

原子层沉积制备 Ta₂O₅ 薄膜的光学特性研究

范欢欢¹ 章岳光¹ 沈伟东¹ 李旻晖¹ 李承帅¹ 何俊鹏¹ 刘春亮² 刘旭¹

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
² 芬兰倍耐克有限公司, 芬兰 赫尔辛基 FIN-01510

摘要 以乙醇钽[Ta(OC₂H₅)₅]和水蒸气为前驱体,采用原子层沉积(ALD)方法分别在基板温度为 250 ℃和 300 ℃的 K9 和石英衬底上制备了 Ta₂O₅ 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)、扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)等手段对薄膜的光学特性、微结构和表面形貌进行了研究。结果表明,用 ALD 方法制备的 Ta₂O₅ 薄膜在刚沉积和 350 ℃退火后均为无定形结构,而 250 ℃温度下沉积的薄膜其表面粗糙度低,聚集密度很高,光学均匀性优,在中紫外到近红外均表现出很好的光学特性,可以作为高折射率材料很好地应用于光学薄膜中。

关键词 薄膜;原子层沉积;Ta₂O₅ 薄膜;光学特性

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1031001

Optical Properties of Ta₂O₅ Thin Films Fabricated by Atomic Layer Deposition

Fan Huanhuan¹ Zhang Yueguang¹ Shen Weidong¹ Li Yanghui¹
Li Chengshuai¹ He Junpeng¹ Liu Chunliang² Liu Xu¹

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University,
Hangzhou, Zhejiang 310027, China
² Finland Beneq Oy, Helsinki FIN-01510, Finland

Abstract Tantalum ethoxide [Ta(OC₂H₅)₅] and water vapor (H₂O) are used as chemical precursors to deposit Ta₂O₅ thin films on K9 and JGS1 substrates by atomic layer deposition (ALD) at the temperature of 250 ℃ and 300 ℃ respectively. Characteristics of the films such as optical properties, microstructure and surface morphological image are investigated by 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 Ta₂O₅ films are amorphous. The film deposited at the temperature of 250 ℃ possesses excellent microstructure with good optical properties in the spectral region from mid-ultraviolet to near-infrared, and it can be well used for optical coatings as a kind of high-refractive-index materials.

Key words thin films; atomic layer deposition; Ta₂O₅ thin films; optical properties

OCIS codes 310.1860; 310.6860; 160.4670

1 引 言

Ta₂O₅ 是一种重要的光学薄膜材料,在可见区到近红外的波长范围内,有较高的折射率和较低的

光学吸收,并且具有比较宽的光谱透过范围(300~1000 nm),因此被广泛地应用于各种光学器件^[1]。目前制备 Ta₂O₅ 薄膜的方法一般有热氧化法、化学

收稿日期: 2011-03-22; 收到修改稿日期: 2011-05-05

基金项目: 浙江省科技厅项目(2010R10008)、中央高校基本科研业务费专项资金(2010QNA5036)和教育部留学回国人员科研启动基金项目资助课题。

作者简介: 范欢欢(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: fanhuanhuan@zju.edu.cn

导师简介: 章岳光(1968—),男,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)

气相沉积^[2]、电子束蒸发^[3]、离子束辅助沉积^[4]、反应溅射法^[5]、离子束溅射法^[6]和脉冲激光沉积法等,其中最常用的是电子束蒸发技术^[7]。然而传统电子束蒸发技术制备的薄膜,由于蒸发粒子具有的动能相对较低(0.01~0.1 eV)^[8],呈现柱状结构,膜层不够致密,折射率较低,存在着易吸潮,吸收大,光学稳定性差和表面散射大等一系列缺点。而原子层沉积(ALD)技术在沉积过程中对真空度和温度等条件的要求比传统电子束蒸发相对要低,由于其特定的生长机理,所制备薄膜的厚度可以精确的控制,并且膜层无柱状结构,有很高的聚集密度^[9,10],折射率接近于块状材料本身,有较好的光学稳定性,吸收小,散射低。因此,原子层沉积技术在制备优质光学薄膜,尤其是可见光及红外光谱区光学薄膜方面,有潜在的应用。本文对采用原子层沉积法制备的 Ta₂O₅ 光学薄膜的工艺参数及其微结构和光学特性进行了分析。

