

Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜等离子体环境稳定性研究

李钱陶, 李 定, 王 潺, 熊长新, 杨长城

(华中光电技术研究所-武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430223)

摘要: 利用射频激励电容耦合等离子体放电装置产生等离子体, 分别采用氧、空气、氩、氖等离子体对 Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜进行处理, 试验研究了等离子体气压和等离子体种类对 Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜光学损耗的影响。通过对比实验、能谱、光电子能谱分析测试等技术手段, 对 Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜在等离子体环境下出现的损耗变化现象、机理进行了探讨。Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜经氧等离子体处理后的损耗变化量最大, 达到了 15 ppm(1 ppm=1×10⁻⁶), 为另 3 种等离子体处理后损耗变化量的 2~4 倍。定位出了 Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜等离子体环境下产生吸收具体膜层为最外层 2LAl₂O₃, 发现了 2LAl₂O₃ 在氧、氩等离子体作用下吸收损耗在一定程度上产生可逆变化的现象, 结合 XPS 分析, 对这一可逆现象从薄膜中游离 O、Ar 与等离子体中粒子之间相互作用产生缺陷等角度进行了探讨。提出了进一步提升 Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜等离子体环境稳定性的技术措施。

关键词: 激光陀螺反射镜; 光学吸收; 等离子体; 三氧化二铝; 五氧化二钽

中图分类号: O484.1⁺1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200064

Study on stability of Ta₂O₅/Al₂O₃ laser gyro mirrors exposed in plasma

Li Qiantao, Li Ding, Wang Chan, Xiong Changxin, Yang Changcheng

(Huazhong Institute of Electro-Optics-Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430223, China)

Abstract: Ta₂O₅/Al₂O₃ laser gyro mirrors have been exposed in oxygen, air, argon and neon plasma respectively. Plasma was generated by capacity coupling Radio Frequency (RF) discharge technology. The effect of plasma pressure, plasma exposing time and plasma type on optical loss of Ta₂O₅/Al₂O₃ laser gyro mirrors was studied. The phenomenon and mechanism, for the optical loss change of Ta₂O₅/Al₂O₃ laser gyro mirrors was analyzed and discussed, by using comparing experiments, Energy Disperse Spectroscopy (EDS) and X-ray photo-electron spectroscopy (XPS). Ta₂O₅/Al₂O₃ laser gyro mirrors exposed in oxygen showed biggest total loss, which arrived 15 ppm (1 ppm=1×10⁻⁶). The value was 2 to 4 times of Ta₂O₅/Al₂O₃ laser gyro mirrors exposing in air, Ne and Ar plasma. The total loss changing was caused by the absorption of outermost 2LAl₂O₃ layer in Ta₂O₅/Al₂O₃ laser gyro mirrors. When Ta₂O₅/Al₂O₃ laser gyro mirrors exposing O₂ plasma and Ar plasma alternately, the partial reversible changing phenomenon of 2LAl₂O₃ layer's absorption loss was found. The partial reversible changing phenomenon was discussed by

收稿日期: 2020-04-01; 修订日期: 2020-05-09

基金项目: 航天科技创新基金(SAST2016076)

作者简介: 李钱陶(1978-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光学薄膜等方面的研究。Email: liqiantao@hotmail.com

XPS analyzing. The results show that the absorption loss changing is related to the exchanging of free oxygen and argon, occurred between outermost $2L\text{Al}_2\text{O}_3$ layer and plasma. Some measures and suggestions are proposed to improve the stability of $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ laser gyro mirrors exposed in plasma.

Key words: laser gyro mirror; optical absorption; plasma; aluminum (Al_2O_3); tantalum pentoxide (Ta_2O_5)

0 引言

激光陀螺在工作过程中,反射镜一直暴露在等离子体及激光辐照下,造成表面低损耗高反射薄膜损耗增大、反射率降低,影响陀螺输出功率和噪声,严重时可导致激光陀螺不能正常工作^[1-3]。等离子体可导致激光陀螺反射镜寿命降低并形成较大的光学损耗(≥ 100 ppm(1 ppm= 1×10^{-6}))^[2]。在激光陀螺制造过程中,真空处理工艺需要采用不同工艺气体对谐振腔进行等离子体放电处理,这一处理过程亦会导致反射镜损耗增大。为提高激光陀螺反射镜在等离子体环境的稳定性,研究反射镜在等离子体环境下光学损耗增大的现象、规律及机理十分必要。

