

# 激光量热法测量深紫外氟化物薄膜吸收

赵 灵<sup>1,2</sup> 武潇野<sup>1</sup> 谷勇强<sup>1</sup> 时 光<sup>1</sup> 梅 林<sup>1</sup> 才玺坤<sup>1</sup> 张立超<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要** 为了获得薄膜材料吸收率与深紫外激光照射能量密度间的对应关系,掌握薄膜材料深紫外吸收特性,应制定相应的吸收测量规范。介绍了激光量热法的原理及测试流程,分析了测试过程中的剂量效应、非线性吸收和不可恢复吸收等现象,提出了利用激光量热法测量应用于波长 193 nm 紫外光刻系统的氟化物薄膜材料吸收率的方法,并进行了实际测量。根据所建立的测量方法,获得熔石英基底材料在 193 nm 紫外光照射下的剂量效应及出现不可恢复吸收现象时相应的激光能量密度,进而测量出基底材料吸收率与激光能量密度之间的关系;通过热蒸发对基底镀氟化镁及氟化镧单层膜,测量镀膜后样品的吸收率与激光能量密度的关系,通过与镀膜前吸收率的对比,计算了两种薄膜材料吸收率与激光能量密度的关系,推算出薄膜材料在实际工作状态时的吸收率,并得到不同沉积温度下氟化镧薄膜材料吸收率、粗糙度与波纹度。实验结果证实了新提出测量方法的可行性,测量结果为改善系统成像质量以及延长元件使用寿命提供支持。

**关键词** 薄膜;薄膜材料;193 nm 激光器;激光量热法;吸收系数

**中图分类号** O436.2; O551.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0807001

## Measuring the Absorptance of Deep Ultraviolet Fluoride Coatings with Laser Calorimetry

Zhao Ling<sup>1,2</sup> Wu Xiaoye<sup>1</sup> Gu Yongqiang<sup>1</sup> Shi Guang<sup>1</sup> Mei Lin<sup>1</sup>  
Cai Xikun<sup>1</sup> Zhang Lichao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** To obtain the relationship between the absorptances of thin-film materials and the incoming ultraviolet laser energy density, it is better to establish a standard measurement method. The principle and measurement process of laser calorimetry is introduced, the dose depending effect, nonlinear absorption, and unrecoverable absorption phenomenon that might influence the measurement results are analyzed, a method based on the laser calorimetry is proposed, which is used to measure the absorptance of fluoride coatings that can be used in 193 nm ultraviolet photolithography systems, and experiments. According to the new proposed method, the dose depending effect, the corresponding laser energy density while the unrecoverable absorption phenomenon appears when the fused silica substrates are irradiated by 193 nm laser are measured; the relationship between absorptances of substrates and the laser energy density are calculated. After that, two substrates are coated with LaF<sub>3</sub> and MgF<sub>2</sub> separately by boat evaporation; the relationships between absorptances of the coated samples and laser energy density are measured. By the comparison of absorptances before and after coating, the relationships of the two thin-film materials between absorptances and laser energy densities are calculated, and the absorptances of LaF<sub>3</sub> and MgF<sub>2</sub> in actual working condition are figured out, also the relationship between deposited temperature and absorptance,

**收稿日期**: 2014-02-27; **收到修改稿日期**: 2014-04-11

**基金项目**: 国家重大科技专项 02 专题(2009ZX02205)

**作者简介**: 赵 灵(1988—),女,硕士研究生,主要从事深紫外光学薄膜吸收方面的研究。E-mail: zhaohappy@163.com

**导师简介**: 张立超(1979—),男,博士,副研究员,主要从事短波光学薄膜技术方面的研究。

E-mail: lichaod@aliyun.com(通信联系人)

roughness, waviness of  $\text{LaF}_3$  is obtained. The experimental results confirm the feasibility of the proposed method, which help to improve the imaging quality and prolong the working life of the objective system that can be used in the photolithography system.

**Key words** thin film; thin-film material; 193 nm laser; laser calorimetry; absorptance

**OCIS codes** 260.7190; 310.6860; 300.1030

## 1 引 言

近年来,光学系统的应用光源不断向短波段发展,其中 193 nm ArF 准分子激光器作为深紫外光学系统尤其是深紫外光刻系统的应用光源<sup>[1]</sup>获得了长足发展。深紫外光刻系统最核心的部分之一是投影物镜系统<sup>[2-3]</sup>,光学薄膜作为投影物镜系统中不可或缺的部分,起着增透及分光等作用<sup>[4]</sup>。光学元件薄膜材料在 193 nm 紫外波段的吸收损耗,作为投影物镜系统中的一项重要技术指标<sup>[5]</sup>,必须得到严格控制,主要原因有两个:1) 光刻投影物镜系统极其复杂,包含几十个透射/反射面,在这种情况下,薄膜吸收对系统透射率的影响非常大,即使每个透射/反射面上的薄膜吸收仅增加 0.1%,也会给系统整体透射率带来百分之几的巨大损失;2) 在长时间激光照射过程中,薄膜吸收的能量进入物镜元件中,导致元件产生热变形,从而引起热像差,降低系统成像质量<sup>[6]</sup>。因此,准确测量光学薄膜的吸收,是光刻投影物镜系统薄膜元件的重要检测内容之一。

