

导模共振滤波器用二氧化钛薄膜制备及研究

张贺, 平奕晨, 屈飞*

中国科学院电工研究所微纳加工技术和智能电气设备研究部, 北京 100190

摘要 利用原子层沉积技术在具有二维结构的石英玻璃上制备出二氧化钛(TiO_2)薄膜,并在不同的温度下进行退火处理。对样品的晶体结构、表面形貌、表面粗糙度以及光谱特性进行研究,结果表明:当热处理温度为 $200\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$ 时,所制备的二氧化钛薄膜具有较好的锐钛矿结构,无其他杂相存在。随着热处理温度的增加,薄膜晶粒尺寸逐渐增大,薄膜折射率变大,但表面粗糙度均小于 0.4 nm 。研究了由单层二维结构光栅和光波导层(二氧化钛薄膜)组成的导模共振滤波器,采用严格耦合波理论分析了该装置在不同条件下的光谱特性。结果表明,通过改变光波导层二氧化钛薄膜的折射率,可以控制该装置共振波长的位置,并保持窄线宽特性。该装置的波长控制范围为 $946.9\sim 967.9\text{ nm}$,半峰全宽小于 0.8 nm 。

关键词 薄膜; 二氧化钛; 原子层沉积; 导模共振; 严格耦合波理论; 共振波长

中图分类号 TB321 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221881

1 引言

不同材料截面的反射和折射可以使光子表现出类似于周期势场中电子的行为,通过设计构造出光子晶体,可以阻止光以特定频率在特定的方向传播,形成光子带隙。光子晶体概念自提出以来,一直受到人们的广泛关注^[1-4]。控制光在光子晶体中的行为方式,是光子晶体独有的特性,利用光子晶体的光子频率禁带特性可以实现对光子的优良滤波性能^[5-6]。光子晶体滤波器是一种具有信号频率选择功能的器件,具有带宽窄和灵敏度高的特点,已在偏振片、光调制器以及微波通信等领域得到广泛应用^[7-14]。

二氧化钛(TiO_2)是一种具有宽带隙、高介电常数和折射率(锐钛矿,折射率 $n=2.55$)的光学材料,由 TiO_2 构成的二维光子晶体具有二维有序结构的优异特性,能够实现结构尺寸与 TiO_2 二维光子晶体相匹配的光的有效调控。 TiO_2 光子晶体可应用于光学滤波器,实现导模共振效应,使得光栅在共振波长处具有较高的反射或透射特性^[15]。导模共振滤波器(GMR)是一种光子晶体谐振反射器,对入射光的某些偏振具有任意窄带的完美共振反射,同时允许其他波段的光继续传输。美国佐治亚理工学院的Graugnard等^[16]利用原子层沉积技术在二维光子晶体上制备 TiO_2 薄膜,薄膜可以增加器件的平均介电常数,使频段向低频率方向移动,完成光子波段的静态调控,从而调整二维光子

晶体色散特性,精确控制光子晶体器件的光学特性。美国爱荷华州立大学的Wang等^[17]在光栅结构上沉积了高折射率的 TiO_2 薄膜作为光波导层,并提出一种用于检测表面束缚光吸收的导模共振装置,该装置可用于可见光和红外光的吸收分析。

国内对基于 TiO_2 薄膜制备的导模共振滤波器的研究较少,仅有陶春先等^[18]对氧化钛薄膜导模共振效应光子晶体滤波器的光谱检测稳定性进行了研究。目前相关研究主要集中在导模共振滤波器的设计和仿真分析等方面,如:北京工业大学的江孝伟等^[19]基于光栅层控制光波的传播耦合波方程,设计了能够实现共振波长可调谐的亚波长光栅导模共振滤波器;河北工程大学的余九州等^[20]提出一种级联双层复合导模共振的光栅结构,解决了单一复合光栅结构难以直接实现窄带平顶滤波响应问题,并利用严格耦合波算法和本征模式分析法分析了其输出光谱;中国科学院大学的黑徐伟等^[21]设计出一个由光栅层和两个被空气薄层隔开的平板介质波导组成的导模共振滤波器,并使用时域有限差分法分析了该光栅在不同结构参数下的光谱特性。

