

文章编号 1004-924X(2017)01-0021-07

## 离子束溅射氧化钽薄膜的光学带隙特性

刘华松<sup>1,2\*</sup>, 杨 霄<sup>1</sup>, 王利栓<sup>1,2</sup>, 姜玉刚<sup>1</sup>, 季一勤<sup>1,2</sup>, 陈德应<sup>2</sup>

- (1. 中国航天科工飞航技术研究院 天津津航技术物理研究所 天津市薄膜光学重点实验室, 天津 300308;
2. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所 可调谐激光技术国防科技重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**  $Ta_2O_5$  薄膜是可见光到近红外波段中重要的高折射率薄膜材料之一。本文针对离子束溅射制备  $Ta_2O_5$  薄膜的光学带隙特性开展了实验研究工作, 基于 Cody-Lorentz 模型表征了薄膜的光学带隙特性, 重点针对薄膜的禁带宽度和 Urbach 带尾宽度与制备参数之间的相关性进行研究。研究表明: 在置信概率 95% 以上时, 对  $Ta_2O_5$  薄膜禁带宽度影响的制备参数, 权重大小依次为氧气流量、基板温度、离子束电压; 而对  $Ta_2O_5$  薄膜 Urbach 带尾宽度影响的制备参数, 权重大小依次为基板温度和氧气流量。对于  $Ta_2O_5$  薄膜在超低损耗激光薄膜和高损伤阈值激光薄膜领域内应用, 本文的研究结果给出了同步提高薄膜的禁带宽度和降低带尾宽度的重要工艺参数选择方法。

**关键词:**  $Ta_2O_5$  薄膜; 禁带宽度; Urbach 带尾宽度; 制备参数; 影响权重

**中图分类号:** O 484.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172501.0021

## Characteristics of optical band gap of tantalum oxide thin film deposited by ion beam sputtering

LIU Hua-song<sup>1,2\*</sup>, YANG Xiao<sup>1</sup>, WANG Li-shuan<sup>1,2</sup>, JIANG Yu-gang<sup>1</sup>, JI Yi-qin<sup>1,2</sup>, CHEN De-ying<sup>2</sup>

- (1. Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Technical Physics Institute, HIWING Technology Academy of CASIC, Tianjin 300308, China;
2. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

\* Corresponding author, E-mail: liuhuasong@hotmail.com

**Abstract:** The  $Ta_2O_5$  thin film is one of the most important high refractive materials in the range from visible to near infrared. This paper researched the optical band gap of the  $Ta_2O_5$  thin film which was deposited by the Ion Beam Sputtering (IBS). The optical band gap was characterized by the Cody-Lorentz dispersion model. Particularly, the correlations of the band gap and the Urbach with technological parameters were studied respectively. The results show that when the confidence probability is over 95%, the technological parameters are ranked due to their influence coefficients on the band gap as follows: oxygen flow, substrate temperature, and ion beam voltage. Accordingly due to those on the Urbach, the technological parameters are ranked as substrate temperature and oxygen flow. The result provides a method for choosing the key technological parameters to increase the band

收稿日期: 2016-08-30; 修订日期: 2016-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61405145, No. 61235011); 天津市自然科学基金重点基金资助项目 (No. 15JCZDJC31900); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2015T80115, No. 2014M560104)

gap width and reduce the Urbach energy width simultaneously of the  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  thin film used in the areas of the ultra-low loss thin film and high laser-induced damage threshold thin film.

**Key words:**  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  thin film; band gap; Urbach energy; preparative parameters; influence coefficient

## 1 引言

$\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的光谱透过波段为  $0.3\sim 10\ \mu\text{m}$ , 是可见光到近红外波段重要的高折射率材料之一。 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜具有较高的折射率和热稳定性、低吸收、无定形微结构和耐化学腐蚀等优点, 广泛应用于制备多种光学元件的减反膜、高反膜、分光膜和干涉滤光膜<sup>[1]</sup>。无定形薄膜主要有禁带宽度和 Urbach 带尾宽度两个重要的光学带隙特性。其中, 禁带宽度表征薄膜的短波吸收极限, 也是评价薄膜吸收的重要参数; 而带尾宽度则是评价薄膜内部结构无序度的关键特性。因此,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜带隙的研究对于它在高损伤阈值和低损耗薄膜中的应用具有重要意义。