传统上对光学元件的吸收测试是通过光度法实现。测量元件的透射率( $T$ )与反射率( $R$ ),在忽略散射的前提下,元件的吸收系数  $A=1-T-R$ 。然而,这一方法并不能准确的表征薄膜元件,尤其是深紫外薄膜元件在激光作用下的吸收特性。1) 光度法无法排除样品表面散射对吸收的影响;2) 光度法测量薄膜元件、尤其是数值约为 0.1%甚至更低的短波段薄膜元件的反射时,其测量精度存在一定的限制,无法满足测量要求。

激光量热法是始于上世纪 70 年代,目前日趋成熟的吸收测量方法,已经被纳入国际标准化组织(ISO)11551 国际标准<sup>[7]</sup>。这一方法具有极高的测量精度,例如工作在 1064nm 可见波段的激光量热仪(LCA)已经可以达到  $1.5 \times 10^{-7}$  的测量灵敏度<sup>[8]</sup>,通过指数法处理实验数据的相对测量不确定度为 1.29%<sup>[9]</sup>。在紫外波段,激光量热法也已成为表征 ArF 光学材料及光学元件吸收特性的主要方法。但是,以往对 193 nm 光学元件吸收特性的研究多数限于熔石英、氟化钙等体材料,而针对薄膜材料的研究非常少,并且不能全面的表征薄膜材料的

吸收特性。Apel 等<sup>[10]</sup>对薄膜的吸收随膜层厚度的变化情况进行了研究,但他们的研究对象是对 193 nm 吸收非常大的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜,不具备实用价值。Mühlig 等<sup>[11]</sup>采用激光偏转法实现了薄膜材料与基底材料吸收的区分,并利用这一技术对几种氧化物与氟化物薄膜的吸收进行了测量。

针对个别种类薄膜材料已经有部分的吸收测量结果,但到目前为止,并没有针对性地建立起完善的薄膜材料吸收测试流程,并展开完全考虑激光辐照情况下的薄膜吸收特性的研究。针对这一现状,基于激光量热法,在分析了实际测试过程中存在的几种现象,即剂量效应、非线性吸收和不可恢复吸收等的基础上,建立了完整的薄膜材料深紫外吸收测试流程,并初步开展了薄膜元件吸收特性研究,对通过热蒸发镀在熔石英基底上的氟化物样品进行了深紫外吸收测量,获得了在波长为 193 nm、重复频率为 1000 Hz、能量密度为  $5 \sim 10 \text{ mJ/cm}^2/\text{pulse}$  激光照射条件下氟化物薄膜的吸收率,验证了测试流程的可行性。

## 2 实验原理与现象分析

### 2.1 激光量热仪原理

激光量热法是一种光热转换法,通过测量激光作用下被测样品的温度变化,直接计算被测样品的吸收率。激光量热仪主要由激光器、衰减器、光束整形镜组、功率计、绝热样品腔等组成,典型的激光量热仪结构示意图如图 1 所示。激光器出射的光束经过衰减器和光束整形器后,形成具有一定能量的圆形光斑进入样品腔。样品腔内是一隔热环境,内部通过充满高纯氮气以保证测量过程不受外界环境温度、气体吸收变化等因素的影响。被测样品处于样品腔内,并安装于带有温度探测器的卡具上。激光光束照射样品时,样品温度上升;激光停止照射后,样品温度下降。记录测量过程中样品的温度变化曲线,通过一定的拟合计算即可获得被测样品的吸收率。

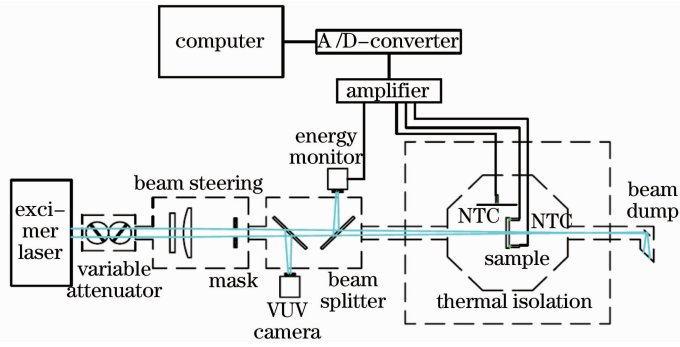


图 1 激光量热仪结构图

Fig. 1 Experimental set-up of laser calorimetry device

在固定功率为  $P$  的激光光束照射下,在环境温度不变,样品的导热系数无限大等理想情况下,样品温度随时间的变化可用(1)式表示<sup>[12]</sup>:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\alpha P}{mc} - \gamma(T - T_c), \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为被测样品的吸收率,  $m$  为样品质量,  $c$  为相

