

121.6 nm 远紫外高反射薄膜研究

王金艳^{1,2}, 张锦龙^{1,2*}, 焦宏飞^{1,2}, 程鑫彬^{1,2}

¹ 同济大学物理科学与工程学院精密光学工程研究所, 上海 200092;

² 同济大学先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092

摘要 远紫外波段高反射薄膜的研究具有重要应用价值。为了实现高反射率,采用高温三步蒸发法沉积 MgF₂ 膜以保护 Al 膜,制备了远紫外宽带高反射薄膜,并对样品进行退火处理。结果显示,改进制备工艺和退火工艺后,紫外宽带高反射薄膜在 121.6 nm 处的反射率高达 90%,接近理论设计值。同时分析了散射损耗的影响。采用优化的 LaF₃/MgF₂ 膜系结构,制备了窄带反射滤光薄膜,其在中心波长 122.5 nm 处的峰值反射率为 75%且半峰全宽为 8 nm,达到了理论设计的预期效果,但退火处理损伤了薄膜表面,散射损耗增加,薄膜反射率下降。

关键词 薄膜; 远紫外; 反射薄膜; 真空退火

中图分类号 O484.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0931001

Study on High Reflective Film in 121.6 nm Far Ultraviolet

Wang Jinyan^{1,2}, Zhang Jinlong^{1,2*}, Jiao Hongfei^{1,2}, Cheng Xinbin^{1,2}

¹ Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering,

Tongji University, Shanghai, 200092, China;

² MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Tongji University, Shanghai, 200092, China

Abstract There are important practical applications of high reflective films in the far-ultraviolet band. In order to obtain high reflectance, the far-ultraviolet broadband high reflective films are prepared by depositing an Al films protected by MgF₂ films with the high temperature three-step evaporation method, and these samples are annealed. The results show that the far-ultraviolet broadband high reflective films after improved preparation and annealing can possess a reflectance as high as 90% at 121.6 nm, close to the theoretical design value, and meanwhile, the effect of scattering loss is also analyzed. The narrowband reflective filter films are prepared based on the optimized LaF₃/MgF₂ film structure. The peak reflectance at central wavelength of 122.5 nm is 75% and the full width half maximum is 8 nm, which indicating the expected effect of the theoretical design has been obtained. However, the annealing process damages the film surface to induce the increase of scattering loss and the decrease of film reflectance.

Key words thin films; far ultraviolet; reflective films; vacuum annealing

OCIS codes 310.6860; 260.7210; 230.4040

1 引言

远紫外 100~200 nm 波段在天文观测领域有着十分重要的应用价值,特别是对应于 H- α 谱线的 121.6 nm 波长^[1],研究人员对此波长的来源和探测开展了广泛且深入的研究。对于 121.6 nm 谱线的探测,常利用紫外探测器、紫外光谱仪、紫外天文望远镜和真空紫外成像仪^[2-3]等天文测量系统。在这

些测量系统中,作为必不可少的核心组成部分,紫外高反射薄膜器件成为目前研究的热门之一。

由于许多材料在远紫外波段有较大吸收,因此材料是限制高反射薄膜制备的重要因素。在远紫外波段内,纯 Al 材料具有高反射率且吸收较小的物理性质^[4],但 Al 膜表面容易氧化成 Al₂O₃ 层,其在 160 nm 以下具有较大吸收。同时, MgF₂ 的吸收边为 115 nm^[5],如果在 Al 膜表面沉积合适厚度的

收稿日期: 2020-01-03; 修回日期: 2020-01-18; 录用日期: 2020-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61621001)、国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金(U1630124, U1630123)、上海市教育委员会科研创新计划

* E-mail: jinlong@tongji.edu.cn

MgF₂保护层,可以抑制和减少 Al₂O₃的形成,从而避免 Al 膜反射率降低。因此,对于 121.6 nm 波长处的紫外宽带高反射薄膜,可以使用 MgF₂膜保护 Al 膜的结构。Al+MgF₂样品的反射率在 120 nm 附近的理论设计值为 90%。然而,通过常温沉积实验制备的 Al+MgF₂膜的反射率小于 80%,低于理论设计值。为了提高 Al 膜的反射率,研究者通过高温三步蒸发法^[6-7]沉积 MgF₂,改善了薄膜质量并提高了薄膜的反射率。此外,对样品进行退火处理^[8]也可以提高反射率。

