD图谱,插图为刚制备的和退火后的离子束溅射沉积LaF<sub>3</sub>薄膜

Fig. 6 XRD patterns of RH LaF<sub>3</sub> and IBS LaF<sub>3</sub> thin films. The inset is as-deposited and annealed IBS LaF<sub>3</sub> thin films

(111),(300),(302),(221),(223)和(411)为两种方法制备的LaF<sub>3</sub>所共有。IBS LaF<sub>3</sub>最强衍射峰为(110),RH LaF<sub>3</sub>最强衍射峰为(113),与标准卡片峰位相比,IBS LaF<sub>3</sub>和RH LaF<sub>3</sub>共有的衍射峰位分别向低衍射角和高衍射角方向偏移,表明了两种薄膜中分别存在压应力和张应力。经过应力仪测试热循环之后,RH LaF<sub>3</sub>薄膜XRD谱线没有变化,而IBS LaF<sub>3</sub>薄膜全部衍射峰强度略有增加,峰位向大角度方向偏移,如图6所示,IBS LaF<sub>3</sub>薄膜的应力释放归因于晶体结构在高温下获得了重整<sup>[22]</sup>。

### 3.3 193 nm 减反膜

减反膜的设计采用高低折射率材料交替的非规整膜系sub/LHL/air,其中H为高折射率材料

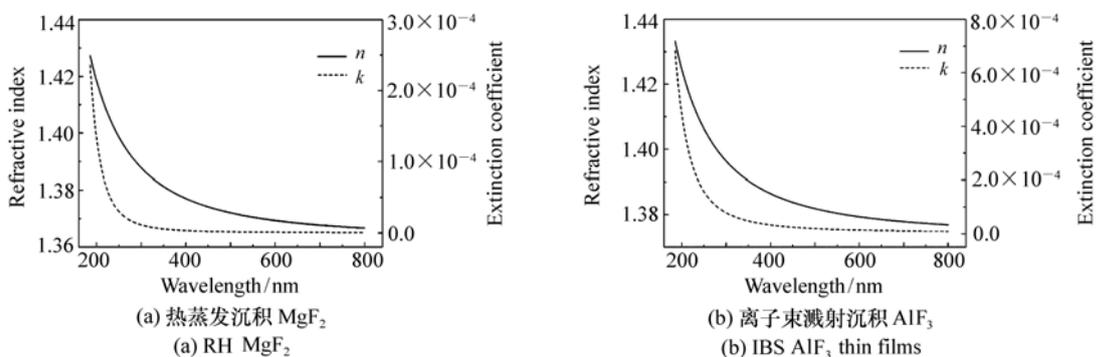


图7 薄膜的光学常数

Fig. 7 Optical constants of thin films

LaF<sub>3</sub>,L为低折射率材料,对于热蒸发方法,低折射率材料为 MgF<sub>2</sub>,而离子束溅射方法,低折射率材料为 AlF<sub>3</sub>。分别采用非均匀和均匀模型拟合得到 MgF<sub>2</sub>和 AlF<sub>3</sub>薄膜的光学常数曲线,如图7所示,在193 nm,MgF<sub>2</sub>薄膜的折射率和消光系数分别为1.423和 $2 \times 10^{-4}$ ,而 AlF<sub>3</sub>薄膜的折射率和消光系数分别为1.428和 $5 \times 10^{-4}$ 。采用热蒸发和离子束溅射方法分别制备了193 nm减反膜,如

图8所示,两种方法制备的减反膜实测曲线与理论曲线基本一致,说明理论设计结果准确可靠。热蒸发制备的减反膜透过率为99.4%,剩余反射率为0.04%,透过率实测数值低于理论值,可能是由于样品表面污染引起。离子束溅射制备的减反膜透过率为99.2%,剩余反射率为0.1%,两种方法制备了193 nm减反膜,均具有较好的光学特性。