$\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的制备主要有电子束蒸发、蒸发离子辅助、离子束溅射、磁控溅射、脉冲激光沉积、阳极氧化法、原子层沉积和溶胶-凝胶等方法。这些制备方法制备的  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的光学特性各不相同, 并且在同一种制备技术下, 制备参数对  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜特性也有较大影响<sup>[2-6]</sup>。自 20 世纪 70 年代以来, 离子束溅射方法制备  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜成为薄膜领域内的主流技术之一, 是当前低损耗激光薄膜的首选制备技术。离子束溅射  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的研究主要集中在离子束、烘烤温度和工作气体流量比等参数的优化以及热处理对薄膜性能的影响上, 并获得了离子束溅射制备  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的折射率、消光系数、应力、化学计量比、微结构和光学带隙等特性<sup>[7-11]</sup>。在光学带隙的调整方法上, 研究人员通过调整  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的氧化程度实现了薄膜带隙的调控。而关于离子束溅射法制备的  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜带隙调控的研究报道却较少。

本文采取正交实验法系统地研究了离子束溅射制备的  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜光学带隙, 基于 Cody-Lorentz 介电常数物理模型, 通过光谱反演计算获得薄膜的禁带宽度和 Urbach 带尾宽度, 最后

得到了  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜禁带宽度和 Urbach 带尾宽度的调整方法。

## 2 实验方法

实验使用的薄膜制备方法为离子束溅射沉积技术, 实验装置如图 1 所示。采用直接溅射高纯度金属 Ta 靶材, 在沉积过程中通过氧化法制备  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜, 靶材的纯度  $>99.95\%$ 。主溅射源为 16 cm 口径的宽束射频离子源, 离子源的工作气体为高纯氩气(纯度  $>99.999\%$ ), 离子束的工作电压为  $300\sim 1\ 300\ \text{V}$ , 工作电流为  $150\sim 650\ \text{mA}$ 。薄膜制备过程中氧气充入到真空室内(氧气纯度  $>99.999\%$ ), 氧气流量为  $0\sim 50\ \text{sccm}$ 。基板加热采用石英灯加热器辐射加热的方式, 加热温度从室温到  $250\ ^\circ\text{C}$ 。薄膜沉积前用 12 cm 离子源清洗基板 5 min。这里重点针对离子束电压、离子束电流、基板温度和氧气流量 4 个制备参数进行了研究。薄膜基底选择两块超光滑的远紫外石英玻璃 ( $\Phi 40\times 6\ \text{mm}$ ), 分别进行双面抛光和单面抛光加工, 为了减低紫外波段光谱测试的散射效应, 基板表面的粗糙度优于  $0.3\ \text{nm}$ 。单面石英样品用于测量椭圆偏振光谱参数, 双面石英样品则用于测量光谱透过率。

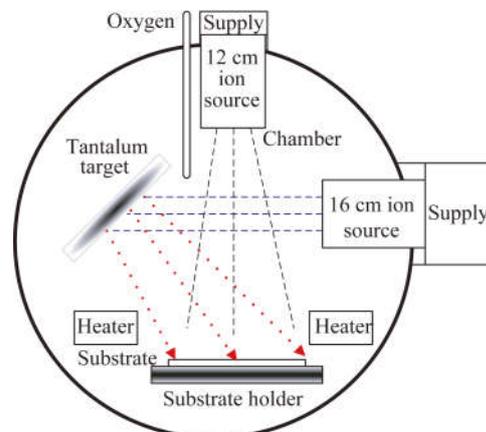


图 1 离子束溅射沉积示意图

Fig. 1 Scheme of triple ion beam sputtering system

为了考察薄膜带隙特性与制备参数的关系,基于正交实验法对上述的 4 个主要制备参数进行实验设计<sup>[12]</sup>,目的是通过较少的实验获得具有规律性的结果。在实验设计中,选择基板温度、离子束压、离子束流和氧气流量作为制备参数,制备参数的因素和水平如表 1 所示。使用  $L_9(3^4)$  四因素、三水平的正交表进行实验设计,设计结果见表 2,在每组实验下薄膜的沉积时间均为 5 000 s。

表 1 实验制备参数的因素和水平

Tab. 1 Factor and level of preparative parameters

	基板温度/℃		离子束电压/V		离子束电流/mA		氧气流量/sccm	
	水平值	符号	水平值	符号	水平值	符号	水平值	符号
1	25	A1	600	B1	300	C1	20	D1
2	125	A2	950	B2	450	C2	30	D2
3	200	A3	1300	B3	650	C3	40	D3

