

## 0.2 nm 带宽滤光片的制备以及退火温度对其形貌和性能的影响

王凯旋<sup>1,2,3</sup>, 陈刚<sup>1,3</sup>, 刘定权<sup>1,2,3\*</sup>, 马冲<sup>1</sup>, 张秋玉<sup>1,2,3</sup>, 高凌山<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

<sup>2</sup>上海科技大学物质学院, 上海 200031;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 近红外波长为 1.064  $\mu\text{m}$  的激光是激光测距、自由空间光通信和空间光学遥感等应用中的主要激光光源之一。窄带滤光片是抑制背景光干扰的关键元件之一, 目前大部分滤光片的半峰全宽为几纳米。本文研制了中心波长为(1064 $\pm$ 0.05) nm、半峰全宽为 0.19 nm、峰值透过率可达 70.2% 的带通滤光片, 并考察了不同温度(100, 200, 300  $^{\circ}\text{C}$ )退火处理后滤光片的表面形貌和光谱特性的变化。实验结果表明: 滤光片的表面光滑, 受退火温度的影响很小; 滤光片的透射光谱随着退火温度的升高向长波方向移动, 在 100  $^{\circ}\text{C}$  退火处理 3 h 的滤光片的光谱漂移量为 0.03 nm, 说明该滤光片可在温控条件有限的空间光学系统中使用。

**关键词** 薄膜; 亚纳米带宽滤光片; 离子束溅射沉积; 近红外波段; 退火温度

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2031001

## Fabrication of 0.2 nm Bandwidth Filter and Effects of Annealing Temperature on Its Morphology and Characteristics

Wang Kaixuan<sup>1,2,3</sup>, Chen Gang<sup>1,3</sup>, Liu Dingquan<sup>1,2,3\*</sup>, Ma Chong<sup>1</sup>,  
Zhang Qiuyu<sup>1,2,3</sup>, Gao Lingshan<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 200031, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The near-infrared laser with a wavelength of 1.064  $\mu\text{m}$  is one of the main laser sources for laser ranging, free-space optical communication, and space optical remote sensing. Narrowband filters are one of the key components that suppress background light interference. At present, the full widths at half maximum of most filters are several nanometers. An ultra-narrow band-pass filter was designed and fabricated, which had a full width at half maximum of 0.19 nm, a peak transmittance of 70.2%, and a central wavelength of (1064 $\pm$ 0.05) nm. Then it was annealed at 100  $^{\circ}\text{C}$ , 200  $^{\circ}\text{C}$ , and 300  $^{\circ}\text{C}$ , respectively, and changes in its surface morphology and spectral characteristics were investigated. The experimental results indicate that the surface of the filter is smooth and annealing has little influence on it. In contrast, the transmission spectrum of the filter undergoes redshift as the annealing temperature rises. When annealed at 100  $^{\circ}\text{C}$  for 3 h, the filter experiences a spectral shift of 0.03 nm, which shows that the filter is suitable for space optical systems with limited temperature control.

**Key words** thin films; sub-nanometer bandwidth filter; ion beam sputtering deposition; near-infrared band; annealing temperature

**OCIS codes** 310.6845; 310.6860; 310.6870

收稿日期: 2021-04-19; 修回日期: 2021-04-30; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 上海市自然科学基金(17ZR1434900)

通信作者: \*dqliu@mail.sitp.ac.cn

## 1 引言

在近红外波段, 1.064  $\mu\text{m}$  是常用的激光波长, 其对应的激光器和探测器相对成熟, 在激光雷达、自由空间光通信和空间光学遥感等方面有着广泛应用。在这些应用中, 需要使用亚纳米带宽的光谱滤波器来抑制背景光的干扰。基于干涉原理的滤光片具有结构简单、稳定性好、便于集成等优点, 特别适合于空间应用。