激光陀螺反射镜在等离子体环境下稳定性问题,一直是激光陀螺研究领域的热点与难点。激光陀螺反射镜等离子体稳定性与反射镜膜层材料、制备工艺及陀螺工作条件等密切相关。激光陀螺反射镜膜系中常见高折射率材料有 Ta_2O_5 、 ZrO_2 、 TiO_2 等,低折射率材料有 SiO_2 、 Al_2O_3 等^[2,4-5]。现有文献多对 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 激光陀螺反射镜的等离子体稳定性进行研究报道^[1-2,6]。对于 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光陀螺反射镜等离子体稳定性的研究鲜见报道。

文中以 Ta_2O_5 为高折射率材料、 Al_2O_3 为低折射率材料,采用规整膜系设计,使用离子束溅射技术在超光滑石英玻璃表面制备了 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光陀螺低损耗高反射薄膜和对照组高反射薄膜。采用射频激励等等离子体放电装置模拟等等离子体环境,研究分析等等离子体放电气体种类、气压等对 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光陀螺反射镜总损耗的影响,采用等离子体处理比对实验、能谱、光电子能谱分析测试等技术手段,对 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光陀螺反射镜在等离子体环境下出现的损耗变化现象、机理进行了探讨。研究结果对于进一步提升 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光陀螺反射镜性能、优化激光陀螺真空处理工艺有重要指导意义。

1 实验

实验样品均采用规整膜系结构设计、离子束溅射工艺镀制。激光陀螺反射镜组(A~D组)样品膜系结构为 $\text{Sub}|H(LH)^n|2L|\text{Air}$,设计中心波长(λ_0)为 632.8 nm,其中,Sub 为超光滑抛光石英玻璃(表面粗糙度 $\text{rms} \leq 0.1$ nm)、H 为 $\lambda_0/4$ 光学厚度的 Ta_2O_5 、L 为 $\lambda_0/4$ 光学厚度的 Al_2O_3 、n 为周期数。对组(E组)样品膜系结构为 $\text{Sub}|H(LH)^n|\text{Air}$,与 A~D 组相比,没有镀制最外面的半波保护层 2L。基片均为超光滑抛光的石英玻璃($\text{rms} \leq 0.1$ nm),A~D 组样品为同一批次镀膜,E 组采用与 A~D 组相同的工艺参数。

采用电容耦合射频激励等等离子体放电装置,对所镀制的样品分别采用氧气、氦气、氩气、空气等等离子体进行放电处理,等等离子体放电处理工艺条件为气压 20~100 Pa、气体流量 20 sccm、等等离子体功率 150 W,每次等等离子体处理时间为 1 hrs。每次等等离子体放电处理前后均采用光腔衰荡法检测样品的反射率,光腔衰荡法测试仪器的重复性误差小于 ± 0.2 ppm(待测样品反射率 $\geq 99.99\%$),每次测量时重复测量 3 次,取 3 次测量的平均值为样品的反射率,通过计算反射率的变化值得出样品光学总损耗的变化量,采用总损耗变化量来表征反射镜在等离子体环境下的稳定性。样品编号与等子离体处理参数如表 1 所示。

A1~A3、E1 组样品在完成成表 1 试验后,再进行了 3 次氩等等离子体处理试验,氩等等离子体处理具体参数同 D 组样品等等离子体处理参数一致。

采用 Oxford X-Max50 型电子能谱仪分析样品表面元素组成,测试条件为:加速电压 15 kV,样本工作电流 1.0 nA。

采用 Therm Fisher ESCALAB 250Xi 型 X-射线光电子能谱仪对样品表面进行扫描测试,靶源为 $\text{Al K}\alpha$,扫描区域为 40 μm ,窄谱扫描步长为 0.05 eV。

表 1 样品编号与等离子体处理参数

Tab.1 Sample No. and plasma exposing parameters

Sample type	Sample No.	Gas	Gas flow/sccm	Pressure/Pa	RF. power/W	Exposing times
RLG mirrors	A1	O ₂	20	2	50	3
	A2	O ₂	20	50	50	3
	A3	O ₂	20	100	50	3
	B	Ne	20	50	50	3
	C	Air	20	50	50	3
	D	Ar	20	50	50	3
Comparing samples	E1	O ₂	20	50	50	3
	E2	Ne	20	50	50	3
	E3	Air	20	50	50	3
	E4	Ar	20	50	50	3

