

文章编号: 0253-2239(2010)01-0277-06

# 原子层沉积制备 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜的光学性能研究

何俊鹏 章岳光 沈伟东 刘 旭 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 研究了原子层沉积制备氧化铝薄膜的光学性能。以三甲基铝(TMA)和水为前聚体,分别在基板温度为 250 °C 和 300 °C 的 K9 和石英玻璃衬底上沉积了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  光学薄膜。采用分光光度计, X 射线光电子能谱(XPS), X 射线衍射(XRD), 原子力显微镜(AFM), 扫描电子显微镜(SEM)等分析手段对薄膜的微结构、表面形貌和光学特性进行了研究。结果表明,原子层沉积法制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜在退火前后均呈现无定形结构,元素成分接近化学计量比,其表面粗糙度小于 1.2 nm,聚集密度高于 0.97,光学非均匀性优于 1%。同时在中紫外到近红外均有很好的光学性能,适合作为中间折射率和低折射率材料在光学薄膜中得到应用。

**关键词** 薄膜光学;原子层沉积; $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜;光学特性

中图分类号 O484.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103001.0277

## Optical Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3$ Thin Film Fabricated by Atomic Layer Deposition

He Junpeng Zhang Yueguang Shen Weidong Liu Xu Gu Peifu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** The optical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films grown by atomic layer deposition were investigated. Trimethylaluminium (TMA) and water vapour ( $\text{H}_2\text{O}$ ) were used as the chemical precursors to deposit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films on glass substrates at temperature of 250 °C and 300 °C respectively. Characterization of the films such as optical properties, surface morphological image and microstructure were performed by using spectrophotometer, X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscopy (AFM). The results show that both the as-deposited and annealed  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films are amorphous. The surface roughness is as low as 1.2 nm while the packing densities are larger than 0.97.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films by this technique exhibit good optical properties with low absorption in the spectral region from mid-ultraviolet to near-infrared. This study indicates that  $\text{Al}_2\text{O}_3$  film deposited by ALD is applicable for optical coatings of the materials with middle and low refractive index.

**Key words** thin film optics; atomic layer deposition;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films; optical properties

## 1 引 言

原子层沉积(ALD),又称原子层外延方法,最初是由芬兰科学家于 20 世纪 70 年代提出。原子层沉积技术由于其沉积参数(厚度,成份和结构)的高度可控性,优异的沉积均匀性和一致性等特点<sup>[1,2]</sup>,使得其在光学与光电子薄膜领域具有广泛的应用潜力,最近几年引起了高度关注。就目前的报道来看,

ALD 的应用领域已逐渐从半导体拓展到其他领域,如光学领域<sup>[3~5]</sup>。杜邦公司(DuPont)采用 ALD 制备厚度 25 nm 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜作为有机电致发光二极管(OLED)的气体扩散阻隔层,大大地提高了 OLED 的发光寿命;芬兰 Planner System 公司提出了在  $\text{TiO}_2$  薄膜中插入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  纳米层来破坏结晶,获得无定形且残余应力小的  $\text{TiO}_2$  薄膜;美国

收稿日期: 2008-11-07; 收到修改稿日期: 2009-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(60778025) 和中国博士后科学基金(20081463)资助课题。

作者简介: 何俊鹏(1985—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: hjpcool@126.com

导师简介: 章岳光(1968—),男,博士,副教授,主要从事光学薄膜方面的研究。

E-mail: zhangyueguang@zju.edu.cn(通信联系人)

Corning 公司在 DLP 显示芯片 DMD 的封装中采用 ALD 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜作为密封层等。

