

# 光谱法确定离子束溅射 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜的光学常数及其性能

尚 鹏<sup>1,2</sup> 熊胜明<sup>1</sup> 李凌辉<sup>1</sup> 田 东<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 采用双离子溅射的方法,在硅、石英基底上制备了单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 及双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 光学薄膜。结合 Cauchy 色散模型,利用石英基底上单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 及双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜透射光谱曲线,采用改进的遗传单纯形混合算法,获得了 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 薄膜材料在 400~700 nm 波段的光学常数。结果表明,理论分析值与实验测量值取得了很好的一致性,拟合出的单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜折射率误差小于 0.001,膜层厚度误差不超过 1 nm;双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜最大折射率误差小于 0.004,最大厚度误差小于 2.5 nm。此外,还对 400 °C 高温环境下双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜的微观结构、应力、表面形貌及光学性能变化进行了研究。

**关键词** 薄膜; 光学常数; 透射光谱; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>

中图分类号 O484.41

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201434.0531002

## Optical Constants and Properties of Dual-Ion-Beam Sputtering Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> Thin Film by Spectroscopy

Shang Peng<sup>1,2</sup> Xiong Shengming<sup>1</sup> Li Linghui<sup>1</sup> Tian Dong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Single Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and double layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> films are deposited on Si and fused silica substrates by dual-ion-beam sputtering. With the Cauchy dispersion model, the optical constants of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and SiO<sub>2</sub> thin films are obtained by fitting the transmission spectra of single Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and double layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> films using the combination of simplex and genetic algorithm (GA) optimization method. It shows that the results calculated by fitting the whole optical spectra are well consistent with the measuring values. The refractive index error and thickness error of single layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> film are less than 0.001 nm and 1 nm, respectively. In the case of double layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> films, the maximum refractive index error and thickness error are in the range of 0.004 nm and 2.5 nm, respectively. In addition, the deposited double layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> thin films are treated at 400 °C in air. The changes of microstructure, surface morphology and optical properties of the Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> films are investigated.

**Key words** thin films; optical constant; transmission spectrum; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub>

**OCIS codes** 310.1620; 310.1860; 310.6860

## 1 引 言

五氧化二钽(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)是可见及近红外领域常用的高、低折射率光学薄膜材料,它们具有较好的化学稳定性、热稳定性、较低的光学损

耗、较宽的光谱透过范围(300 nm~10 μm)以及优良的抗激光损伤等性能<sup>[1-4]</sup>,近年来被广泛地应用于光学薄膜、液晶显示、激光器、光纤通讯和微电子等领域。目前, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub> 薄膜的工艺制备方法

收稿日期: 2013-12-09; 收到修改稿日期: 2014-01-12

作者简介: 尚 鹏(1986—),男,博士研究生,主要从事光学薄膜制备及性能等方面的研究。E-mail: shangpeng@163.com

导师简介: 熊胜明(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事薄膜技术、激光薄膜的性质及损伤等方面的研究。

E-mail: xsm@ioe.ac.cn

有很多种<sup>[1-6]</sup>,如真空蒸发法、离子束溅射法、化学气相沉积法和溶胶-凝胶法等。其中,离子溅射法制备出的光学薄膜,由于制备过程中沉积粒子能量较高,而且具有较好的光学稳定性,较小的吸收和散射等特点,是目前制备高精度光学介质薄膜的重要方法之一。

在光学薄膜领域,薄膜的光学常数是最基本的参量,其受到诸多因素的影响,如制备方法、工艺参数和材料特性等。目前,可用于计算薄膜光学常数的方法主要有光谱法<sup>[7-10]</sup>(极值法、包络线法和全光谱拟合法等)、椭圆偏振法<sup>[11-12]</sup>、偏振态转换法<sup>[13]</sup>和表面等离子激元法<sup>[14]</sup>等。其中,全光谱拟合法由于只需提供薄膜的透过率,不需要相关极值点,且获得的最终结果有相对较高的精度而被广泛应用。在全光谱拟合过程中,可使用的算法也有多种,它们都具有各自的优点,但也存在着一定的不足。例如遗传算法,它是一种应用范围较为广泛的优化算法<sup>[15-17]</sup>,具有收敛速度快,全局搜索能力强等优点,但该算法也存在着过早收敛和局部收敛的问题,在一定程度上影响了最终结果的精度;单纯形搜索算法作为一种多维直接搜索方法,具有操作简单、计算量小等优点,对于拟合未知量个数较多且参量取值范围变化大的曲线具有很好的适应性,且该优化方法易与其他算法结合。但该方法优化的结果对给定初始值存在一定的依赖性<sup>[18-19]</sup>。

