

离子束溅射氧化钽薄膜光学特性的热处理效应

王利栓^{1,2}, 杨霄², 刘丹丹², 姜承慧², 刘华松^{1,2}, 季一勤^{1,2}, 张锋², 樊荣伟¹, 陈德应¹

- (1. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 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)

摘要: 主要研究了离子束溅射制备的氧化钽薄膜在大气环境下热处理对其光学特性的影响规律。实验中热处理温度范围的选择为 150~550 °C, 间隔为 200 °C。研究中分别采用介电常数的 Cody-Lorentz 色散模型和振子模型对氧化钽薄膜的能带特性(1~4 eV)和红外波段(400~4 000 cm⁻¹)的微结构振动特性进行了表征。研究表明, 在 150 °C 和 350 °C 之间出现热处理温度转折点, 即热处理温度高于此值时消光系数增加。Urbach 能量的变化与消光系数趋势相同, 而禁带宽度的变化与消光系数恰好相反。通过红外微结构振动特性分析, 薄膜中仍存在亚氧化物的化学计量缺陷。

关键词: Ta₂O₅ 薄膜; 热处理; 光学常数; 禁带宽度; 微结构振动

中图分类号: O484.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0321004

Annealing effect of the optical properties of tantalum oxide thin film prepared by ion beam sputtering

Wang Lishuan^{1,2}, Yang Xiao², Liu Dandan², Jiang Chenghui², Liu Huasong^{1,2}, Ji Yiqin^{1,2}, Zhang Feng²,
Fan Rongwei¹, Chen Deying¹

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

Abstract: The effect of annealing in atmospheric environment on Ta₂O₅ thin films was researched, which were prepared by ion beam sputtering. The annealing temperatures ranged from 150 °C to 550 °C, and the interval was 200 °C. The optical band gap (1~4 eV) of the Ta₂O₅ thin film was characterized by the Cody-Lorentz dielectric model. And the microstructure vibration was characterized by the oscillator model in the range of infrared region (400~4 000 cm⁻¹). The results show that the turning point of the annealing temperature appeared between 150 °C and 350 °C. The extinction coefficient of the thin film increased when the annealing temperature was above the turning point. The variation of Urbach energy was in accordance with the extinction coefficient, but the variation of band gap was opposite. By analyzing the

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61405145, 61235011); 天津市自然科学基金(15JCZDJC31900); 中国博士后科学基金(2015T80115, 2014M560104)

作者简介: 王利栓(1985-), 男, 博士生, 主要从事激光薄膜的设计、制备与测试技术方面的研究。Email:wanglishuan8358@163.com

导师简介: 陈德应(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事强场微光物理和非线性光学方面的研究。Email:dychen@hit.edu.cn

季一勤(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事光学薄膜的设计、制备与测试技术方面的研究。Email:ji_yiqin@163.com

microstructure vibration in infrared, it's found that the stoichiometry defect of the protoxide was in the Ta₂O₅ films.

Key words: Ta₂O₅ thin film; annealing; optical constants; band gap; microstructure vibration

0 引言

氧化钽(Ta₂O₅)薄膜具有较宽透明区(0.3~10 μm),是从可见光到近红外波段都有所应用的重要高折射率薄膜材料之一。随着薄膜技术发展至今,Ta₂O₅薄膜的制备方法诸多主要包括电子束蒸发、离子束溅射、磁控溅射、原子层沉积、等离子化学汽相沉积、溶胶-凝胶沉积技术等方法。其中,离子束溅射制备的氧化钽薄膜具有吸收低、热稳定性强和薄膜结构无定形等特性,因此被广泛应用于高反射薄膜、减反射薄膜、分光薄膜和滤光薄膜等光学多层膜领域。目前,尤其是在低损耗激光薄膜领域内,基于离子束溅射沉积技术制备的氧化钽薄膜几乎是高折射率材料的唯一选择^[1]。