表 2 离子束溅射  $Ta_2O_5$  薄膜正交实验设计

Tab. 2 Design of orthogonal experiments for  $Ta_2O_5$  films deposited by ion beam sputtering

Number	Experiment	Substrate temperature/℃	Ion beam voltage/V	Ion beam current/mA	Oxygen flow/sccm
1	A1B1C1D1	25	600	300	20
2	A1B2C2D2	25	950	450	30
3	A1B3C3D3	25	1300	650	40
4	A2B1C2D3	125	600	300	40
5	A2B2C3D1	125	950	450	20
6	A2B3C1D2	125	1300	650	30
7	A3B1C3D2	200	600	300	30
8	A3B2C1D3	200	950	450	40
9	A3B3C2D1	200	1300	650	20

### 3 薄膜带隙特性实验结果

Ferlauto 等人<sup>[13]</sup>提出了介电常数色散的 Cody-Lorentz 模型,并应用在典型的无定形半导体材料中。该模型在带间跃迁介电常数模型的基础上,加入了 Urbach 带尾吸收模型,其介电常数的虚部  $\epsilon_i$  为:

$$\epsilon_i(E) = \begin{cases} G(E) \frac{AE_0 \Gamma E}{(E^2 - E_0^2)^2 + \Gamma^2 E^2}, & E > E_t \\ \frac{E_t}{E} \exp\left[-\frac{(E - E_t)}{E_u}\right], & 0 < E \leq E_t \end{cases}, \quad (1)$$

$$G(E) = \frac{(E - E_g)^2}{(E - E_g)^2 + E_p^2}, \quad (2)$$

$$E_t = E_t G(E_t) L(E_t), \quad (3)$$

其中:  $E$  为光子能量;  $E_0, A, E_g$  和  $\Gamma$  分别为带间跃迁中心的光子能量、光学跃迁矩阵元、禁带宽度和带宽;  $E_t$  是 Urbach 带尾跃迁和带间跃迁之间的界限能量,在能量小于  $E_t$  的区域是带尾跃迁吸收,而能量大于  $E_t$  的区域则是带间跃迁;  $E_p$  是第二跃迁能量 ( $E_g + E_p$ ),大于此值的光子吸收为 Lorentz 吸收线形;  $E_u$  表示为 Urbach 带尾宽度,是材料结构无序度和缺陷密度的重要表征参数;  $E_t$  为介电常数虚部  $\epsilon_i$  在  $E = E_t$  处的连续;  $G(E)$  是通过常数偶极子逼近的态密度函数。介电常数的实部  $\epsilon_r$  可通过 Kramers-Kronig 变换得到,即有:

$$\epsilon_r(E) = \epsilon_\infty + \frac{2E_t}{\pi} P \int_0^{E_t} \frac{\exp\left[-\frac{(E' - E_t)/E_u}{E'^2 - E^2}\right] dE'}{E'^2 - E^2} + \frac{2}{\pi} P \int_{E_t}^\infty \frac{E' G(E') L(E')}{E'^2 - E^2} dE'. \quad (4)$$

该模型可以用于表征  $Ta_2O_5$  薄膜从紫外到近红外范围的介电常数色散。通过介电常数可以计算出薄膜的分光光谱和椭圆偏振光谱。因此,在上述介电常数方程的基础上,基于光谱反演计算获得上述方程的系数<sup>[14]</sup>,即可直接获得禁带宽度  $E_g$  与 Urbach 带尾宽度  $E_u$ 。

在本文中,对表 2 中 9 组实验样品的光谱透过率和椭圆偏振参数分别进行测量。光谱透过率测试使用 Lambda 900 分光光度计,透过率测量精度为  $\pm 0.5\%$ ,测试应用的波长为 300~1 200 nm,扫描速度为 150 nm/s,光阑孔径为 2 mm。反射椭圆偏参数的测量使用美国 J. Woolanm 公司的 W. VASE32 椭圆偏振仪,测量波长为 270~2 000 nm,数据采样间隔为 10 nm,测量角度分别为  $55^\circ, 65^\circ$  和  $75^\circ$ 。将光谱透过率和椭圆偏振参数作为复合反演的计算目标,应用光学常数反演计算的数值优化方法,得到式(1)中的禁带宽度  $E_g$  和 Urbach 带尾宽度  $E_u$ ,9 组实验的反射椭圆偏振 ( $\Delta$ ) 和光谱透过率、以及反演计算结果如图 2 所示,计算结果如表 3 所示。