激光的单色性很好, 其光谱带宽远小于 1 nm, 因此所用薄膜滤光片的光谱带宽通常要达到亚纳米级别<sup>[1-4]</sup>。滤光片的带宽越窄, 透过率越高, 带外截止越深, 系统的信噪比就越好。目前, 5G 光通信使用的波分复用滤光片的标准带宽为 0.4 nm, 工作在波长 1550 nm 附近, 需要使用最先进的专用镀膜设备进行镀制。受薄膜生长和监控技术的制约, 在近红外波段研制高性能亚纳米带宽滤光片成为研究人员的一项挑战性工作, 而且目前针对亚纳米带宽滤光片在空间应用方面的研究还未有报道。针对空间应用的需要, 本文采用双离子束溅射(DIBS)方法制备了亚纳米带宽滤光片, 其中心波长为(1064  $\pm$  0.05) nm, 半峰全宽为 0.19 nm, 峰值透过率可达到 70.2%。

为了考察以及减小一些应用中温度大幅变化对滤光片性能的影响, 本课题组对所研制的滤光片进行了不同温度(100, 200, 300  $^{\circ}\text{C}$ )的退火处理, 研究了薄膜的表面形貌和滤光片光谱特性的变化。目前, 已经有一些学者对光学薄膜热退火处理进行了较为深入的研究<sup>[5-11]</sup>, 如: Zhao 等<sup>[12]</sup>研究了退火对  $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  多层介质反射镜结构和激光损伤阈值的影响, 结果发现随着退火温度升高, 中心波长向长波方向漂移; Shen 等<sup>[13]</sup>研究了退火对电子束蒸发制备的  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  多层膜残余应力的影响, 结果发现, 当退火温度为 200  $^{\circ}\text{C}$  时, 多层膜中的应力由压应力转变为张应力, 且应力随着退火温度的升高而增大<sup>[14]</sup>。但是, 这些研究都没有涉及退火温度对亚纳米带宽滤光片光谱特性的影响。在部分空间应用中, 由于受到重量和结构的限制, 温控保护不够充分, 温度波动有时 would 达到 100  $^{\circ}\text{C}$ , 所以研究温度对滤光片光谱特性的影响是必要的。

## 2 滤光片的制备

在 1.064  $\mu\text{m}$  所在的近红外波段, 氧化钽( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ )和二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )薄膜具有良好的光学透

明性和理化稳定性, 将它们分别选为高折射率膜层(H)材料和低折射率膜层(L)材料, 它们的折射率分别约为 2.10 和 1.44。基片选用直径为 50 mm、厚度为 0.5 mm 的 JGS-1 熔石英玻璃。窄带通滤光片通常由一个或几个谐振腔组成, 每个谐振腔的基本结构为 HLH...H |  $m * \text{LL}$  | H...HLH 或 HLH...HL |  $m * \text{HH}$  | LH...HLH, 这里的 H 和 L 分别代表光学厚度为 1/4 中心波长的高、低折射率膜层,  $m$  代表间隔层的级次<sup>[15]</sup>。

当间隔层为高折射率膜层时, 滤光片通带宽度的计算公式为

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0 n_L^{2x} n_g}{m\pi n_H^{2x+1}} \cdot \frac{n_H - n_L}{n_H - n_L + n_L/m}; \quad (1)$$

当间隔层为低折射率膜层时, 滤光片通带宽度的计算公式为

$$2\Delta\lambda = \frac{4\lambda_0 n_L^{2x-1} n_g}{m\pi n_H^{2x}} \cdot \frac{n_H - n_L}{n_H - n_L + n_L/m}。 \quad (2)$$

式中:  $\lambda_0$  为中心波长;  $n_H$  和  $n_L$  分别为高低折射率膜层的折射率;  $n_g$  为基片折射率;  $x$  为反射膜堆内高折射率膜的层数<sup>[16]</sup>。

根据应用需求, 滤光片的通带宽度应不大于 0.2 nm, 中心波长为 1064 nm。本课题组设计的滤光片膜系为 Sub / (HL)<sup>9</sup>2H (LH)<sup>9</sup>1L (HL)<sup>9</sup>4H (LH)<sup>9</sup>/air, 共 75 层膜, 含有 2 个谐振腔, 两个间隔层选用高折射率材料, 分别为 2H 和 4H, 刚好满足通带宽度的要求, 也能够适应监控精度的限制。