$\text{Al}_2\text{O}_3$  材料作为一种很常用的高折射率材料广泛应用于多层介质膜中。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的光学特性强烈依赖于镀膜工艺条件及杂质污染等其它因素<sup>[6]</sup>。传统电子束热蒸发方法沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜容易出现失氧及结构疏松等情况,限制了其在紫外波段的应用。采用离子辅助技术可以在一定程度上得到改善,但是不利之处是同时又引入了其它的污染<sup>[7]</sup>。有关 ALD 制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的栅极特性已有相关文献<sup>[8,9]</sup>报道过,主要研究  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的微结构和电学特性。但  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜作为栅极介电层研究时膜层较薄,并且其光学特性也未见报道。

采用原子层沉积方法在不同温度下沉积了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  单层膜,分析其光学性能、微结构和表面状况。有关 ALD 的沉积原理及其在光学方面的潜在应用已有文献<sup>[10]</sup>进行过报道,本文重点介绍  $\text{Al}_2\text{O}_3$  光学薄膜的 ALD 制备方法及其光学特性。

## 2 薄膜制备

薄膜的制备是在芬兰 Beneq 公司的 TFS 200 ALD 沉积设备上进行的。由于 ALD 法制备半导体工业用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  栅极薄膜的工艺比较成熟,只是其薄膜厚度很薄(几个纳米量级),因此在制备中以最常用的三甲基铝(TMA)和水为反应源,沉积温度设定在 250 °C 和 300 °C,反应腔工作压强保持 40 Pa。基板采用直径为 30 mm,厚度为 2 mm 的 K9 玻璃和 JGS1 石英玻璃。所有基板经过仔细抛光,表面光圈均小于一个,均方根粗糙度在 1 nm 左右。晶片清洗采用先进行超声波处理,再用乙醚溶液清洗工序,为检查重复性,样品数均为 2 个。

在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的原子层沉积过程中,每个生长周期时间为 1 s,主要包括两个半反应。1) TMA 在  $\text{N}_2$  的携带下脉冲进入反应腔,化学吸附在衬底,然后,用  $\text{N}_2$  吹洗并带走腔中剩余的 TMA; 2)  $\text{H}_2\text{O}$  在  $\text{N}_2$  的携带下脉冲进入反应腔并与吸附在衬底上的 TMA 反应,生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和副产物  $\text{CH}_4$ 。同样地,  $\text{CH}_4$  及过量的水由  $\text{N}_2$  吹洗带出反应腔。

## 3 性能分析

$\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜 200~2000 nm 的光谱测量均由 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda900 光谱测试仪获得,仪器的波长分辨率为 0.08 nm,反射率的测量

通过与标准石英基板作比较得到。薄膜的厚度和折射率由薄膜的光谱透射比和反射率通过光度法<sup>[11]</sup>得到。薄膜透射比温漂实验在实验室自制的可控温分光光度计上完成<sup>[12]</sup>。XPS 测试在 AXIS Ultra (英国 Kratos 公司)的光电子能谱仪上进行,使用带单色器的铝靶 X 射线源( $\text{Al K}\alpha$ , 1486.71 eV)。在测试过程中,把样品放置在预处理室进行真空处理以除去表面吸附的杂质,再将样品送入分析腔中。所有元素的结合能均以污染碳的 C 1s(284.8 eV)谱线作为内标校正样品的荷电效应。薄膜的微结构由 RIGAKU /MAX-3C 型 X 射线衍射(XRD)仪进行测量分析。退火前后薄膜的表面形貌用 PSIA 公司的 XE-100 型原子力显微镜(AFM)表征。测试时采用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  微悬臂做探测针尖,以轻敲模式对样品进行成像。用 FEI 公司的 SIRON 型扫描电镜观察薄膜表面的形貌结构,该扫描电镜的分辨率为 10 nm。测试过程中为了研究薄膜的老化特性,将薄膜样品进行 350 °C 退火处理,时间为 2 h。

## 4 结果分析

### 4.1 薄膜的光学特性

图 1 是石英基板上  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的透射光谱曲线,可以看出  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的透射比均很高。在中紫外、可见光和近红外波长范围内(200~2000 nm),透射比平均值均在 87% 以上,极值点透射比约为 93%,接近石英玻璃基片的透射比。在中紫外区(200~400 nm),薄膜仍有较高的透射比,其中在入射波长为 278 nm 处透射比极值为 92%。