2 实验结果

2.1 等离子体处理参数的影响

图 1 为等离子体种类对激光陀螺反射镜组样品 (A2、B~D) 总损耗的影响。由图 1 所示, 在等离子体处理前, A2、B、C、D 组样品的初始损耗均在 5.3、5.4、4.8、5.1 ppm, 处于同一水平, 在分别经过氧气、氖气、空气和氩气的等离子体处理试验后, 样品已达到稳定状态, A2、B、C、D 组样品总损耗分别为 20.3、9.4、10.8、12.7 ppm。经过氧等离子体处理的反射镜总损耗变化量最大, 达到了 15 ppm, 是其他三种等离子体处理后反射镜总损耗变化量的 2~4 倍。

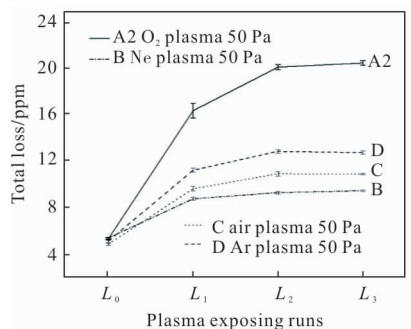


图 1 等离子体种类对激光陀螺反射镜组样品总损耗的影响

Fig.1 Influence of plasma type on total loss of RLG mirror samples

图 2 为氧等离子体气压对激光陀螺反射镜组样品 (A1、A2、A3) 总损耗的影响。由图 2 所示, A1、A2、

A3 组样品氧等离子体气压分别为 20、50、100 Pa, 它们达到总损耗稳定状态分别需经过 1 次、2 次和 3 次等离子体处理, 最终稳定状态下 A1、A2、A3 组样品的总损耗均稳定在 20.3~21.1 ppm 之间。文中所采用的等离子体处理参数范围内, 在等离子体处理开始后, 随着等离子体放电气压的降低, 样品达到稳定状态所需的时间越少。经过试验, 其他激光陀螺反射镜组别的样品也存在类似现象。根据射频激励电容耦合等离子体放电基本原理^[7], 在相同的电容结构和激励功率下, 放电气压越低, 样品所处的阴极负偏压越大, 等离子体中粒子与样品相互作用时的能量越大, 从某种程度上说, 样品在等离子体作用时, 在总损耗值稳定之前, 样品总损耗变化速率与等离子体能量成正比。

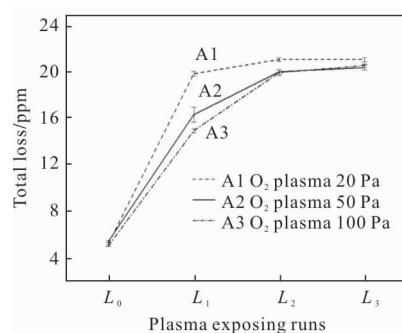


图 2 氧等离子体气压对激光陀螺反射镜组样品总损耗的影响

Fig.2 Influence of oxygen plasma pressure on total loss of RLG mirror samples

在 3 次氧等离子体处理基础上,激光陀螺反射组样品 A1、A2、A3 再经过 3 次氩等离子体处理,具体结果如表 2 所示。经过氩等离子体处理后,A1、

A2 和 A3 的总损耗由 20.3~21.1 ppm 下降至 12.4~13.3 ppm,与样品 D 经 3 次氩等离子体处理后总损耗值(12.7 ppm)一致。

表 2 A1、A2、A3 组样品再经过氩等离子体处理后的总损耗实测结果

Tab.2 Measured optical loss of A1, A2 and A3 after extra processing Ar plasma

Sample No.	L0/ppm	L3/ppm	L4/ppm	L5/ppm	L6/ppm
	No plasma exposing	3rd O ₂ plasma exposing	1st extra Ar plasma exposing	2nd extra Ar plasma exposing	3rd extra Ar plasma exposing
A1	5.1	21.1	12.3	12.4	12.8
A2	5.3	20.3	11.4	12.3	12.4
A3	4.9	20.6	12.2	13.7	13.3

2.2 膜系结构的影响

图 3 为等离子体种类对对照组样品 (E1~E4)总损耗的影响。由图 3 可知,E1、E2、E3、E4 分别在 O₂、Ne、Air、Ar 等离子体处理后,各样品总损耗波动变化值均小于 1 ppm,相对于 A~D 组样品来讲,E 组