氧化钽薄膜制备的关键在于控制其折射率与吸收系数两个重要光学特性,主要通过调整离子束溅射的工艺参数和选用合适的后处理工艺来实现。已发表的相关文章^[2]表明在离子束溅射制备的工艺过程中,基板温度、离子束电压、氧气偏压对薄膜的光学特性及微结构特性具有显著的影响,尤其是氧偏压可以有效调控薄膜的吸收系数^[3]。在 Ta₂O₅ 薄膜后处理工艺研究中,热处理的方法报道较多^[4-6]。Masse 等人^[5]使用等离子增强化学气相沉积方法制备了氧化钽薄膜,并在热处理中发现温度 973 K 为光学特性变化的拐点,得出折射率下降消光系数增加的结论。但其他学者的研究结果是:热处理会增加薄膜的折射率和降低薄膜的消光系数。关于离子束溅射制备的氧化钽薄膜,刘华松等人^[7]研究了热处理温度对薄膜的折射率、消光系数、应力、晶向和表面形貌的影响,但并没有讨论能带特性与红外波段光学特性与热处理的关系,基于能带工程的氧化钽薄膜热处理效应仍需进一步讨论。

文中采用离子束溅射沉积技术制备了 Ta₂O₅ 薄膜,并基于 Cody-Lorentz 色散模型,由可见光的透/反射率光谱和红外透射率光谱反演计算出可见光和红外波段的光学常数,得到折射率、消光系数、禁带

宽度、带尾宽度、红外微结构振动与热处理温度之间的关系。

1 Ta₂O₅ 薄膜光学特性表征方法

Tauc-Lorentz 模型可用于表征氧化物薄膜的紫外光学常数,该模型基于能带理论的带间跃迁特性,在透明区内对薄膜光学常数的表征与柯西模型一致,因此可应用于紫外到近红外波段的透明区内。但该模型却无法描述出无定形薄膜材料的能带带尾特征,Ferlauto 等人提出了 Cody-Lorentz 介电常数模型^[8],介电常数的虚部振子函数表达式如下:

$$\varepsilon_2(E)=G(E)\frac{AE_0\Gamma E}{(E^2-E_0^2)^2+\Gamma^2 E^2} \quad E>E_t$$

$$\frac{E_1}{E} \exp\left[\frac{(E-E_t)}{E_u}\right] \quad E \leq E_t \quad (1)$$

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

$$E_1=E_t G_t(E)L_t(E) \quad (3)$$

式中: E_0 、 A 、 E_g 和 Γ , 分别表示中心跃迁的光子能量、光学跃迁矩阵元、禁带宽度和带展宽参数; 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 的区域为带尾跃迁吸收,而在能量大于 E_t 的区域则是带间跃迁; E_p 是第二跃迁能量,大于此能量的光子吸收呈现为 Lorentz 吸收线形; E_u 表示 Urbach 能量,表征了禁带尾部的宽度,是反映材料结构无序度的重要参数。 E_1 表示为介电常数虚部在 $E=E_t$ 处连续; $G(E)$ 是通过常数偶极子逼近的态密度函数。介电常数的实部 ε_1 可通过 K-K 变换得到:

$$\varepsilon_1(E)=\varepsilon_\infty + \frac{2}{\pi} P \int_0^\infty \frac{E' \varepsilon_2(E')}{E'^2-E^2} dE' \quad (4)$$

氧化物薄膜的声子振动特性决定了其在红外波段光学常数的色散规律,而无定形材料的声子振动特性一般表现为高斯函数的形式,即用高斯线形函数表征材料单声子带的介电常数虚部^[9]。单声子表征介电常数虚部的表达式如下:

$$\varepsilon_{2,j}(\omega) = \frac{A_j}{\gamma_j} \left\{ \exp^{-4\ln(2)\left(\frac{\omega-\omega_j}{\gamma_j}\right)^2} - \exp^{-4\ln(2)\left(\frac{\omega+\omega_j}{\gamma_j}\right)^2} \right\} \quad (5)$$

