

## 激光与光电子学进展

## 可见光谱区线性渐变滤光片的制备、表征及退火

倪康<sup>1</sup>, 胡二涛<sup>1\*</sup>, 王敏<sup>1</sup>, 王静<sup>2</sup>, 李安康<sup>1</sup>, 林一波<sup>1</sup>, 韦玮<sup>1</sup><sup>1</sup>南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023;<sup>2</sup>南京邮电大学通达学院基础教学部, 江苏 扬州 225127

**摘要** 结合多靶磁控溅射镀膜方法和自制的一维位移挡板样品台制备了基于 TiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 的可见光谱区线性渐变滤光片 (LVOF)。使用商用分光光度计和一维手动平移样品台对样品进行光谱表征。重点研究了退火温度和时间对 LVOF 透射光谱的影响。结果表明, LVOF 样品的可工作光谱范围为 510~700 nm, 且样品上不同位置的透射光谱峰值与样品位置呈现出良好的线性关系。在 300 °C 下进行 1 h 真空退火处理后, 样品的透射率得到了显著提升, 优于 60%。这表明退火处理可显著提升 LVOF 的性能。

**关键词** 光学器件; 线性渐变滤光片; 磁控溅射; 透射率; 退火

中图分类号 O433 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2323001

## Fabrication, Characterization and Annealing of Linear Variable Optical Filter in Visible Spectral Region

Ni Kang<sup>1</sup>, Hu Ertao<sup>1\*</sup>, Wang Min<sup>1</sup>, Wang Jing<sup>2</sup>, Li Ankang<sup>1</sup>, Lin Yibo<sup>1</sup>, Wei Wei<sup>1</sup><sup>1</sup>College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China;<sup>2</sup>Department of Basic Education, Tongda College of Nanjing University of Posts and Telecommunications, Yangzhou 225127, Jiangsu, China

**Abstract** In this paper, a linear variable optical filter (LVOF) in the visible spectral region based on TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> is prepared by combining a multi-target magnetron sputtering coating method with a self-made one-dimensional displacement baffle sample stage. The transmittance spectra are characterized by a spectrophotometer and a hand-operated one-dimensional translation stage. The effects of annealing temperature and time on the LVOF transmission spectrum are primarily evaluated in terms of functional dependency. The results show that the workable spectral range of the LVOF sample is 510–700 nm, and the transmission spectral peaks at different positions on the sample have a consistent linear relationship with the sample position. After vacuum-annealing at 300 °C for 1 h, the transmittance of the samples is significantly improved, better than 60%. This indicates that the annealing treatment can significantly improve the performance of the LVOF.

**Key words** optical devices; linear variable optical filter; magnetron sputtering; transmittance; annealing

## 1 引言

光谱仪在环境探测、生物医药科学、遥感及空间探索等研究领域具有重要应用价值<sup>[1-2]</sup>。分光元件在光谱仪中起着至关重要的作用。传统台式光谱仪中常用的分光元件有棱镜、衍射光栅及迈克耳孙干涉仪<sup>[1,3]</sup>。棱镜和衍射光栅需使用机械部件带动其转动,并结合

狭缝选取波长。基于迈克耳孙干涉仪的红外傅里叶光谱仪的光谱采集时间较短,但需要使用动镜,机械部件会因磨损、振动等因素造成错位,从而影响光谱仪的光谱精度<sup>[2]</sup>。传统光谱仪使用了大量块状光学色散元件和移动部件以及较长的光学传播路径,极大限制了光谱仪的小型化,为光谱仪的便携性带来困难,且制造成本高、电能消耗较大。

收稿日期: 2021-10-26; 修回日期: 2021-11-02; 录用日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(61605089)、江苏省高等学校自然科学研究面上项目(20KJB140006)

通信作者: iamethu@njupt.edu.cn

使用滤光片可以克服上述困难,相较于光栅型光谱仪,滤光片技术极大减少了光学系统数值孔径对器件光谱分辨率的限制,且能通过与集成电路兼容的技术直接在光电探测器上制备,从而实现单芯片微型光谱仪<sup>[4-7]</sup>。对于多通道光谱滤光片基光谱仪,单个滤光片的共振透射峰峰值较高,半峰全宽(FWHM)较窄,为了更细致地覆盖每个波长,需要增加滤光片的数量,这大大增加了制备过程的复杂度<sup>[2]</sup>。线性渐变滤光片(LVOF)近年来受到了人们的广泛关注,其制备过程相较于多通道带通滤光片更简单<sup>[8-10]</sup>。LVOF基于法布里-珀罗(F-P)共振原理,基本结构为布拉格反射镜/腔体/布拉格反射镜三明治结构,通过改变腔体的厚度改变F-P共振腔的透射波长,相当于将无限多个腔体厚度不同的F-P共振器件在一维(1D)方向进行排列,从而形成位置依赖的光谱透过特性<sup>[11-13]</sup>。LVOF具有小型化、质量轻、稳定性高等优点,在光谱分析中显示出极大的应用前景<sup>[14]</sup>。