的等离子体稳定性极佳。对比膜系结构,E 组样品最外层为 Ta₂O₅。样品 E1 在进行额外进行了 3 次氩等离子体处理后,未见样品总损耗明显变化。这一结果表明,激光陀螺反射镜组样品(A~D)在等离子体环境下处理后总损耗的变化主要由最外层 2L Al₂O₃ 引起。

3 讨论与分析

3.1 总损耗变化原因分析

激光陀螺反射镜组 A~D 和对照组 E 样品在等离子体作用下,总损耗变化的主要差异来自于 A~D 组样品膜系最外面 2L Al₂O₃。根据光学薄膜干涉原理,A~D 组样品膜系最外面 2L 半波层不对反射率产生贡献,反射波堆的反射率不会变化,引起 A~D 组样品 2L Al₂O₃ 损耗变化的可能原因有吸收和散射。

测试等离子体处理前后样品的表面粗糙度,未发现表面粗糙度有明显变化,说明等离子体处理后,由散射引起的损耗变化可以排除。实验发现,A~D 组样品在等离子体处理后,再经过热处理,A~D 组样品的反射率值均可以恢复至初始水平,确认 A~D 组样品在等离子体环境下的总损耗增加的主因是 2L Al₂O₃ 的微弱吸收。

3.2 总损耗变化机理探讨

固体光吸收的根本机制是光与固体中存在的电子、激子、晶格振动、杂质和缺陷等相互作用的过程。单晶 Al₂O₃ 中存在的 F⁺、F、F⁻等缺陷在 460 nm (2.7 eV)、354 nm (3.5 eV)、258 nm(4.8 eV)处存在

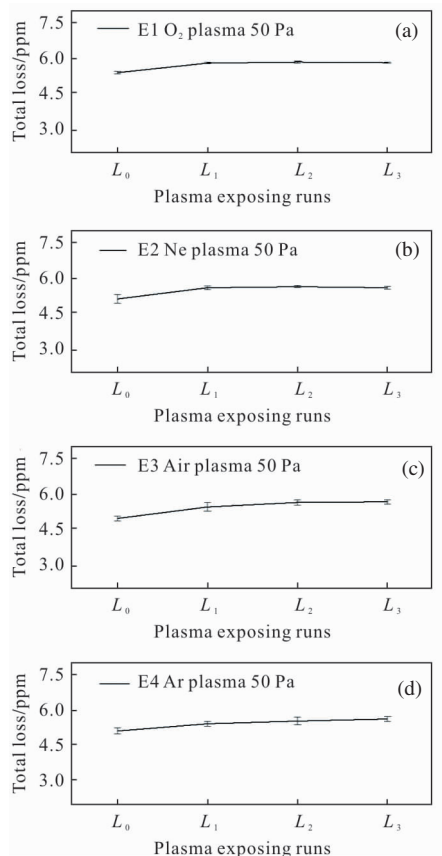


图 3 等离子体种类对对照组样品总损耗的影响
Fig.3 Influence of plasma type on total loss of comparing samples

吸收峰^[8]。对于非晶态 Al_2O_3 和多晶态 Al_2O_3 , 在高能射线辐照下, 会形成 F^+ , F , F^- 等色心而导致吸收^[9-11]。这些色心的形成与杂质、空位等缺陷直接相关。下面结合实验结果, 从等离子体处理过程中产生的射线辐射、离子轰击效应两方面, 对 $2\text{LAl}_2\text{O}_3$ 在 632.8 nm 处吸收损耗变化现象进行初步探讨。

根据参考文献[12]报道, 常见几种气体激发形成等离子体所释放的主要发射波长及粒子能量如表 3 所示。由表 3 可知, 氧气激发后形成等离子体的辐射能量约 9.5 eV, 这一数值与 N_2 、Ar 放电后形成等离子体的辐射能量接近, 小于 Ne 放电后形成等离子体的辐射能量 16.7 eV。由图 1 所示, 氧等离子体对 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 反射镜的损耗变化量影响最大, 等离子体中射线辐射能量与 $2\text{LAl}_2\text{O}_3$ 的吸收损耗变化没有显示出正比关系, 说明射线辐射不是引起不同气体等离子体作用下反射镜损耗变化量不一致的主要因素。

表3 O_2 、 N_2 、Ne、Ar 等离子体放电发射波长及能量
Tab.3 Emission wavelength and energy of O_2 , N_2 , Ne and Ar plasma