式中: A_j 、 γ_j 和 ω_j 分别是第 j 个振子的强度、线宽和振动频率, 在后续讨论中所有涉及频率和阻尼系数变量的单位都为 cm^{-1} 。由 m 个振子组成的介电常数虚部可以由下式表示:

$$\varepsilon_2(\omega) = \sum_{j=1}^m \frac{A_j}{\gamma_j} \left\{ \exp^{-4\ln(2)\left(\frac{\omega-\omega_j}{\gamma_j}\right)^2} - \exp^{-4\ln(2)\left(\frac{\omega+\omega_j}{\gamma_j}\right)^2} \right\} \quad (6)$$

根据 Kramers-Kronig 变换原理, 由方程(1)和方程(3)可计算材料在不同波段的介电常数实部 $\varepsilon_1(\omega)$:

$$\varepsilon_1(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{2}{\pi} P \int_0^\infty \frac{\omega' \varepsilon_2(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (7)$$

式中: P 为主值积分; ε_∞ 为常数项。

方程(1)~(7)表征的介电常数决定了光学薄膜的折射率与消光系数, 因此其与薄膜光谱特性直接相关。根据基底-薄膜体系的光学原理, 在可见光波段将反射率光谱和透射率光谱作为目标特性, 在红外波段将透射率光谱作为目标特性, 并采用非线性数值优化算法, 即可反演计算出方程(1)和方程(6)中系数值。然后再根据方程(4)和方程(7)进行 K-K 变换得到介电常数的实部, 进而获得薄膜的光学常数, 在整个计算过程中采用评价函数对反演效果进行评价^[10]。

2 实验方法

2.1 薄膜制备与后处理

实验中 Ta_2O_5 薄膜的制备采用的是离子束溅射沉积技术。设备离子源为 16 cm 宽束射频离子源; 真空系统分别为使用机械泵进行低真空汲取, 使用低温泵进行高真空汲取, 从而避免薄膜在真空室的油气污染。在薄膜制备过程中, 由离子源发出的高能氩离子直接溅射高纯度的钽靶(纯度 > 99.5%), 高纯度的氧气直接通入到靶材表面(氧气的纯度大于 99.99%), 溅射出的 Ta 元素再经过氧化制成 Ta_2O_5 薄膜。本底真空度优于 1×10^{-3} Pa, 基板不加温, 离子束电压为 1 250 V, 离子束电流 650 mA, 氧气流量为 35 sccm。基底选择远紫外石英玻璃和单晶硅片, 表面粗糙度(rms)均优于 0.3 nm, 其中石英基底包括单面抛光和双面抛光两类, 分别用于反射率光谱和透射率光谱的测试。 Ta_2O_5 薄薄膜热处理的设备为

Espec[®] 温度试验箱, 该设备的温度控制精度为 $\pm 5\%$, 实验中热处理温度的选择分别为 150℃、350℃ 和 550℃, 升温速率为 5℃/min, 达到温度后持续保温 24 h, 降温过程采取自然降温的方式, 整个热处理过程均在大气氛围下进行。

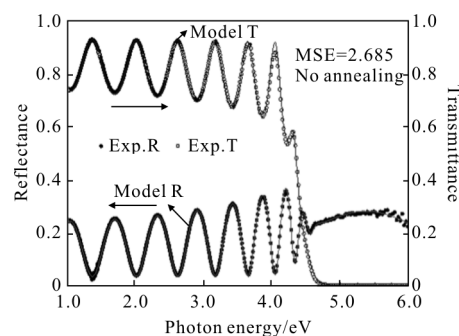
2.2 薄膜光谱特性测试

首先, Ta_2O_5 薄薄膜样品可见光光谱测试使用的是美国 PE 公司的 Lambda 900 分光光度计, 该仪器的反射率和透射率测量精度分别为 $\pm 0.08\%$ 和 $\pm 0.5\%$, 在可见光的光谱特性测试中, 扫描波长范围为 200~1 240 nm, 扫描速度为 150 nm/min, 光阑孔径为 2 mm, 透射率测试的入射角为 0°, 而反射率测试入射角为 8°; 其次, 红外波段的透射率光谱测量使用美国 PE 公司的傅里叶变换光谱仪, 测试波数范围为 400~4 000 cm^{-1} , 波数间隔 0.2 cm^{-1} 。