为了提高LVOF的截止效果、降低共振透射峰的FWHM,往往需要增加腔体层上下反射镜的层数,但每层薄膜的结晶状态<sup>[15]</sup>、层与层之间的缺陷<sup>[16]</sup>、应力<sup>[17]</sup>等都会影响LVOF的光学特性。本文结合射频磁控溅射方法和自制的一维平移挡板样品台制备了基于TiO<sub>2</sub>和SiO<sub>2</sub>的可见光谱区LVOF,对样品进行了退火处理,重点研究了退火温度对样品透射光谱的影响。

## 2 线性渐变滤光片的设计与制备

### 2.1 线性渐变滤光片的设计

LVOF的透射率<sup>[18]</sup>可表示为

$$T = \frac{T_0}{1 + F \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

$$T_0 = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2}, \quad (2)$$

$$F = \frac{4\sqrt{R_1 R_2}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2}, \quad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2 - 2\delta), \quad (4)$$

式中: $R_1$ 和 $R_2$ 分别为腔体与上下布拉格反射镜界面的反射率; $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 分别为反射光在上下布拉格反射镜界面的相位变化量; $\delta$ 为由腔体层厚度引起的入射光相位变化量。当光垂直入射时,存在

$$2\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nd, \quad (5)$$

式中: $n$ 为腔体层的折射率; $d$ 为腔体层的厚度。

对于多层介质基布拉格反射镜,其反射率和相位变化量可表示为

$$R = \left( \frac{N_0 - Y}{N_0 + Y} \right) \left( \frac{N_0 - Y}{N_0 + Y} \right)^*, \quad (6)$$

$$\phi = \arctan \left[ \frac{iN_0(Y - Y^*)}{N_0^3 - YY^*} \right], \quad (7)$$

式中: $N_0$ 为入射层的折射率; $Y$ 为多层介质薄膜的光学阻抗,可由光学传输矩阵直接计算;上标\*表示复共轭。

根据式(1)可知,当 $\theta$ 为 $\pi$ 的整数倍时,LVOF的透射率最大,得到

$$\theta = \frac{1}{2}(\phi_1 + \phi_2 - 2\frac{2\pi}{\lambda} nd) = -k\pi, k = 0, 1, \dots, \quad (8)$$

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + \left( \frac{\phi_1 + \phi_2}{2\pi} \right)}. \quad (9)$$

从式(9)可以发现,通过改变腔体层厚度 $d$ 可以连续改变共振透射峰的中心波长 $\lambda_0$ 。线性滤光片的线性色散系数也是表征其性能的一个重要参数<sup>[19]</sup>,可表示为

$$X_{LD} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta d} = \frac{\lambda_{end} - \lambda_{start}}{d_{end} - d_{start}}, \quad (10)$$

式中: $d_{start}$ 和 $d_{end}$ 分别为LVOF的起始工作位置和终止工作位置; $\lambda_{start}$ 和 $\lambda_{end}$ 分别为LVOF工作起始端和终止端的波长。

LVOF是基于F-P的滤波器结构,整个滤光片分为底部反射镜、顶部反射镜和楔形谐振腔体层<sup>[20]</sup>三部分。膜系结构为(LH)<sup>*m*</sup>xL(HL)<sup>*m*</sup>或(HL)<sup>*m*</sup>xH(LH)<sup>*m*</sup><sup>[21]</sup>。其中:L和H分别为低折射率和高折射率材料; $m$ 为LH或HL堆叠的数量; $x$ 为LVOF中间楔形谐振腔的渐变厚度,可调节共振峰的中心波长<sup>[22]</sup>。L和H的厚度分别由 $\lambda_0/4n_L$ 和 $\lambda_0/4n_H$ 确定<sup>[2]</sup>。其中, $n_L$ 和 $n_H$ 分别为两种材料的折射率。实验中将中心波长 $\lambda_0$ 设定为580 nm。 $m$ 越大,共振透射峰的FWHM(对应于光谱分辨率)越小,反之,FWHM则越大。