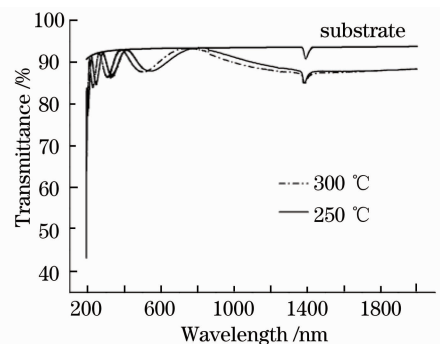


图 1 石英基板上  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的透射光谱曲线  
Fig. 1 Transmission spectra of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films grown on quartz substrates

ALD 通过表面自限制反应,交替沉积薄膜,每次沉积的薄膜在化学动力学特性、组分成分、厚度等方面保持一致性。同时由于自饱和和表面反应,使得表面沉积对气体流量与基片表面的形状等条件不敏

感, 这为沉积平坦、均匀的原子层薄膜创造了条件。图 2 是石英基板上  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的反射光谱曲线, 从图中可以看出薄膜的反射率极值与基板反射率基本相同, 膜层均匀性非常好, 其折射率非均匀性小于 1%。所以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜整体吸收很小, 在中紫外到近红外均有很好的光学性能。

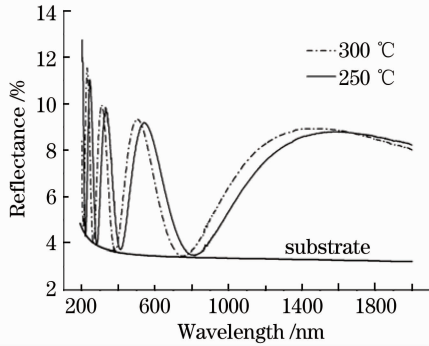


图 2 石英基板上  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的反射光谱曲线

Fig. 2 Reflection spectra of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films grown on quartz substrates

图 3 是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜在室温和加热到 120 °C 时测试得到的透射光谱。温度升高后, 波长向短波漂移, 说明薄膜中吸附的水汽从薄膜内部解吸<sup>[8]</sup>。从温漂曲线看出透射比的半高全宽所对应的波长漂移了 1 nm, 计算可知, 250 °C 和 300 °C 基板温度下沉积  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的聚集密度均大于 0.97。连续的 ALD 过程使薄膜无针孔, 具有很高的密度<sup>[11,12]</sup>, 这从图 10 的 SEM 截面图中也得到了证实。

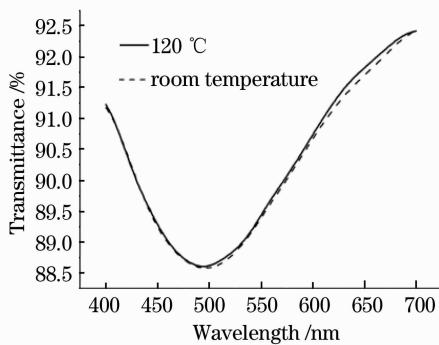


图 3 300 °C 沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜透射光谱的波长漂移

Fig. 3 Wavelength shift of transmission spectra of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films grown at 300 °C

薄膜的厚度和折射率由薄膜的光谱透射比和反射率通过光度法得到。从图 1 和图 2 的光谱曲线可以得到, 300 °C 和 250 °C 基板温度下沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的厚度分别为 224 nm 和 241 nm。图 4 为对应的折射率色散情况。在 550 nm 处两个温度下沉积薄膜的折射率均大于 1.65, 比电子束蒸发生长的

$\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的折射率(1.62)稍大。由上面聚集密度可知, 这是因为原子层沉积的薄膜更加致密。两种温度下原子层沉积  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的消光系数都小于  $10^{-4}$ , 优于电子束蒸发制备的氧化铝薄膜<sup>[7]</sup>。退火后薄膜透射比和反射率光谱没有明显变化, 图 5 表明退火后折射率稍有提高。