应样品的比热容,  $\gamma$  为样品的热损耗系数,  $T$  为样品温度,  $T_c$  为测量环境温度。若激光光束在  $t_1$  时刻开始照射样品,在  $t_2$  时刻停止照射,样品温度的变化可以根据(1)式进行求解,得到(2)式<sup>[12]</sup>:

$$T(t) - T_c = \begin{cases} 0, & t \leq t_1 \\ \frac{\alpha P}{\gamma mc} \{1 - \exp[-\gamma(t - t_1)]\}, & t_1 < t < t_2 \\ \frac{\alpha P}{\gamma mc} \exp\{-\gamma(t - t_2) - \exp[-\gamma(t - t_1)]\}, & t > t_2 \end{cases}, \quad (2)$$

测量激光照射过程中以及照射后样品的温度变化曲线,即可根据(2)式拟合计算出样品的热损耗系数  $\gamma$  以及吸收率  $\alpha$ 。

## 2.2 实验现象分析

对薄膜样品、未镀膜熔石英基底的吸收特性的表征是一个复杂的测试过程。激光照射条件不同,样品的吸收率也不相同。部分原因是样品表面吸附的吸收性有机物,在激光辐照过程中逐渐被清除,使样品吸收率有一定程度的下降,但最主要的原因在于,在激光照射过程中,光子会对材料的微观结构产生影响,使材料的吸收表现出如剂量效应、非线性吸收及不可恢复吸收等现象,体现为样品吸收率测试结果随激光照射条件变化而变化。因为光子对材料本身特性的影响与激光照射相关,因此在测量过程中,建立并遵循合理的测试流程,排除激光照射过程中光子对材料特性影响导致的测量偏差,是测量样品吸收率所必须解决的问题。

### 2.2.1 剂量效应

通常在同一测量条件下,样品吸收率的测量数值应相同。在实际测量中,由于剂量效应现象<sup>[13-15]</sup>的存在,致使在同一测量条件下测得的样品吸收率

数值随测量次数逐渐降低。当激光照射剂量累积达到一定数值后,样品的吸收率在该测试条件下不再随测量次数变化。因此,在研究吸收随激光能量密度变化的关系时,应该分析并排除剂量效应的影响,否则所测得的吸收率不能准确反映样品的实际吸收特性;另外,在实际使用中,如光刻机在实际应用前,应对投影物镜进行一定剂量的激光预处理,提高其工作效率。

### 2.2.2 非线性吸收

消除被测样品的剂量效应后,当激光能量密度不同时,样品的吸收率也不相同,显现出非线性吸收现象。材料的非线性吸收主要来自于多光子吸收。在普通光源照射下,材料的多光子吸收极其微弱,几乎不可观测,但对于 193 nm ArF 准分子激光光源,材料的多光子吸收则不可忽视,在不同激光能量密度照射下具有不同的吸收数值。例如熔石英材料在能量密度低于  $2 \text{ mJ/cm}^2/\text{pulse}$  的 193 nm 激光照射下,吸收率随激光能量密度的增加呈非线性增长趋势<sup>[13-14]</sup>;在能量密度低于  $8 \text{ mJ/cm}^2/\text{pulse}$  的 193 nm 激光照射下,氟化钙材料的吸收率随激光能量密度的增加线性增长<sup>[13]</sup>。

### 2.2.3 不可恢复吸收

在非线性吸收的测试过程中,当激光能量密度增加到一定程度后,会对样品造成一定的损伤,这种损伤随着激光能量密度的增加而不断变大,反映在吸收率的数值变化上。对只有激光照射能量密度为变量的测试,在样品未因为激光照射产生损伤前,吸收率的测量结果与激光照射能量密度始终一一对应;当激光能量密度增加到一定程度,样品出现不可恢复的吸收后,样品的吸收率不再与激光照射能量密度一一对应,而是产生了一个不可逆的增量<sup>[16]</sup>,此后即使在相同的激光能量密度照射下,样品的吸收率也会随着照射次数的增加而增大。一旦样品产生不可恢复吸收,其损伤的增加速率会逐渐加快,有时即使降低激光照射能量密度,也不足抵消样品损伤带来的影响。因此,为了避免出现不可恢复吸收现象,在实际测量中应该尽量降低激光能量密度。