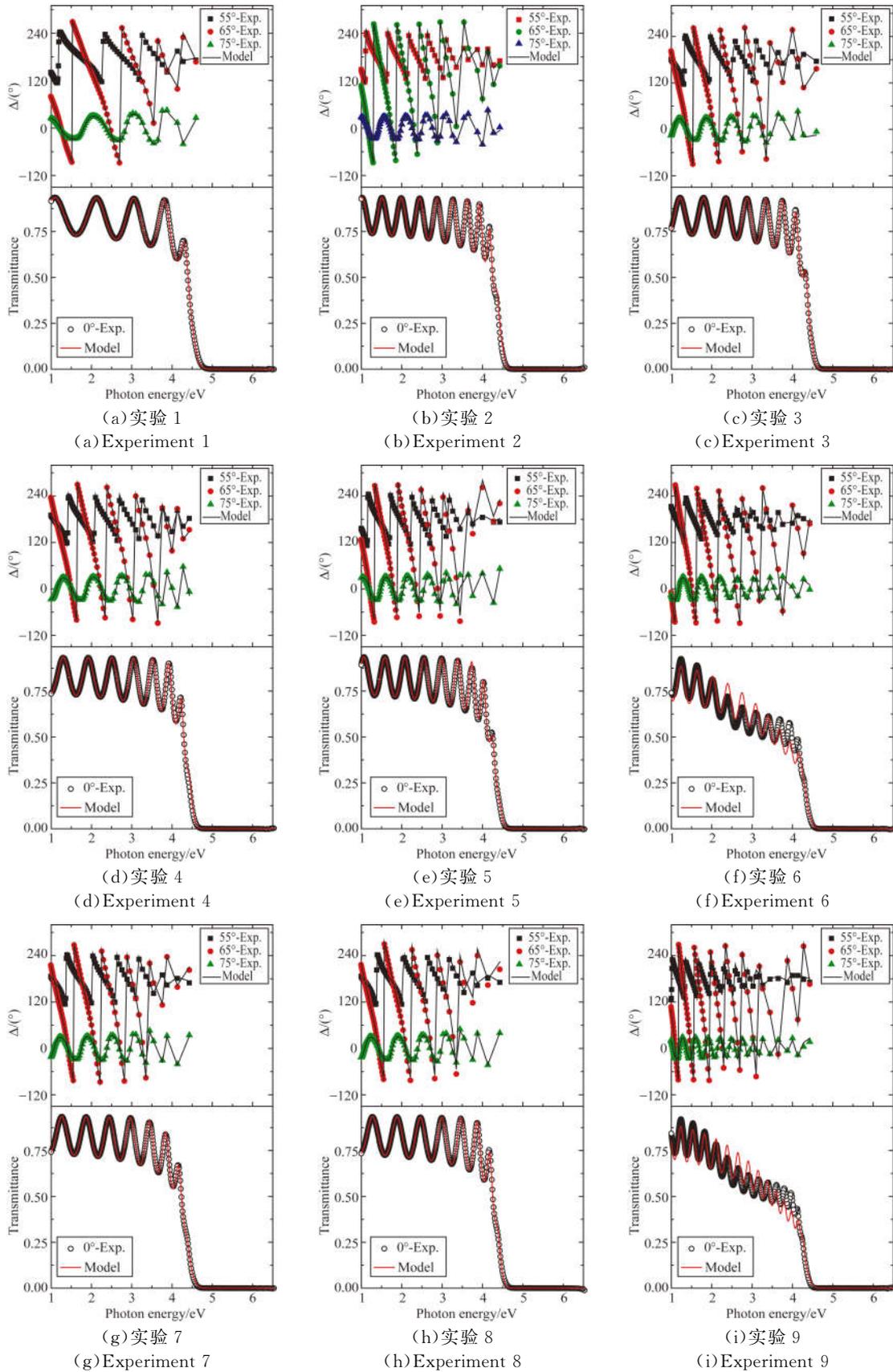


图 2 九组实验椭圆偏振光谱、透过率光谱及反演计算结果

Fig. 2 Ellipsometric and transmittance spectra and inversion calculation of 9 experiments

表 3 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的带隙特性测试结果

Tab. 3 Optical band properties of tantalum oxide films deposited by ion beam sputtering

