

应用于等离子体环境的反射镜损耗的实时测量

翟 亮, 王 涛, 白满社, 左毅娟, 苏 宇, 刘 新, 陈 静, 朱良建

中航工业西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065

摘要 设计并搭建了一套反射镜损耗增量的实时测量系统, 实验得到反射镜损耗变化曲线。结果表明, 该系统能有效地监测反射镜损耗在等离子体环境中变化的过程, 并揭示损耗变化规律, 并发现实际损耗增量和与等离子体作用后的自然放置时间密切相关; 改变放电电流和腔体气压, 损耗增量幅度明显不同。测量结果为等离子体作用下反射镜损耗变化机理的研究提供了实验依据。

关键词 测量; 反射镜; 实时测量; 损耗; 等离子体; 气体放电

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0712001

Real-Time Loss Measurement of Reflecting Mirrors Applied in Plasma Environment

Zhai Liang, Wang Tao, Bai Manshe, Zuo Yijuan, Su Yu, Liu Xin, Chen Jing, Zhu Liangjian

AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract A new system for the real-time loss increment measurement of reflecting mirrors is designed and built, and the loss change curve of reflecting mirrors is gained. The results show that the system is capable of effectively monitoring the loss change process of reflecting mirrors in the plasma environment and can reveal the change law. The actual loss increment is closely related to the natural standing time after the interaction of reflectors with plasma. The curve amplitude of loss change is quite different when the discharging current and the cavity pressure change. These measurement results can provide an experimental evidence for the study of the loss change mechanism of reflectors under the action of plasma.

Key words measurement; reflecting mirror; real-time measurement; loss; plasma; gas discharge

OCIS codes 120.3940; 310.6860; 230.4040

1 引 言

反射镜薄膜作为高功率激光器、激光陀螺、引力波探测器等激光系统的关键元件之一, 其损耗普遍低于 100×10^{-6} ^[1-2]。由于激光系统在运行中受空间粒子、高功率激光、气体等离子体等影响, 反射镜的光学性能尤其是损耗性能可能有所改变^[3-5]。例如在激光陀螺应用中, 受阳极和阴极之间的直流高压放电激励, 环形谐振腔内的气体增益介质形成了等离子体, 朗缪尔流动效应使得等离子体在腔体内毛细孔中定向流动^[6]。这种流动使得等离子体与反射镜发生作用, 进而导致反射镜薄膜的损耗增加, 输出光功率降低, 陀螺的噪声极限增加^[7]。

国内外关于等离子体导致反射镜损耗增加的研究鲜有报道, 通常将等离子体作用前后的损耗差当作反射镜损耗增量的测量结果, 但作用过程中的损耗变化无从得知。监测损耗变化的过程, 发现损耗增加的规律, 对于进一步揭示等离子体导致损耗增加的机理, 提升反射镜耐等离子体轰击能力具有重要意义。本文设计并搭建了一套实时测量系统, 在气体放电产生的等离子体环境中能够监测反射镜的损耗增加过程, 发现反射镜损耗的变化规律。

收稿日期: 2017-01-04; **收到修改稿日期:** 2017-03-17

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1435208)、装备预研联合基金(6141B05090402)

作者简介: 翟 亮(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事薄膜检测技术方面的研究。E-mail: l_zhai@sina.com

2 测量系统设计与搭建

2.1 测量系统设计

目前,能精确测量 100×10^{-6} 以下损耗的唯一方法是光腔衰荡法^[8]。光腔衰荡法是通过测量光在一对高反腔镜形成的无源谐振腔内的衰荡时间来确定谐振腔内的总损耗,进而得到插入待测镜片的损耗。本文设计了可用于实时测量的实验腔体,利用待测高反镜和密封减反镜形成了测试通路,将腔体置于光腔衰荡损耗仪待测镜片位置,并采用多维的微调装置进行调节,使测试光在谐振腔内形成稳定振荡,测量腔体的总损耗,其原理如图 1 所示。