Plasma type	Emission wavelength/nm	Energy/eV
O_2	130.5	9.5
N_2	120.0	10.3
	149.2	8.3
Ne	73.59	16.8
	74.37	16.7
Ar	104.82	11.8
	106.66	11.6

当反射镜置于等离子体中时, 受等离子体的固有特性影响, 反射镜表面形成负偏压, 等离子体中的正离子将在此负偏压下撞击反射镜表面, 反射镜表面膜层存在微观结构上的空位等缺陷给了这些粒子空间, 等离子体中的离子将被交换或注入至膜层中, 这一点在激光陀螺反射镜中已被证实, 激光陀螺反射镜经使用后, 反射镜膜层中检测出了 Ne 的存在^[3]。离子束溅射工艺过程中, Ar 为主溅射气体而 O 为反应氧化气体, 存在部分游离 Ar 和未形成牢固化学键合的游离 O (O_2 、 O_3 等非桥氧) 被包裹至薄膜中, 造成薄膜中“氧过剩”和“氧空位”两种缺陷现象同时存在^[13]。图 4 为未经等离子体处理的激光陀螺

反射镜组样品能谱图。由图 4 所示, 检测出的 Ta、Al 元素来自于 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜, Si 来源于石英基底, C 来源于表面吸附污染, Ar 为镀膜工艺过程中掺入 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 薄膜中的杂质, 能谱检测结果证实了游离 Ar 的存在。

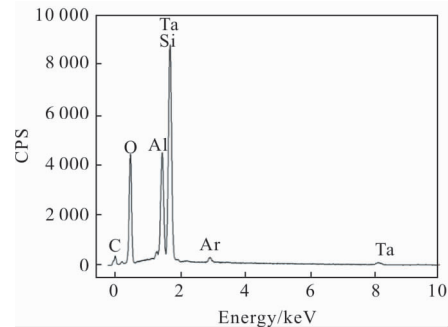


图 4 未经等离子体处理的 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光陀螺反射镜能谱图
Fig.4 EDS of $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ laser gyro mirrors without plasma exposing

图 5、6 分别为激光陀螺反射镜组样品(A2、D)在等离子体处理前后 XPS O1S 峰窄谱图。未进行等离子体处理时, A2、D 两组样品 O1S 峰分别位于 531.18、531.23 eV, 一致性较好。经过 3 次氧等离子体处理后, A2 组样品的 O1S 峰向低能方向偏移至 530.83 eV。再经过 3 次氩等离子体处理后, A2 组样品的 O1S 峰向高能方向偏移至 531.83 eV。D 组样品经过氩等离子体处理后, O1S 峰由 531.23 eV 偏移到 531.78 eV, 此时的 D 组样品与 A2 组样品依次经过 3 次氧等离子体和 3 次氩等离子体处理后状态一致(531.83 eV)。通过 XPS 图谱定量计算, 未经等离子体处理时 A2 组样品 O/Al 原子比为 1.505, 经过 3 次氧等离子体处理后样品 O/Al 原子比上升为 1.552, 再经过 3 次氩等离子体处理后样品 O/Si 原子比下降为 1.491。从原子比的计算结果来看, 薄膜中的游离 Ar、O 与等离子体中 Ar、O 等粒子存在置换现象。根据 XPS 化学位移基本原理, $2\text{L Al}_2\text{O}_3$ 中游离 O 处于低能峰位置, 处于化合物状态桥氧处于高能峰位置^[14-15]。A2 组样品经过氧等离子体处理后, $2\text{L Al}_2\text{O}_3$ 中的游离 Ar 与等离子体中的 O 产生的置换, 造成薄膜中的游离氧含量增加, O1S 峰向低能方向偏移; D 组样品和已进行氧等离子体处理过的 A2 样品, 再进行氩等离子体处理后, $2\text{L Al}_2\text{O}_3$ 中的游离 O 与等离子体中 Ar 产生的置换, 造成薄膜

中的游离氧含量减少, O1S 峰向高能方向偏移。XPS 原子比分析结果显示, 氧等离子体处理后, 薄膜中的“氧过剩”现象相对明显; 而氩等离子体处理后, 薄膜中的“氧空位”现象相对明显。这说明等离子体处理导致了薄膜内部缺陷的变化, 缺陷的变化引起光学吸收等性能的变化。