因此,为了能够准确、快速拟合双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜透射光谱,进而获得较高精度的 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 薄膜光学常数,本文采用标准遗传算法与改进后的单纯形算法相互交替迭代进行的方法,编写了遗传单纯形混合算法程序,并用于单层及双层薄膜光学常数的拟合分析中,取得了初步的理论与实验测试结果。

## 2 理论与实验

### 2.1 相关数学模型及拟合理论

如图 1 所示的弱吸收均匀多层光学薄膜系统,在忽略基底吸收和散射的情况下,当测量光束垂直入射到基底上时,其透过率为  $T'_s$ ,假定基底上下表面的透过率相同,都为  $T_s$ ,可得

$$T_s = \frac{2T'_s}{1 + T'_s}, \quad (1)$$

基底折射率  $n_s$  为

$$n_s = \frac{1}{T_s} + \sqrt{\frac{1}{T_s^2} - 1}, \quad (2)$$

多层薄膜系统的特征矩阵可表示为<sup>[20]</sup>

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{i=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_i & i \sin \delta_i / \eta_i \\ i \eta_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}, \quad (3)$$

进而可求得

$$R = \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*, \quad (4)$$

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_s}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (5)$$

式中  $\delta_i$  为第  $i$  层薄膜的相位厚度; $\eta_0$ 、 $\eta_i$ 、 $\eta_s$  分别为入射介质,第  $i$  层薄膜及基底的光学导纳。

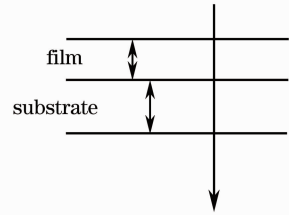


图 1 弱吸收多层薄膜系统的示意图

Fig. 1 System of a weakly absorbing multilayer film

对于  $s$  分量

$$\eta_j = N_j \cos \theta_j, \quad j = 0, i, s, \quad (6)$$

对于  $p$  分量

$$\eta_j = N_j / \cos \theta_j, \quad j = 0, i, s, \quad (7)$$

由于薄膜折射率  $n$  和消光系数  $k$  是随波长变化的,根据 Cauchy 色散公式:

$$n = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4}, \quad (8)$$

$$k = A_k + \frac{B_k}{\lambda^2} + \frac{C_k}{\lambda^4}, \quad (9)$$

式中  $A_n$ 、 $B_n$ 、 $C_n$ 、 $A_k$ 、 $B_k$ 、 $C_k$  为待定系数,从而将整个波段内的薄膜光学常数和厚度的拟合问题转化为了待定系数和薄膜厚度的求解问题。

而利用透射光谱拟合分析薄膜的光学常数也就转化为在已知基底及薄膜系统透射光谱的前提下,利用相关算法拟合分析 Cauchy 色散公式中的待定系数及厚度  $d$ 。具体而言,当计算值  $T(\lambda, A_n, B_n, C_n, A_k, B_k, C_k, d)$  与实际测量值  $T_0$  的偏差取到最小值时,就可认为此时的预设值即为待求得未知参量值。这里,利用最小二乘法定义评价函数  $\Delta$  为

$$\Delta = \frac{1}{m} \left\{ \sum_{i=1}^m [T(\lambda_i, A_n, B_n, C_n, A_k, B_k, C_k, d) - T_0]^2 \right\}^{1/2} + \varphi, \quad \varphi = \begin{cases} 0 \\ M \end{cases} \quad (10)$$

式中  $m$  表示光谱范围内取样的点数,  $T(\lambda_i, A_n, B_n, C_n, A_k, B_k, C_k, d), T_0$  分别为计算透射率值和实际测量透射率值。 $M$  是一个很大的定值, 当优化变量超过拟合变量的约束区间时,  $\varphi$  取该值, 其相当于一个惩罚性函数, 从而通过这样的方式使优化过程逐步趋近最优解<sup>[21]</sup>。而评价函数  $\Delta$  值的大小反映了理论计算值和实际测量值之间的接近程度, 也间接反映了理论估算值的精度。