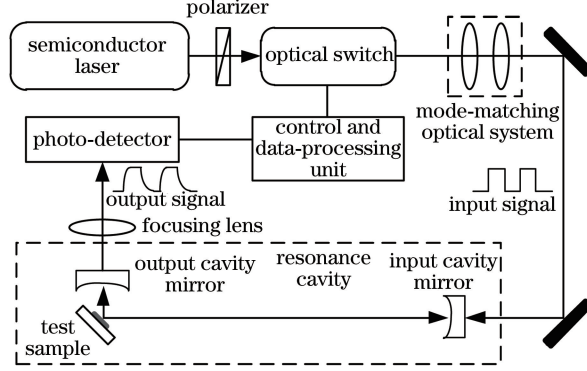


图 1 光腔衰荡损耗仪原理图

Fig. 1 Schematic diagram of cavity ring-down loss meter

在测量过程中,首先需使光腔衰荡损耗仪的两腔镜形成初始直腔(不插入待测元件),测量此时的初始衰荡时间 τ_0 并作为基准。激光在谐振腔中来回振荡,在输出腔镜上每发生一次反射,就会有微量的光透射出来。初始输出光强为 I_0 ,当光开关关断后,探测器采集到的输出光强信号可以表示为

$$I(t) \propto I_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau_0}\right), \quad (1)$$

式中 t 为放电持续时间,则初始衰荡时间 τ_0 可表示为

$$\tau_0 = \frac{L_0}{(c_0/n)(\alpha L_0 - \ln \sqrt{R_1 R_2})}, \quad (2)$$

式中 L_0 为初始直腔的腔长, n 和 α 分别为腔内介质的折射率和吸收系数, R_1 和 R_2 分别为两腔镜的反射率, c_0 为真空中的光速。当谐振腔内不存在吸收介质时,则 τ_0 只与腔长以及腔镜的反射率有关,即

$$\tau_0 = \frac{-L_0}{c \ln \sqrt{R_1 R_2}}, \quad (3)$$

式中 $c = c_0/n$ 。当仅插入待测反射镜时,反射镜和两腔镜组成折叠腔, L 为折叠腔的腔长,此时的衰荡时间 τ 为

$$\tau = \frac{-L}{c \ln(R_s \cdot \sqrt{R_1 R_2})}, \quad (4)$$

式中 R_s 为待测反射镜的反射率。根据(3)式和(4)式可求得

$$R_s = \exp\left(\frac{L_0}{c\tau_0} - \frac{L}{c\tau}\right). \quad (5)$$

因此高反镜的损耗为

$$k_1 = 1 - R_s. \quad (6)$$

腔体的总损耗来源还包含两个减反镜引起的散射和吸收损耗。根据光腔衰荡法原理,对于减反镜等表面镀有增透膜的高透射率样品,当其于光路垂直时,表面增透膜的剩余反射光仍可保留在谐振腔内振荡,因此不影响损耗测量结果^[9]。但当反射镜和两腔镜组成稳定谐振腔时,无法保证减反镜与光路严格垂直,会有部分剩余反射光经过若干次反射后逃逸出谐振腔而形成逃逸损耗。因此,减反镜的损耗包含逃逸损耗、散射和吸收损耗。

减反镜的基底材料会导致光程发生变化,(4)式的衰荡时间可修正为

$$\tau = \frac{L + (n_s - 1)d}{c(k_2 - \ln\sqrt{R_1 R_2})}, \quad (7)$$

式中 n_s 为减反镜的基底材料折射率, d 为减反镜的基底厚度, k_2 为减反射镜的损耗。因此, 损耗 k_2 可表示为

$$k_2 = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) + \frac{(n_s - 1)d}{c\tau}. \quad (8)$$