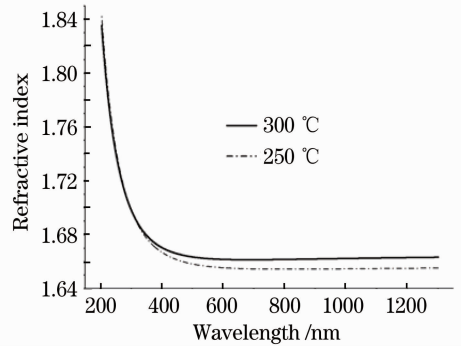


图 4 BK7 玻璃上  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的折射率色散

Fig. 4 Refractive index of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films grown on BK7 substrates

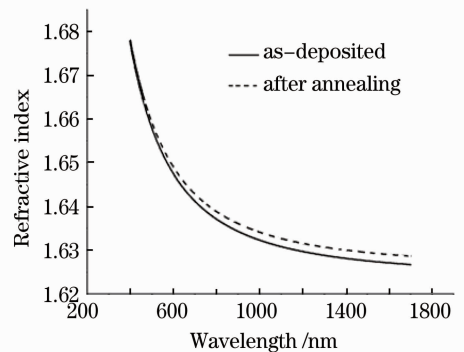


图 5 退火前后 300 °C 沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的折射率比较

Fig. 5 Refractive index of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films grown at 300 °C after annealing

## 4.2 表面形貌

光学薄膜对膜层表面要求很高, 粗糙表面造成光散射而影响膜层光学性能。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜在 350 °C 下退火处理前后的表面形貌三维照片如图 6 和图 7 所示。膜层表面光滑平整, 由许多细小颗粒组成, 颗粒起伏很小, 一般峰高在 3 nm 左右, 最大峰高接近 5 nm, 达到光学表面的要求。通过扫描探针显微镜软件分析, 镀膜前基板均方根粗糙度在 1 nm 左右, 300 °C 和 250 °C 基板温度工艺沉积薄膜的表面均方根粗糙度(RMS)分别为 1.16 nm 和 1.15 nm, 退火后薄膜表面没有明显变化, RMS 表面粗糙度分别为 1.10 nm 和 1.02 nm, 与电子束蒸发制备的氧化铝薄膜的表面粗糙度相当<sup>[7]</sup>。

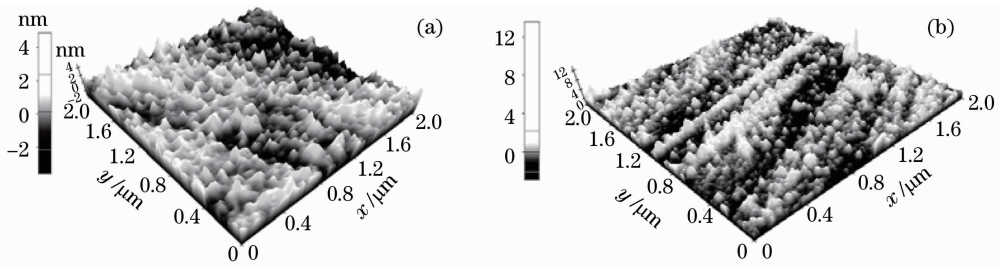


图 6 300 °C 沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜 AFM 表面形貌图。(a)退火前,(b)退火后

Fig. 6 Morphological image of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films grown at 300 °C. (a) as deposited, (b) after annealing