本文通过原子层沉积(ALD)技术将 TiO_2 薄膜沉积在二维光子晶体光栅结构上,并将其作为光波导层制作导模共振滤波器。该装置能在共振波长处实现接近 100% 的反射率,共振反射发生的波段对光栅区域填充材料的折射率非常敏感,通过控制 TiO_2 薄膜的折

收稿日期: 2022-10-26; 修回日期: 2022-11-07; 录用日期: 2022-11-25; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1503502)、慧眼行动项目

通信作者: *qufei@mail.iee.ac.cn

射率实现对装置共振波长的精准控制,制备出高效、可控的窄线宽滤波器。

2 实验

2.1 样品制备

本实验采用原子层沉积技术在具有二维结构的石英玻璃上沉积 TiO_2 薄膜。首先依次利用硫酸、去离子水、丙酮、去离子水溶液对刻蚀好的二维石英玻璃衬底超声清洗 30 min,最后用高纯氮气吹干。将四(二甲氨基)钛($\text{Ti}[\text{N}(\text{CH}_3)_2]_4$)作为金属 Ti 的前驱体源, H_2O 作为氧源;将清洗过的玻璃衬底放在腔室中,并抽真空,使腔室的真空度小于 1 Pa。通入 N_2 使腔室气压保持在 50 Pa,将样品台温度设置为 100 $^\circ\text{C}$,钛前驱体脉冲时间为 0.5 s,吹扫时间为 15 s; H_2O 的脉冲时间为 0.5 s,吹扫时间为 15 s,反应循环周期数为 2000;制备的 TiO_2 薄膜分别在 100、200、300、400 $^\circ\text{C}$ 进行热处理。

2.2 样品表征

利用 Bruker 公司生产的 D8 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对样品进行物相分析,利用 ZEISS 公司生产的 SIGMA 500 场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 进行微观结构分析,利用 Bruker 公司生产的 ICON2-SYS 原子力显微镜 (AFM) 进行表面粗糙度分析,利用 Sentech 公司生产的光谱偏振仪 (SE 850 DUV) 对薄膜样品的厚度和折射率进行分析,采用基于周期性介质中波传播的严格耦合波理论分析方法 (RCWA) 模拟计算滤波器的反射图谱。

3 结果与讨论

3.1 物相结构

图 1 所示为采用原子层沉积技术制备的 TiO_2 薄膜样品的 XRD 谱。从图 1 可以看到:100 $^\circ\text{C}$ 热处理得到的 TiO_2 薄膜 XRD 谱仅有一个鼓包峰,无其他明显特征峰存在,说明在该温度下制备的 TiO_2 薄膜为无定形态;当热处理温度为 200、300、400 $^\circ\text{C}$ 时, TiO_2 薄膜样品的衍射峰都与四方晶系锐钛矿 TiO_2 标准卡片 (01-073-1764) 相符,未发现其他杂质峰,说明制备的 TiO_2 薄膜

为单相。如表 1 所示,利用 Scherrer 公式计算出热处理温度为 200、300、400 $^\circ\text{C}$ 时 TiO_2 薄膜样品的晶粒尺寸分别为 380.2、390.3、423.6 \AA ($1 \text{\AA} = 0.1 \text{ nm}$)。随着热处理温度的升高, TiO_2 薄膜样品的特征峰强度逐渐增大,表明制备样品的结晶性能变好。样品的晶粒尺寸较小,有利于产生量子尺寸效应。

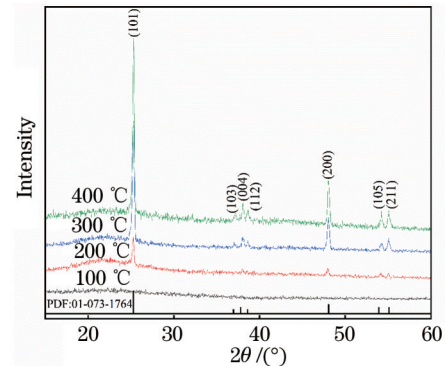


图 1 不同温度热处理后 TiO_2 样品的 XRD 谱

Fig. 1 XRD spectra of TiO_2 samples after heat treatment at different temperatures