对于窄带滤光元件, Malherbe^[9]使用 Al 和 MgF₂薄膜周期组合,制备了透射式真空紫外滤光片,该透射式真空紫外滤光片采用了半波干涉滤光片结构,即 LiF 基板/Al/MgF₂/Al/MgF₂/Al/MgF₂/空气。LiF 基板容易吸潮,并且透射滤光的效率较低,学者对窄带反射滤光薄膜器件^[10]展开了研究。按照高/低折射率材料交替的多周期介质膜结构^[11]制备窄带反射滤光薄膜,实现了宽广范围的深度截止。由于宽带隙氟化物材料在紫外波段吸收小且稳定性高,在真空紫外(VUV)光谱区域中,LaF₃已被广泛用作干涉薄膜的高折射率材料,而 MgF₂材料可被用作低折射率材料^[12-13]。对于中心波长为 121.6 nm 的窄带反射滤光薄膜,可采用电子束热蒸发镀膜方式^[14],通过叠加沉积 LaF₃/MgF₂多周期介质膜进行制备。对于一般的介质薄膜,退火处理^[15]会降低薄膜吸收,但会影响激光损伤阈值。

本文系统地介绍了 Al+MgF₂紫外宽带高反射薄膜和 LaF₃/MgF₂窄带反射滤光薄膜的优化设计、实验制备的过程。通过测试样品的反射率,对比不同工艺对样品反射率的影响。通过测试样品表面粗糙度,利用散射值和粗糙度的关系,计算样品在 121.6 nm 处的散射损耗。此外,对 Al+MgF₂样品和 LaF₃/MgF₂样品进行退火处理,并分析退火处理对样品反射率的影响。

2 设计与制备

2.1 实验设计

通过光学薄膜设计软件(Optilayer)对 Al+MgF₂紫外宽带高反射薄膜和 LaF₃/MgF₂窄带反射滤光薄膜的薄膜厚度进行优化设计,从而使样品在 121.6 nm 的中心波长下获得高反射率。紫外宽带高反射薄膜采用 25 nm 的 MgF₂薄膜保护 100 nm 的 Al 膜,为增加 Al 膜附着力,先设计 15 nm Cr 膜

打底。经过优化,理论反射率在 121.6 nm 处可达 90%,如图 1 所示, R 为反射率。

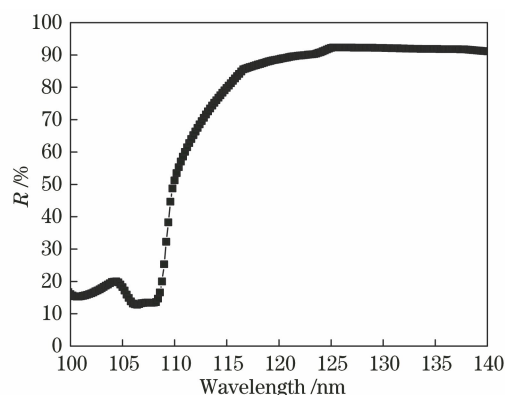


图 1 Cr+Al+MgF₂样品的设计反射率光谱

Fig. 1 Reflectance spectrum designed for Cr+Al+MgF₂ samples

LaF₃/MgF₂窄带反射滤光薄膜采用规整膜系 SUB|(HL)^xL|AIR 的多周期介质膜,其中“L”是低折射率材料 MgF₂，“H”是高折射率材料 LaF₃，“SUB”是基底，“AIR”是空气, x 为膜堆数。当 LaF₃/MgF₂的膜堆数为 16 时,中心波长 121.6 nm 处的峰位反射率为 73.5%,若继续增加膜堆数,峰位反射率不会继续提高,所以采用 $x=17$ 制备 LaF₃/MgF₂样品。