## 3 测试流程与实验结果分析

采用 193 nm ArF 准分子激光器作为激光量热仪的光源,激光到达样品表面时光束直径为 2 mm;在激光照射重复频率为 1000 Hz 时,激光脉冲宽度为  $8 \pm 3$  ns。选取 8 块口径为 25.4 mm、厚度为 1 mm 的熔石英材料,分别为样品 1、2、3、4、5、6、7、8 进行实验。样品 1、2、3、4 用来分析实验中所产生的剂量效应、非线性吸收以及不可恢复吸收等现象,从而确定合理的测量规范;样品 5、6、7、8 是通过热蒸发制作的镀膜样品,其中样品 5 为  $MgF_2$ ,镀膜时基底温度为 300 °C,样品 6、7、8 为  $LaF_3$ ,镀膜基底温度分别为 350 °C、250 °C、150 °C。为避免样品本身差异的影响,所有熔石英基底均采用来自同一生产厂家的同一批次产品,并且利用白光干涉仪(WLI)对其中频波纹度进行了检测,Rq 值均优于 0.5 nm;高频粗糙度经原子力显微镜(AFM)检测,均方根(RMS)值均优于 0.7 nm。

### 3.1 测试流程确定

利用样品 1 进行剂量效应消除实验。由于激光照射频率越高,预处理后被测样品的透射率越大<sup>[15]</sup>,所以在测量样品的激光照射特性之前,通过重复频率 1000 Hz、能量密度为 5 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse、照射时间为 120 s 的连续激光照射预处理,得知当激光照射剂量累积到约 9 kJ/cm<sup>2</sup> 时被测样品达到饱和,测试结果如图 2 所示。

在消除剂量效应的前提下,当激光能量密度处于 5~10 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse 之间时,测量样品 2 的吸收

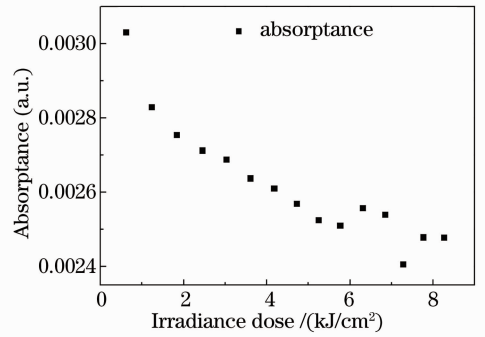


图 2 熔石英材料剂量效应

Fig. 2 Dose-dependent effect of SiO<sub>2</sub> substrate 率与激光能量密度的关系,测试结果如图 3 所示。可知,其吸收率随激光能量密度的增加线性增长。

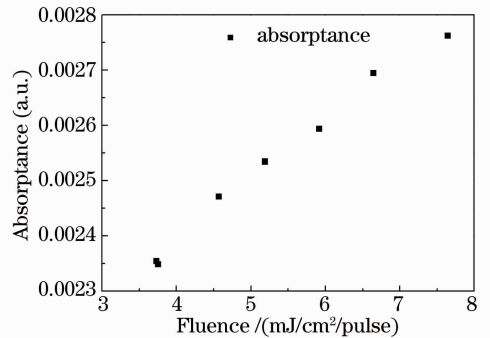


图 3 熔石英材料吸收率随激光能量密度变化规律

Fig. 3 Relationship between absorbance of fused silica and laser energy density

在去除剂量效应基础上,测试样品处于可恢复吸收时照射激光的能量密度范围,以避免被测样品出现不可恢复吸收对检测结果的影响。调节照射在样品 3 上的激光能量密度,使其在 5~10 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse 范围内周期性变化,测量此时样品 3 的吸收率,测量结果如图 4 所示,其中(a)表示样品吸收率随总照射剂量的关系;(b)为样品吸收率随激光能量密度关系,由图 4 可以得出,样品的吸收率与激光能量密度一一对应,证实此时熔石英基底不存在不可恢复吸收。

当激光能量密度增加到一定数值后,材料会出现不可恢复的吸收损伤。消除样品 4 剂量效应后,将激光能量密度从 10 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse 逐渐增加至 30 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse,在此过程中,当激光能量密度达到 20 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse、25 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse 和 30 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse,能量密度降低 3 mJ/cm<sup>2</sup>/pulse,然后继续增加。测量整个过程中基底样品 4 的吸收率,结果如图 5 所示。其中,1、3、5 阶段为激光照射能量密度连续增加时的样品吸收率,2、4、6 阶段为激光照射能量密度降低时的样品吸收率。通过对两