3.2 微观结构

图 2(a)~(d) 为采用原子层沉积技术制备的 TiO_2 薄膜样品的 FESEM 图像,其中图 2(a) 的样品经过 200 $^\circ\text{C}$ 热处理,图 2(b) 的样品经过 300 $^\circ\text{C}$ 热处理,图 2(c)、(d) 的样品经过 400 $^\circ\text{C}$ 热处理。从图 2 可以看出,热处理后的 TiO_2 薄膜均为透明状,且所有样品的表面平整光滑,均没有观察到晶粒,这是因为样品的晶粒尺寸太小,薄膜结晶性能较好、致密度较高。

图 3(a)~(c) 所示为采用原子层沉积技术制备的 TiO_2 薄膜样品的 AFM 图像。热处理温度为 200、300、400 $^\circ\text{C}$ 的样品的表面粗糙度分别为 0.262、0.270、0.326 nm。随着温度的增加,样品的表面粗糙度并没有明显变化。由此可见,制备的薄膜样品具有良好的致密性和平整性。

以上结果表明,所制备的 TiO_2 薄膜表面形态较好、结晶性能优良、致密度较高,有利于其在器件上的应用。

表 1 不同温度热处理后 TiO_2 样品的薄膜结构和光学性能参数

Table 1 Thin film structure and optical property parameters of TiO_2 samples after heat treatment at different temperatures

Heat treatment temperature / $^\circ\text{C}$	Crystal structure	Grain size / \AA	Surface roughness / nm	Thickness / nm	Resonant wavelength / nm	FWHM
100	Amorphous	—	—	—	—	—
200	Anatase	380.2	0.262	80.5	946.9	0.74
300	Anatase	390.3	0.270	80.7	959.4	0.77
400	Anatase	423.6	0.326	80.8	967.9	0.79

3.3 光学性能

利用光谱偏振仪对 TiO_2 薄膜样品的厚度和折射率进行分析。如表 1 所示,经过 200、300、400 $^\circ\text{C}$ 热处理

以后, TiO_2 薄膜的厚度分别为 80.5、80.7、80.8 nm,厚度变化非常小,可见薄膜厚度与热处理温度无关。不同波长光入射时薄膜的折射率曲线如图 4 所示。可以

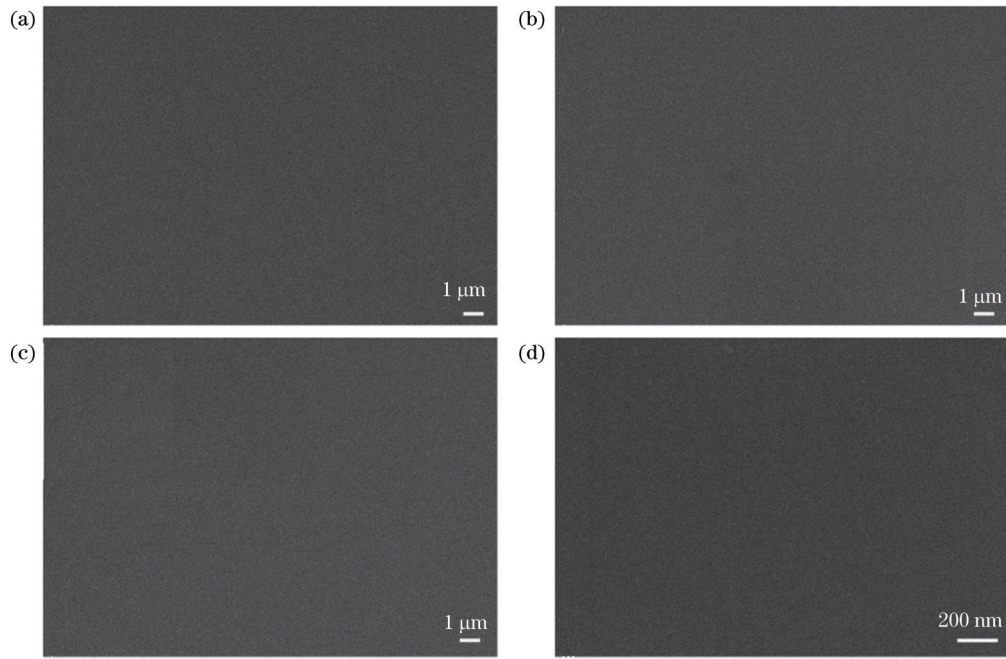


图 2 不同温度热处理后 TiO₂样品的 FESEM 图像;(a) 200 °C;(b) 300 °C;(c)(d) 400 °C

Fig. 2 FESEM images of TiO₂ samples after heat treatment at different temperatures. (a) 200 °C; (b) 300 °C; (c)(d) 400 °C