滤波器的设计主要取决于低折射率和高折射率层材料的选择。高低折射率之间的比值应较大,消光系数应较小。实验中分别选择TiO<sub>2</sub>和SiO<sub>2</sub>作为高、低折射率材料<sup>[23]</sup>。用椭圆偏振光谱仪测量制备的TiO<sub>2</sub>和SiO<sub>2</sub>薄膜的光学常数,光谱测试范围为300~1100 nm,测量角度分别为65°、70°和75°。采用Film Wizard软件进行膜系设计,图1为设计的LVOF结构。

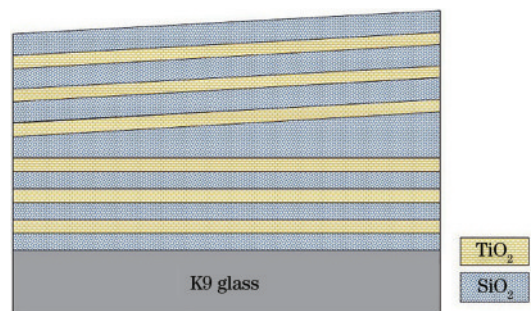


图1 LVOF薄膜的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of LVOF film

## 2.2 线性渐变滤光片的制备

实验采用韩国 INFOVION 公司的多靶磁控溅射系统制备  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$ ，靶材为高纯  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  靶（纯度不小于 99.99%，直径为 76.2 mm，中诺新材）。衬底为 K9 玻璃，尺寸为  $40\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 。将 K9 玻璃衬底放入溅射仪的真空腔体之前，先分别用丙酮、酒精、去离子水进行 10 min 的超声清洗，然后用氮气吹干衬底表面。当磁控溅射仪的真空度低于  $6.0 \times 10^{-4}\text{ Pa}$  时，通入流量为  $0.01\text{ L/min}$  的氩气，并用蝶阀将腔内压强稳定控制在  $0.133\text{ Pa}$ 。溅射模式为射频溅射模式，将  $\text{TiO}_2$

和  $\text{SiO}_2$  的溅射功率分别设置为  $100\text{ W}$  和  $120\text{ W}$ 。对于布拉格反射镜中  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的制备，衬底加热温度设置为  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 。 $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的生长速率通过椭圆偏振光谱仪进行标定并结合石英晶振进行监控。

对于 LVOF 中厚度连续变化的楔形薄膜，可通过光刻胶重流法<sup>[23]</sup>、离子束刻蚀法<sup>[2]</sup>、掩模版法<sup>[19]</sup>、拉伸法<sup>[24]</sup>等制备。实验中自制了一维滑动挡板平移台，如图 2 所示。薄膜沉积过程中，用真空马达拖动挡板连续均匀移动形成楔形薄膜，制备的 LVOF 楔形区域长度约为  $30\text{ mm}$ 。

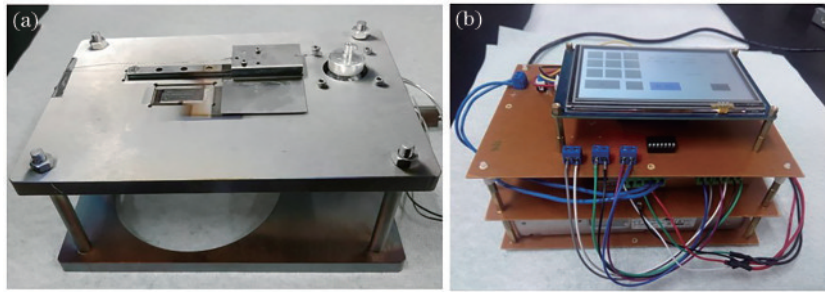


图 2 样品制备装置。(a)样品台的实物图；(b)控制单元的实物图

Fig. 2 Device for sample preparation. (a) Physical map of the sample stage; (b) physical map of the control unit

## 2.3 退火处理

将制备好的样品放入管式退火炉中进行退火处理。当真空度约为  $20.0\text{ Pa}$  时，以  $10\text{ }^\circ\text{C/min}$  的速率进行升温，待温度增加到设定温度时进行退火处理，之后仍以  $10\text{ }^\circ\text{C/min}$  的速率降至室温。退火温度分别设定为  $200$ 、 $300$ 、 $400\text{ }^\circ\text{C}$ ，退火时间分别为  $1$ 、 $2$ 、 $3\text{ h}$ 。