为了能够较好地拟合双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜在 400~800 nm 波段范围的透射光谱曲线, 将改进后的单纯形算法融合到标准遗传算法(GA)中, 建立了遗传单纯形混合算法。具体而言, 在参数拟合前期采用遗传算法在全局范围内进行分析, 以防止其陷入局部极值; 在后期采用改进后的单纯形算法以前期遗传算法反演结果为基础, 进一步进行局部精细化优化, 从而保证程序能以较大的概率、较高的精度找到在实际约束条件下的最佳结果。选取最大遗传代数作为终止条件, 其程序运行流程如图 2 所示。

### 2.2 薄膜的制备及相关测试

通过双离子溅射的方法在硅、石英衬底上分别制备了单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜及双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 光学薄膜。所使用的制备工艺条件为溅射前溅射室的真空度为  $3.0 \times 10^{-5}$  Pa, 工作气压  $4.0 \times 10^{-2}$  Pa, 射束电压 1200 V, 射束电流 600 mA, 制备室温度 40 ℃, 工作气体为 99.999% 的 Ar, 反应气体为 99.999% 的 O<sub>2</sub>, 两种气体的流量比为 2:1。用可见红外双光束分光光度计(Lambda900)测量石英衬底上单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 光学薄膜在可见光波段的透射率, 测量的波长范围为 400~800 nm。利用椭圆偏振仪对硅基底上的单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub>

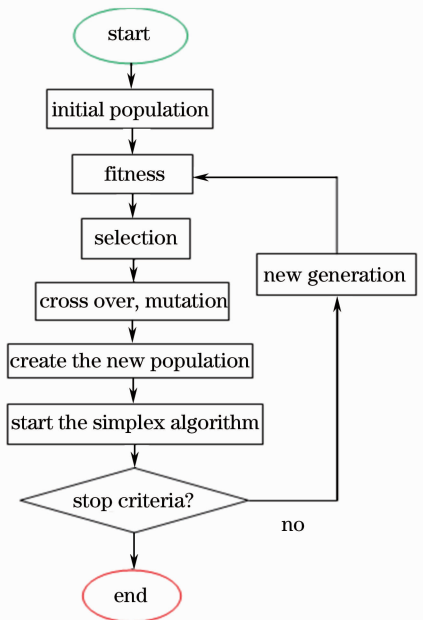


图 2 遗传单纯形混合算法确定薄膜光学常数流程图  
Fig. 2 Flow chart of optical constant determination of thin film using the combination of GA and simplex optimization method

薄膜样品进行测试分析, 将获得的光学常数与拟合测试透射光谱所得结果进行比较分析。同时, 考虑到考察波段范围很宽, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜在可见光波段的吸收相对较小(约 10<sup>-3</sup> 量级以下), 且透射光谱测量本身存在一定的系统误差与随机误差, 在初始薄膜光学常数反演可靠性的验证中, 忽略了 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜消光系数的比较。此外, 还利用干涉仪测试了硅衬底上双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 光学薄膜的表面三维轮廓图, 通过 Stony 公式求得了薄膜中的残余应力  $\sigma_f$ <sup>[22]</sup>。

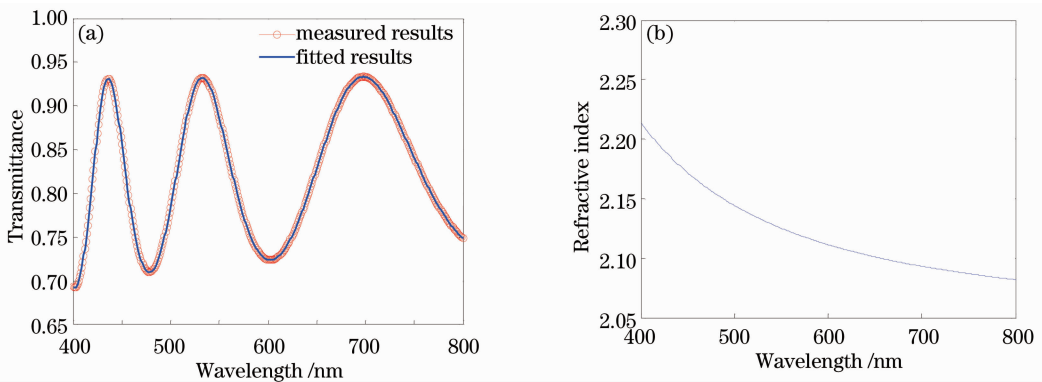


图 3 石英衬底上单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜。(a)透射光谱; (b)拟合折射率