2 薄膜制备

作为前驱体,常用的 Ta 金属有机化合物有 Ta(OCH₃)₅, Ta(OC₂H₅)₅, Ta[N(CH₃)₂]₅, Ta[N(C₂H₅)₂]₅ 等。Koyama 等^[11]比较了在常压与 80 Pa 条件下 Ta(OCH₃)₅, Ta(OC₂H₅)₅, Ta[N(CH₃)₂]₅ 与 TaCl₅ 的热重-差热分析(TG-DTA)曲线,发现除 Ta(OC₂H₅)₅ 外,其余 3 种在常压和减压挥发过程中均有部分分解,会影响挥发率,且掺杂在沉积薄膜中;而 Ta(OC₂H₅)₅ 100%挥发,故 Ta(OC₂H₅)₅ 成为化学气相沉积最常使用的前驱体。因此本文采用 Ta(OC₂H₅)₅ 作为制备 Ta₂O₅ 薄膜的 Ta 源,并采用去离子水作为 O 源。

基板采用直径为 30 mm,厚度为 2 mm 的 K9 玻璃和 JGS1 石英玻璃。所有基板都经过仔细抛光,表面光圈均小于一个,均方根粗糙度在 1 nm 左右。基片清洗采用先进行超声波处理,再用乙醚乙醇溶液清洗工序,为检查重复性,样品数均为 2 个。

ALD 是通过将气相前驱体脉冲交替地通入反应腔并在沉积基体上化学吸附并反应形成沉积膜的一种方法。一个 ALD 循环包括 4 个步骤:1)脉冲第一种前驱体;2)清洗;3)脉冲第二种前驱体;4)清洗。每个饱和反应的 ALD 循环都生长出厚度一致的膜层。薄膜的制备在芬兰 Beneq 公司的 TFS-200 ALD 沉积设备上,真空腔和反应腔的压强分别保持在 8×10^2 和 1.5×10^2 Pa 左右。用惰性气体 N₂ 作为载气和清洗气体。乙醇钽通过热源加热到

110 ℃左右后蒸发,由 N₂ 携带进入反应腔。而去离子水则被放置在温度控制在 20 ℃左右的液态源罐中,并通过自身蒸汽压进入反应腔。两种前驱体进入反应腔的管路上分别装有一个电磁阀,通过调节电磁阀的脉冲时间来控制每次进入反应腔的反应源量,每次脉冲后用高纯 N₂ 来清洗反应腔和管路。薄膜的生长分别在基板温度为 250 ℃,300 ℃下进行。因为在 225 ℃~325 ℃的温度区间内,以 Ta(OC₂H₅)₅ 和 H₂O 为反应源的 ALD 反应都具有最佳的反应速率,但是在 300 ℃左右时需要考虑 Ta(OC₂H₅)₅ 热分解所产生的 Ta₂O₅ 的化合物,它们可分别作为 Ta 源和 O 源发生类似于化学气相沉积(CVD)的反应,这会破坏 ALD 反应的自限制特性,从而对薄膜的微结构,表面均匀性等造成影响^[12],故选取了 250 ℃,300 ℃这两个典型的温度来进行研究。优化后的前驱体脉冲时间为 Ta(OC₂H₅)₅ 300 ms, H₂O 2 s。脉冲后的清洗时间分别为 1 s 和 500 ms,其中高纯 N₂ 的流量设定在 300 sccm(标准状态下 ml/min)。

3 测试结果分析和讨论

3.1 薄膜的光学特性

Ta₂O₅ 薄膜在 200~2000 nm 波长范围的光谱测量在 Perkin Elmer 公司生产的 Lambda900 光谱测试仪上进行。分别测试了在 250 ℃和 300 ℃沉积温度下 ALD 方法制备的 Ta₂O₅ 薄膜的透射光谱曲线,并和 300 ℃温度下电子束蒸发(EB)制备的 Ta₂O₅ 薄膜作了对比,测试的光谱曲线如图 1 中所示。从图 1 可以看出,基板温度为 300 ℃时沉积的 Ta₂O₅ 薄膜其透射率峰值与基板透射率并不重合,说明存在较大的光学损耗。特别是在小于 600 nm 的波长范围,其峰值透射率减小了 3%左右,透射性劣于相同温度下电子束蒸发沉积的薄膜。而在 250 ℃温度条件下沉积的 Ta₂O₅ 薄膜具有良好的光学特性,在中紫外、可见光和近红外波长范围内(300~1700 nm),透射率极大值均接近于玻璃基片的透射率。显然在不同的沉积温度下,薄膜的微结构存在一定差异,从而使其表现出不同的光学特性,这在下面的消光系数测定实验和原子力显微镜(AFM)实验中将予以分析。图 2 是 K9 基板上 Ta₂O₅ 薄膜的反射光谱曲线,从图中可以看出 250 ℃和 300 ℃下沉积的薄膜的反射率极值与基板反射率基本相同,说明两者的折射率均匀性都非常好^[13]。