采用双离子束溅射沉积(DIBS)制备滤光片薄膜, 该技术是一种经典的精密光学薄膜制备技术。采用该技术制备得到的薄膜表面光滑, 膜层致密, 光学和理化性能稳定。同时, 该技术特别适合用于氧化物光学薄膜的制备。图 1 是双离子束溅射沉积设备的工作原理示意图, 左侧的靶材为金属钽靶和  $\text{SiO}_2$  靶, 制备薄膜时靶面倾斜 45 $^{\circ}$ , 离子束以 45 $^{\circ}$  角入射溅射靶材。镀膜时, 工件盘高速转动, 转速为 800 r/min, 监控光束从样品中心垂直穿过, 这样可以将机械运动对光学监控系统(OMS)光电信号的影响降低到最小。高能量的氩离子束从 16 cm 射频离子源中发出, 中和器产生的电子能够将真空室表面积累的氩离子中和掉, 从而避免表面电荷的积累。被溅射出的原子(或粒子)到达基片表面形成薄膜。与此同时, 另一个 12 cm 辅助离子源产生的氧离子和氩离子混合离子束轰击生长中的薄膜表面, 并最终在基片上形成稳定致密的薄膜。真空室的背景真空度为  $2 \times 10^{-4}$  Pa, 当沉积薄膜时, 向真空室内充入

氧气和氩气,并使真空度保持在  $2.0 \times 10^{-2} \sim 4.0 \times 10^{-2}$  Pa。 $Ta_2O_5$  膜层的沉积速率为 0.12 nm/s,而  $SiO_2$  膜层的沉积速率为 0.2 nm/s。在本实验中,主离子源 RF16 的离子束流为 600 mA,离子加速电压设置为 1250 V,工作气体为氩气,流量为 18 mL/min;辅助离子源 RF12 的工作气体为氩气和氧气的混合气体,其流量分别为 3 mL/min 和 15 mL/min,离子束流为 150 mA,离子加速电压设置为 500 V。

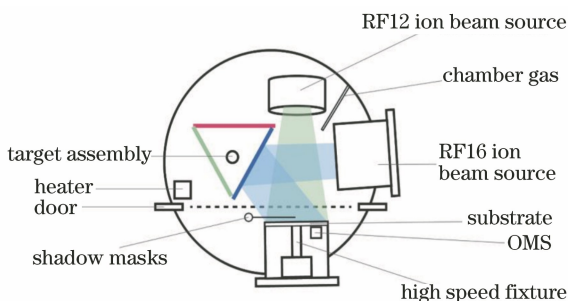


图 1 薄膜制备系统的工作示意图

Fig. 1 Schematic layout of thin film fabrication system

在薄膜制备过程中,采用光学监控和时间监控两种方法相结合的方式对膜层厚度进行控制,其中光学监控中的自补偿效应和中心波长的错位作用有利于超窄带滤光片的制备。图 2 是用 OptiLayer 光学薄膜软件生成的该滤光膜系中各膜层的误差灵敏度分布图。由图可知,滤光膜系的间隔层(第 19 层和第 57 层)及其前后膜层的误差灵敏度最大,而耦合层(第 38 层)及其附近膜层的误差灵敏度较小。在沉积前 16 层薄膜时,光学监控信号较强,以光学监控为主,同时系统自动记录各个膜层的时间监控参数;沉积第 17~21 层薄膜时,光学监控信号较弱,采用时间监控和光学监控相结合的方式,其中的一种监控信号到达终点,即完成该层薄膜的沉积;沉积第 22~54 层薄膜时,光学信号较强,以光学监控为