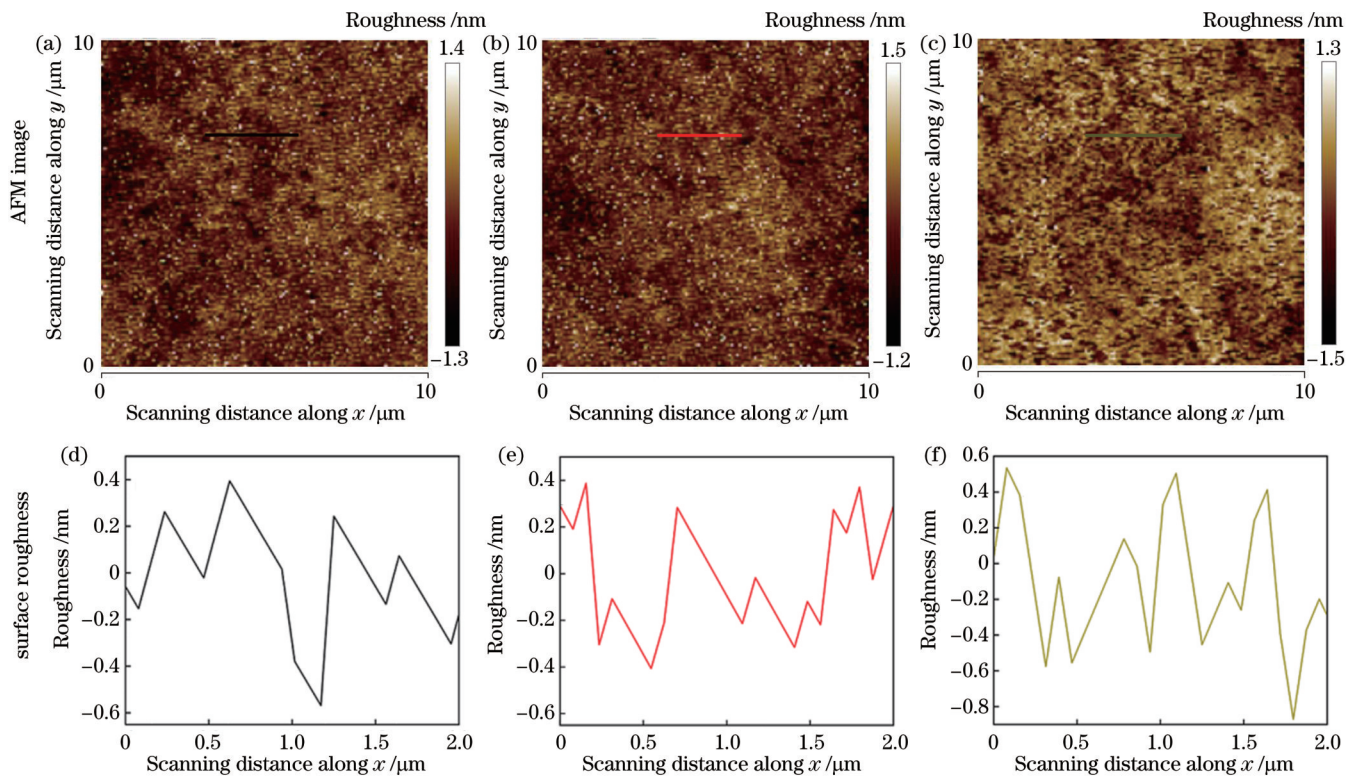


图 3 不同温度热处理后 TiO₂样品的 AFM 图像及其横线处的表面粗糙度。(a)(d) 200 °C;(b)(e) 300 °C;(c)(f) 400 °C

Fig. 3 AFM images and surface roughness of TiO₂ samples after heat treatment at different temperatures. (a)(d) 200 °C; (b)(e) 300 °C; (c)(f) 400 °C