Fig. 3 Single layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film on silica substrate. (a) Transmittance spectrum; (b) fitted refractive index

### 3 相关结果与分析

#### 3.1 单层膜的测量和计算

首先通过椭圆偏振仪器获得了硅衬底上单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的光学常数,同时利用上面的方法对石英基底上的单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜透射光谱进行拟合分析。相应的测量与拟合曲线如图 3 所示,测量结果和拟合结果如表 1 所示。

表 1 单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜折射率拟合结果与测试结果的比较

Table 1 Comparison of fitted results with the experimental data of refractive index of single layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film

Wavelength /nm	450	550	650	750
Measured value	2.171	2.125	2.101	2.086
Fitted value	2.172	2.125	2.101	2.087

从拟合曲线和拟合结果可以看出改进后的遗传单纯形混合算法可以高精度的反演出单层薄膜的光学参数,拟合厚度值(499.96 nm)与椭圆偏振法测量值(500.50 nm)偏差小于 1 nm,最大折射率误差小于 0.001。下面将通过双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜来进一步验证该混合算法的可行性。

#### 3.2 双层膜的测量和计算

从以上拟合曲线和测试结果可以看出,采用改进

后的混合算法拟合分析双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 光学薄膜也能够获得具有较高精度的结果,如图 4 所示。在 400~700 nm 波段范围,薄膜透射光谱拟合精度  $\Delta$  在 10<sup>-8</sup> 量级,利用改进后的遗传单纯形混合算法确定的 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜最大折射率偏差在 0.004 以内,拟合厚度分别为 118.4 nm 和 84.1 nm,与实际厚度最大偏差在 2.5 nm 以内,由此验证了采用改进后的遗传单纯形混合算法确定双层薄膜光学常数的可靠性,如图 5 和表 2、3 所示。

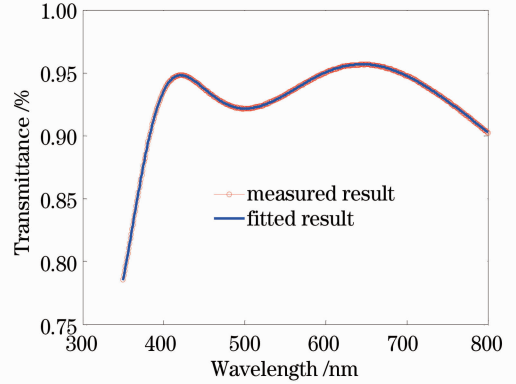


图 4 双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 光学薄膜测试及拟合光谱曲线图  
Fig. 4 Measured and fitted spectrum curves of double layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> thin film

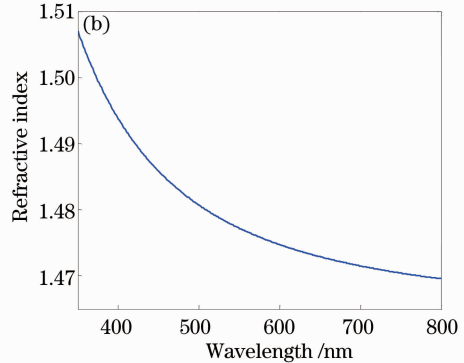
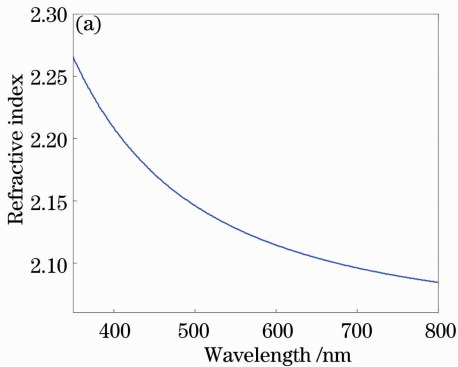


图 5 拟合出的折射率与波长的关系。(a) Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜;(b) SiO<sub>2</sub> 薄膜

Fig. 5 Refractive index versus wavelength using fitted method. (a) Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film; (b) SiO<sub>2</sub> thin film