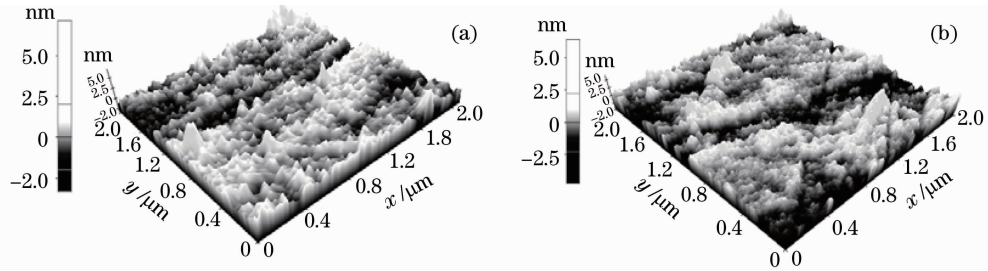


图 7 250 °C 沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜 AFM 表面形貌图。(a)退火前,(b)退火后

Fig. 7 Morphological image of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films grown at 250 °C. (a) as deposited, (b) after annealing

### 4.3 微结构

图 8 是刚淀积薄膜和 350 °C 退火后  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的 O 1s 和 Al 2p XPS 谱图。对于退火前后样品,其 O 1s 和 Al 2p 的结合能之差均为  $(456.7 \pm 0.05)$  eV, 接近蓝宝石(纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )的 456.6 eV<sup>[8]</sup>, 表明薄膜主要由 Al—O 键组成。薄膜退火前后的 Al 2p XPS 谱均

表现为对称的高斯分布,且具有稳定的峰位,如图 8(c)和(d)所示。这也表明薄膜中的 Al 元素主要是以 Al—O 键的形式存在。根据峰面积,计算出退火前后薄膜中 O 和 Al 元素的相对比例分别为 1.59 和 1.58,即 ALD 沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜元素成分接近化学计量比。

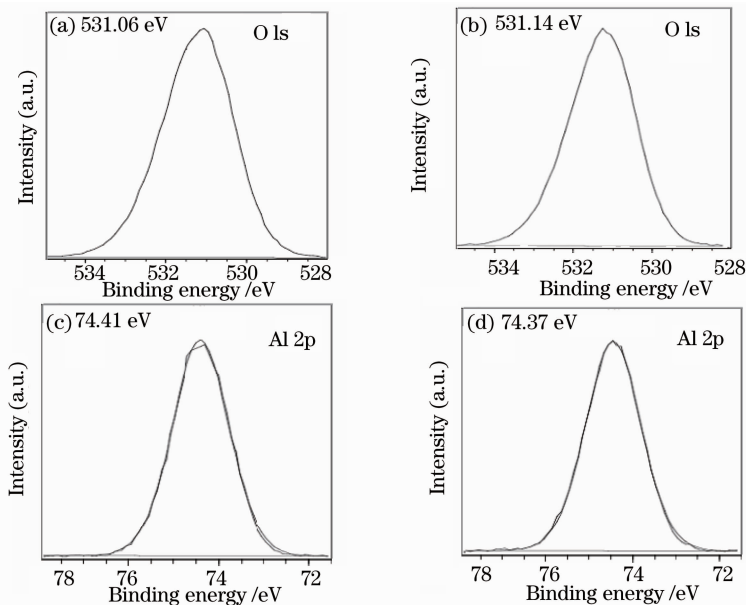


图 8  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的 O 1s 和 Al 2p XPS 谱图。(a),(c)刚淀积薄膜;(b)(d)350 °C 退火后

Fig. 8 O 1s and Al 2p XPS spectra image of ALD  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films. (a) and (c) as-deposited; (b) and (d) after annealing at 350 °C

图 9 是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的 X 射线衍射(XRD)谱,从上到下,分别对应 250 °C 退火后,300 °C 退火后,250 °C 及 300 °C。XRD 分析表明 250 °C 和 300 °C 基板温度

下沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜退火前后都没有明显的结晶产生,生长的薄膜均呈现无定形结构。图 10 为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜 250 °C 沉积在 K9 基板上的 SEM 截面图。可以