Experiment number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
禁带宽度/eV	4.32	4.37	4.32	4.33	3.95	4.01	4.26	4.25	3.89
Urbach 带尾宽度/eV	0.244	0.243	0.233	0.256	0.290	0.235	0.303	0.288	0.334

### 4 分析与讨论

根据正交实验的数学分析法,对表 3 中的禁带宽度与 Urbach 带尾宽度进行极差分析和方差分析,分析方法具体见文献[15]。分析过程是先确定制备参数对  $E_g$  与  $E_u$  影响的权重,再分析这种影响权重的可信概率。图 3 和图 4 分别给出了禁带宽度与带尾宽度的极差分析结果,表 4 和表 5 给出了正交实验结果的方差分析。由表 4 和表 5 中的结果可以确定 4 个制备参数对薄膜禁带宽度和带尾宽度影响的主次关系和可信概率。

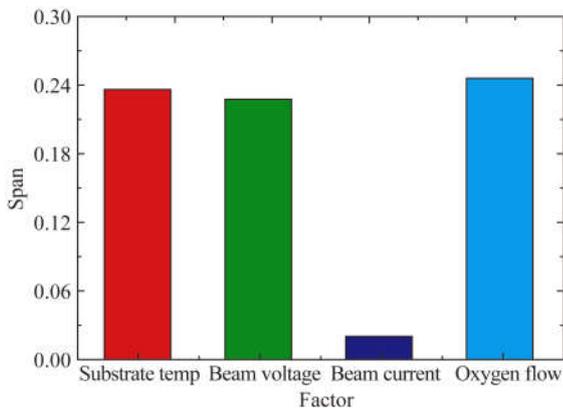


图 3 带隙的极差分析

Fig. 3 Range analysis of band gap

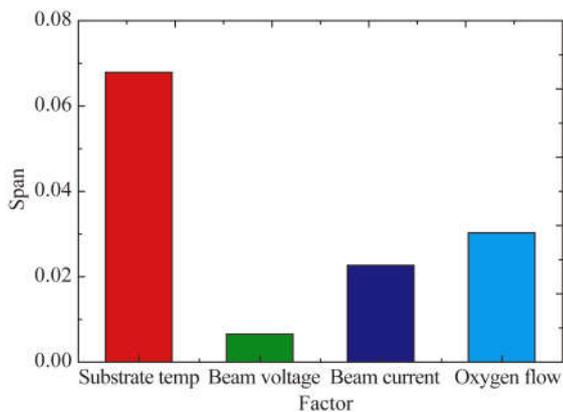


图 4 带尾宽度的极差分析

Fig. 4 Range analysis of Urbach

由带隙的极差分析结果可知,  $R_{\text{氧气流量}} > R_{\text{基板温度}} > R_{\text{离子束电压}} > R_{\text{离子束电流}}$ ,如图 3 所示,影响禁带宽度的制备参数按权重大小依次是氧气流量、基板温度、离子束电压和离子束电流。进一步的方差分析结果显示,在离子束电流参数下的方差估计值最小,该项因素作为实验误差处理,在置信概率 0.95 以上时,其余 3 个制备参数下禁带宽度的统计量  $F$  均大于  $F_{0.05}$ ,说明其它 3 个制备参数对禁带宽度的影响是高度显著。在同一制备参数下从统计量  $k$  值可以获得最优工艺水平。从表 4 中可以得到,若制备高禁带宽度的 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜,氧气流量的工艺水平应选择 D<sub>3</sub>、基板温度的工艺水平为 A<sub>1</sub>、离子束电压的工艺水平为 B<sub>1</sub>,离子束电流的参数影响并不显著。氧气流量决定了溅射过程金属再氧化的效果,其大小直接决定金属氧化物的化学计量比,氧气流量直接影响到薄膜的化学计量比,在非完整化学计量比下薄膜的禁带宽度一定变小;因此,高带隙 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜的制备参数选择相对最优化的组合为 D<sub>3</sub>A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>。

表 4 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 薄膜禁带宽度的方差分析

Tab. 4 Variance analysis of band gap of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film