3 结果与分析

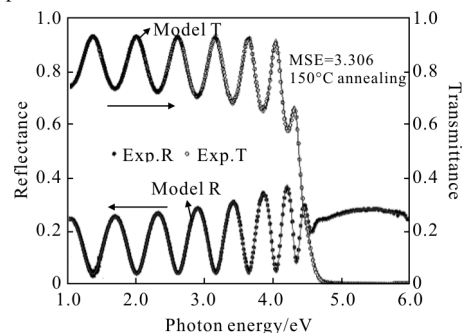
3.1 Ta_2O_5 薄膜的光学常数

Ta_2O_5 薄膜样品热处理前后的可见光光谱测试结果见图 1(a)~(d), 基于介电常数色散方程(1)~(4), 对反射率光谱和透射率光谱进行反演计算(将光谱



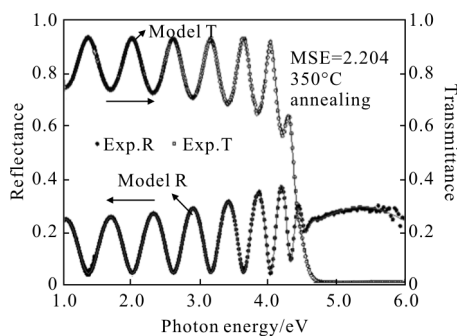
(a) 未处理的薄膜光谱特性

(a) Spectral characteristic of thin film without annealing



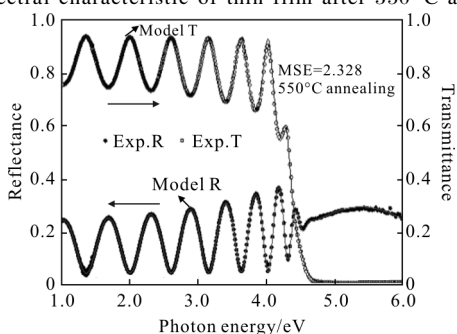
(b) 150 °C 热处理后的光谱特性

(b) Spectral characteristic after 150 °C annealing



(c) 350 °C 热处理后的薄膜光谱特性

(c) Spectral characteristic of thin film after 350 °C annealing



(d) 550 °C 热处理后的薄膜光谱特性

(d) Spectral characteristic of thin film after 550 °C annealing

图 1 不同温度热处理后的光谱特性反演拟合计算

Fig.1 Spectral characteristic inversion fitting calculation with annealing of different temperature

的波长单位换算为光子能量单位),最终拟合的评价函数分别为 2.685、3.306、2.204 和 2.328,测试值与反演计算值基本一致,据此得到不同温度处理后 Ta₂O₅ 薄膜的光学常数。折射率与消光系数的色散分别见图 2 和图 3。在 1~4 eV 波段内,薄膜的折射率随热处理温度的增加而下降;在 4 eV 光子能量附近处,消光系数随着热处理温度的增加先下降,在 150 °C 热处理温度下达到最小,而随着温度进一步升高,薄膜的消光系数增大,在 550 °C 时热处理基本