根据薄膜的基本理论可知,通过调节样品高低折射率材料的厚度比值,可以改变窄带的反射率峰值和带宽。采用 SUB|(HL)¹⁷L|AIR 的膜系设计,通过改变 H 和 L 厚度的比值,计算窄带在中心波长 121.6 nm 处的峰位反射率和带宽。高折射率材料的吸收相对较大,减少 H 的比例,选择合适的 H 和 L 的厚度比,可能会提高薄膜的反射率,同时使带宽变窄,且对峰值两侧的抑制能力得到加强。经过光谱曲线对比可知,H 和 L 的厚度比为 1/3 时,窄带的带宽虽然较窄,但反射率峰值仅有 69%;而 H 和 L 的厚度比为 1/2 时,窄带的反射率峰值可以达到 73.5%,与 H 和 L 的厚度比为 1 时的峰值反射率相等,且带宽相对较窄。经过优化处理,采用 H 和 L 的厚度比为 1/2 的 SUB|(0.67H1.34L)¹⁷0.66L|AIR 膜系,当中心波长为 121.6 nm 时,LaF₃/MgF₂峰位反射率为 73.5%。理论设计光谱曲线如图 2 所示。

2.2 样品制备

对于 Al+MgF₂紫外宽带高反射薄膜元件,使用直径为 30 mm、厚度为 5 mm 的 K9 基板,薄膜材料包括 Cr 材料、纯度(质量分数,全文同)为 99.999%

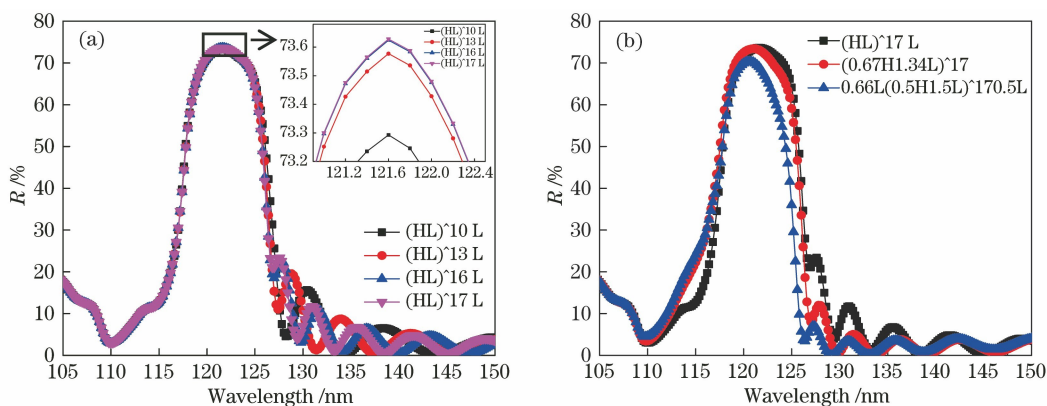


图 2 不同设计下 LaF₃/MgF₂ 样品在中心波长 121.6 nm 处的反射率。(a)不同的膜堆数;(b)不同的 H 与 L 的厚度比
Fig. 2 Reflectance at central wavelength of 121.6 nm for LaF₃/MgF₂ samples under different designs.

(a) Different film stacks; (b) different thickness ratios of H to L

的 Al 材料和纯度为 99.99% 的 MgF₂ 材料。在真空镀膜机保持 10⁻⁵ Pa 真空条件下,先在基板上沉积 15 nm Cr 膜,以提高 Al 膜的附着力。随后,通过热蒸发形式以 12 nm·s⁻¹ 的速率沉积 100 nm 的 Al 膜,再以 0.8 nm·s⁻¹ 的速率沉积 25 nm MgF₂ 薄膜

以保护 Al 膜。MgF₂ 薄膜的制备方法有两种:一种是在常温环境下直接沉积 MgF₂ 薄膜 (Deposition-RT);另一种是通过高温三步蒸发法沉积 MgF₂ 薄膜 (Deposition-HT)。薄膜沉积参数如表 1 所示,其中 RT 表示室温,HT 表示高温。

表 1 Al+MgF₂ 样品的参数

Table 1 Parameters for Al+MgF₂ sample

| Condition | Film | Thickness /nm | Deposition rate /(nm·s ⁻¹) | Temperature /°C |
|---------------|------------------|---------------|--|-----------------|
| Deposition-RT | Cr | 15 | 0.6 | 23 |
| | Al | 100 | 12.0 | 23 |
| | MgF ₂ | 25 | 0.8 | 23 |
| Deposition-HT | Cr | 15 | 0.6 | 23 |
| | Al | 100 | 12 | 23 |
| | MgF ₂ | 5 | 0.8 | 23 |
| | MgF ₂ | 20 | 0.8 | 250 |