表 2 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜折射率拟合结果与实验结果的比较

Table 2 Comparison of fitted results with the experimental data of refractive index Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film

Wavelength /nm	450	550	650	750
Measured value	2.171	2.125	2.101	2.086
Fitted value	2.172	2.128	2.104	2.090

#### 3.3 400 °C 高温加热对 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜的影响分析

由图 6 可知,离子溅射制备的 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜为非晶结构,经 400 °C 高温加热后,特定晶向的衍

射峰并没有出现,这说明 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜材料的微观结构仍处于非晶状态,这与其晶体转变温度高于 400 °C 有关。

表 3 SiO<sub>2</sub> 薄膜折射率拟合结果与实验结果的比较分析

Table 3 Comparison of fitted results with the experimental data of refractive index of SiO<sub>2</sub> thin film

Wavelength /nm	450	550	650	750
Measured value	1.487	1.480	1.476	1.474
Fitted value	1.486	1.477	1.473	1.470

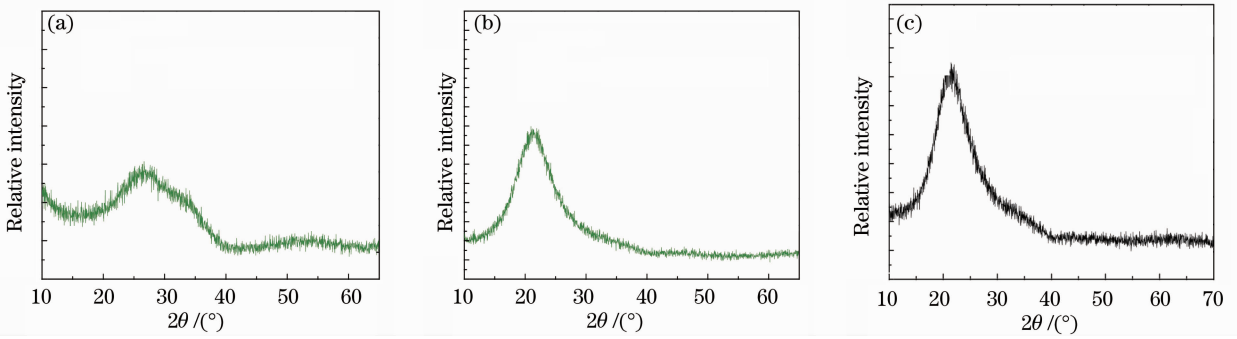


图 6 400 °C 高温处理 1 h 前后的 X 射线衍射图谱。(a)单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜；(b) SiO<sub>2</sub> 薄膜；(c) 双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜  
Fig. 6 X-ray diffraction patterns annealed at 400 °C for 1 h. (a) As-deposited single layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film; (b) SiO<sub>2</sub> thin film; (c) double layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> thin film

图 7 为双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜加热前后表面形貌的变化图。由两图可知，高温热处理前，双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜的表面粗糙度为 0.8 nm，但经过 400 °C 高温热处理后，其表面的粗糙度降为 0.5 nm。双层

Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜表面粗糙度的降低与 400 °C 高温环境下膜层表面粒子的移动有关，这对于降低表面散射损失有很好的帮助，有利于提高薄膜系统的光学性能。

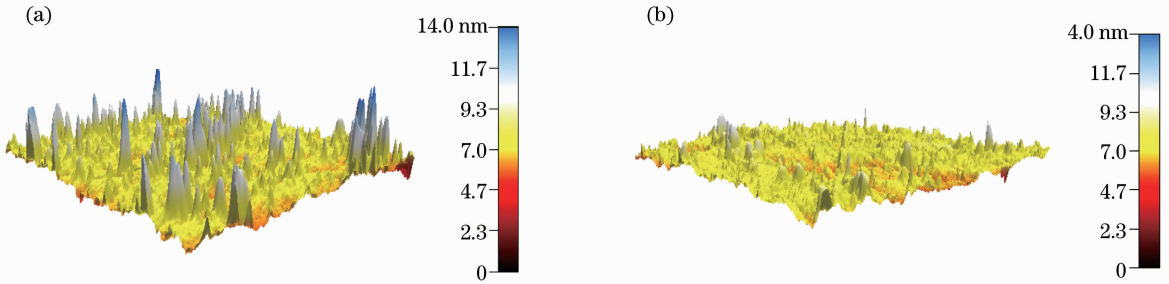


图 7 双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜表面形貌的变化。(a)加热前；(b)加热后

Fig. 7 Morphology pictures of double layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> thin film. (a) Before heated; (b) after heated