## 2.4 线性渐变滤光片的测试

用商用紫外/可见光/近红外分光光度计进行 LVOF 的透射光谱测试 ( $\text{Lambda } 950$ , PerkinElmer)<sup>[25-26]</sup>。为了连续测量样品上不同位置的透射光谱，设计了一个可在一维方向移动样品架，如图 3 所示。在测量过程中，沿 LVOF 的楔形渐变方向移动样品，每隔  $1\text{ mm}$  测量一次，从而得到测试样品上不同位置的透射光谱。实际测量得到样品仓出光孔处的光斑尺寸约为  $13\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ，样品上的光斑尺寸约为  $8\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。出光孔与样品表面的距离约为  $86\text{ mm}$ ，计算得到出射、入射光线与法线的最大夹角约为  $1.33^\circ$ ，可近似认为是

垂直入射。在测试过程中，光斑的宽度对应于样品上楔形腔厚度变化方向。样品的楔形腔体厚度随测量距离的变化量约为  $8.6\text{ nm/mm}$ ，即在  $2\text{ mm}$  宽度的光斑范围内腔体的厚度变化约为  $17.2\text{ nm}$ 。腔体厚度变化会导致共振透射峰的透射强度降低、FWHM 增大<sup>[25]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 仿真设计结果

对椭圆偏振光谱仪测量的  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  椭圆偏参数进行拟合。使用 Cauchy 指数模型表征  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的光学色散，光学模型为空气/ $\text{TiO}_2$ /Si 衬底和空气/ $\text{SiO}_2$ /Si 衬底。图 4 为拟合得到的  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  光学常数。可以发现： $\text{TiO}_2$  的折射率  $n$  随波长的增加逐渐从  $3.4$  降为  $2.4$ ，并趋于不变，而  $\text{SiO}_2$  的折射率  $n$  几乎不随波长的变化而变化，约为  $1.5$ ；在波长大于  $400\text{ nm}$  的光谱范围， $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的消光系数  $k$  都近似为  $0$ ；在中心波长  $580\text{ nm}$  处， $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的折射率  $n$  分别为  $2.40$  和  $1.48$ ，计算得到布拉格反射镜中  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的薄膜厚度分别为  $60.4\text{ nm}$  和  $98.0\text{ nm}$ 。设计的 LVOF 中间楔形谐振腔厚度范围为  $120.0 \sim 300.0\text{ nm}$ ，反射镜中  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的堆叠周期为  $3$ 。

仿真设计中认为 LVOF 由多个分离的固定腔体厚度 F-P 共振腔组成。图 5(a) 为  $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)^3$  布拉格反射镜的反射光谱。可以发现，该反射镜在  $500 \sim 700\text{ nm}$  光谱范围内具有较高的反射率以及较低的截止透射率。图 5(b) 为 LVOF 在不同腔体层厚度下的仿真透射光谱。可以发现，设计的 LVOF 可使用的光谱范围约为  $500 \sim 700\text{ nm}$ 。

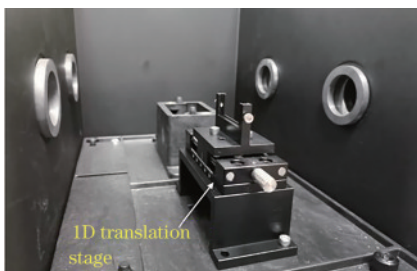


图 3 样品架在样品仓中的实物图

Fig. 3 Physical picture of the sample holder in the sample compartment

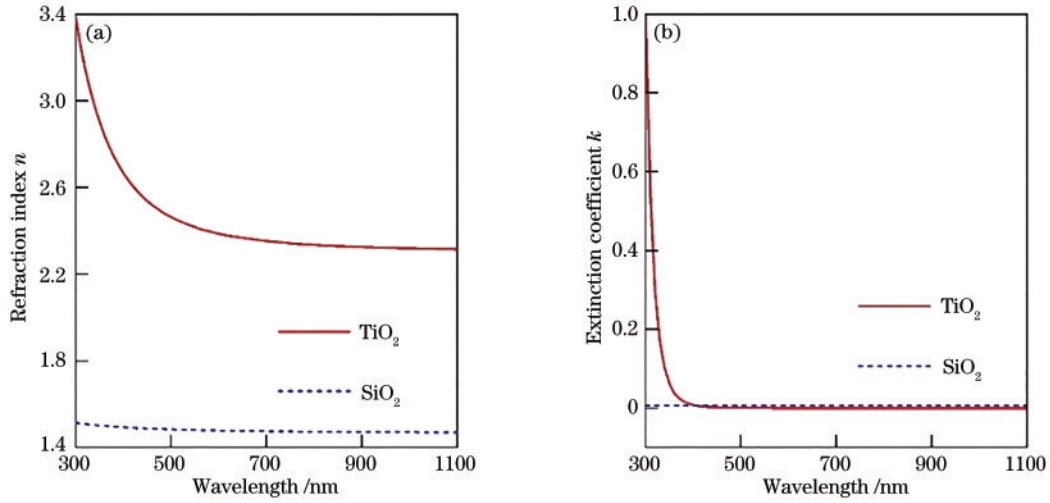


图 4  $\text{TiO}_2$ 和 $\text{SiO}_2$ 的光学常数。(a)折射率;(b)消光系数

Fig. 4 Optical constants of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{SiO}_2$ . (a) Refractive index; (b) extinction coefficient