看到,随着热处理温度的升高,TiO₂薄膜的晶粒尺寸逐渐变大,薄膜致密度不断增大,折射率也逐渐变大。通过改变 TiO₂薄膜的折射率,可以对装置共振波长进行精准控制,并在共振波长处产生接近 100% 的反射

率,实现在高效窄线宽滤波器上的应用。

3.4 导模共振滤波器的结构及光谱特性

基于导模共振效应的二维光子晶体光栅可以成为制备可见光及近红外光谱波段光学设备的新元件。通

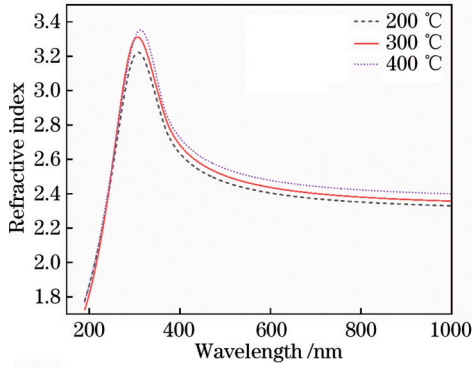


图 4 不同温度热处理后 TiO₂样品的折射率变化曲线
Fig. 4 Refractive index curves of TiO₂ samples after heat treatment at different temperatures

过单层光栅和波导,亚波长光栅在共振波长处表现出高反射率。二维光子晶体光栅的结构如图 5 所示,该光栅为双层结构,二氧化硅(折射率为 n_{SiO_2})基板表面周期性排布多孔结构,孔深度为 d_g 、排布周期为 Δ 、占空比为 D ,覆盖的 TiO₂(折射率为 n_{TiO_2})填充孔作为装置的波导层,波导层表面到基板顶面的距离为 d_h ,且 $r=110 \text{ nm}$ 、 $d_g=700 \text{ nm}$ 、 $a=710 \text{ nm}$ 。当光从基板下方入射时,一部分光被耦合到光栅中形成导模,这些被耦合的光从光栅中被不断解耦出来,当共振条件匹配时,解耦光与直接透射光发生相消干涉,导致共振反射,在反射光谱中对应于共振波长的一个或多个尖锐的峰值。

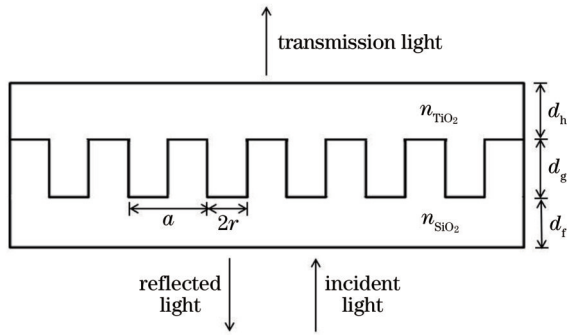


图 5 二维光子晶体光栅示意图

Fig. 5 Schematic of two-dimensional photonic crystal grating

光栅的衍射模式与波导的引导模式的匹配条件为

$$\beta_m = k_0 n_{\text{eff}} = k_0 n \sin \theta_m, \quad (1)$$

式中: β_m 为 m 级衍射波的传播常数,级次数 $m = \dots, -2, -1, 0, +1, +2, \dots$; k_0 为真空中光波的波数; λ_0 为真空中光的波长; n_{eff} 为光栅层的有效折射率; n 由光栅的结构和材料决定。当某一级次的衍射波正好与波导所支持的某个模式相位匹配时,对应的入射光能量将耦合到这一模式中,引起共振效应。

根据光栅的衍射方程

$$n \sin \theta_m = n_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Delta} \sin \phi, \quad (2)$$

共振波长处光栅层的有效折射率满足

$$n_{\text{eff}} = n_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Delta} \sin \phi, \quad (3)$$

即共振波长满足不等式

$$\max[n_{\text{inc}}, n_{\text{trn}}] \leq \left| n_{\text{inc}} \sin \theta_{\text{inc}} - m \frac{\lambda_0}{\Delta} \sin \phi \right| < n, \quad (4)$$