如图 8 所示，经 400 °C 高温热处理，双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜中的平均应力状态发生了变化，由高温加热前的 394 Mpa 压应力状态转化为加热后的 646 Mpa 张应力状态，应力状态及应力大小的改

变会对薄膜微观结构致密性产生较为明显的变化。一般而言，薄膜系统处于压应力状态具有向内方向的力作用，薄膜结构相对较为致密，而对于张应力状态下则相反，最终使薄膜系统的光学性能发生变化。

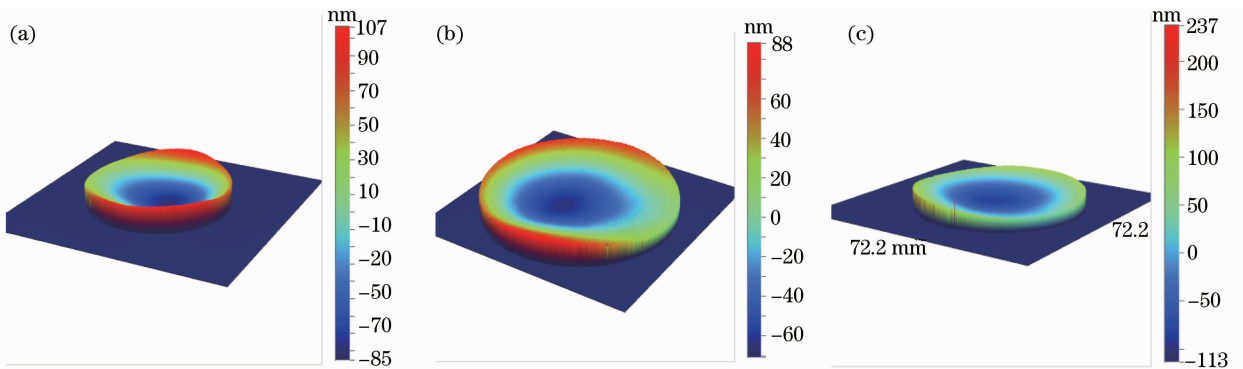


图 8 加热处理对双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜表面面形轮廓的影响分析。(a) 沉积前；(b) 沉积后；(c) 400 °C 热处理后  
Fig. 8 Influence of heat treatment on the profile of double layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> thin films. (a) Before deposition; (b) after deposition; (c) after 400 °C heat treatment

由双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜高温处理前后的透射光谱图(图 9)可知，经过 400 °C 高温热处理，Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/

SiO<sub>2</sub> 薄膜的平均透过率在 400~800 nm 可见光波段大约有 1% 的提高。据光学薄膜理论可知，薄膜

整体光学性能的提高是薄膜光学常数及相关结构变化综合作用的结果,利用提出的遗传单纯形混合算法,拟合分析了 400 °C 热处理后 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 薄膜的光学常数。如图 10 所示,经过 400 °C 高温热处理, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜的光学常数(折射率和消光系数)都明显变小了:在 600 nm 波长处,折射率  $n$  从高温加热前的 2.115、1.475 分别降为 2.045、1.406,这与热处理前后 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜应力释放所引起的结构致密性变化有密切关系。400 °C 高温处理后, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜的消光系数基本可视为 0,这与薄膜表面粗糙度的降低,高温处理有效去除了一些表面杂质等因素有关。

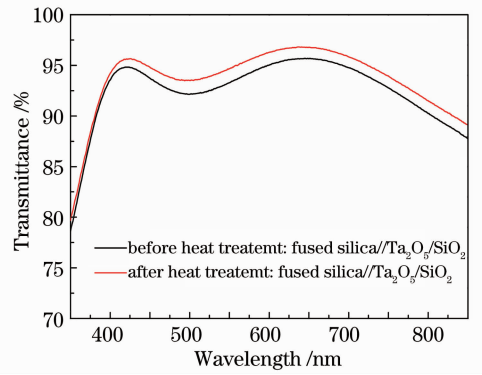


图 9 双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜高温处理前后的透射光谱  
Fig. 9 Transmission spectra of double layer Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> thin film before and after heat treatment