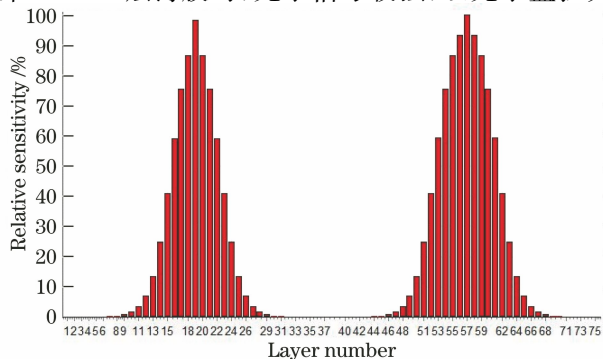


图 2 滤光片中各膜层的误差灵敏度

Fig. 2 Error sensitivity of each layer in the filter

主;沉积第 55~59 层薄膜时的监控方法与沉积第 17~21 层的相同;沉积第 60~75 层薄膜时的监控方法与沉积前 16 层薄膜相同。沉积第 38 层薄膜时,光学监控信号因几乎保持不变而无法利用,故用沉积时间来控制该层膜的厚度。

为配合光纤光路的使用,滤光片制备完成后被切成尺寸为  $1.4 \text{ mm} \times 1.4 \text{ mm}$  的方形小片,如图 3 所示。在室温( $22 \pm 2$ ) °C 条件下,采用可调谐激光光源和日本横河公司的 AQ6370D 高分辨率光谱仪对这些切割后的小尺寸滤光片进行光谱测量,在垂直入射下测量得到的透射光谱如图 4 所示。从图 4 中可以看出,滤光片的截止带较宽,在  $1000 \sim 1200 \text{ nm}$  波段范围内,没有其他透射峰。峰值透过率一半( $0.5T_p$ )处的通带宽度为 0.19 nm,中心波长为  $(1064 \pm 0.05) \text{ nm}$ ,峰值透过率为 70.2%。

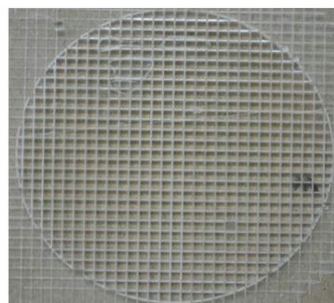


图 3 滤光片方形小片

Fig. 3 Small square filter

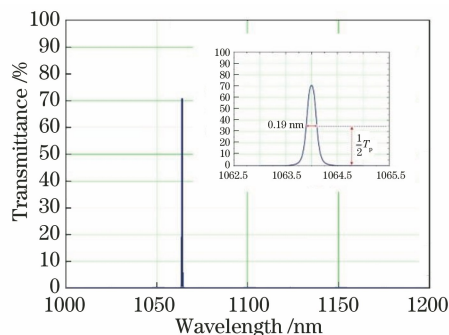


图 4 测量得到的滤光片的透射光谱

Fig. 4 Measured transmission spectrum of the narrow band-pass filter

为了表示滤光片的带外截止深度,本文给出了对数坐标形式的滤光片透射光谱曲线,如图 5 所示。从图 5 可以看出,在中心波长  $\pm 1 \text{ nm}$  以外的光谱区域,滤光片的截止深度达到了 OD4。

### 3 退火和表征

将滤光片样品放入退火炉中,分别在 100, 200, 300 °C 的空气氛围中进行退火处理,保温时间为 3 h

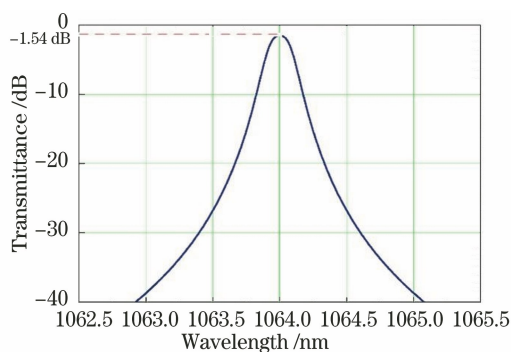


图 5 对数坐标形式下滤光片的透射率

Fig. 5 Transmittance of the filter in logarithmic scale

(保温期间的温度误差在  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  以内), 然后自然冷却到室温。