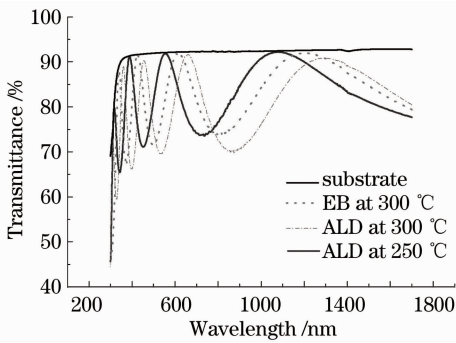


图 1 K9 基板上 Ta₂O₅ 薄膜的透射光谱曲线
Fig. 1 Transmittance spectra of Ta₂O₅ thin films grown on K9 substrates

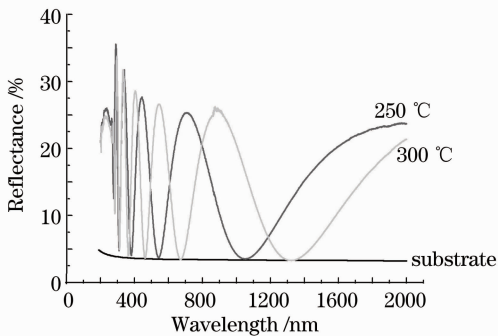


图 2 K9 基板上 Ta₂O₅ 薄膜的反射光谱曲线
Fig. 2 Reflectance spectra of Ta₂O₅ thin films grown on K9 substrates

薄膜透射率温漂实验在实验室自制的可控温分光光度计上完成^[14]。图 3 是 250 °C 温度下沉积的 Ta₂O₅ 薄膜分别在室温和加热到 120 °C 时测试得到的透射率光谱曲线。可以看到,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^[15]。从温漂曲线看出透射率为 50% 所对应的波长漂移小于 1 nm, 计算可知,其聚集密度大于 0.98, 远高于电子束蒸发生长的薄膜。这是因为 ALD 连续的脉冲过程使薄膜几乎没有针孔,具有很高的聚

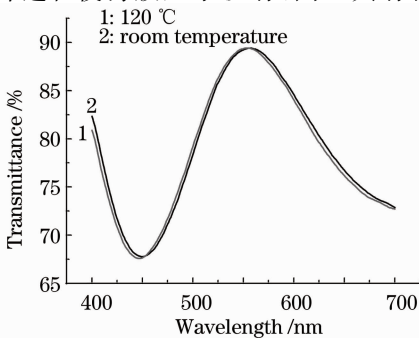


图 3 250 °C 沉积的 Ta₂O₅ 薄膜透射光谱的波长漂移
Fig. 3 Wavelength shift of transmittance spectra of Ta₂O₅ thin films grown at 250 °C

集密度。

根据测得的光谱透射率和反射率曲线,通过光度法^[16]可以反演得到薄膜的厚度、折射率和消光系数。从图 1, 2 的光谱曲线计算得到, 250 °C 和 300 °C 基板温度下沉积的 Ta₂O₅ 样品的厚度分别为 255 和 299 nm。图 4 为对应的折射率色散曲线。可见薄膜折射率随温度升高增大, 并且 250 °C 和 300 °C 下 ALD 制备的 Ta₂O₅ 薄膜都比电子束蒸发制备的 Ta₂O₅ 薄膜的折射率大。在 550 nm 处 250 °C ALD 沉积的薄膜折射率为 2.13, 而电子束蒸发沉积的 Ta₂O₅ 薄膜的折射率为 2.10, 这从另一方面也反映出 ALD 制备的薄膜聚集密度要大于电子束蒸发制备的薄膜。图 5 是得到的 250 °C 和 300 °C 基板温度下的 Ta₂O₅ 薄膜的消光系数曲线。对于 250 °C 温度下沉积的 Ta₂O₅ 薄膜, 其可见区到近红外消光系数均小于 8.0×10^{-4} , 薄膜的吸收非常小。而 300 °C 温度下沉积的薄膜其消光系数则达到了 $(1.8 \sim 2.1) \times 10^{-3}$, 可见其吸收明显大于前者。由于透射率受消光系数的影响较大, 所以这是造成 250 °C 和 300 °C 基板温度下 Ta₂O₅ 薄膜的透射率曲线差异的重要因素。可见 ALD 法制备薄膜的过程受沉积温度影响很大, 是控制沉积速度和膜层质量的重要工艺参数^[17]。