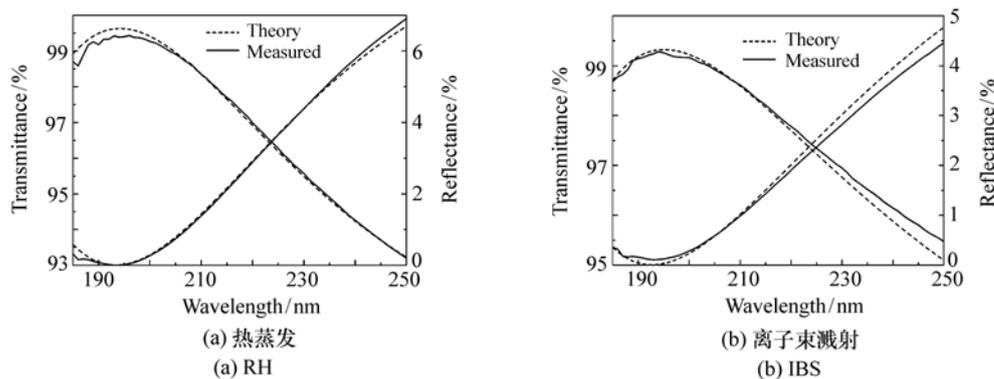


图8 减反膜的透射反射实测与理论曲线

Fig.8 Measured transmittance/reflectance data of AR coatings and theory curves

## 4 结 论

采用热蒸发和离子束溅射方法分别制备了单层 LaF<sub>3</sub>薄膜,比较了两种薄膜在光学特性,应力以及结构方面的差异。结果表明,RH LaF<sub>3</sub>薄膜存在折射率的不均匀性,而 IBS LaF<sub>3</sub>的折射率更高,且不存在折射率的梯度分布。离子束溅射制备的薄膜吸收大于 RH LaF<sub>3</sub>,在193 nm,二者的消光系数分别为 $9 \times 10^{-4}$ 和 $5 \times 10^{-4}$ ,并且离子束溅

射制备的 LaF<sub>3</sub>薄膜的环境稳定性优于热蒸发方法。RH LaF<sub>3</sub>薄膜具有张应力,其中以热应力为主导,IBS LaF<sub>3</sub>具有压应力,退火之后压应力减小。使用两种方法分别制备了193 nm减反膜,热蒸发制备的减反膜透过率为99.4%,反射率为0.04%,离子束溅射制备的减反膜透过率为99.2%,反射率为0.1%,均表现了较好的光学特性,因此在实际应用中,可根据具体的性能需求选择合适的沉积方法,获得最佳的性能。

## 参考文献:

- [1] 柳强,闫兴鹏,陈海龙,等.高功率全固态紫外激光器研究新进展[J].中国激光,2010,37(9):2289-2298.  
LIU Q,YAN X P,CHENG H L,*et al.*. New progress in high-power all-solid-state ultraviolet laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010,37(9):2289-2298. (in Chinese)
- [2] 李玉瑶,王菲,焦正超,等.高效率LD端面抽运连续355 nm激光器[J].发光学报,2014,35(3):332-336.  
LI Y Y,WANG F,JIAO ZH CH,*et al.*. High efficient LD end-pumped QCW 355 nm laser[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2014,35(3):332-336. (in Chinese)
- [3] 汪丽杰,佟存柱,曾玉刚,等.高亮度布拉格反射波导激光器[J].发光学报,2013,34(6):787-791.  
WANG L J,TONG C ZH,ZENG Y G,*et al.*. High brightness Bragg reflection waveguide laser[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013,34(6):787-791. (in Chinese)