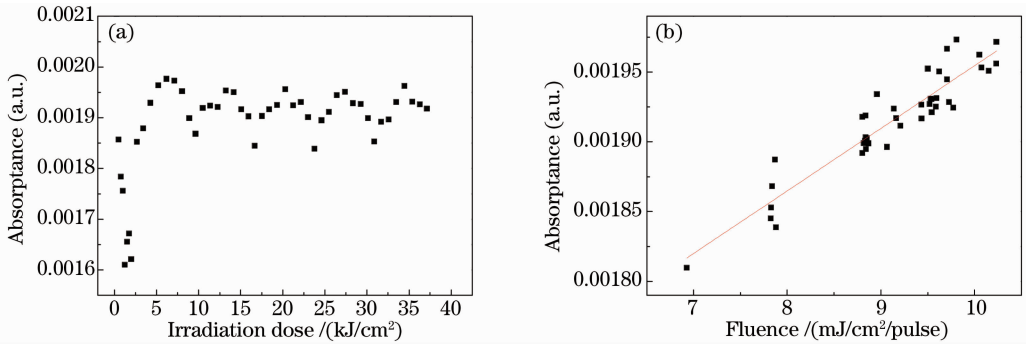


图 4 样品 3 的可恢复吸收

Fig. 4 Recoverable absorption of substrate No. 3

种过程的比较,样品的吸收率出现了明显的回程差,证实当激光能量密度达到一定程度后,样品的吸收率数值不再与照射能量密度一一对应,而是产生了一个不可逆的增量,亦即不可恢复吸收。另外,从图中可以得出,激光能量密度越大,样品吸收率回程差越大,意味着不可恢复吸收越大。

度处于合理范围,保证样品不产生不可逆吸收。具体的测试方法有多种,比如在一定范围内反复调节激光能量密度值以观察被测样品的吸收率是否存在回程差,或者将激光能量密度固定在某一数值,连续进行若干次实验,观察样品吸收数值是否存在变化等。

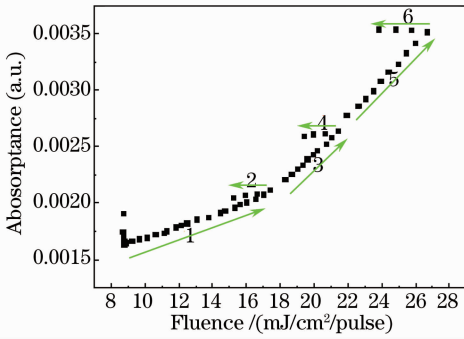


图 5 基底样品 4 的不可恢复吸收过程

Fig. 5 Unrecoverable absorption process of substrate No. 4

根据前文的实验以及分析得知,在测量样品随激光能量密度变化关系时,应通过一定时间的激光预照射,去除样品的剂量效应,同时,测量并获得样品处于不可逆吸收时的激光照射能量密度,从而确定合理的激光能量密度范围。据此,制定了薄膜样品的深紫外吸收测试规范。

3) 薄膜材料吸收率的测量。薄膜材料不同于基底材料,无法进行直接测量,故需进行两次测试。第一次测量薄膜材料基底的吸收率,第二次测量镀膜后基底与薄膜样品的总吸收率,通过两次测量结果之差,获得薄膜材料本身的吸收。需要注意的是,在每次测量前,均需要重复步骤 1) 和步骤 2),以去除被测样品的剂量效应和确定激光能量密度范围。

### 3.2 实验结果

对样品 5、6、7、8 基底进行总剂量约  $9 \text{ kJ/cm}^2$  的激光照射预处理,去除样品的剂量效应;测量其吸收率与激光照射能量密度变化关系;之后通过热蒸发对基底样品进行镀膜,分别为厚  $300 \text{ nm}$  的  $\text{MgF}_2$  及  $\text{LaF}_3$  薄膜材料。同样,在去除镀膜后样品的剂量效应后,测量其吸收率与激光能量密度之间的关系,测试结果分别如图 6 所示。

从图中可以看出,熔石英基底及薄膜样品在达到剂量饱和之后,吸收率随激光能量密度增加为线性增长。根据实验测得的结果,利用最小二乘法对数据进行线性拟合,镀膜前后样品 5、6、7、8 测量数据的拟合残差小于测量值的 1%,故基底材料及薄膜样品总的吸收随能量密度变化可分别用(3)、(4)式表达

$$\begin{cases} A_{35} = 0.00206 + 82.8 \times 10^{-6} H \\ A_{36} = 0.00162 + 84.2 \times 10^{-6} H \\ A_{37} = 0.00181 + 86.3 \times 10^{-6} H \\ A_{38} = 0.00175 + 110 \times 10^{-6} H \end{cases}, \quad (3)$$

1) 剂量效应的消除。在对样品进行吸收测试前,利用低能量密度激光束对被测样品进行一定剂量的预照射,使得样品的吸收率在同一测量条件下不发生变化,从而去除样品的剂量效应。一般可以通过对测量样品进行多次短时间(如  $120 \text{ s}$ )的照射,测量并观察直至样品吸收率达到饱和来消除剂量效应;或者对样品进行单次长时间(如  $1 \text{ h}$ )照射,使样品受辐照的剂量总和达到一定数值。