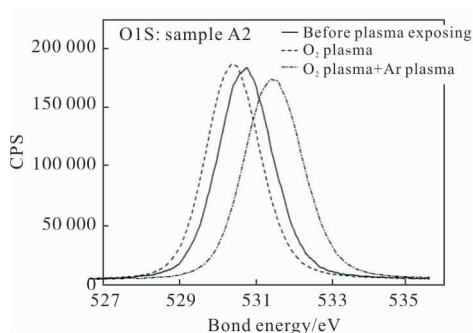


图 5 等离子体处理前后样品 A2 表面 XPS O1S 谱图
Fig.5 XPS O1S spectra of sample A2 before and after different plasma exposing

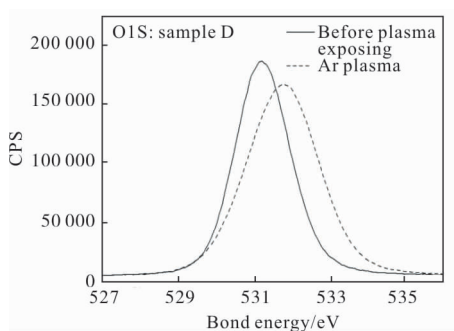


图 6 Ar 等离子处理前后样品 D 表面 XPS O1S 谱图
Fig.6 XPS O1S spectra of sample D before and after Ar plasma exposing

图 7 为对照组样品 E1 在等离子体处理前后 XPS O1S 峰窄谱图。由图 7 所示, 在依次进行氧、氩等离子体处理后, Ta₂O₅ O1s 峰在化学位移变化不明显。E1 组样品未进行等离子体处理时 O/Ta 原子比为 2.506, 经过 3 次氧等离子体处理后 O/Ta 原子比上升为 2.586, 再经过 3 次氩等离子体处理后 O/Ta 原子比下降为 2.494。这一结果显示, Ta₂O₅ 在等离子体处理过程存在 O、Ar 相互置换效应。等离子体处理后, 未能识别出 Ta₂O₅ 在 632.8 nm 处的吸收, 这可能与 Ta₂O₅ 在等离子体作用下形成缺陷的吸收带远离 632.8 nm 有关。

在依次经历氧、氩等离子体处理后, Ta₂O₅/Al₂O₃

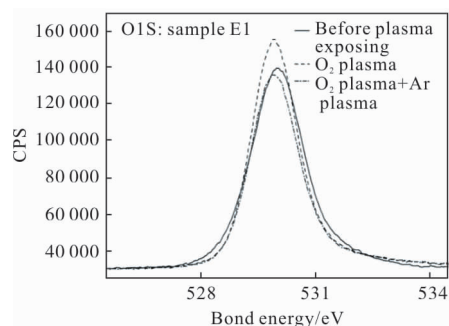


图 7 等离子体处理前后 E1 组样品表面 XPS O1S 谱图
Fig.7 XPS O1S spectra of sample E1 before and after plasma exposing

激光陀螺反射镜组样品总损耗和 O1S 峰的变化在一定程度上可逆, 说明 2LaI₂O₃ 中的游离 O、Ar 与等离子体中的粒子存在相互置换, 导致缺陷种类、浓度的可逆变化。在同种等离子体多次处理后, 2LaI₂O₃ 内部所产生的缺陷浓度最终趋于稳定, 从而等离子体处理后 Ta₂O₅/Al₂O₃ 反射镜总损耗值趋于稳定。不同气体等离子体产生的缺陷种类、缺陷浓度不一致, 导致 2LaI₂O₃ 吸收值不一致, 造成反射镜总损耗值的不一致。2LaI₂O₃ 在等离子体作下吸收损耗的深层次机理需要进一步研究。从进一步提升激光陀螺反射镜等离子体环境下稳定性角度, 在镀膜工艺上需要进一步减少 2LaI₂O₃ 内部游离 O、Ar 等含量, 在激光陀螺真空处理工艺选择合适的工艺气体和工艺参数。

4 结论

文中研究了 Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜在等离子体环境下的稳定性, 实验研究了氧、空气、氩、氟等气体等离子体作用下 Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜总损耗变化现象, 对 Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜在等离子体环境下出现的损耗变化原因、机理进行了探讨。结果表明:

(1) Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜经过文中所述的等离子体处理后, 总损耗发生不同程度变化, 氧等离子体处理后的损耗变化量达 15 ppm, 为空气、氩、氟等离子体导致损耗变化量的 2~4 倍。