式中: n_{inc} 与 n_{trn} 分别为入射和透射介质的折射率。共振波长的位置与装置的结构、周期以及材料的折射率有关,且对它们的变化十分敏感。光栅层中任何折射率的变化都会直接导致引导模式的变化,从而改变共振波长。因此在装置的周期和结构不变的情况下,通过改变 TiO₂层的折射率,即可实现对共振波长在一定范围内的调控。共振波长由严格的耦合波分析方法计算得到,而严格耦合波分析方法引入了电磁理论,光作为一种电磁波,同样遵守麦克斯韦方程。求解过程由两个部分组成:将入射的电磁场在光栅区域展开为一系列空间谐波,并代入到麦克斯韦方程组得到耦合波的本征方程,再结合电磁场边界的连续性条件进行求解。考虑介质的色散特性,介质折射率与入射波长之间的关系由光谱椭偏仪(SE 850 DUV)测量得到,仪器测量值以外的点利用插值函数补充。

图 6 所示为不同温度热处理后 TiO₂薄膜样品的反射率与共振波长的变化曲线。由图 6 可知,随着温度的升高,反射光谱的形状没有发生变化,共振波长逐渐红移,共振峰分别位于 946.9、959.4、967.9 nm,共振峰的位置变化在 22 nm 以内,半峰全宽分别为 0.74、0.77、0.79 nm,旁带反射率几乎没有变化。这是因为当共振匹配时,若折射率发生变化,将引起共振匹配条件变化,为了达到导模共振条件,共振波长也会发生变化。因此,通过改变波导层 TiO₂薄膜的折射率,可以设计出所需共振波长的窄线宽导模共振滤波器。经过严格耦合波理论的模拟计算,实现了器件的设计和優化。由于制备工艺比较复杂,目前 TiO₂薄膜用于导模共振滤波器的制备正处于探索阶段。

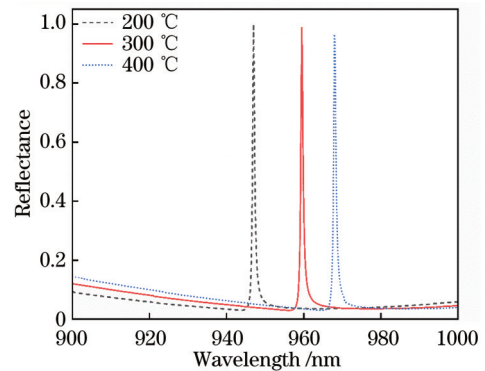


图 6 TiO₂样品的共振波长随不同温度热处理样品反射率的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of resonance wavelength of TiO₂ samples with reflectance after heat treating at different temperatures

4 结 论

利用原子层沉积技术在具有二维结构的石英玻璃上制备了不同折射率的高质量 TiO₂ 薄膜, XRD 和 AFM 的测试结果表明, 当热处理温度大于 200 °C 时, TiO₂ 薄膜具有锐钛矿结构, 表面粗糙度小于 0.4 nm。基于严格耦合波理论, 讨论了 TiO₂ 薄膜作为光波导层的作用, 分析了折射率对共振波长的影响。通过改变光波导层 TiO₂ 薄膜的折射率, 可以有效控制共振波长的位置, 且在一定范围内始终保持较窄的线宽(小于 0.8 nm), 实现了 946.9~967.9 nm 范围内导模共振滤波器设计, 并在共振波长处产生接近 100% 的反射率。所提方法可以精准控制共振波长位置, 有利于未来器件的实际应用。