2) 激光能量密度范围的确定。消除被测样品的剂量效应后,通过实验确定照射样品的激光能量密度,使得在样品吸收率的测量过程中,激光能量密

$$\begin{cases} A_{s5+F5} = 0.00533 + 88.8 \times 10^{-6} H \\ A_{s6+F6} = 0.00694 + 96.1 \times 10^{-6} H \\ A_{s7+F7} = 0.00946 + 124 \times 10^{-6} H \\ A_{s8+F8} = 0.0095 + 234 \times 10^{-6} H \end{cases}, \quad (4)$$

式中  $H$  为激光能量密度。

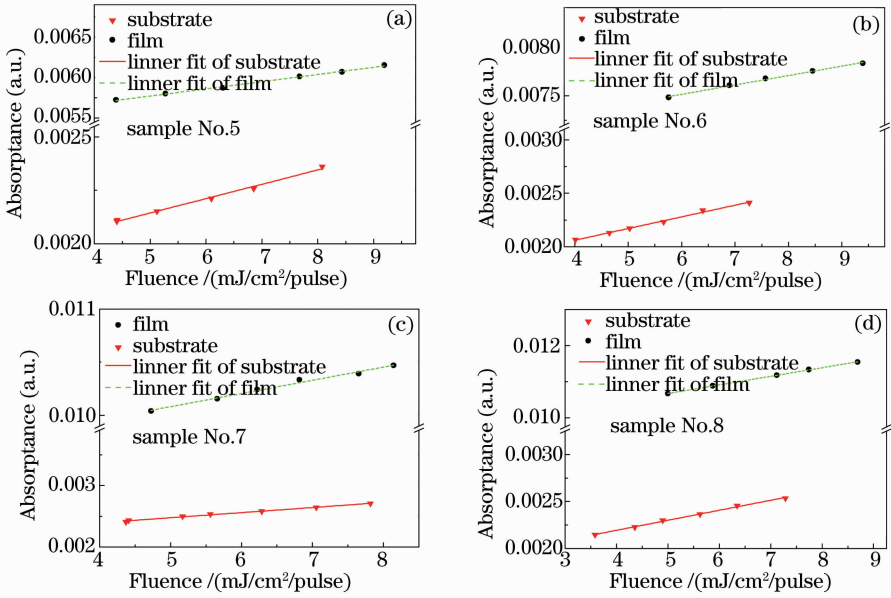


图 6 样品 5、6、7、8 吸收曲线

Fig. 6 Absorption curve of sample No. 5, No. 6, No. 7 and No. 8

若不考虑界面吸收的影响,根据(3)式与(4)式,样品 5 与样品 6 上的  $\text{LaF}_3$  及  $\text{MgF}_2$  薄膜材料的吸收率可用(5)式表示:

$$\begin{cases} A_{F5} = A_{s5+F5} - A_{s5} = 0.00327 + 6 \times 10^{-6} H \\ A_{F6} = A_{s6+F6} - A_{s6} = 0.00532 + 11.9 \times 10^{-6} H \\ A_{F7} = A_{s7+F7} - A_{s7} = 0.00765 + 37.7 \times 10^{-6} H \\ A_{F8} = A_{s8+F8} - A_{s8} = 0.00775 + 124 \times 10^{-6} H \end{cases} \quad (5)$$

在实际的紫外光刻物镜系统中工作时,激光照射能量密度一般小于  $0.2 \text{ mJ/cm}^2/\text{pulse}$ ,根据(5)式,推算出在实际工作激光能量密度范围内,样品 5、6、7、8 上的  $\text{MgF}_2$  及  $\text{LaF}_3$  薄膜材料的吸收率变化分别约为 1.2、2.4、7.5 和 25 ppm。根据上述数据可知,沉积温度为  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  的  $\text{LaF}_3$  薄膜材料在实际工作能量密度范围的吸收率变化较大,已经不可以忽略。而对于沉积温度高于  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  的氟化物薄膜材料的吸收,可以仅考虑固有吸收部分,即样品 5、6、7 的材料吸收率与激光照射能量密度之间的关系可简写为(6)式:

$$\begin{cases} A_{F5}(\text{MgF}_2) = 0.327\% \\ A_{F6}(\text{LaF}_3) = 0.532\% \\ A_{F7}(\text{LaF}_3) = 0.765\% \end{cases} \quad (6)$$

通过原子力显微镜(视场  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ )及白光干涉仪(视场  $471 \mu\text{m} \times 629 \mu\text{m}$ )对不同沉积温度镀制的  $\text{LaF}_3$  薄膜样品进行采样测量,测量结果如图 7 所示。其中(a)为基底,(b)、(c)、(d)分别为沉积温度  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $150 \text{ }^\circ\text{C}$  下镀制的  $\text{LaF}_3$  薄膜。测得粗糙度均方根值分别为 0.68、2.00、5.01、6.09 nm;波纹度均方根值分别为 0.47、0.61、0.64、0.93 nm。