### 3.1 光谱性能变化

在每次退火后分别测量滤光片的透射率, 并将其与退火前的透射率进行对比, 对比结果在图 6 中给出。从图 6 可以看出: 退火后, 滤光片的透射光谱向长波方向移动, 在 100, 200, 300  $^\circ\text{C}$  退火处理的滤光片的光谱曲线漂移量分别为 0.03, 0.75, 2.90 nm; 退火前后, 滤光片的光谱形状基本保持不变。以上说明各膜层的物理厚度增大了。

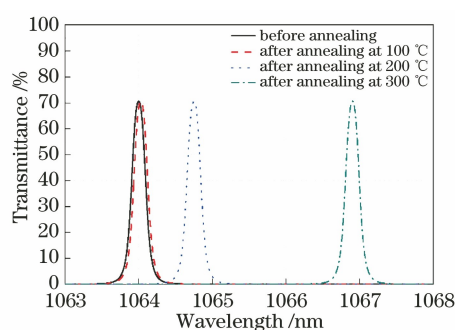


图 6 退火前后滤光片的透射率

Fig. 6 Transmittance of filter before and after annealing

### 3.2 表面形貌

表面形貌是光学薄膜的重要特性, 粗糙的表面会使散射变大, 从而影响膜层的光学性能和可靠性<sup>[17-18]</sup>。为了研究退火温度对滤光片表面形貌的影响, 采用原子力显微镜 (AFM) 对退火前后滤光片的表面形貌进行观测, 扫描范围为  $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ , 得到的图像如图 7 所示。滤光片的表面粗糙度数据在表 1 中给出。可以看出, 退火后滤光片的表面粗糙度 RMS 值虽然经历了一定波动, 但变化不大, 基本保持在 0.25~0.36 nm 范围内, 说明滤光片仍然保持着光滑的表面。

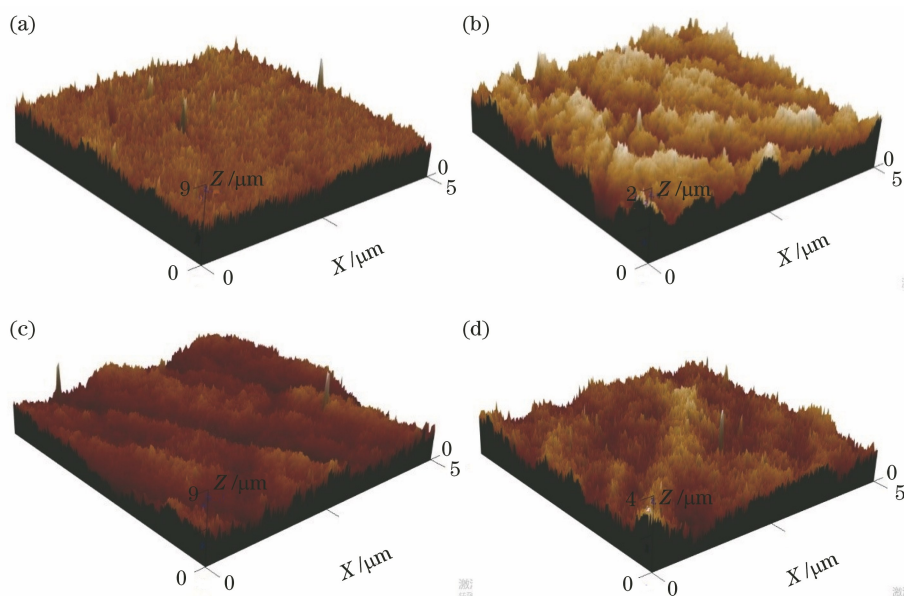


图 7 退火前后滤光片的 AFM 形貌。(a) 退火前; (b) 100  $^\circ\text{C}$  退火后; (c) 200  $^\circ\text{C}$  退火后; (d) 300  $^\circ\text{C}$  退火后