窄带反射滤光薄膜元件使用直径为 30 mm、厚度为 1 mm 的 K9 基板,薄膜材料为高折射率 LaF₃ 材料和低折射率 MgF₂ 材料。LaF₃/MgF₂ 窄带反射滤光薄膜元件采用 SUB|(0.67H1.34L)¹⁷0.66L|AIR 的膜系设计,通过计算得知,0.67H 对应 8.96 nm 的 LaF₃ 膜层厚度,1.34L 和 0.66L 分别对应 23.86 nm 和 11.74 nm 的 MgF₂ 膜层厚度。整个实验过程在真空电子束镀膜机内完成,腔内真空度维持 10⁻⁴ Pa,在 23 °C 的常温环境中通过电子束热蒸发的形式将 LaF₃ 和 MgF₂ 膜堆沉积在基板上,采用晶振监控的方式控制 LaF₃ 和 MgF₂ 薄膜的沉积厚度。首先在基板上以 0.6 nm·s⁻¹ 的速率沉积 8.96 nm 的 LaF₃ 薄膜,随后以 0.8 nm·s⁻¹ 的速率沉积 23.86 nm 的 MgF₂ 薄膜,依次重复沉积 17 对 LaF₃ 和 MgF₂ 双层膜堆,最后再沉积膜层厚度为 11.74 nm 的 MgF₂

薄膜。

此外,对高温三步蒸发法制备的 Al+MgF₂ 样品和 LaF₃/MgF₂ 样品进行退火处理,验证退火工艺对反射率的影响。退火处理的过程为:将样品放入真空度为 5×10⁻³ Pa 的退火炉中,按照退火步骤对样品分别进行 200 °C/2 h,250 °C/2 h,300 °C/2 h 退火。退火的温度控制步骤为:先在 1 h 内将温度从室温 23 °C 加热到退火温度,然后恒温保持 2 h,最后 10 h 降温到室温 23 °C。

最后,为了验证样品的反射率结果,采用 LiF 滤光片抑制高次谐波的通过,使用同步辐射反射率计测量 105~135 nm 波段的光谱,得到了 Al+MgF₂ 样品和 LaF₃/MgF₂ 样品的反射率数据。除此之外,使用原子力显微镜 (AFM) 测量样品表面粗糙度,扫描区域为 10 μm×10 μm,进而计算样品的总积分

散射损耗。为了给出样品的整体形貌,使用光学显微镜观察样品的表面。

3 测试结果分析与讨论

3.1 Al+MgF₂ 紫外宽带高反射薄膜

测试了三种 Al+MgF₂ 样品的反射率,这三种样品分别是常温直接沉积样品 A,高温三步蒸发法沉积样品 B,高温三步蒸发法沉积+300 °C/2 h 退火处理的样品 C,并将实验结果与理论设计反射率

进行对比。实验测试反射率光谱曲线如图 3 所示。可以看出:在测试波长范围内,相较于样品 A,样品 B 的反射率显著增加,经 200 °C/2 h 和 250 °C/2 h 退火处理后样品反射率略有提高,样品 C 反射率最大。在 H- α 线波长 121.6 nm 处,样品 A 的反射率为 80%,样品 B 的反射率为 85%,而样品 C 的反射率高达 90%,接近理论设计反射率。同时,样品 C 在波长 120 nm 以上宽波段的反射率始终高于 80%。