看出玻璃基板上  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜层为无定形, 连续均匀。膜横断面微观无柱状结构且没有明显的针孔, 整体致密, 这与前面的温漂分析结果相一致。同时 SEM 得到薄膜的物理厚度与光度法计算的相同。

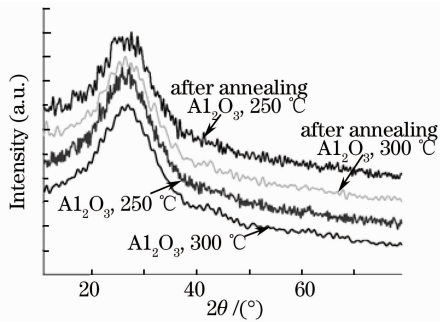


图 9  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的 XRD 谱图

Fig. 9 XRD spectra image of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films

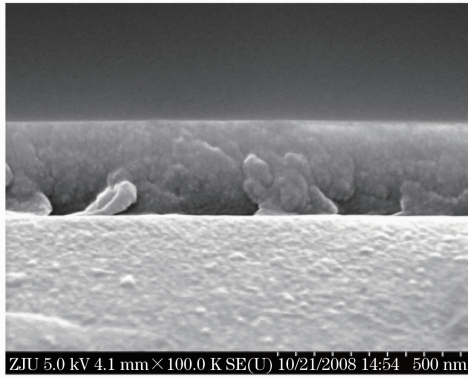


图 10  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜 SEM 截面图

Fig. 10 SEM image of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  film

## 5 分析讨论

薄膜样品的光学损耗包括吸收和散射两个方面。采用传统的电子束热蒸发方法沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜在紫外波段存在明显的光学损耗, 主要是电子束蒸发制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜在未经过退火处理时存在一定的氧化不充分现象, 这是引起吸收损耗的一种主要原因<sup>[7]</sup>。原子层沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜在中紫外到近红外均有很好的光学性能, 光度法得到的消光系数小于  $10^{-4}$ 。在 200~400 nm 段透射比明显高于电子束热蒸发方法沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜<sup>[7]</sup>, 并且退火前后透射光谱曲线变化不大。由 XPS 结果可知, 原子层沉积  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜氧化充分, 薄膜材料的元素成分接近化学计量比。

电子束热蒸发方法制备的薄膜都具有显著的柱状结构, 有针孔并且结构疏松, 聚集密度低。而聚集密度影响薄膜的光学稳定性, 当聚集密度较低时薄

膜容易吸潮, 引起波长漂移。由 SEM 和温漂结果可知, 原子层沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜没有明显的针孔, 整体致密, 膜层质量高。

ALD 方法可以在光学薄膜的基板上(石英玻璃和 K9 玻璃)生长  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜, 且有宽广的工艺温度窗口, 较高的反应气压, 能在大面积衬底上生长高质量的薄膜, 满足复杂要求光学多层膜, 抗激光损伤薄膜等方面的应用<sup>[13~16]</sup>。但 ALD 也存在沉积速率缓慢和反应前驱体较贵的问题, 需要通过成批处理来补偿 ALD 速率, 以及对反应前驱体和工艺过程进一步研究。

## 6 结 论

以 TMA 和  $\text{H}_2\text{O}$  为反应源, 在 250 °C 和 300 °C 下用 ALD 技术在 K9 玻璃和 JGS1 石英玻璃衬底上生长了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜, 研究了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的光学特性。通过透射比和反射率光谱发现 ALD 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜均匀性很好, 膜层较致密且折射率比 PVD 制备薄膜高。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜退火前后均为无定形结构, 在中紫外到近红外均有很好的光学性能。原子力显微镜(AFM)的结果表明制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜颗粒很小, 表面粗糙度低, 在 350 °C 退火后其薄膜表面没有明显变化。SEM 断面显示玻璃基板上  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜层为无定形, 连续均匀, 微观无柱状结构且没有明显的针孔, 整体聚集密度高。这表明原子层沉积的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜完全满足光学领域要求, 有望在光学薄膜的制造中应用。