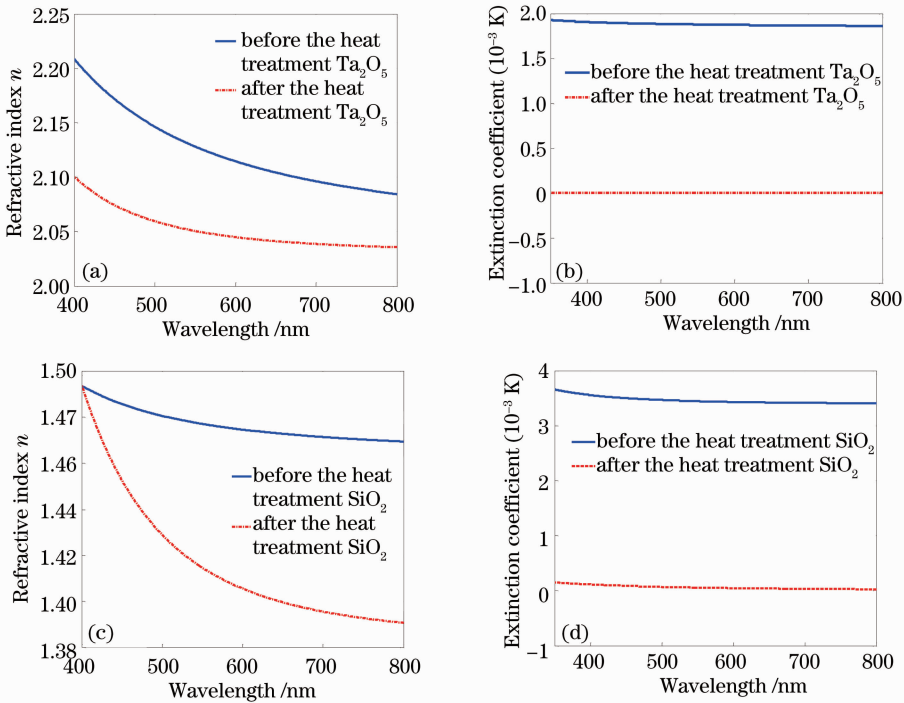


图 10 400 °C 加热前后, (a)、(b) Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 (c)、(d) SiO<sub>2</sub> 薄膜光学常数变化曲线

Fig. 10 Optical constant of (a), (b) Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and (c), (d) SiO<sub>2</sub> films before and after 400 °C heat treatment

## 4 结 论

采用双离子溅射的方法在石英、硅基板上制备了单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 及双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜。基于石英衬底上单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 及双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜的透射光谱,结合使用改进后的遗传单纯形混合算法,编写了薄膜光学常数拟合分析程序。初步实验表明,采用改进后的遗传单纯形混合算法可有效确定薄膜的光学常数和厚度,单层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的拟合光学常数与测量值最大偏差为 0.001,膜层厚度偏差不超过 1 nm;而双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜拟合光学常数最大误差在 0.004 以内,最大厚度偏差仅为 2.5 nm。

同时,将溅射制备的双层 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 薄膜进行热处理,结果表明:高温热处理可有效释放薄膜中的应力,降低 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub> 薄膜在 400~700 nm 波段的折射率和消光系数。下一步将进一步改进算法和模型,如引入膜层表面粗糙度及薄膜接触面为非理想界面等因素,并对算法在多层薄膜反演计算中的正确性和可靠性进行理论及实验验证。

## 参 考 文 献

1 J K Yao, Z X Fan, Y X Jin, *et al.*. Investigation on thermal stability of TiO<sub>2</sub> films for application at high temperature [J]. Thin Solid Film, 2008, 516: 1237-1241.