- [4] 申德振,梅增霞,梁会力,等. 氧化锌基材料、异质结构及光电器件[J]. 发光学报,2014,35(1):1-60.  
SHEN D ZH,MEI Z X,LIANG H L,*et al.*. ZnO-based material, heterojunction and photoelectric device[J]. *Chinese J. Luminescence*,2014,35(1):1-60. (in Chinese)
- [5] 张立超,高劲松. 长春光机所深紫外光学薄膜技术研究进展[J]. 光学精密工程,2012,20(11):2395-2401.  
ZHANG L CH,GAO J S. Developments of DUV coating technologies in CIOMP[J]. *Opt. Precision Eng.*,2012,20(11):2395-2401. (in Chinese)
- [6] SUN J,LI X,ZHANG W L,*et al.*. Effects of substrate temperatures and deposition rates on properties of aluminum fluoride thin films in deep-ultraviolet region[J]. *Applied Optics*,2012,51(35):8481-8489.
- [7] LEE C C,LIAO B H,LIU M C. AlF<sub>3</sub> thin films deposited by reactive magnetron sputtering with Al target[J]. *Optics Express*,2007,15(15):9152-9156.
- [8] BISCHOFFM,SODEM,GÄBLERD. Metal fluoride coatings prepared by ion-assisted deposition[J]. *Advances in Optical Thin Films III*,2008,71010L:1-10.
- [9] TOSHIYAY,KEIJIN,KEIICHIS,*et al.*. Fluoride antireflection coatings for deep ultraviolet optics deposited by ion-beam sputtering[J]. *Applied Optics*,2006,45(7):1375-1379.
- [10] ATANASSOV G,TURLO J,FU J K,*et al.*. Mechanical,optical and structural properties of TiO<sub>2</sub> and MgF<sub>2</sub> thin films deposited by plasma ion assisted deposition[J]. *Thin Solid Films*,1999,342(1-2):83-92.
- [11] 时光,梅林,高劲松,等. 离子束溅射、热舟和电子束法制备深紫外 LaF<sub>3</sub> 薄膜[J]. 激光技术,2013,37(5):592-595.  
SHI G,MEI L,GAO J S,*et al.*. DUV LaF<sub>3</sub> thin film deposited by IBS, thermal boat and electron beam evaporation[J]. *Laser Technology*,2013,37(5):592-595. (in Chinese)
- [12] 时光,梅林,张立超. 球面元件表面 AlF<sub>3</sub> 薄膜的光学特性和微观结构表征[J]. 中国光学,2013,6(6):906-911.  
SHI G,MEI L,ZHANG L CH. Characterization of optical and microstructural properties of AlF<sub>3</sub> thin films deposited on spherical element[J]. *Chinese Optics*,2013,6(6):906-911. (in Chinese)
- [13] BISCHOFF M,GÄBLERD,KAISERN,*et al.*. Optical and structural properties of LaF<sub>3</sub> thin films[J]. *Applied Optics*,2008,47(13):c157-c161.
- [14] AL-KUHAILIM F,KHAWAJAE E,DURRANISM A. Determination of the optical constants of inhomogeneous thin films with linear index profiles[J]. *Applied Optics*,2006,45(19):4591-4597.
- [15] ODE,AIKO. Ion beam sputtering deposition of fluoride thin films for 193 nm applications[J]. *Optical Interference Coatings*,2013,FC. 8.
- [16] 唐晋发,顾培夫,刘旭,等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006,330-332.  
TANG J F,GU P F,LIU X,*et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou:Zhejiang University Press,2006,330-332. (in Chinese)
- [17] JACOB D,PEIRÓ F,QUESNELE,*et al.*. Microstructure and composition of MgF<sub>2</sub> optical coatings grown on Si substrate by PVD and IBS processes[J]. *Thin Solid Films*,2000,360,1-2:133-138.
- [18] 郭春,林大伟,张云洞. 光度法确定 LaF<sub>3</sub> 薄膜光学常数[J]. 光学学报,2011,31(7):0731001-1-7.  
GUO C,LIN D W,ZHANG Y D,*et al.*. Determination of optical constants of LaF<sub>3</sub> Films from spectrophotometric measurements[J]. *Acta Optica Sinica*,2011,31(7):0731001-1-7. (in Chinese)
- [19] GUO C,KONG M D,GAO W D. Simultaneous determination of optical constants,thickness, and surface roughness of thin film from spectrophotometric measurements[J]. *Optics Letters*,2013,38(1):40-42.
- [20] WANG Y,ZHANG Y G,CHEN,W L,*et al.*. Optical properties and residual stress of YbF<sub>3</sub> thin films deposited at different temperatures[J]. *Applied Optics*,2008,47(13):C319-C323.
- [21] LIU M C,LEE C C,KANEKO M,*et al.*. Influence of ion assistance on LaF<sub>3</sub> films deposited by molybdenum boat evaporation[J]. *Applied Optics*,2012,51(15):2865-2869.
- [22] MARTIN B,TOBIAS N,OLIVER V,*et al.*. Post-deposition treatment of IBS coatings for UV applications with optimized thin-film stress properties[J]. *Applied Optics*,2014,53(4):A212-A220.

## 作者简介:



才玺坤(1988—),男,吉林长春人,硕士,研究实习员,2010年、2012年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,主要从事深紫外薄膜方面的研究。E-mail: christcxk@126.com



梅林(1985—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2009年于东北大学获得学士学位,2011年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事深紫外薄膜方面的研究。Email: meilin0431@gmail.com



张立超(1979—),男,吉林吉林人,博士,副研究员,2000年、2003年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事短波光学薄膜技术方面的研究。E-mail: zhanglc@sklao.ac.cn



时光(1985—),女,黑龙江鸡西人,硕士,助理研究员,2008年、2011年于电子科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事深紫外薄膜方面的研究。E-mail: nrconnie@163.com