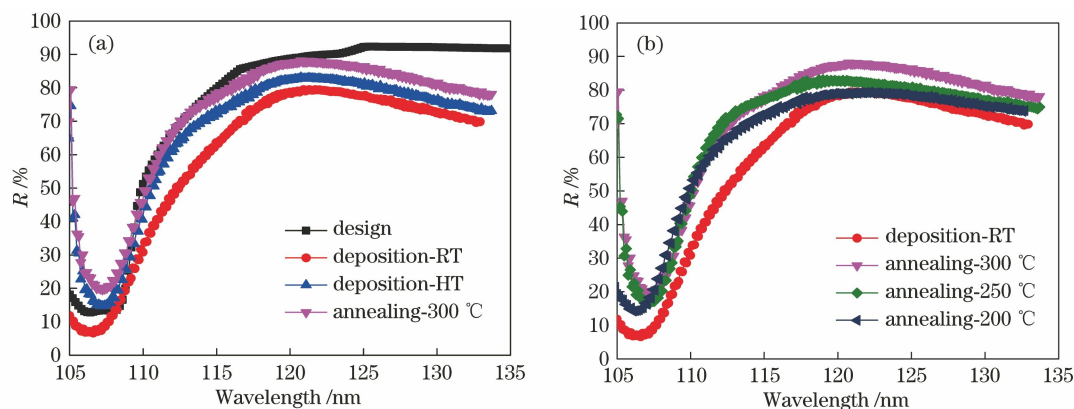


图 3 不同条件下 Al+MgF₂ 样品的测试反射率光谱。(a)不同工艺制备;(b)不同退火温度

Fig. 3 Measured reflectance spectra of Al+MgF₂ samples under different conditions.

(a) Different deposition processes; (b) different annealing temperatures

AFM 测试结果如图 4 所示,样品 A 的粗糙度为 1.42 nm,样品 B 的粗糙度为 1.19 nm,样品 C 的

粗糙度为 1.09 nm。分析认为,高温环境有望提高薄膜致密性,减小粗糙度。

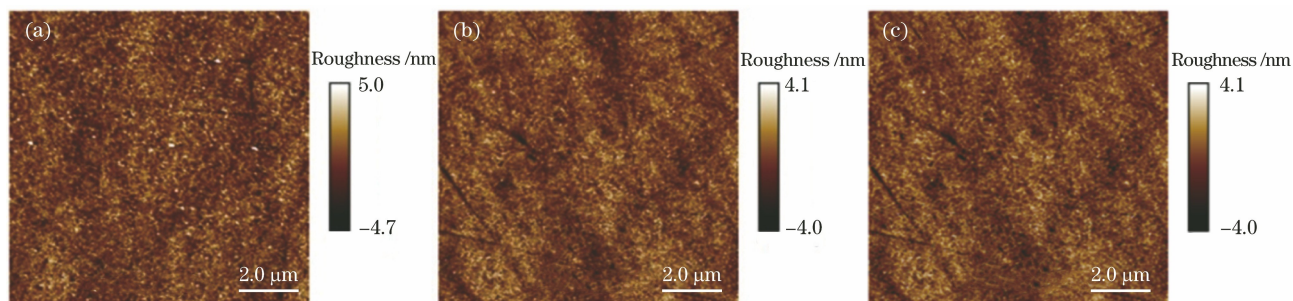


图 4 不同 Al+MgF₂ 样品的粗糙度。(a)样品 A;(b)样品 B;(c)样品 C

Fig. 4 Roughness of different Al+MgF₂ samples. (a) Sample A; (b) sample B; (c) sample C

样品粗糙度和总积分散射(TIS)的关系式为

$$T_{TIS} = 1 - \exp[-(4\pi \cos \theta_i \sigma / \lambda)^2], \quad (1)$$

式中: T_{TIS} 为总积分散射率; θ_i 为薄膜入射角; σ 为表面均方根粗糙度; λ 为入射激光波长。

由(1)式可知,在波长 121.6 nm 处,正入射时可以得到样品的总积分散射值。样品 A、B、C 的总积分散射值分别为 2.13%,1.5%和 1.26%。结合前文所述的反射率结果,对比分析数据可知,样品 C 相较于样品 A,反射率提高了 10%,但散射损耗仅降低了 1%,所以影响样品反射率的主要因素不是散

射损耗,而是吸收损耗。Al+MgF₂ 样品在 121.6 nm 处的反射率和散射损耗如表 2 所示。

表 2 Al+MgF₂ 样品在 121.6 nm 处反射率和散射参数

Table 2 Reflectance and scattering parameters of Al+MgF₂ samples at 121.6 nm

| Sample | Roughness σ / nm | TIS / % | R / % |
|----------|-------------------------|---------|-------|
| Sample A | 1.42 | 2.13 | 80 |
| Sample B | 1.19 | 1.50 | 85 |
| Sample C | 1.09 | 1.26 | 90 |