统计量	基板 温度/℃	离子束 电压/V	离子束 电流/mA	氧气 流量/scm
$K_1$	13.005 60	12.906 30	12.586 10	12.160 70
$K_2$	12.292 70	12.571 30	12.585 00	12.633 00
$K_3$	12.398 60	12.219 30	12.525 80	12.903 20
$k_1$	4.335 20	4.302 10	4.195 37	4.053 57
$k_2$	4.097 57	4.190 43	4.1950 0	4.211 00
$k_3$	4.132 87	4.073 10	4.175 27	4.301 07
R	0.237 63	0.229 00	0.020 10	0.247 50
W-P	0.272 28	0.272 28	0.272 28	0.272 28
Q	0.098 654	0.078 678	0.000 794	0.094 154
自由度	2	2	2	2
方差估计值	0.049 3	0.039 3	0.000 4	0.047 1
F 值	124.320 6	99.146 5	—	118.648 7
$F_{0.01}$	99	99	误差项	99
$F_{0.05}$	19	19		19

注:  $K_1, K_2, K_3$  为水平和;  $k_1, k_2, k_3$  为水平均值; R 为极差; W-P 为总偏差平方和; Q 为偏差平方和。

由 Urbach 极差分析结果可知,  $R_{\text{基板温度}} > R_{\text{氧气流量}} > R_{\text{离子束电流}} > R_{\text{离子束电压}}$ , 如图 4 所示, 影响 Urbach 带尾宽度的制备参数按权重从大到小依次是基板温度、氧气流量、离子束电流和离子束电压。进一步的方差分析结果显示, 由于离子束电压参数下实验的估计值较小, 在此当作实验误差处理。在置信概率 0.95 以上时, 基板温度和氧气流量下的带尾宽度统计量  $F$  均大于  $F_{0.05}$ , 说明这两个制备参数对光学带隙的影响高度显著。Urbach 带尾宽度反映了薄膜中的缺陷态密度, 缺陷态密度越高则带尾宽度越大。为了降低  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜中的缺陷态密度, 必须降低带尾宽度。

表 5  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的 Urbach 带尾宽度方差分析

Tab. 5 Variance analysis of Urbach of  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  thin film

统计量	基板 温度/°C	离子束 电压/V	离子束 电流/mA	氧气 流量/sccm
$K_1$	0.720 07	0.803 13	0.765 57	0.867 46
$K_2$	0.781 56	0.820 95	0.833 53	0.781 44
$K_3$	0.923 92	0.801 47	0.826 45	0.776 65
$k_1$	0.240 02	0.267 71	0.255 19	0.289 15
$k_2$	0.260 52	0.273 65	0.277 84	0.260 48
$k_3$	0.307 97	0.267 16	0.275 48	0.258 88
$R$	0.067 95	0.006 49	0.022 65	0.03027
W-P	0.010 04	0.010 04	0.010 04	0.010 04
$Q$	0.007 289	0.000 078	0.000 931	0.001 741
自由度	2	2	2	2
方差估计值	0.003 64	3.9E-05	0.000 47	0.000 87
$F$ 值	93.747 1	11.96 82	—	22.391 1
$F_{0.01}$	99	误差项	99	99
$F_{0.05}$	19		19	19

注:  $K_1, K_2, K_3$  为水平和;  $k_1, k_2, k_3$  为水平均值;  $R$  为极差; W-P 为总偏差平方和;  $Q$  为偏差平方和。

在置信概率 0.95 以上时, 从表 5 中的不同水平下统计量  $k$  值可以看出, 要获得低的带尾宽度, 则基板温度的工艺水平为  $A_1$ 、氧气流量的工艺水

平为  $D_3$ 、离子束电流的工艺水平和离子束电压的影响并不显著。因此, 若获得较低  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的 Urbach 带尾宽度,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜制备工艺应选择的制备参数组合为  $A_1 D_3$ 。从制备参数的影响来看, 提高基板温度增加会增大带尾宽度, 使薄膜中产生更多的缺陷; 其次, 氧气流量对产生缺陷态的影响没有基板温度重要; 离子束电流决定了靶材的溅射速率, 也就影响到薄膜的沉积速率, 在本文选择的离子束电流范围内, 沉积速率对于缺陷态的产生贡献不大。因此, 在控制离子束溅射制备的  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的缺陷态密度上, 必须降低基板温度和增加氧气流量。第 3 组实验恰好符合条件, 该参数下能够获得最小的带尾宽度。