Fig. 7 AFM images of the filter before and after annealing. (a) Before annealing; (b) after annealing at 100  $^\circ\text{C}$ ; (c) after annealing at 200  $^\circ\text{C}$ ; (d) after annealing at 300  $^\circ\text{C}$

### 3.3 截面形貌

选取几个切割后的滤光片方形小片, 用扫描电镜对每次退火后的膜层截面进行观察, 获取了选定膜层的截面图像; 然后用软件测量其中一对高低折射率膜层的物理厚度, 测量结果如图 8 所示。由图

8 所示的退火前以及不同温度退火后滤光片的截面 SEM 图可以看出, 滤光片截面的中间部分清晰平整, 膜层致密, 膜层之间的界面明显, 未出现柱状结构。此外, 截面图的一些边缘部分因切割工艺的影响, 未显示出膜层的截面情况。将退火前后滤光片

样品的物理厚度进行比较可以发现,样品的物理厚度随着退火温度的升高而略有增加。这与滤光片光谱曲线向长波方向移动的趋势是吻合的。当氧原子

与少量未充分氧化的钽原子(以多价态离子形式出现)结合时,氧原子会镶嵌在晶格的间隙中,导致晶格畸变,表现为样品体积增大。

表 1 滤光片退火前后的表面粗糙度

Table 1 Surface roughness of the filter before and after annealing

Surface roughness	Before annealing	After annealing at 100 °C	After annealing at 200 °C	After annealing at 300 °C
Max /nm	2.062	0.932	2.370	2.062
Min /nm	-1.462	-1.147	-1.262	-1.462
Peak-to-peak /nm	3.525	2.079	3.632	3.525
Root-mean-square /nm	0.355	0.250	0.316	0.355

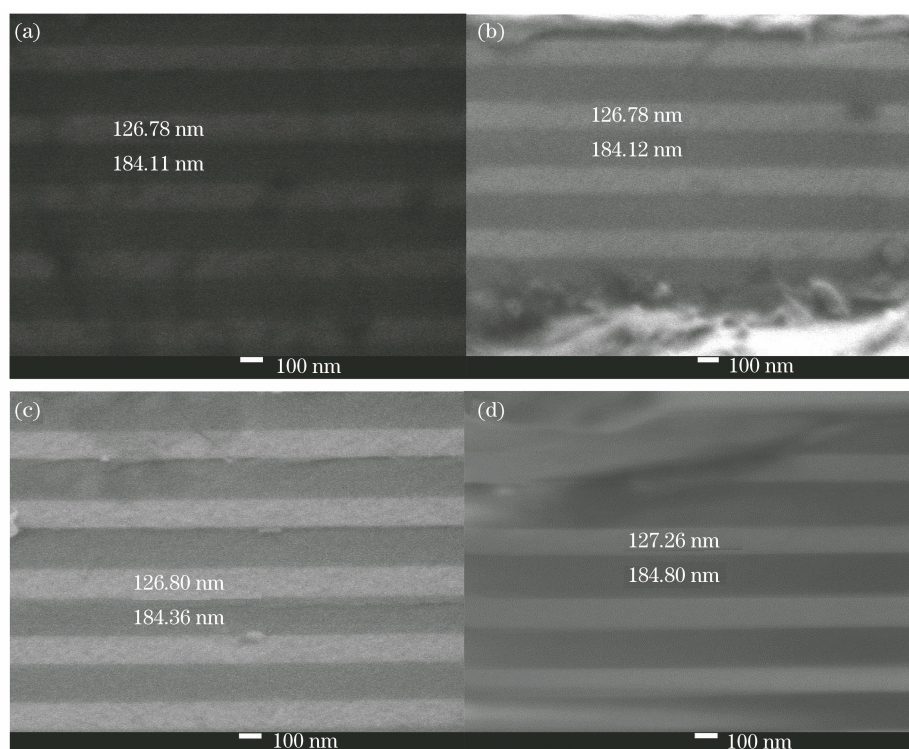


图 8 退火前后滤光片截面的 SEM 图。(a)退火前;(b) 100 °C退火后;(c) 200 °C退火后;(d) 300 °C退火后

Fig. 8 Cross-sectional SEM images of the filter before and after annealing. (a) Before annealing; (b) after annealing at 100 °C; (c) after annealing at 200 °C; (d) after annealing at 300 °C