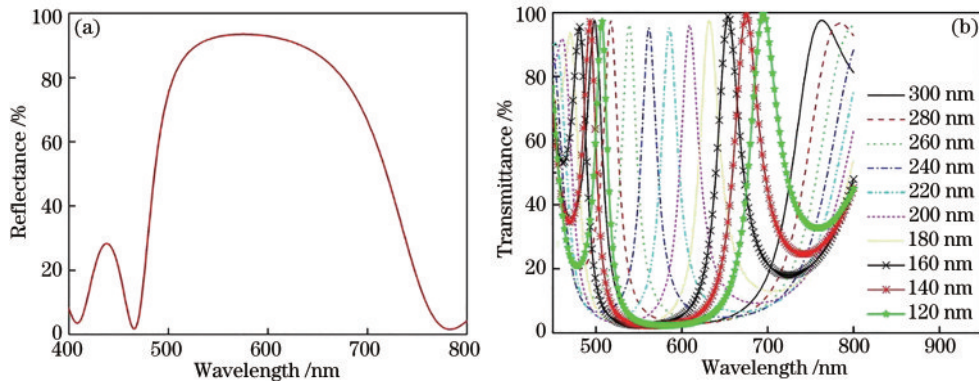


图 5 仿真光谱。(a)  $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)^3$ 介质布拉格反射镜的反射光谱;(b) LVOF 的仿真透射光谱

Fig. 5 Simulated spectra. (a) Simulated reflectance spectra of  $(\text{SiO}_2/\text{TiO}_2)^3$ ; (b) simulated transmittance spectra of the LVOF

### 3.2 测试结果分析

图 6(a)为固定腔体层厚度为 200 nm 时,理论仿真的透射光谱与制备态和 300 °C 退火处理样品的透射光谱。可以发现,除了共振透射峰值的差别较大外,其他波形的吻合度较好。相比理论仿真结果,实验制备

的样品共振透射峰峰值下降,FWHM 变大。这一方面与使用的入射光斑尺寸有关<sup>[25]</sup>,另一方面也受到制备样品膜层中缺陷、应力的影响。

相对于腔体层厚度固定的 F-P 共振腔结构, LVOF 的腔体层厚度连续变化。在同一个入射光斑

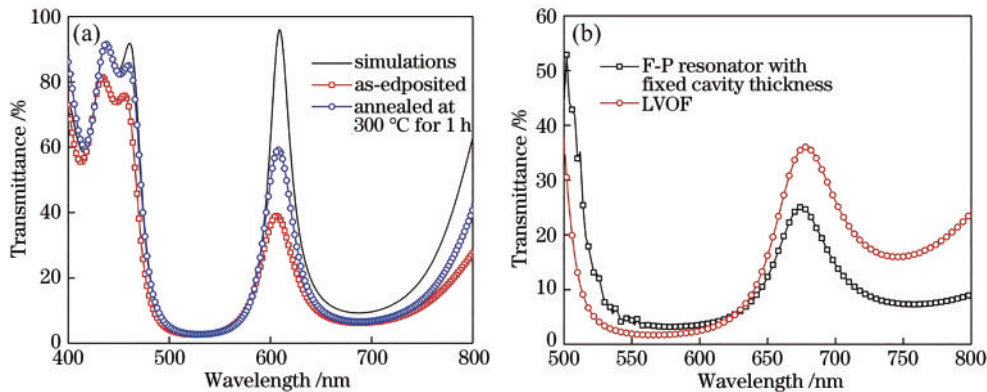


图 6 测量的透射光谱。(a)腔体层厚度为 200 nm 时的理论模拟光谱与制备态及退火样品的测量透射光谱;(b)腔体厚度为 290 nm 时 F-P 共振腔器件和 LVOF 的透射光谱

Fig. 6 Measured transmittance spectra. (a) Theoretical simulated spectra and the measured transmission spectra of the as-prepared and annealed samples when the cavity layer thickness is 200 nm; (b) transmission spectra of the F-P resonant cavity device and LVOF with a cavity thickness of 290 nm