3.2 LaF₃/MgF₂ 窄带反射滤光薄膜

采用优化的薄膜设计制备 LaF₃/MgF₂ 样品,理论光谱在中心波长为 121.6 nm 处的峰位反射率为 73%,半峰全宽为 10 nm。同步辐射反射率计测量得出的反射率光谱显示,在中心波长 122.5 nm 处的峰位反射率达到 75%,同时半峰全宽为 8 nm,在 121.6 nm 处反射率为 72%。薄膜厚度较薄,且镀膜过程采用晶振监控的方式,存在 1% 以内的监控误差,导致中心波长偏移,但波长的偏移仍在正常误差范围内。由于远紫外波段吸收率较大,LaF₃/MgF₂ 样品光谱的中心波长位置会影响反射峰位和半峰全宽,故需要重新对 LaF₃/MgF₂ 样品光谱进行优化设计,使设计光谱的中心波长为 122.5 nm。在重新设计的光谱中,中心波长 122.5 nm 处的峰位反射率为 74%,且半峰全宽为 9 nm。相比之下,实验制备样品的峰值反射率和半峰全宽均达到了理论设计值。尽管中心波长位置发生偏移,但在允许的误差范围内,实验制备的窄带反射滤光薄膜仍拥有高反射率且窄带宽的优良性能,为了精确制备出中心波长在 121.6 nm 处的高反射率样品,需要改善薄膜厚度控制工艺。反射率光谱曲线对比如图 5 所示。

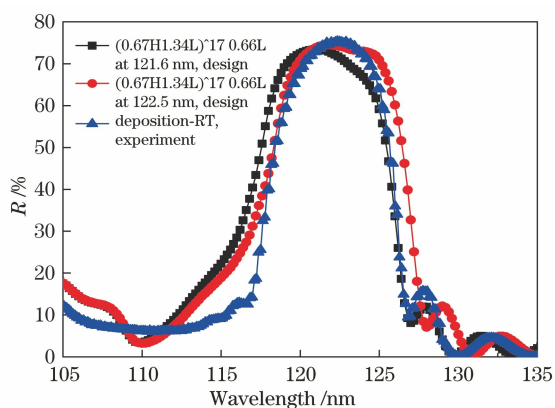


图 5 常温制备的 LaF₃/MgF₂ 样品反射率的对比
Fig. 5 Reflectance comparison of LaF₃/MgF₂ samples prepared at room temperature

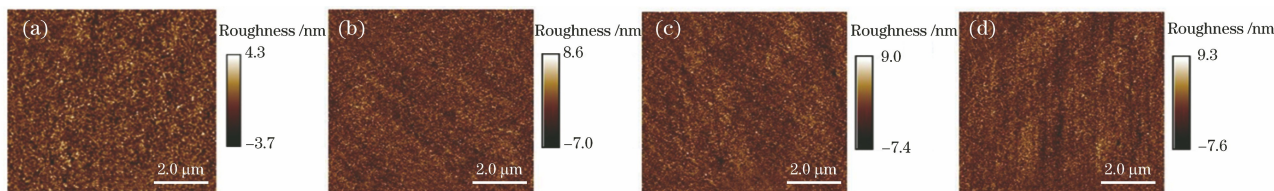


图 7 常温制备 LaF₃/MgF₂ 样品的粗糙度。(a) 未退火;(b) 200 °C/2 h 退火;
(c) 250 °C/2 h 退火;(d) 300 °C/2 h 退火

Fig. 7 Roughness of LaF₃/MgF₂ samples prepared at room temperature. (a) No annealing; (b) annealing-200 °C/2 h;
(c) annealing-250 °C/2 h; (d) annealing-300 °C/2 h

接着对常温制备的 LaF₃/MgF₂ 样品进行了三种不同工艺的退火处理,并将经退火处理与未经退火处理的样品测试反射率进行对比。常温制备的 LaF₃/MgF₂ 样品在中心波长 122.5 nm 处的峰位反射率为 75%,退火处理后反射率均下降:200 °C/2 h 退火样品反射率下降较少,峰位反射率为 71%;250 °C/2 h 和 300 °C/2 h 退火时,峰位反射率下降较严重,分别为 65% 和 64%。不同退火工艺下样品的测试反射率光谱曲线如图 6 所示。