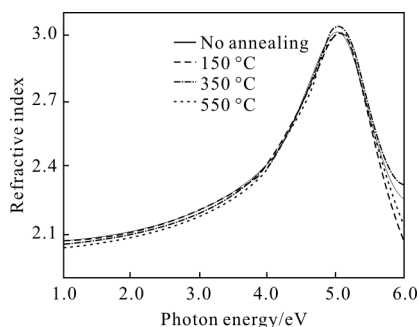


图 2 热处理温度对折射率的影响

Fig.2 Effect of annealing temperature on refractive index

与未进行热处理时的消光系数相当。这种现象产生的机制就是源于薄膜缺陷态密度的变化,而评价缺陷态密度的参数是 Urbach 能量,在 3.2 节中详细讨论。

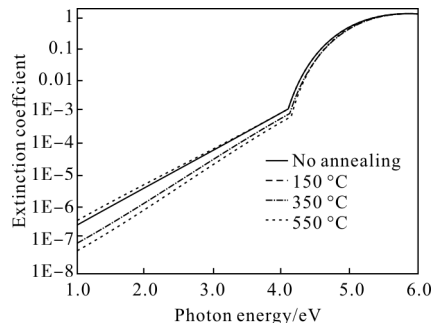


图 3 热处理温度对消光系数的影响

Fig.3 Effect of annealing temperature on extinction coefficient

3.2 Ta₂O₅ 薄膜的能带特性

材料的光学吸收边表征了电子由价带到导带的跃迁特性,禁带宽度 E_g 和带尾宽度 E_u (Urbach 能量)是表征无定形材料带间跃迁的重要参数, E_u 代表局域态能带尾部的宽度,是无定形材料无序度表征的重要参数。图 4 给出了薄膜的禁带宽度与热处理温度的关系,随着热处理温度的增加 E_g 先增加,在 150 °C 时热处理薄膜 E_g 达到最大值,而后随着热处理温度的增加而降低。材料的吸收边吸收系数呈指数变化,吸收系数用 E_u 表达为:

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \exp(h\nu/E_u)$$

式中: α_0 为吸收常数, E_u 为 Urbach 能量,在数值上是 $h\nu - \ln(\alpha/\alpha_0)$ 曲线的斜率。图 5 给出了 E_u 与热处理温度的关系,随着热处理温度的增加, E_u 呈现先下降后增加的趋势,在 200~300 °C 热处理温度区间出现极小值,该实验现象表明薄膜结构内的缺陷态密度先减小后增加。薄膜 E_g 变化规律与其恰好相反,同时也解释了图 3 中薄膜消光系数的变化规律。