(2) 在文中所述的参数范围内, Ta₂O₅/Al₂O₃ 激光陀螺反射镜在等离子体环境下损耗变化的大小主要与等离子体种类有关, 等离子体处理功率、气压等参

数仅影响反射镜损耗的变化速率,不影响最终损耗变化值。

(3) $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ 激光陀螺反射镜在等离子体处理后损耗发生变化的主要原因为反射镜最外层 $2\text{L Al}_2\text{O}_3$ 的吸收所致。

(4) $2\text{L Al}_2\text{O}_3$ 在等离子体作用下,内部形成缺陷并导致吸收。 $2\text{L Al}_2\text{O}_3$ 在氧、氩等离子体作用下吸收损耗可产生一定程度上可逆变化,这一可逆现象与 $2\text{L Al}_2\text{O}_3$ 中游离 O、Ar 与等离子体中粒子之间相互作用后形成的缺陷状态有关。

参考文献:

- [1] Zhai Liang, Wang Tao, Bai Manshe, et al. Real-time loss measurement of reflecting mirrors applied in plasma environment [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0712001. (in Chinese)
翟亮, 王涛, 白满社, 等. 应用于等离子体环境的反射镜损耗的实时测量[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0712001.
- [2] Cole, B E. UV and plasma stable high-reflectance multilayer dielectric mirror: EP, 0372438A2[P]. 1989.
- [3] Wang Peng. Theoretical investigation of the loss of high-reflection films [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
王鹏. 高反射膜损耗的理论研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [4] Hyun Ju Cho, Young Zip Jeon. Design and fabrication of super mirrors on the Zerodur substrate [C]//Proc of SPIE, 2010, 7786: 778611.
- [5] Lu S, Sun M J, Stewart A F, et al. Ultraviolet resistive coated mirror and method of fabrication: US, 5513039 [P]. 1996.
- [6] Ji Yiqin, Liu Huasong. Silicon Dioxide Optical Thin Film Material [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2018. (in Chinese)
季一勤, 刘华松. 二氧化硅光学薄膜材料 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
- [7] Robertson J. Diamond-like amorphous carbon[J]. *Mater Sci and Eng R*, 2002, 37: 129-281.
- [8] Gutierrez G, Taga A, Johansson B, et al. Theoretical structure determination of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [J]. *Physical Review B*, 2002, 65: 201-204.
- [9] Thielsch R, Gatto A, Heber J, et al. A comparative study of the UV optical and structural properties of SiO_2 , Al_2O_3 , and HfO_2 single layers deposited by reactive evaporation, ion-assisted deposition and plasma ion beam[J]. *Thin Solid Films*, 2002, 410(1-2): 86-93.
- [10] Nakamra R, Ishimaru M, Yasuda H. Atomic rearrangements in amorphous Al_2O_3 under electron-beam irradiation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(6): 064312.
- [11] Heber J, Mühlhig C, Triebel W, et al. Deep UV laser induced luminescence in oxide thinfilms [J]. *Applied Physics A (Materials Science Processing)*, 2002, 75(5): 637-640.
- [12] Liu Yanhong, Zhao Yu, Wang Meitian, et al. Two modes of devices damage during plasma processing[J]. *Semiconductor Technology*, 2002, 27(5): 69-70. (in Chinese)
刘艳红, 赵宇, 王美田, 等. 等离子体加工对器件损伤的两种模式[J]. 半导体技术, 2002, 27(5): 69-70.
- [13] Liu Jinsheng. Ion Beam Deposition Film Technology and Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press. 2003. (in Chinese)
刘金声. 离子束沉积薄膜技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [14] Su Chunhui, Wen Xueheng, Duanmu Qingfeng, et al. Study on the structure of the Al_2O_3 polycrystalline transparent film material with XPS technology [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 1997, 26(3-4): 335-341. (in Chinese)
苏春辉, 温学恒, 端木庆峰, 等. Al_2O_3 透明多晶薄膜材料结构的 XPS 表征[J]. 人工晶体学报, 1997, 26(3-4): 335-341.
- [15] Guo Liwei, Zhu Yan, Dai Hongbin. Modern Methods of Material Analysis and Testing [M]. Beijing: Beijing University Press, 2014. (in Chinese)
郭立伟, 朱艳, 戴鸿滨. 现代材料分析测试方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.