## 参 考 文 献

- 1 H. L. Goodman. Atomic layer epitaxy[J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **60**(3): R65~R81
  - 2 Suntora. Atomic layer epitaxy[J]. *Thin Solid Films*, 1992, **216**: 84~89
  - 3 P. F. Carcia, R. S. McLean, M. H. Reilly *et al.*. Ca test of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gas diffusion barriers grown by atomic layer deposition on polymers[J]. *American Institute of Physics*, 2006, **89**: 031915
  - 4 A. Nikolov, J. Wang, X. Ouyang *et al.*. NanoOpto Corp, Films for optical use and methods for making such films[P]. U. S. Patent 7,142,375
  - 5 J. Maula, K. Harkonen, A. Nikolov *et al.*. Multilayer material and method of preparing the same[J]. *U. S. Patent Application*, 2006, **11**: 0134433
  - 6 O. Apel, K. Mann, A. Zoeller *et al.*. Nonlinear absorption of thin  $\text{Al}_2\text{O}_3$  film at 193 nm [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(18): 3165~3169
  - 7 Shang Shuzhen, Liao Chunyan, Yi Kui *et al.*. Experimental study of annealing effects on electron-beam evaporated  $\text{Al}_2\text{O}_3$  films[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2005, **11**(04): 511~514
- 尚淑珍, 廖春艳, 易 葵 等. 退火对电子束热蒸发  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜性

- 能影响的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **11**(04): 511~514
- 8 Stefan Jakschik, Uwe Schroeder, Thomas Hecht *et al.*. Crystallization behavior of thin ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3$  films[J]. *Thin Solid Films*, 2003, **425**: 216~220
- 9 Lu Hongliang, Xu Ming, Ding Shijin *et al.*. Thermal stability of atomic layer deposition  $\text{Al}_2\text{O}_3$  thin films [J]. *J. Inorganic Materials*, 2006, (05): 31~37  
卢红亮, 徐敏, 丁士进等. 原子层沉积  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜的热稳定性研究[J]. 无机材料学报, 2006, (05): 31~37
- 10 He Junpeng, Zhang Yueguang, Shen Weidong *et al.*. Atomic layer deposition and its applications in optical thin films[J]. *J. Vacuum Science and Technology*, 2009, **29**(2): 173~179  
何俊鹏, 章岳光, 沈伟东等. 原子层沉积技术及其在光学薄膜中的应用[J]. 真空科学与技术学报, 2009, **29**(2): 173~179
- 11 Shen Weidong, Liu Xu, Ye Hui *et al.*. A new method for determination of the optical constants and thickness of thin film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 885~888  
沈伟东, 刘旭, 叶辉等. 确定薄膜厚度和光学常数的一种新方法[J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 885~888
- 12 Xue Hui, Li Haifeng, Huang Wenbiao *et al.*. Design of spectrophotometer for measuring polarized transmittance and reflectance at different temperature [J]. *J. Zhejiang University(Engineering Science)*, 2007, **41**(9): 1523~1526  
薛晖, 李海峰, 黄文标等. 可测温漂的偏振透反射分光光度计的设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, **41**(9): 1523~1526
- 13 Shin-ichi Zaitso, M. Shinji, J. Takahisa. Laser damage properties of optical coatings with nanoscale layers grown by atomic layer deposition[J]. *Japanese J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(3): 1034~1035
- 14 Cheng Xu, Jianke Yao, Jianyong Ma *et al.*. Laser-induced damage threshold in n-on-1 regime of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  films at 532, 800 and 1064 nm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(12): 727~729
- 15 Xiao Hu, Juan Song, Qinling Zhou *et al.*. Self-formation of void array in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  crystal by femtosecond laser irradiation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 388~390
- 16 Jingmei Yuan, Hongji Qi, Yuan'an Zhao *et al.*. Influence of purity of  $\text{HfO}_2$  on reflectance of ultraviolet multilayer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 222~224