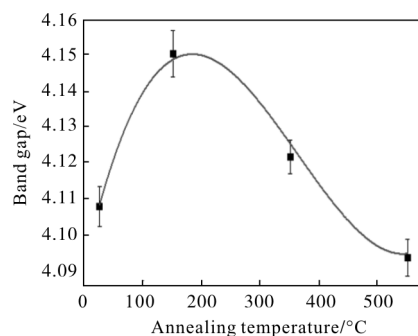


图 4 热处理温度对禁带宽度 E_g 的影响

Fig.4 Effect of annealing temperature on band gap E_g

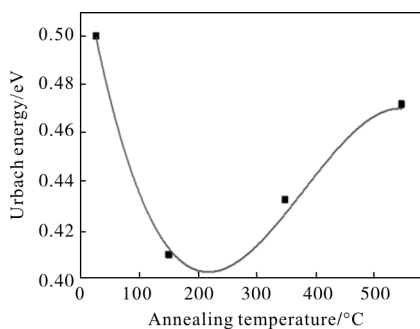


图 5 热处理温度对带尾能量 E_u 的影响

Fig.5 Effect of annealing temperature on Urbach energy E_u

3.3 Ta₂O₅ 薄膜的红外光谱特性及微结构振动特性

无定形结构的 Ta₂O₅ 薄膜在红外波段内的声子特性见表 1, 参考文献[11]中是采用磁控溅射方法在

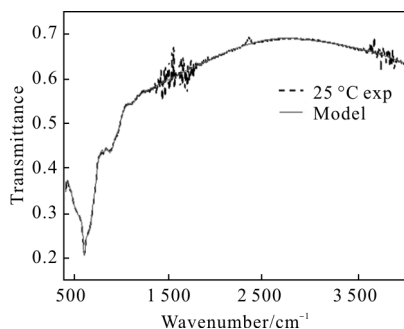
Si 基底上制备的 Ta₂O₅ 薄膜, 未经高温处理时为无定形结构, 参考文献[12]中的 Ta₂O₅ 薄膜则采用了多种方法制备(DIBS、PECVD、MS 等), 也均为无定形结构。其主要红外激活模式为 Ta-O-Ta 的伸缩振动^[11-12], 振动频率分别为 266、500、609、672、868 cm⁻¹; 而亚氧化物 Ta-O 的伸缩振动峰值位于 890 cm⁻¹。由图 6 中的红外透射率光谱可发现, 在 400~1 000 cm⁻¹ 之间存在 Ta-O 的本征振动峰。

利用表征薄膜红外介电常数的方程(2)和方程(3), 参照参考文献[11]中报道的振动频率, 选择振子数量为 4 个, 对红外透射率光谱进行反演计算, 拟合结果与测试值的对比见图 6, 拟合的评价函数分别为 3.704、3.360、3.403 和 1.902, 反演计算得到的介电

表 1 Ta₂O₅ 薄膜介电常数方程系数拟合结果

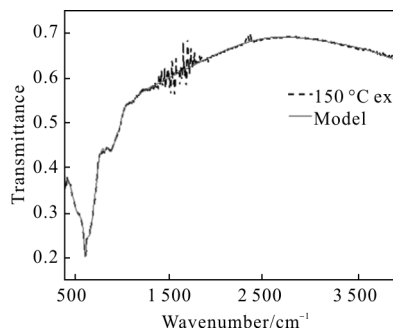
Tab.1 Fitting result of equation coefficient of Ta₂O₅ thin film dielectric constant

Fitted parameters	25°C	150°C	350°C	550°C	Reference[11]	Reference[12]
ω_1	279.6±26.9	279.6±26.9	279.6±26.9	279.6±26.9	266	/
A1	26.578±7.01	11.559±3.51	21.104±5.39	6.09±0.897	/	/
B1	155.41±50.7	243.81±98.4	154.62±22.4	355.62±124	188	/
ω_2	521.84±10.4	532.8±8.58	515.87±7.1	525.81±4.68	500	510
A2	7.13±0.28	6.45±1.43	7.21±0.17	4.70±1.24	/	/
B2	200.52±68	163.49±51.6	181.69±37.4	141.11±17.3	112	/
ω_3	650.77±4.29	649.54±4.7	648.55±4.41	645.35±2.46	609	650
A3	6.24±2.06	7.02±1.48	7.63±1.28	7.09±0.39	/	/
B3	107.33±12.6	107.76±6.22	113.42±6.54	113.73±3.11	88	/
ω_4	851.4±11.6	845.34±3.94	859.31±5.29	870.46±5.92	868	890
A4	0.98±0.06	0.99±0.04	0.95±0.04	0.85±0.03	/	/
B4	213.35±18.4	223.92±8.57	222.25±12.1	220.99±10.3	113	/
MSE	3.704	3.360	3.403	1.902		



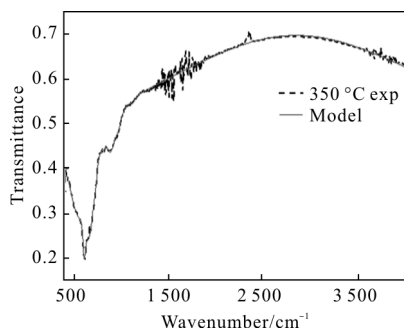
(a) 未处理的薄膜红外光谱特性

(a) Infrared spectral characteristic of thin film without annealing



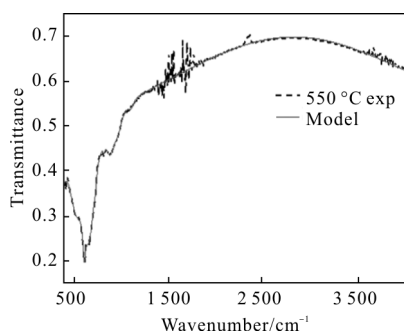
(b) 150°C 热处理后的红外光谱特性

(b) Infrared spectral characteristic after 150°C annealing



(c) 350 °C 热处理后的薄膜红外光谱特性

(c) Infrared spectral characteristic after 350°C annealing



(d) 550 °C 热处理后的红外光谱特性

(d) Infrared spectral characteristic after 550°C annealing

图 6 不同温度热处理后的红外透射率光谱反演拟合计算

Fig.6 Inversion fitting calculation of infrared transmittance spectrum after annealing of different temperature