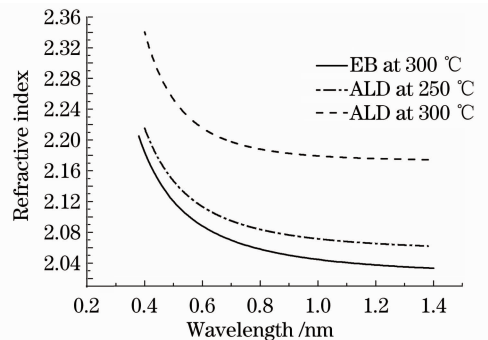


图 4 250 °C, 300 °C 下 ALD 和 300 °C 电子束蒸发沉积的 Ta₂O₅ 薄膜折射率曲线

Fig. 4 Refractive index of Ta₂O₅ thin films grown at 250 °C, 300 °C by ALD and at 300 °C by EB

3.2 表面形貌

用 PSIA 公司的 XE-100 型 AFM 测试了样品的表面形貌。图 6 和图 7 分别为 300 °C 和 250 °C 基板温度下沉积的 Ta₂O₅ 薄膜的 AFM 表面形貌图, 镀膜前基板均方根粗糙度在 1 nm 左右。从图中可以看出对于 300 °C 基板温度下沉积的 Ta₂O₅ 薄膜, 表面有大小不均匀颗粒, 表面平均粗糙度 (RMS) 为 5 nm 左右。而 250 °C 基板温度下沉积的薄膜表面