下, LVOF 相当于将多个腔体层厚度不同的 F-P 共振腔叠加, 而中心波长的移动会引起共振透射峰 FWHM 的增加。此外, 光斑尺寸也会影响共振透射峰的透射率<sup>[23]</sup>。为了对比固定腔体厚度 F-P 共振腔与 LVOF 的不同, 用与 LVOF 相同的制备参数制备了固定腔体厚度约为 290 nm 的 F-P 共振腔器件, 并在相同条件进行了测试, 结果如图 6(b) 所示。可以发现: 固定厚度的 F-P 共振腔样品的共振透射峰值约为 25.1%, FWHM 为 55 nm; LVOF 的共振峰透射率为 36%, FWHM 为 71 nm。由于共振透射峰 FWHM 增加, LVOF 将在一定程度上造成光谱分辨率的减弱。

制备态样品上不同位置的测量透射光谱如

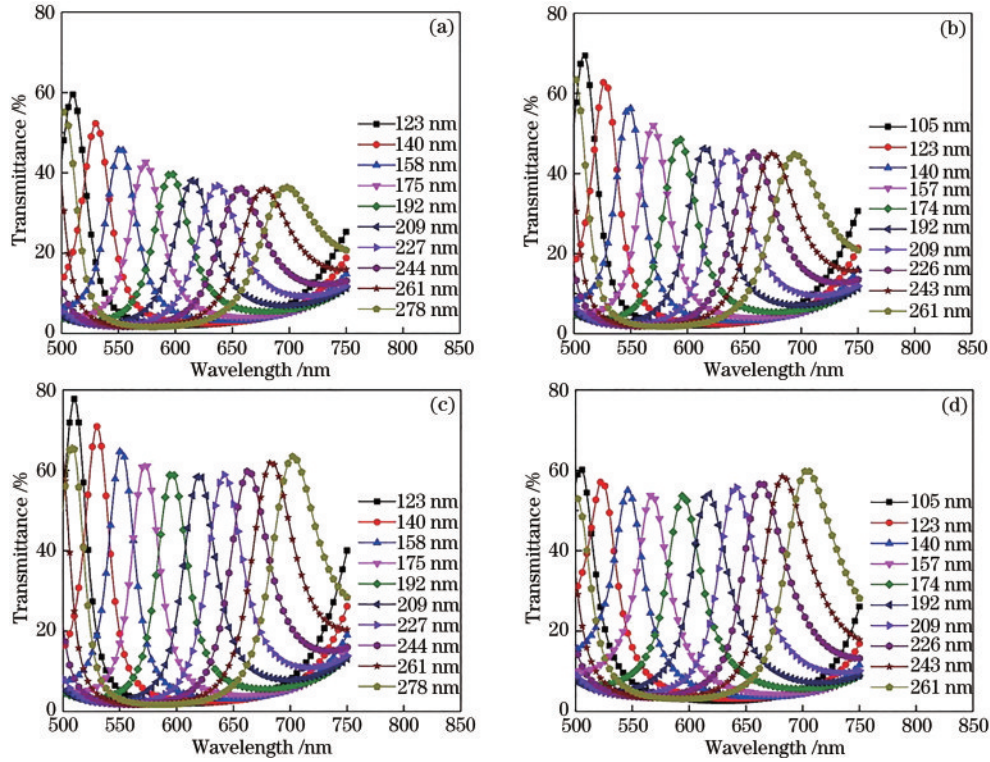


图 7 样品的透射光谱。(a)制备态;(b)退火温度为 200 °C;(c)退火温度为 300 °C;(d)退火温度为 400 °C

Fig. 7 Transmission spectra of the sample. (a) As-prepared; (b) annealed at 200 °C; (c) annealed at 300 °C; (d) annealed at 400 °C