损耗仪测得未放电状态下的腔体的总损耗 $K_0 = k_1 + 2k_2$, 而放电状态下的总损耗表示为 $K(t)$, 其中 t 为放电持续时间。放电时减反镜不在等离子体作用的路径上, 因而损耗不受影响, 可认为腔体总损耗的增量全部由待测反射镜的损耗 $K(t)$ 贡献, 反射镜的损耗增量为 $[K(t) - K_0]$ 。

2.2 测量系统搭建

为了实时测量反射镜放电过程中的损耗, 借用了抖动激光陀螺的环形谐振腔^[10], 在谐振腔毛细孔放电通路外再形成一条测试通路; 为避免受放电通路的影响, 此测试通路与放电通路完全垂直, 如图 2 所示。减反镜上的增透膜与等离子体作用也会出现损耗增加的现象, 为此在减反镜和腔体之间设置垫块, 使得减反镜远离等离子体放电路径, 避免影响损耗测量结果。同时, 垫块可以将减反镜的入射角度调整为垂直入射, 大幅降低增透膜的镀制难度。减反镜基底为石英材料, 双面镀制增透膜。

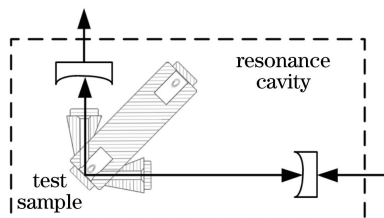


图 2 腔体置入损耗仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cavity placed into loss meter

根据光腔衰荡法原理, 测试光需在谐振腔内形成稳定振荡, 为此搭建了一套光路微调装置。为了避免影响损耗仪内原有光学器件, 该微调装置采用悬挂方式, 形成了以待测反射镜为中心的多轴调节, 测量系统装置如图 3 所示。

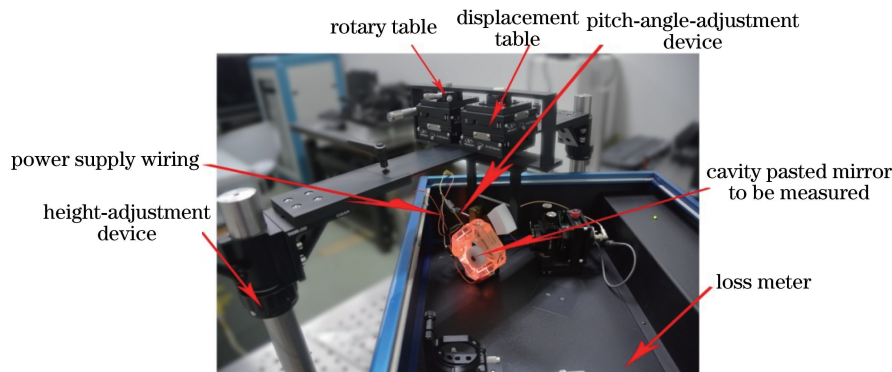


图 3 实时测量系统实物图

Fig. 3 Physical map of real-time measurement system

在测量时, 将待测镜片贴于腔体对应位置, 并利用真空处理通入放电气体介质, 腔体的阴极和阳极接入激光陀螺专用电源, 并固定于微调装置相应位置, 插入损耗仪后经过光路调节, 测得腔体的初始总损耗。点燃腔体和断开电源的全部过程, 该系统都可实时监控损耗的变化。

3 实 验

3.1 损耗变化曲线

所选取的反射镜采用离子溅射技术镀制了 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 膜系的高反膜,在 45° 斜入射下反射光谱中心波长为 632.8 nm ,放电气体为 600 Pa 氖气,放电电流选择为 1 mA 。图 4 为从开始放电到断开电源后 60 min 内完整过程的损耗增量曲线,其中 I 段为放电后的损耗上升阶段,II 段为断开电源后的损耗下降阶段。