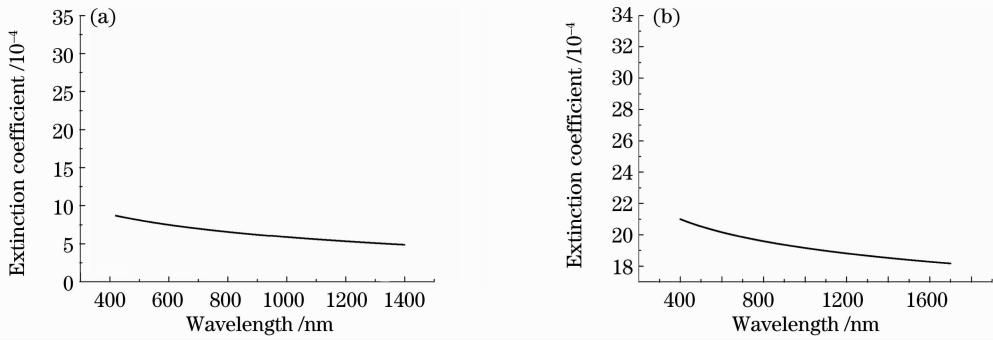


图 5 Ta₂O₅ 薄膜的消光系数曲线。(a) 250 °C；(b) 300 °C

Fig. 5 Extinction coefficient curves of Ta₂O₅ thin films. (a) 250 °C；(b) 300 °C

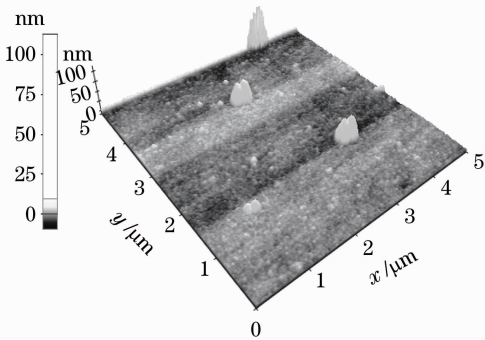


图 6 300 °C 沉积的 Ta₂O₅ 薄膜 AFM 表面形貌图

Fig. 6 Morphological image of Ta₂O₅ thin films grown at 300 °C

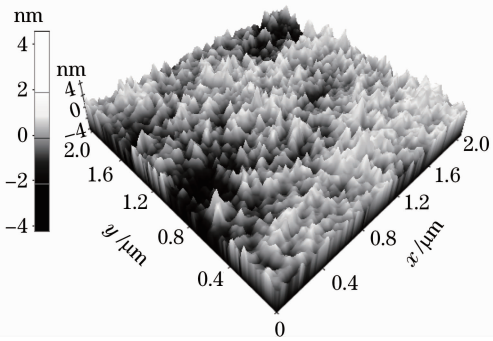


图 7 250 °C 沉积的 Ta₂O₅ 薄膜 AFM 表面形貌图

Fig. 7 Morphological image of Ta₂O₅ thin films grown at 250 °C

比较均匀,表面平均粗糙度(RMS)为 1.026 nm。这说明基板温度在 300 °C 时确实发生了 CVD 反应,对薄膜的生长和表面均匀性造成了较大影响。而薄膜的表面形貌是光学薄膜的重要特性,粗糙的表面会使薄膜的表面散射变大,导致光学损耗增大,从而影响其光学性能^[18]。故对于 300 °C 基板温度下沉积的 Ta₂O₅ 薄膜,它更加粗糙的表面导致其表面散射相比 250 °C 下的薄膜更大。这是前者透射率峰值小于后者的另一重要因素。AFM 图表明 250 °C 基板温度条件下 Ta₂O₅ 薄膜颗粒很小,表面粗糙度较小,因此薄膜散射也较小,符合其在光学薄膜中的应用的要求。

3.3 微结构

X 光电子能谱(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 (Al K α , $h\nu = 1486.71$ eV)。图 8 是 250 °C 下刚沉积的 Ta₂O₅ 薄膜和其在 350 °C 退火后的 O 1s 和 Ta 4f XPS 能谱图。发现 Ta 4f 谱线由 25.9 和 27.8 eV 两个峰组成(能量间隔 1.9 eV,面积比为 1.4),分别代表 Ta 4f 7/2 和 Ta 4f 5/2。退火前后的 O 1s XPS 能谱都表现出稳定的峰位,峰值为 530.06 eV。薄膜退火前后的结合能均接近于 Ta₂O₅ 化学计量比,表明薄膜主要由

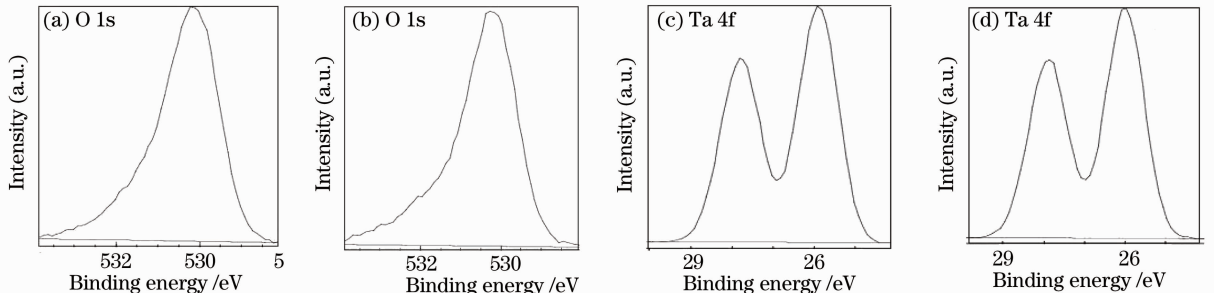


图 8 Ta₂O₅ 薄膜 O 1s 和 Ta 4f XPS 谱图。(a),(c) 沉积后；(b),(d) 350 °C 退火后

Fig. 8 O 1s and Ta 4f XPS spectra image of Ta₂O₅ thin films. (a),(c) Deposited；(b),(d) after annealing at 350 °C

Ta—O 键组成^[19]。并且退火前后的 Ta 4f XPS 谱变化不大,且具有稳定的峰位,如图 8(c)和(d)所示。这也表明薄膜中的 Ta 元素主要是以 Ta—O 键的形式存在。根据峰面积,计算出退火前后薄膜中 O 和 Ta 元素的相对比例分别为 2.13 和 2.35,即退火后的薄膜中 O 和 Ta 的含量更接近于化学计量比的 Ta₂O₅。