### 3.4 讨论分析

采用双离子束溅射沉积技术制备得到的氧化物光学薄膜具有结构致密、缺陷少、稳定性好<sup>[19]</sup>等优点,能够满足大部分场合下的使用要求。对于亚纳米带宽的滤光片,其稳定性仍然是需要关注的一个重要方面。

低折射率 SiO<sub>2</sub> 膜层的源材料是经过充分氧化的 SiO<sub>2</sub> 靶材,薄膜生长过程中伴随着含 O<sup>2+</sup> 的离子束的辅助轰击,因此膜层的缺氧情况可以忽略;高折射率 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜层的源材料是高纯度(纯度为 99.999%)的金属钽靶材,薄膜生长过程中虽然也伴随着含 O<sup>2+</sup> 的离子束的辅助轰击,但被溅射沉积的

金属钽原子无法完全被充分氧化,总会有少量钽以不同的价态出现,即钽的化学键处于缺氧状态。

当切割成形的滤光片在含氧的气氛中退火时,薄膜中这些欠充分氧化的钽离子就有机会与环境中的氧分子接触。薄膜虽然密实,但仍有少量的微孔隙存在,氧分子(或原子)经过较长时间的迁移,仍能够接触薄膜的各个部位。氧原子与薄膜中未充分氧化的钽离子的结合是一个化学过程,这个化学过程的充分与否与浓度、温度和时间这三个因素有关。本文主要讨论温度这个变化因素。当退火温度为 100 °C 时,未充分氧化的钽离子开始与氧原子结合,薄膜基本保持原来的状态;当退火温度为 200 °C

时,未充分氧化的钽离子与氧原子大量结合,薄膜状态发生改变;当退火温度为 300 °C 时,未充分氧化的钽离子与氧原子的结合更充分,薄膜状态的改变更为明显。当 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜层被充分氧化后,薄膜的折射率会稍稍增大<sup>[20]</sup>。Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 膜层在膜系中起主导作用,相当于整个膜系的中心波长增大了,使得光谱向长波方向移动。

## 4 结 论

采用双离子束溅射沉积技术制备了中心波长为 (1064±0.05) nm、半峰全宽为 0.19 nm 的超窄带通滤光片,并在不同退火温度(100, 200, 300 °C)下对滤光片进行了 3 h 的退火处理,研究了退火温度对滤光片表面形貌和光谱特性的影响。滤光片的表面光滑,粗糙度 RMS 值约为 0.3 nm,退火处理对薄膜的表面形貌没有明显影响,膜层也是完整的。

退火处理后,滤光片的光谱曲线向长波方向移动,而光谱形状基本保持不变,这说明整个膜系中各个膜层的物理厚度增大了。在 100 °C 退火后,光谱的漂移量很小,只有 0.03 nm,说明这种滤光片在 100 °C 的环境下可以正常工作,不影响使用。当退火温度达到 200 °C 时,光谱发生了不可恢复的红移,偏移量达到 0.75 nm,应避免滤光片工作在 200 °C 及以上温度环境下。