参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] Cersonsky R K, Antonaglia J, Dice B D, et al. The diversity of three-dimensional photonic crystals[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 2543.
- [4] 陈剑锋, 梁文耀, 李志远. 磁光光子晶体中拓扑光子态研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823015.
Chen J F, Liang W Y, Li Z Y. Progress of topological photonic state in magneto-optical photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823015.
- [5] Madhumitha M, Selvendran S, Raja A S, et al. Photonic crystal based narrowband optical filter: a brief analysis[J]. *Optik*, 2021, 228: 166162.
- [6] 周铭杰, 谭海云, 周岩, 等. 一种基于束缚态的可调等离子体光子晶体窄带滤波器[J]. *物理学报*, 2021, 70(17): 175201.
Zhou M J, Tan H Y, Zhou Y, et al. A tunable narrow-band plasma photonic crystal filter based on bound state[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(17): 175201.
- [7] Wang Z Y, Zhang R J, Guo J P. Quadrupole mode plasmon resonance enabled subwavelength metal-dielectric grating optical reflection filters[J]. *Optics Express*, 2018, 26(1): 496-504.
- [8] Brückner F, Friedrich D, Clausnitzer T, et al. Realization of a monolithic high-reflectivity cavity mirror from a single silicon crystal[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(16): 163903.
- [9] Kontio J M, Simonen J, Leinonen K, et al. Broadband infrared mirror using guided-mode resonance in a subwavelength germanium grating[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(15): 2564-2566.
- [10] Khonina S N, Kazanskiy N L, Butt M A. Spectral characteristics of broad band-rejection filter based on Bragg grating, one-dimensional photonic crystal, and subwavelength grating waveguide[J]. *Physica Scripta*, 2021, 96(5): 055505.
- [11] Bhowmik T, Chowdhary A K, Sikdar D. Grating-assisted polarization-insensitive dual-mode spatial light modulator design using epsilon-near-zero material[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2022, 58(4): 7300108.
- [12] Xiao G H, Zhu Q Z, Shen Y, et al. A tunable submicro-optofluidic polymer filter based on guided-mode resonance[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(8): 3429-3434.
- [13] 包益宁, 刘秀红, 胡劲华, 等. 基于凹型谐振光栅的高性能光学折射率传感器[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0913001.
Bao Y N, Liu X H, Hu J H, et al. High-performance optical refractive index sensor based on concave resonant grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0913001.
- [14] 宋志, 路畅, 魏国军, 等. 反射型光变色超表面滤光结构[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2023001.
Song Z, Lu C, Wei G J, et al. Reflective metasurface filter with optical variable color[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2023001.
- [15] Magnusson R, Wang S S. New principle for optical filters[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 61(9): 1022-1024.
- [16] Graugnard E, Gaillot D P, Dunham S N, et al. Photonic band tuning in 2D photonic crystals by atomic layer deposition[C]// LEOS 2006-19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, October 29-November 2, 2006, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2006: 763-764.
- [17] Wang Y F, Huang Y, Sun J X, et al. Guided-mode-resonance-enhanced measurement of thin-film absorption[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 28567-28573.
- [18] 陶春先, 王琦, 李业, 等. 导模共振效应光子晶体滤波器光谱检测稳定性的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(5): 1173-1176.
Tao C X, Wang Q, Li Y, et al. Real-time stability monitoring of photonic crystal sensing system based on guided-mode resonance effect[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(5): 1173-1176.
- [19] 江孝伟, 关宝璐. 基于导模共振滤波器的波长可调谐垂直腔面发射激光器的研究[J]. *光子学报*, 2019, 48(1): 0114005.
Jiang X W, Guan B L. Wavelength tunable vertical cavity surface emitting laser based on guided mode resonance filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(1): 0114005.
- [20] 余九州, 刘秀红, 包益宁, 等. 基于级联复合光栅的窄带平顶型滤波器设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2005001.
Yu J Z, Liu X H, Bao Y N, et al. Design of narrow-band flat-top filter based on cascaded compound gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2005001.
- [21] 黑徐伟, 章玲璇, 刘继红, 等. 基于导模共振的窄带可调谐滤波器[J]. *光子学报*, 2017, 46(12): 1223001.
Hei X W, Zhang L X, Liu J H, et al. Tunable narrowband filter based on guided mode resonance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 1223001.

Preparation and Study of Titanium Dioxide Thin Films for Guided-Mode Resonance Filter

Zhang He, Ping Yichen, Qu Fei*

*Research Department of Micro-Nano Fabrication Technology and Intelligent Electronic Equipment Devices,
Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