X 射线衍射(XPD)谱是由 RIGAKU /MAX-3C 型 X 射线衍射仪获得的。图 9 是 Ta₂O₅ 薄膜的 XRD 谱,从上到下,分别对应的基板温度为 300 °C 退火后,250 °C 退火后,300 °C 以及 250 °C。XRD 分析表明 250 °C 和 300 °C 基板温度下沉积的 Ta₂O₅ 薄膜退火前后都没有明显的结晶产生,生长的薄膜均为无定形结构^[20]。

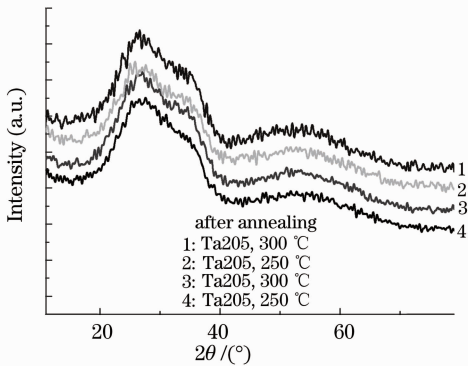


图 9 Ta₂O₅ 薄膜的 XRD 能谱图

Fig. 9 XRD spectra of Ta₂O₅ thin films

用 FEI 公司的 SIRON 型扫描电子显微镜(SEM)获得薄膜样品的截面图,该扫描电镜的分辨率为 10 nm。图 10 为 250 °C 温度下沉积在 K9 基板上的 Ta₂O₅ 薄膜的 SEM 截面图。可以看出玻璃基板上的 Ta₂O₅ 薄膜层为无定形态,未出现柱状结构且没有明显的针孔,致密均匀。这与前面的温漂实验的分析结果相一致。并且从 SEM 截面图测得的薄膜物理厚度

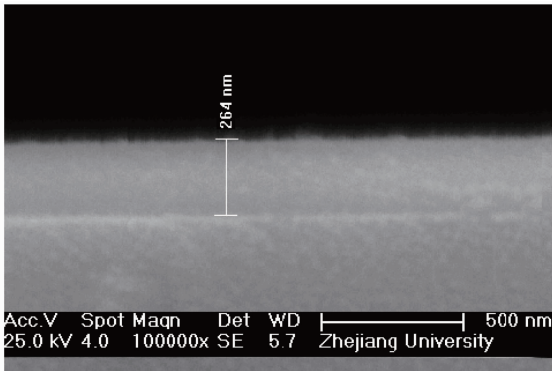


图 10 Ta₂O₅ 薄膜 SEM 截面图

Fig. 10 SEM image of Ta₂O₅ thin films

(264 nm)与光度法计算的结果(255 nm)很接近。

4 结 论

以乙醇钽[Ta(OC₂H₅)₅]和 H₂O 为反应源,分别在 250 °C 和 300 °C 下用原子层沉积技术在 K9 玻璃和 JGS1 石英玻璃衬底上生长了 Ta₂O₅ 薄膜,并研究了其光学特性。通过测试发现 300 °C 基板温度下 ALD 沉积的 Ta₂O₅ 薄膜存在较大光学损耗,不能满足光学薄膜的要求。而 250 °C 基板温度下沉积的 Ta₂O₅ 薄膜表面比较平整,为连续均匀的无定形态,膜层致密,无柱状结构且没有明显的针孔,相比传统电子束蒸发制备的薄膜,具备更优异的微结构和光学特性,并且 225 °C~250 °C 的温度范围可作为 ALD 法制备优质 Ta₂O₅ 薄膜的适宜温度窗口。