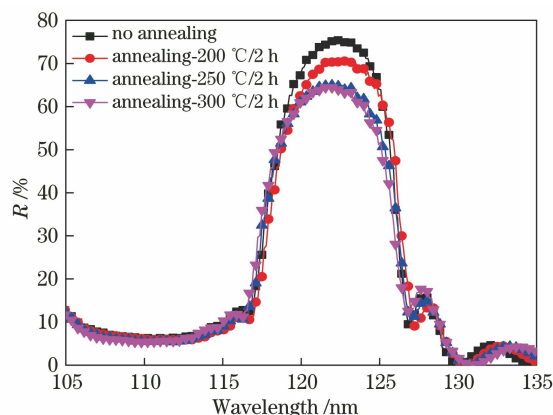


图 6 不同退火工艺下常温制备 LaF₃/MgF₂ 样品的反射率

Fig. 6 Reflectance of LaF₃/MgF₂ samples prepared at room temperature under different annealing processes

AFM 测试得出的 LaF₃/MgF₂ 样品表面粗糙度如图 7 所示。测试结果表明,退火温度越高,样品表面粗糙度越大。文献[15]表明,与单层介质膜不同,窄带反射滤光薄膜是由两种材料交替沉积获得的,不同膜层间存在多个界面,退火可能导致界面上的缺陷数量和尺寸增大。因此,多个界面的存在可能严重影响样品表面的粗糙度。

通过总积分散射公式,计算可得退火处理使 LaF₃/MgF₂ 样品的总积分散射增加到 5%,这严重影响样品的反射率。表 3 总结了常温制备 LaF₃/MgF₂ 样品在 122.5 nm 处的反射率和散射值。

表 3 常温制备 $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ 样品在 122.5 nm 处的
反射率和散射参数

Table 3 Reflectance and scattering parameters at 122.5 nm
of $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ samples prepared at room temperature

| Condition | Roughness σ /nm | TIS /% | R /% |
|----------------------|------------------------|--------|------|
| No annealing | 1.12 | 1.31 | 78 |
| Annealing-200 °C/2 h | 2.19 | 4.92 | 73 |
| Annealing-250 °C/2 h | 2.30 | 5.41 | 67 |
| Annealing-300 °C/2 h | 2.36 | 5.69 | 66 |

为了分析退火对薄膜特性的影响,使用光学显微镜,选择“50×”倍率物镜,“10×”倍率目镜观察样品表面情况。未处理的 $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ 样品表面有零星点迹存在;经过 200 °C/2 h 退火处理的 $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ 样品表面具有均匀密集的麻点;而经过 250 °C/2 h 和 300 °C/2 h 退火处理的 $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ 样品表面除了有密集的麻点,还存在裂痕,且经 300 °C/2 h 退火处理的样品表面出现的裂痕较明显。样品表面出现的裂纹主要是由薄膜应力引起的。氟化物薄膜本身较为疏松,高温退火会导致薄膜应力变化较为剧烈,进而导致薄膜出现裂纹。样品的表面质量情况如图 8 所示。

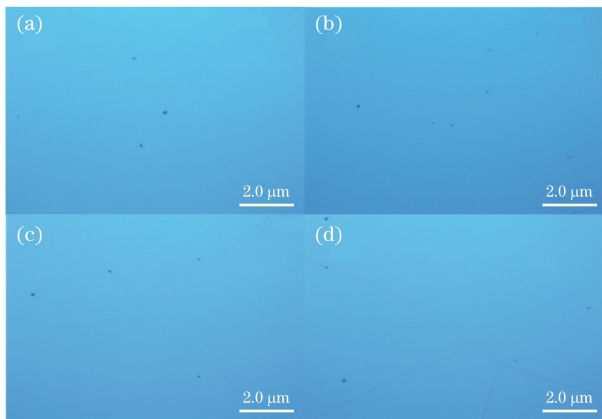


图 8 常温制备 $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ 样品的表面。(a) 未处理;
(b) 200 °C/2 h 退火;(c) 250 °C/2 h 退火;
(d) 300 °C/2 h 退火

Fig. 8 Surfaces of $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ samples prepared at room
temperature. (a) No annealing; (b) annealing-
200 °C/2 h; (c) annealing-250 °C/2 h; (d)
annealing-300 °C/2 h