常数方程系数见表 1。薄膜介电常数的实部和虚部分别见图 7 和图 8。

Ta₂O₅ 块体材料有无定形、低温形态晶体(斜方相和立方相)和高温形态晶体等三种结构,晶体形态结构的转化温度为 1 630 K。Ta₂O₅ 薄膜的结构没有块体材料的丰富,一般为无定形结构,但在制备过程中,通过提高基板温度的方法有可能制备出低温结晶结构的 Ta₂O₅ 薄膜。由表 1 的结果可看出,Ta₂O₅

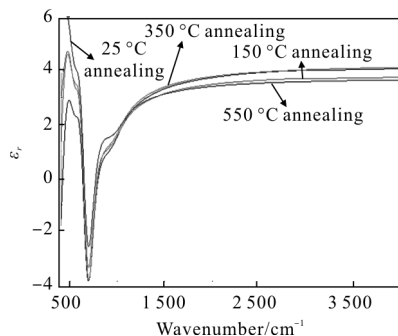


图 7 Ta₂O₅ 薄膜介电常数实部

Fig.7 Real part of Ta₂O₅ thin film dielectric constant

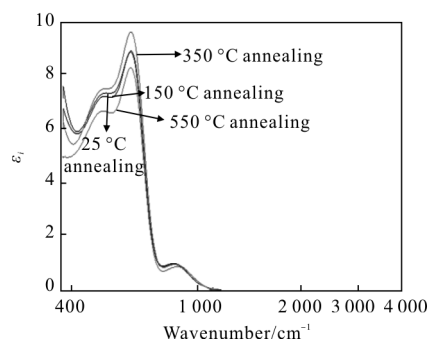


图 8 Ta₂O₅ 薄膜介电常数虚部

Fig.8 Imaginary part of Ta₂O₅ thin film dielectric constant

薄膜的 4 个振动峰的带宽较宽,这主要是由于无定形结构造成的,且在热处理后也未出现结晶结构,这一点在笔者等的前期研究中的 X 射线衍射谱中已经证实^[7]。振动峰 ω_4 表征了 Ta₂O₅ 薄膜的亚氧化物振动特性,说明存在一定的化学计量比缺陷,这种缺陷引起的薄膜透明区吸收在 10⁻⁷~10⁻⁵ 量级之间,在 X 射线光电子能谱测试中,这种低含量的化学计量比缺失无法测得^[7]。

从图 6 反演计算得到的介电常数结果分析:(1)在远离振动吸收的高频位置,随着热处理温度的增加,介电常数实部先下降再增加然后又下降,没有明显的规律性,而虚部的变化并不显著;(2)在波数小于 1 000 cm⁻¹ 的波数范围内,从介电常数虚部来看,振动强度随着热处理温度增加而先增加后下降,介电常数的实部随着热处理温度增加而逐渐增加。参考文献 [11] 采用磁控溅射的方式制备了 Ta₂O₅ 薄膜,文中与该文献中的无定形 Ta₂O₅ 薄膜相比,除了亚氧化钽氧化物比文献值低以外,其余振动频率均比文献给出的结果高;参考文献[12]则采用了电子束蒸发离子辅助、磁控溅射、双离子束溅射和等离子增强化学气相沉积技术分别制备了 Ta₂O₅ 薄膜,与参考文献[12]制备的 Ta₂O₅ 薄膜相比,亚氧化钽氧化物振动频率仍小于文献值,在 650 cm⁻¹ 处振动频率基本一致,而在 510 cm⁻¹ 处振动频率大于文献中给出的结果。