Abstract

Objective Titanium dioxide (TiO_2) photonic crystals can be applied to prepare guided-mode resonance (GMR) filters that allow gratings to have high reflectance at resonance wavelengths. A GMR filter is a photonic crystal resonant reflector with a perfect resonant reflection of incident light with specific polarizations in arbitrarily narrow bands while allowing the light in other wavelengths to pass through. In China, few studies have been conducted on GMR filters prepared from TiO_2 films. The current research on GMR filters mainly focuses on the design of GMR filters, such as sub-wavelength grating GMR filters with tunable resonance wavelengths, but their structures are more complex, which makes device fabrication difficult to be realized. In this work, a GMR filter is prepared by depositing a thin film of TiO_2 on a two-dimensional patterned photonic crystal grating structure as an optical waveguide layer by atomic layer deposition (ALD). The device can produce high reflectance at the resonance wavelengths. The band of resonance wavelengths is sensitive to the refractive index of the filling material in the grating region. By controlling the refractive index of the TiO_2 film, the resonance wavelength of the device can be precisely controlled, and an efficient and controllable narrow linewidth filter can be prepared.

Methods In this present experiment, TiO_2 films are deposited on a two-dimensional patterned quartz glass by the ALD technique, and then the prepared TiO_2 films are annealed at different temperatures to have different refractive indices. Then we simulate the reflection spectrum of the filters by using the rigorous coupled wave algorithm (RCWA). In addition, we use a D8 X-ray diffractometer (XRD) from Bruker for the phase identification and structure analysis, a SIGMA 500 field emission scanning electron microscope (FESEM) from ZEISS for microstructure analysis, an ICON2-SYS atomic force microscope (AFM) from Bruker for surface roughness analysis, and a spectroscopic ellipsometer (SE 850 DUV) from Sentech for thickness and refractive index analysis of the thin film samples.

Results and Discussions The prepared TiO_2 thin film samples show tetragonal anatase structure at the anneal temperatures of 200 °C, 300 °C, and 400 °C, and no other characteristic peaks are found (Fig. 1). The grain sizes of the prepared TiO_2 thin film samples at the anneal temperatures of 200 °C, 300 °C, and 400 °C are calculated to be 380.2 Å, 390.3 Å, and 423.6 Å, respectively, by using Scherrer's formula (Table 1). The intensity of the characteristic peaks of the TiO_2 thin film samples gradually becomes higher with the increase in the annealing temperature, which indicates that the crystalline quality of the prepared samples becomes better. The FESEM and AFM photographs show that the surface of all the samples is flat and smooth, with a surface roughness of less than 0.4 nm, which indicates that the prepared thin film samples have positive denseness and flatness (Fig. 2 and Fig. 3). The thickness of the TiO_2 films is 80.5 nm, 80.7 nm, and 80.8 nm after annealed at 200 °C, 300 °C, and 400 °C, respectively, and the thickness of the films is independent of the annealing temperature. By changing the refractive index of the TiO_2 film, the resonance wavelength of the device can be precisely controlled, and a high reflectance close to 100% at the resonance wavelength can be achieved for the application in high-efficiency narrow linewidth filters (Fig. 4). As the refractive index becomes larger, the shape of the reflection spectrum does not change, and the resonance wavelength is gradually red-shifted with resonance peaks of 946.9 nm, 959.4 nm, and 967.9 nm, respectively, and the position of the resonance peak changes within 22 nm, with full widths at half maximum of 0.74 nm, 0.77 nm, and 0.79 nm, respectively, and there is almost no change in the sideband reflectivity (Fig. 6). Therefore, by changing the refractive index of the waveguide layer TiO_2 film, a narrow linewidth GMR filter can be designed for the required resonance wavelength.

Conclusions In this paper, high-quality TiO_2 films with different refractive indices are prepared on a two-dimensional patterned quartz glass by the ALD technique and annealed at different temperatures. The XRD and AFM test results show that the TiO_2 films have an anatase structure, and their surface roughness is less than 0.4 nm at an annealing temperature of greater than 200 °C. Different anneal temperatures change the refractive index of TiO_2 films. The effect of the refractive index on the resonance wavelength is analyzed by the RCWA. By changing the refractive index of the TiO_2 film of the optical waveguide layer, the position of the resonant peak can be effectively controlled. As a practical

application example, we design a GMR filter that can control resonance wavelength in the range of 946.9–967.9 nm, and a narrow linewidth (less than 0.8 nm) is always maintained within the scope of usage. By using this method, one can achieve precise control of the resonance wavelength peak, which is beneficial to the practical application of future devices.

Key words thin film; titanium dioxide; atomic layer deposition; guided mode resonance; rigorous coupled wave theory; resonance wavelength