4 结 论

改进了 $\text{Al} + \text{MgF}_2$ 紫外宽带高反射薄膜和 $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ 窄带反射滤光薄膜的设计与制备方法,测试了样品的反射率和表面粗糙度,计算了样品的散射损耗,并分析制备工艺和退火处理对薄膜反射

率的影响。

与常温直接沉积制备的样品相比,高温三步蒸发法制备的 $\text{Al} + \text{MgF}_2$ 样品在 121.6 nm 处的反射率提高了 5%,且经过退火处理后,反射率高达 90%,接近理论设计值。尽管高温三步蒸发法+退火处理可以降低 $\text{Al} + \text{MgF}_2$ 样品的表面粗糙度,进而降低散射损耗,但散射损耗降低并不是反射率提高的主要原因。此外, $\text{Al} + \text{MgF}_2$ 紫外宽带高反射薄膜在 120 nm 以后的宽带高反射率略有下降,其影响因素还有待研究。

通过改变膜堆数及 H 和 L 的厚度比,优化了 $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ 样品在中心波长 121.6 nm 处的膜系设计,最后制备的 $\text{LaF}_3/\text{MgF}_2$ 样品在中心波长 122.5 nm 处的峰值反射率达到 78%,半峰全宽为 8 nm,达到理论设计的预期效果。研究结果显示,退火处理会降低样品反射率,增加样品表面粗糙度,严重破坏样品的表面质量。

参 考 文 献

- [1] Narukage N, Kubo M, Ishikawa R, et al. High-reflectivity coatings for a vacuum ultraviolet spectropolarimeter[J]. *Solar Physics*, 2017, 292(3): 40.
- [2] Osterman S N, Wilkinson E, Green J C, et al. Cosmic origins spectrograph FUV grating performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4485: 361-369.
- [3] Zukic M, Torr D G, Kim J, et al. Far-ultraviolet filters for the ISTP UV imager[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1745: 99-107.
- [4] Del Hoyo J, Quijada M. Enhanced aluminum reflecting and solar-blind filter coatings for the far-ultraviolet[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10372: 1037204.
- [5] Wilbrandt S, Stenzel O, Nakamura H, et al. Protected and enhanced aluminum mirrors for the VUV[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(4): A125-A130.
- [6] Quijada M A, Hoyo J D, Rice S. Enhanced far-ultraviolet reflectance of MgF_2 and LiF over-coated Al mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9144: 91444G.
- [7] Rodríguez-de Marcos L V, Gutiérrez-Luna N, Espinosa-Yáñez L, et al. Enhanced far-UV reflectance of Al mirrors protected with hot-deposited MgF_2 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10691: 106910T.
- [8] de Marcos L V R, Larruquert J I, Méndez J A, et al. Optimization of MgF_2 -deposition temperature for far UV Al mirrors[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 9363-9372.

- [9] Malherbe A. Interference filters for the far ultraviolet [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(6): 1275-1276.
- [10] Guo C, Kong M D, Lin D W, et al. Fluoride coatings for vacuum ultraviolet reflection filters[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(35): 10498-10503.
- [11] Zukic M, Torr D G. Multiple reflectors as narrow-band and broadband vacuum ultraviolet filters[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(10): 1588-1596.
- [12] Zukic M, Torr D G, Spann J F, et al. Vacuum ultraviolet thin films. 1: optical constants of BaF_2 , CaF_2 , LaF_3 , MgF_2 , Al_2O_3 , HfO_2 , and SiO_2 thin films[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(28): 4284-4292.
- [13] Rodríguez-de Marcos L V, Larruquert J I, Méndez J A, et al. Self-consistent optical constants of MgF_2 , LaF_3 , and CeF_3 films[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(3): 989-1006.
- [14] Liu M C, Lee C C, Kaneko M, et al. Microstructure of magnesium fluoride films deposited by boat evaporation at 193 nm[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(28): 7319-7324.
- [15] Yu H, Cui Y, Shen Y M, et al. Design, preparation and characterization of 355 nm antireflection coatings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(12): 2026-2030.
- 余华, 崔云, 申雁鸣, 等. 355 nm 增透膜的设计、制备与性能 [J]. *中国激光*, 2008, 35(12): 2026-2030.