## 参 考 文 献

- [1] Faber R, Zhang K Q, Zoeller A. Design and manufacturing of WDM narrow-band interference filters[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4094: 58-64.
- [2] Hagedorn H, Lotz A, Pecher P, et al. Ultra narrow band pass filters produced by plasma ion assisted deposition[C]//Optical Interference Coatings, July 15, 2001, Banff, Canada. Washington, D. C.: OSA, 2001: WA4.
- [3] Fredell M A, Carver G E, Chanda S, et al. Sub-nanometer band pass coatings for LIDAR and astronomy[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9612: 96120K.
- [4] Rahmlow T D, Jr, Fredell M, Chanda S, et al. Ultra-narrow bandpass filters for infrared applications with improved angle of incidence performance [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9822: 982211.
- [5] Wang L S, Liu H S, Jiang Y G, et al. Effects of hot-isostatic pressing and annealing post-treatment on HfO<sub>2</sub> and Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films prepared by ion beam sputtering[J]. Optik, 2017, 142: 33-41.
- [6] Sertel T, Sonmez N A, Cetin S S, et al. Influences of annealing temperature on anti-reflective performance of amorphous Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films [J]. Ceramics International, 2019, 45(1): 11-18.
- [7] Li S D, Liu H S, Jiang Y G, et al. Annealing effects on the optical and structural properties of Si thin films deposited by ion beam sputtering technique[J]. Optik, 2019, 181: 695-702.
- [8] Bischoff M, Nowitzki T, Voß O, et al. Postdeposition treatment of IBS coatings for UV applications with optimized thin-film stress properties [J]. Applied Optics, 2014, 53(4): A212-A220.
- [9] Jena S, Tokas R B, Rao K D, et al. Annealing effects on microstructure and laser-induced damage threshold of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayer mirrors [J]. Applied Optics, 2016, 55(22): 6108-6114.
- [10] Cetinörgü-Goldenberg E, Klemberg-Sapieha J E, Martinu L. Effect of postdeposition annealing on the structure, composition, and the mechanical and optical characteristics of niobium and tantalum oxide films [J]. Applied Optics, 2012, 51 (27): 6498-6507.
- [11] Guo D S, Chen Z N, Wang D K, et al. Effects of annealing temperature on crystal quality and photoelectric properties of Al-doped ZnO thin film [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46 (4): 0403002.  
郭德双, 陈子男, 王登魁, 等. 退火温度对铝掺杂氧化锌薄膜晶体质量及光电性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0403002.
- [12] Zhao Y, Wang Y J, Gong H, et al. Annealing effects on structure and laser-induced damage threshold of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> dielectric mirrors [J]. Applied Surface Science, 2003, 210(3/4): 353-358.
- [13] Shen Y M, Han Z X, Shao J D, et al. Annealing effects on residual stress of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayers [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(3): 225-227.
- [14] MacLeod H A, MacLeod H A. Thin-film optical filters[M]. 4th ed. New York: CRC Press, 2010: 46-58.
- [15] Tang J F, Gu P F, Liu X. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 140-146.  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 140-146.
- [16] Lee C C, Hsu J C, Wei D T, et al. Morphology of dual beam ion sputtered films investigated by atomic force microscopy[J]. Thin Solid Films, 1997, 308/309: 74-78.
- [17] Liu J Z, Pan Y Q, Zhang D, et al. Surface roughness and scattering characteristics of TiO<sub>2</sub> thin film [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57 (3):

033101.

刘金泽, 潘永强, 张达, 等.  $\text{TiO}_2$  薄膜表面粗糙度与散射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 033101.

- [18] Yu Z, Zhang W L, Zhu R, et al. Structural, optical, chemical and laser damage resistant properties of  $\text{HfO}_2$  films deposited by reactive electron beam evaporation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0403002.

余振, 张伟丽, 朱瑞, 等. 反应电子束蒸发  $\text{HfO}_2$  薄膜的结构、光学、化学和抗激光损伤特性[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0403002.

- [19] Chen G, Liu D Q, Ma C, et al. Spectrum modulation

of a thin-film filter with visible and near infrared dual band-pass channel [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(6): 791-795.

陈刚, 刘定权, 马冲, 等. 可见光和近红外双带通薄膜滤光片的光谱调控[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(6): 791-795.

- [20] Chen G, Liu D Q, Ma C, et al. Optical spectra and surface morphologies of near-infrared narrow band-pass filters using dual ion beam sputtering[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2131001.

陈刚, 刘定权, 马冲, 等. 双离子束溅射制备近红外窄带通滤光片的光谱和表面形貌[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2131001.