$\text{LaF}_3$  薄膜样品在镀制工艺中只改变沉积温度,可见,沉积温度是影响  $\text{LaF}_3$  薄膜吸收率、粗糙度及波纹度的主要因素。其原因在于沉积温度高, $\text{LaF}_3$  分子到达基底表面前的动能大,表面迁移率高,这时  $\text{LaF}_3$  分子会在基片表面不断迁移,直至找到使系统能量最低的位置并停留下来,达到较高的堆积密度<sup>[17]</sup>,从而降低薄膜的不均匀性<sup>[18]</sup>。随着沉积温度的降低, $\text{LaF}_3$  分子在到达基片前动能减小,沉积分子在基片表面的迁移减弱,形成空隙率高的柱状结构,导致  $\text{LaF}_3$  薄膜粗糙度及波纹度升高,吸收率变大<sup>[19]</sup>。

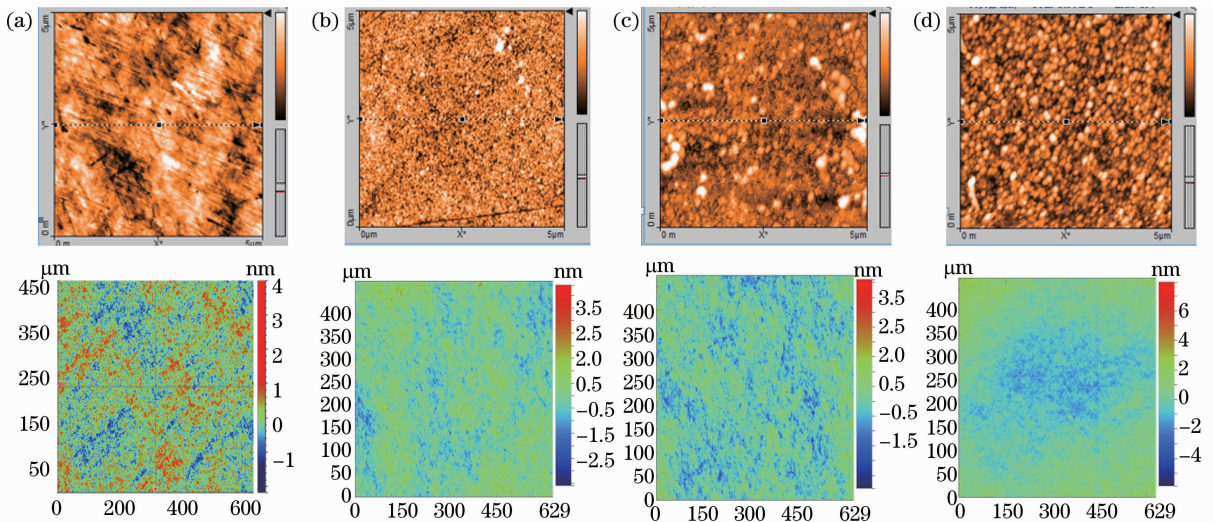


图7 基底及不同沉积温度  $\text{LaF}_3$  薄膜的粗糙度与波纹度。(a) 基底；(b) 350 °C；(c) 250 °C；(d) 150 °C

Fig. 7 Roughness and waveness of substrate and  $\text{LaF}_3$  coated with different depositing temperatures.

(a) Substrate; (b) 350 °C; (c) 250 °C; (d) 150 °C

## 4 结 论

介绍了激光量热仪的实验装置及工作原理,针对工作于 193 nm 深紫外波段氟化物薄膜的弱吸收测量,通过对剂量效应、非线性吸收及不可恢复损伤等实际测量过程中存在的现象的实验和分析,制定了标准化的深紫外氟化物薄膜测量规范,并根据所建立的测量规范,对  $\text{MgF}_2$  及  $\text{LaF}_3$  两种薄膜材料的深紫外弱吸收进行了测量。当激光能量密度处于  $5\sim 10 \text{ mJ/cm}^2/\text{pulse}$  范围内时,熔石英基底的吸收率随能量密度增加呈线性增长;当激光能量密度大于  $20 \text{ mJ/cm}^2/\text{pulse}$  时出现不可恢复吸收现象;在忽略界面吸收的前提下,得到了  $\text{LaF}_3$  及  $\text{MgF}_2$  薄膜材料的吸收率与激光能量密度的关系,推算出在实际工作状态下薄膜材料的吸收率。最后对  $\text{LaF}_3$  薄膜材料的波纹度和粗糙度进行测量,高温镀制的薄膜材料波纹度和粗糙度较低,且吸收较小,为实际镀膜提供相应参考。