- 2 W J Liu, X J Guo, C H Chien. The study of optical and micro-structural evolution of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  and  $\text{SiO}_2$  thin films by plasma ion assisted deposition method [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 196(1): 69–75.
- 3 J Y Natoli, L Gallais, H Akhouayri, *et al.*. Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms [J]. Appl Opt, 2002, 41(16): 3156–3166.
- 4 H Grüger, C Kunath, E Kurth, *et al.*. High quality of sputtered metal oxides ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HfO}_2$ ) and their properties after annealing [J]. Thin Solid Films, 2004, 447: 509–515.
- 5 Chen Shenglong, Yang Jianguang, Gao Liang. Recent situation and progress in preparation of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  film [J]. Materials Review, 2010, 1: 25–30.  
陈胜龙, 杨建广, 高亮.  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜制备的研究现状及进展 [J]. 材料导报, 2010, 1: 25–30.
- 6 S Ezhilvalavan, T Y Tseng. Preparation and properties of tantalum pentoxide ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) thin films for ultra large scale integrated circuits (ULSIs) application—a review [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 1999, 10(1): 9–31.
- 7 J R Hall, F Joseph, W F C Ferguson. Optical properties of cadmium sulfide and zinc sulfide from 0.6 micron to 14 microns [J]. J Opt Soc Am, 1955, 45(9): 714–717.
- 8 J C Manifacier, J Gasiot, J P Fillard. A simple method for the determination of the optical constants  $n$ ,  $k$  and the thickness of a weakly absorbing thin film [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1976, 9(11): 1002.
- 9 Qiao Mingxia, Huang Wei, Zhang Bin. Determination of refractive index and thickness of  $\text{YbF}_3$  and  $\text{ZnS}$  thin films from spectrophotometric methods [J]. Laser Journal, 2006, 27(1): 24–25.  
乔明霞, 黄伟, 张彬.  $\text{YbF}_3$  和  $\text{ZnS}$  薄膜的折射率和厚度的分光光度法测定 [J]. 激光杂志, 2006, 27(1): 24–25.
- 10 Ji Yiqin, Liu Huasong, Zhang Yanmin. Test and analysis of optical film constants [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 513–518.  
季一勤, 刘华松, 张艳敏. 光学薄膜常数的测试与分析 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(5): 513–518.
- 11 Zhou Yi, Wang Aiyang. Determination of optical constants and thickness of diamond-like carbon films by a multiple sample method [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2468–2473.  
周毅, 汪爱英. 多样品法确定类金刚石薄膜的光学常数与厚度 [J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2468–2473.
- 12 S Y Kim. Simultaneous determination of refractive index, extinction coefficient, and void distribution of titanium dioxide thin film by optical methods [J]. Appl Opt, 1996, 35(34): 6703–6707.
- 13 Y J Jen, C Y Peng, H H Chang. Optical constant determination of an anisotropic thin film via polarization conversion [J]. Opt Express, 2007, 15(8): 4445–4451.
- 14 Y J Jen, C H Hsieh, T S Lo. Optical constant determination of an anisotropic thin film via surface plasmon resonance; analyzed by sensitivity calculation [J]. Opt Commun, 2005, 244(1): 269–277.
- 15 Zhou Tianyu, Yang Kaiyong, Wu Suyong. Determination of optical constants and thicknesses of high-reflection multilayer system [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(1): 128–132.  
周天宇, 杨开勇, 吴素勇. 多层高反膜光学常数和厚度的反演 [J]. 应用光学, 2011, 32(1): 128–132.
- 16 Jing Longkang, Jian Yurong, Ni Ting. Application of adaptive simulated annealing genetic algorithm in inverse of optical constants and thicknesses of the thin film [J]. Optical Technique, 2012, 38(2): 218–224.  
荆龙康, 蒋玉蓉, 倪婷. 自适应模拟退火遗传算法在薄膜厚度及光学常数反演中的应用 [J]. 光学技术, 2012, 38(2): 218–224.
- 17 Wu Suyong. Design Thin Films by Genetic Algorithm [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2007, 16–21.  
吴素勇. 遗传算法在膜系设计中的应用 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2007. 16–21.
- 18 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): 885–889.  
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): 885–889.
- 19 Jin Weihua, Jin Chunshui, Zhang Lichao, *et al.*. Determination of optical constants for aluminum thin film based on combined optimal algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1582–1588.  
金伟华, 金春水, 张立超, 等. 基于混合优化算法测定铝薄膜光学常数 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1582–1588.
- 20 A H Macleod. Thin-Film Optical Filters [M]. London: Institute of Physics Publishing, 2001. 37–40.
- 21 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 411–412.  
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. 411–412.
- 22 G G Stoney. The tension of metallic films deposited by electrolysis [J]. Proc R Soc London, Ser A, 1909, 82(553): 172–175.