参 考 文 献

- Cheng Xu, Hongcheng Dong, Jianyong Ma *et al.*. Influences of SiO₂ protective layers and annealing on the laser-induced damage threshold of Ta₂O₅ films[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 228~230
- Yang Shenghai, Liu Yinyuan, Qiu Guanzhou *et al.*. Recent process in preparation of Ta₂O₅ film by CVD using Ta(OC₂H₅)₅ as precursor[J]. *Rare Metal Material and Engineering*, 2007, **36**(12): 2059~2075
杨声海, 刘银元, 邱周周 等. 乙醇钽化学气相沉积制备 Ta₂O₅ 薄膜研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, **36**(12): 2059~2075
- Zhang Guangyong, Xue Yiyu, Guo Peitao *et al.*. The research of electron beam evaporation deposits the Ta₂O₅ optical thin-film [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2008, **30**(1): 12~15
张光勇, 薛亦渝, 郭培涛 等. 电子束蒸发沉积 Ta₂O₅ 光学薄膜的研究[J]. *压电与声光*, 2008, **30**(1): 12~15
- Du Jifu, Zhan Changyong, Huang Ningkang. Microanalysis of tantalum oxide films deposited by dynamic ion beam mixing[J]. *J. Functional Material and Devices*, 2007, **13**(6): 512~516
杜纪富, 展长勇, 黄宁康. 动态离子束混合沉积氧化钽薄膜的微观分析[J]. *功能材料与器件学报*, 2007, **13**(6): 512~516
- O. Banakha, T. Heulin, P. E. Schmid *et al.*. Influence of process parameters on the properties of the tantalum oxynitride thin film s deposited by pulsing reactive gas sputtering[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2006, **24**(2): 328~333
- S. G. Yoona, Y. T. Kima, H. K. Kimb *et al.*. Comparison of residual stress and optical properties in Ta₂O₅ thin films deposited by single and dual ion beam sputtering[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2005, **118**(1-3): 234~237
- Todorova, Donkov, Ristic *et al.*. Electrical and optical characteristics of Ta₂O₅ thin films deposited by electron-beam vapor deposition [J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2006, **3**(2): 174~178
- J. Serra. Image Analysis and Mathematical Morphology[M]. New York: Academic, 1982
- H. L. Goodman. Atomic layer epitaxy[J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **60**(3): R65~R81
- Suntora. Atomic layer epitaxy [J]. *Thin Solid Films*, 1992, **216**(1): 84~89
- Hiroyuki Koyama, Satoshi Tanimoto, Koichi Kuroiwa *et al.*. Thermal properties of various Ta precursors used in chemical

- vapor deposition of tantalum pentoxide [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, **33**(11): 6291~6298
- 12 Kaupo Kukli, Mikko Ritala, Markku Leskela. Atomic layer epitaxy growth of tantalum oxide thin films from Ta(OC₂H₅)₅ and H₂O [J]. *J. Electrochemical Society*, 1995, **142**(5): 1670~1675
- 13 Yuan Wenjia, Zhang Yueguang, Shen Weidong *et al.*. Characteristics of Nb₂O₅ thin films deposited by ion beam sputtering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(4): 047803
袁文佳, 章岳光, 沈伟东等. 离子束溅射制备 Nb₂O₅ 光学薄膜的特性研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(4): 047803
- 14 Xue Hui, Li Haifeng, Huang Wenbiao. 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. 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
- 15 Stefan Jakschik, Uwe Schroeder, Thomas Hecht *et al.*. Crystallization behavior of thin ALD Al₂O₃ films[J]. *Thin Solid Films*, 2003, **425**(1-2): 216~220
- 16 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 403~412
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. 403~412
- 17 Szeghalmi, Adriana, Helgert *et al.*. Atomic layer deposition of Al₂O₃ and TiO₂ multilayers for applications as bandpass filters and antireflection coatings [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(9): 1727~1732
- 18 He Junpeng, Zhang Yueguang, Shen Weidong *et al.*. Optical properties of Al₂O₃ thin film fabricated by atomic layer deposition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 277~282
何俊鹏, 章岳光, 沈伟东等. 原子层沉积制备 Al₂O₃ 薄膜的光学性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 277~282
- 19 Huang Lijuan, Wang Lei, Du Jun. Preparation and photoluminescence properties of AuSi_x ($x = 1/2, 1/7$) nanoparticles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2338~2343
黄丽娟, 王 磊, 杜 军. AuSi_x ($x=1/2, 1/7$) 纳米颗粒的制备及光致发光性能研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2338~2343
- 20 Huang Caihua, Xue Yiyu, Peng Hua *et al.*. Effect of annealing on the optical properties of Ta₂O₅ films prepared by electron beam evaporation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 364~368
黄才华, 薛亦渝, 彭 桦等. 退火对电子束蒸发制备 Ta₂O₅ 光学薄膜光学性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 364~368