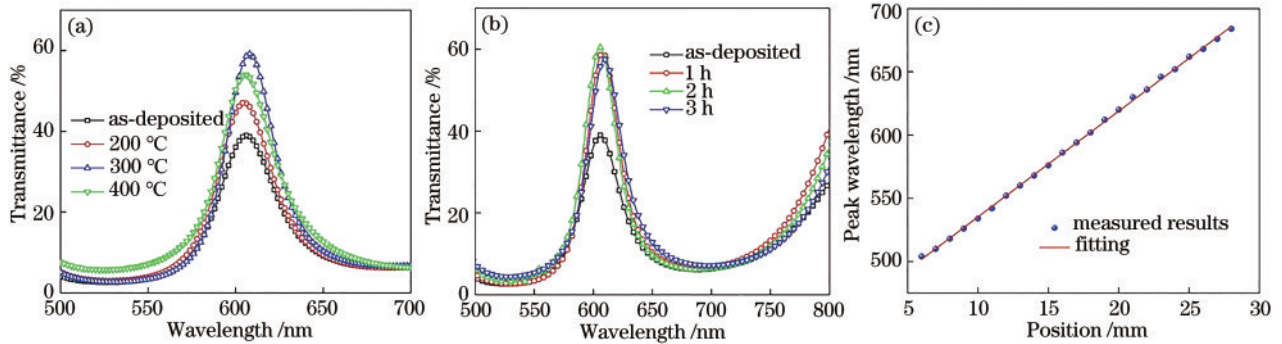


图 8 共振峰中心波长与样品位置的关系。(a)不同退火温度样品的透射光谱;(b)不同退火时间样品的透射光谱;(c)退火样品共振峰值波长与样品位置的关系

Fig. 8 Resonance peak center wavelength versus sample position. (a) Transmission spectra of samples with different annealing temperatures; (b) transmission spectra of samples with different annealing times; (c) relationship between the resonance peak wavelength of the annealed samples and the position of the samples

图 7(a) 所示。可以发现, 随着测量位置的连续改变, 共振峰透射峰值波长的位置也不断移动, 可工作波长范围与理论设计范围基本一致, 但相比理论设计光谱, 样品的共振峰透射率平均约为 35%。图 7(b)~图 7(d) 分别为对制备态样品在低真空条件和 200、300、400 °C 下退火处理 1 h 后测量的透射光谱。可以发现, 经退火处理后, 样品的透射率有显著提高, 在 300 °C 退火处理条件下, 样品的共振峰透射率最大, 且优于 60%。原因可能是退火改善了各个膜层的结晶情况, 减小了层与层之间的缺陷<sup>[15]</sup>。

图 8(a) 为制备态及 200、300、400 °C 下退火样品在共振峰为 606 nm 处的透射光谱。可以发现, 300 °C

退火处理的样品具有最大的透射峰值。这表明退火处理可以改善膜层的结晶、减少缺陷,但温度过高会增大层与层之间的应力差别,且层与层之间的扩散增强,边界变得模糊,这也是 400 °C 退火样品没有 300 °C 退火样品性能好的原因。图 8(b)为制备态及在 300 °C 分别退火处理 1、2、3 h 的样品在共振峰 606 nm 处的透射光谱。可以发现,经过 1 h 的退火处理后,样品的透射光谱基本趋于不变。对 300 °C 退火处理 1 h 样品的共振透射峰值与测量位置的关系进行了线性拟合,结果如图 8(c)所示<sup>[27]</sup>。可以发现,制备的 LVOF 具有很好的分光效果,在 510~700 nm 光谱范围样品的线性色散系数约为 8.35 nm/mm。

## 4 结 论

结合多靶磁控溅射镀膜系统和自制的一维高精度平移台制备了基于 TiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 的可见光谱区 LVOF。重点研究了退火温度对样品透射率的影响。结果表明,在低真空条件下,经过 300 °C 和 1 h 退火处理后,退火样品的共振峰透射率优于 60%,且不同位置的透射峰值波长与样品位置呈现出良好的线性关系。这表明退火处理可显著提高样品的光学性能。