## 参 考 文 献

- 1 Chang Yanhe, Jin Chunshui, Li Chun, *et al.*. Laser induced damage of fluoride coatings at 193 nm[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 40(7): 0707001.  
常艳贺, 金春水, 李 春, 等. 193 nm 氟化物薄膜的激光诱导损伤[J]. 光学学报, 2013, 40(7): 0707001.
- 2 Zhao Yang, Gong Yan. Design of beam shaping unit for deep ultraviolet lithographic illumination system [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 29–34.  
赵 阳, 巩 岩. 深紫外光刻照明系统光束整形单元的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 29–34.
- 3 Gong Yan, Zhang Wei. Present status and progress in 193 nm exposure system in lithography[J]. Chinese Journal of Optics and

Applied Optics, 2008, 1(1): 25–35.

巩 岩, 张 巍. 193 nm 光刻曝光系统的现状及发展[J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 25–35.

- 4 Yang Lihong, Wang Tao, Su Junhong, *et al.*. Influence of laser conditioning on the damage properties of  $\text{HfO}_2$  thin film[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1231001.  
杨利红, 王 涛, 苏俊宏, 等. 激光预处理对  $\text{HfO}_2$  薄膜损伤特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1231001.
- 5 Jin Jingcheng, Jin Chunshui, Deng Wenyuan. Measuring absorption of 193 nm thin-film by laser calorimetry and system calibration[J]. Analytical Instrumentation, 2011, (1): 59–64.  
靳京城, 金春水, 邓文渊. 193 nm 光学薄膜激光量热吸收测试及系统校正[J]. 分析仪器, 2011, (1): 59–64.
- 6 Yang Guanghua, Li Yanqiu. Thermal and structural deformation of projection optics and its influence on optical image performance for 22 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322005.  
杨光华, 李艳秋. 22 nm 极紫外光刻物镜热和结构变形及其对成像性能影响[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322005.
- 7 ISO 11551:2003(E), Test Method for Absorptance of Optical Laser Components [S]. Geneva: International organization for standardization, 2003.
- 8 Li Bincheng, Xiong Shengming. Measuring weak absorptance of optical thin films with laser calorimetric technique[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 823–826.  
李斌成, 熊胜明. 激光量热法测量光学薄膜的微弱吸收[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 823–826.
- 9 Liu Hao, Ma Ping. Uncertainty analysis of laser calorimetry[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 942–948.  
刘 浩, 马 平. 激光量热计不确定度分析[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 942–948.
- 10 Apel O, Mann K, Marowsky G. Nonlinear thickness dependence of two-photon absorptance in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films [J]. Appl Phys A, 2000, 71(5): 593–596.
- 11 Christian Mühlig, Simon Bublitz, Siegfried Kufert. Nonlinear absorption in single  $\text{LaF}_3$  and  $\text{MgF}_2$  layers at 193 nm measured by surface sensitive laser induced deflection technique[J]. Applied Optics, 2009, 48(35): 6781–6787.
- 12 Uwe Willamowski, Detlev Ristau, Eberhard Welsch. Measuring the absolute absorptance of optical laser components[J]. Applied

- Optics, 1998, 37(36): 8362–8370.
- 13 Balasa I, Blaschke H, Jensen L, *et al.*. Impact of SiO<sub>2</sub> and CaF<sub>2</sub> surface composition on the absolute absorption at 193 nm[C]. SPIE, 2011, 8190: 81901T.
- 14 Weijing Liu, Bincheng Li. Repetition rate dependence of absorption of fused silica irradiated at 193 nm[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(5): 053002.
- 15 Ute Natura, Rolf Martin, Gordon von der Goenna, *et al.*. Kinetics of laser induced changes of characteristic optical properties in lithosil with 193 nm excimer laser exposure[C]. SPIE, 2005, 5754: 1312.
- 16 Blaschke H, Ristau D, Welsh E, *et al.*. Absolute measurements of non-linear absorption near LIDT at 193nm[C]. SPIE, 2001, 4347: 447–453.
- 17 Shang Shuzhen, Shao Jianda, Fan Zhengxiu, *et al.*. The study of ultraviolet properties of resistant boat evaporated LaF<sub>3</sub> films[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1941–1945.
- 尚淑珍, 邵建达, 范正修, 等. 热舟蒸发 LaF<sub>3</sub> 薄膜的紫外性能研究[J]. 物理学报, 2008, 57(3): 1941–1945.
- 18 Xue Chunrong, Shao Jianda. Properties of AlF<sub>3</sub> and LaF<sub>3</sub> films at 193 nm[C]. SPIE, 2010, 7655: 76553G–765536-11.
- 19 Liu Mingchung, Kaneko M, Nakahicra K, *et al.*. Microstructure and composition related characteristics of LaF<sub>3</sub> thin films at 193 nm[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 083801.

栏目编辑:张浩佳