## 5 结 论

本文系统地研究了离子束溅射制备  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的光学带隙特性, 在实验上采用正交实验方法获得了制备参数对禁带宽度和 Urbach 带尾宽度影响的权重。在置信概率 95% 以上, 影响薄膜禁带宽度的因素按权重大小依次是氧气流量、基板温度和离子束电压; 影响薄膜带尾宽度的制备参数依次是基板温度和氧气流量。研究结果表明: 基板温度越大, 薄膜的禁带宽度越小, 带尾宽度越大; 氧气流量越大, 薄膜的禁带宽度越大, 带尾宽度越小; 离子束电压越大, 禁带宽度越小, 但它不是影响带尾宽度的主要参数; 离子束电流对  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的光学带隙和带尾宽度的影响均不显著。

综上所述, 基于正交实验可以系统考察各制备参数对  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜能带特性影响的权重。在超低损耗激光薄膜和高损伤阈值激光薄膜领域内, 提高薄膜的禁带宽度和降低带尾宽度是共同的目标, 本文的研究结果给出了同步调控两个特性的重要工艺参数选择方法, 但是没有深入研究具体制备参数水平对禁带宽度和带尾宽度的微小影响, 后续将进一步研究离子束溅射  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  薄膜的光学带隙特性, 以指导其在多层膜应用上的制备参数选择。

## 参考文献:

- [1] FLORY F. Comparison of different technologies for high quality optical coatings [J]. *SPIE*, 1990, 1270: 172-183.
- [2] HERRMANN JR W C. E-beam deposition characteristics of reactively evaporated Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> for optical interference coatings [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1981, 18(3): 1303-1305.
- [3] SCHILLER S, HEISIG U, STEINFELDER K, *et al.*. Reactive DC sputtering with the magnetron-plasmatron for tantalum pentoxide and titanium dioxide films [J]. *Thin Solid Films*, 1979, 63(2): 369-375.
- [4] MARTIN P J, MACLEOD H A, NETTERFIELD R P, *et al.*. Ion-beam-assisted deposition of thin films [J]. *Applied Optics*, 1983, 22(1): 178-184.
- [5] DEMIRYONT H, SITES J R, GEIB K. Effects of oxygen content on the optical properties of tantalum oxide films deposited by ion-beam sputtering [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(4):490-495.
- [6] YOON S G, KIM Y T, KIM H K, *et al.*. Comparison of residual stress and optical properties in Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films deposited by single and dual ion beam sputtering [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2005, 118(1-3): 234-237.
- [7] YOON S G, KIM H K, KIM M J, *et al.*. Effect of substrate temperature on surface roughness and optical properties of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> using ion-beam sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 2005, 475(1): 239-242.
- [8] HUANG A P, CHU P K. Characteristics of interface between Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin film and Si (100) substrate [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 200(5-6): 1714-1718.
- [9] CHENG W H, CHI S F, CHU A K. Effect of thermal stresses on temperature dependence of refractive index for Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dielectric films [J]. *Thin Solid Films*, 1999, 347(1-2): 233-237.
- [10] LIU W J, CHIEN C H. Influences of residual argon gas and thermal annealing on Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> thin films [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(1R): 181.
- [11] UTHANNA S, CHANDRA S V J, REDDY P S, *et al.*. Effect of post-deposition annealing on the structural, electrical, and optical properties of DC magnetron sputtered Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> films [J]. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2008, 114(1):012035.
- [12] 数学手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1979: 853-858.  
*Handbook of Mathematics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1979:853-858. (in Chinese)
- [13] FERLAUTO A S, FERREIRA G M, PEARCE J M, *et al.*. Analytical model for the optical functions of amorphous semiconductors from the near infrared to ultraviolet: Applications in thin film photovoltaics [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(5): 2424-2436.
- [14] 刘华松, 季一勤, 张锋, 等. 金属氧化物薄膜在中波红外光谱区内光学常数色散特性 [J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0831003.  
LIU H S, JI Y Q, ZHANG F, *et al.*. Dispersive properties of optical constants of some metallic oxide thin films in the mid-infrared regions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0831003. (in Chinese)
- [15] 何少华, 文竹青, 姜涛. 试验设计与数据处理 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002: 62-92.  
HE SH H, WEN ZH Q, LOU T. *Experiment and Data Handle* [M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 2002:62-92. (in Chinese)

## 作者简介:



刘华松(1980—),男,辽宁阜新人,博士,研究员,主要从事高性能与特种光学薄膜的设计、制备与表征、固体光学薄膜材料等方面的研究。E-mail: liuhuasong@hotmail.com