红外振动频率出现频移是量子效应、表面效应和晶体场效应等综合影响的结果。文中 Ta₂O₅ 薄膜在热处理作用下振动频率出现蓝移,根据目前对纳米材料吸收谱变化机制研究的结果,其可能存在的两种效应:一是薄膜中的量子效应,另一个是悬挂键

的表面效应,但其中的物理机制仍不明确,解释振动谱的频移现象也是目前金属氧化物薄膜红外吸收光谱研究的难题。

4 结论

文中详细研究了离子束溅射制备的 Ta_2O_5 薄膜在热处理后光学特性的变化规律,主要针对紫外到近红外波段的折射率和消光系数、红外波段的介电常数进行了研究。在近紫外波段的光学常数上,随着热处理温度的增加出现消光系数变化的温度拐点,这个临界点在 $150\sim 350^\circ C$ 之间;禁带宽度和带尾能量的变化规律相反,可认为薄膜的消光系数的转化与其禁带宽度和带尾能量相关,说明热处理能够减少 Ta_2O_5 薄膜的缺陷态密度,进而降低薄膜的消光系数。红外波段的光学吸收与薄膜的振动特性相关,通过对红外波段的振动区域特性的分析,发现了具有亚氧化物薄膜结构的存在。关于热处理对振动频率产生的频移现象仍需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Detlev Ristau, Tobias Gross. Ion beam sputter coatings for laser technology[C]//SPIE, 2005, 5963: 596313.
- [2] Yoon S G, Kanga S M, Junga W S, et al. Effect of assist ion beam voltage on intrinsic stress and optical properties of Ta_2O_5 thin films deposited by dual ion beam sputtering[J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(11): 3582-3585.
- [3] 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.
- [4] Yoon S G, Kang S M, Yoon D H. Post-annealing effects on the structural properties and residual stress of Ta_2O_5 thin films deposited by ion beam sputtering [J]. *Journal of Optoelectronics & Advanced Materials*, 2007, 9(5): 1246-1249.
- [5] Masse J P, Szymanowski H, Zabeida O, et al. Stability and effect of annealing on the optical properties of plasma-deposited Ta_2O_5 , and Nb_2O_5 , films [J]. *Thin Solid Films*, 2006, 515(4): 1674-1682.
- [6] Chandra S V J, Rao G M, Uthanna S. Heat treatment induced structural and optical properties of rf magnetron sputtered tantalum oxide films [J]. *Crystal Research & Technology*, 2007, 42(3): 290-294.
- [7] Liu Huasong, Jiang Chenghui, Wang Lishuan, et al. Effects of annealing on properties of Ta_2O_5 thin films deposited by ion beam sputtering [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2645-2651. (in Chinese)
刘华松, 姜承慧, 王利栓, 等. 热处理对离子束溅射 Ta_2O_5 薄膜特性的影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 2645-2651.
- [8] 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.
- [9] Liu Huasong, Ji Yiqin, Zhang Feng, et al. Dispersive properties of optical constants of some metallic oxide thin films in the near infrared regions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0831003. (in Chinese)
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.
- [10] Ji Yiqin, Jiang Yugang, Liu Huasong, et al. Analysis on effects of thermal treatment on structural characteristic of ion beam sputtering SiO_2 films [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 418-422. (in Chinese)
季一勤, 姜玉刚, 刘华松, 等. 热处理对离子束溅射 SiO_2 薄膜结构特性的影响分析 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(2): 418-422.
- [11] Bright T J, Watjen J I, Zhang Z M, et al. Infrared optical properties of amorphous and nanocrystalline Ta_2O_5 thin films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(8): 083515.
- [12] Klemberg-Sapieha J E, Oberste-Berghaus J, Martinu L, et al. Mechanical characteristics of optical coatings prepared by various techniques: a comparative study.[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2670-2679.