## 参 考 文 献

- [1] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cai W W, et al. Miniaturization of optical spectrometers[J]. *Science*, 2021, 371(6528): eabe0722.
- [2] Xuan Z Y, Zhi Y, Wang S W, et al. Rapid and precise wavelength determination approach based on visually patterned integrated narrow bandpass filters[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 4900307.
- [3] Zang K Y, Yao Y, Hu E T, et al. A high-performance spectrometer with two spectral channels sharing the same BSI-CMOS detector[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 12660.
- [4] Serruys P, Sima A, Livens S, et al. Linear variable filters-A camera system requirement analysis for hyperspectral imaging sensors onboard small remotely piloted aircraft systems[C]//2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), June 24-27, 2014, Lausanne, Switzerland. New York: IEEE Press, 2014.
- [5] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1020.
- [6] 王绪泉, 王丽丽, 方家熊. 近红外光谱传感物联网研究与应用进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1210001.  
Wang X Q, Wang L L, Fang J X. Research and application progresses of near-infrared spectral sensing internet of things[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1210001.
- [7] 于志强, 费书国, 赵帅锋, 等. 面向多光谱掌纹图像采集系统的光学薄膜滤光片设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 2331001.  
Yu Z Q, Fei S G, Zhao S F, et al. Design of optical thin-film filters for multispectral palmprint image acquisition systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 2331001.
- [8] Ayerden N P, de Graaf G, Wolffenbuttel R F. Compact gas cell integrated with a linear variable optical filter[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2981-3002.
- [9] Wan Y H, Carlson J A, Kesler B A, et al. Compact characterization of liquid absorption and emission spectra using linear variable filters integrated with a CMOS imaging camera[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 29117.
- [10] 朱瑞, 陶春先, 余振, 等. 248 nm 透过率线性渐变光学薄膜的设计与制备[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0603001.  
Zhu R, Tao C X, Yu Z, et al. Design and fabrication of a 248-nm near-linearly graded transmittance optical film[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0603001.
- [11] Ghaderi M, Ayerden N P, Emadi A, et al. Design, fabrication and characterization of infrared LVOFs for measuring gas composition[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(8): 084001.
- [12] 柳青, 周锦松, 聂云峰, 等. 线性渐变滤光片光谱分光特性及检测方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(4): 1142-1145.  
Liu Q, Zhou J S, Nie Y F, et al. Study of spectral property and measurement of linear variable filters[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(4): 1142-1145.
- [13] Piegari A, Bulir J. Variable narrowband transmission filters with a wide rejection band for spectrometry[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16): 3768-3773.
- [14] 李文杰, 王成良, 郑新波, 等. 基于线性渐变滤光片的成像光谱仪综述[J]. *红外*, 2015, 36(3): 1-7.  
Li W J, Wang C L, Zheng X B, et al. Review of imaging spectrometer based on linear variable filter[J]. *Infrared*, 2015, 36(3): 1-7.
- [15] 庞天奇, 邓金祥, 王吉有, 等. 退火温度对 ZnO 薄膜结晶和折射率的影响[J]. *微纳电子技术*, 2015, 52(2): 93-97.  
Pang T Q, Deng J X, Wang J Y, et al. Effects of the annealing temperature on the crystallization and refraction index of the ZnO thin film[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2015, 52(2): 93-97.
- [16] 张昭琳, 苏俊宏. 光学薄膜损伤表面三维微观形貌的仿真与重构[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0212002.  
Zhang Z L, Su J H. Simulation and reconstruction of 3D microscopic morphology of damaged optical film surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0212002.
- [17] 罗庆洪, 娄艳芝, 赵振业, 等. 退火对 AlTiN 多层薄膜结构及力学性能影响[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 066201.  
Luo Q H, Lou Y Z, Zhao Z Y, et al. Effect of annealing on microstructure and mechanical properties of AlTiN multilayer coatings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 066201.
- [18] Zhang S D, Bin W, Xu B B, et al. Mixed-gas CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/CO detection based on linear variable optical filter and thermopile detector array[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2019, 14(1): 348.

- [19] 范滨, 李刚正, 程鑫彬, 等. 线性渐变滤光片的制备与测试[J]. 光学仪器, 2006, 28(4): 95-103.  
Fan B, Li G Z, Cheng X B, et al. Production and measurement of linear variable filter[J]. Optical Instruments, 2006, 28(4): 95-103.
- [20] Kiesel P, Schmidt O, Mohta S, et al. Compact, low-cost, and high-resolution interrogation unit for optical sensors[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(20): 201113.
- [21] Wang X Z, Wang Z F, Bu Y K, et al. Power-ratio tunable dual-wavelength laser using linearly variable Fabry-Perot filter as output coupler[J]. Applied Optics, 2016, 55(4): 879-883.
- [22] Yu X Y, Lu Q P, Gao H Z, et al. Development of a handheld spectrometer based on a linear variable filter and a complementary metal-oxide-semiconductor detector for measuring the internal quality of fruit[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2016, 24(1): 69-76.
- [23] Emadi A, Wu H, Grabarnik S, et al. Fabrication and characterization of IC-compatible linear variable optical filters with application in a micro-spectrometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 162(2): 400-405.
- [24] Liu L J, Khan H A, Li J J, et al. A strain-tunable nanoimprint lithography for linear variable photonic crystal filters[J]. Nanotechnology, 2016, 27(29): 295301.
- [25] Tang H L, Gao J S, Zhang J, et al. Preparation and spectrum characterization of a high quality linear variable filter[J]. Coatings, 2018, 8(9): 308.
- [26] 王世丰, 袁艳, 苏丽娟, 等. 线性渐变滤光片光谱特征参数测试方法[J]. 光子学报, 2017, 46(11): 1112002.  
Wang S F, Yuan Y, Su L J, et al. Measurement of the spectral characteristic parameters of linear variable filters [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(11): 1112002.
- [27] Ji P, Gao S, Park C S, et al. Linear variable filter enabling an enhanced wavelength gradient based on shadow-mask sputtering[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2017, 59(12): 3142-3146.