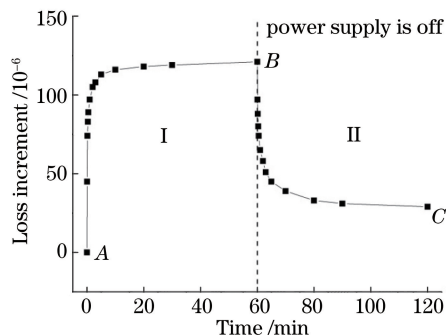


图 4 反射镜损耗增量随时间的变化

Fig. 4 Loss increment of reflecting mirrors versus time

从图中可以看出,反射镜在放电初期损耗增加很快,增速逐渐降低,在 60 min 前已趋于平缓;而下降过程类似,停止放电后损耗下降很快,降速逐渐降低,在 120 min 前趋于平缓。在传统认知中,放电过后的损耗增量只与放电能量和放电时间有关,并将放电前和放电后两静态点(相当于图中的 A 点和 C 点)之间的损耗差当作损耗增量。但此实验结果表明,实际的损耗增量与放电后的自然放置时间密切相关,而且实际的损耗增量(相当于图中的 B 点)要明显大于传统认知,因而损耗增大的机理有待于进一步研究。

3.2 系统的主要影响因素

所设计的测量系统中,反射镜采用光学胶合的方法固定于腔体的指定位置上,充入氖气作为放电气体,并在腔体上接入电源进行放电。充气气压和放电电流成为该系统中主要的可变因素。

当改变放电电流和腔体内充入的气压后,发现不同条件下反射镜的损耗增量的幅度有明显不同,如图 5 所示。损耗增量随着放电电流的增加而增加,并随着气压的减小而增加。气压和电流是决定等离子体能量的关键,对于同一反射镜而言,放电产生的等离子体能量是影响损耗实时测量结果的重要因素之一。利用此实时测量系统,分析不同薄膜与等离子体作用过程中损耗的变化情况,需要保持充气气压和放电电流不变。

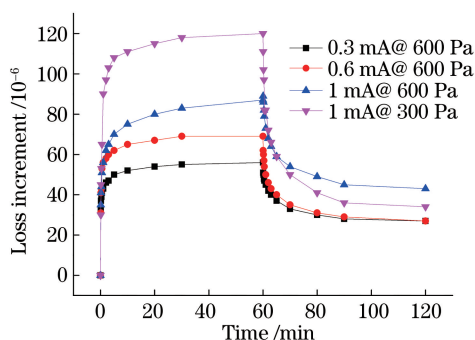


图 5 不同放电电流和腔体气压下反射镜的损耗增量随时间的变化

Fig. 5 Loss increment of reflecting mirrors versus time under different discharging currents and cavity pressures

4 结 论

搭建了反射镜损耗实时测量系统,有效地监测了放电过程中等离子体作用下反射镜的损耗变化过程。实验结果表明,反射镜与放电产生的等离子体作用后损耗迅速增加,增速逐渐放缓并趋于平稳,一旦停止放电,损耗迅速降低,降速也呈现逐渐放缓并趋于平稳的规律。整体来看,实际的损耗增量不仅与放电能量和

放电时间有关,还与放电后的自然放置时间密切相关,该损耗变化规律有助于等离子体作用下反射镜损耗变化机理的研究。下一步可利用此系统分析不同工艺的反射镜在放电过程中损耗增量的区别,研制更耐等离子体作用、更稳定的反射镜薄膜,从而提升激光系统的性能。

参 考 文 献

- [1] Camp J B, Billingsley G, Kells W, *et al.* LIGO optics: Initial and advanced[C]. SPIE, 2002, 4679: 1-16.
- [2] Wei D T. Ion beam interference coating for ultralow optical loss[J]. Applied Optics, 1989, 28(14): 2813-2816.
- [3] Luo Kun, Chen Guang, Li Bincheng. Effect of space charging particles irradiation on performance of laser optical films at 1064 nm[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(2): 46-49.
罗 坤, 陈 光, 李斌成. 空间带电粒子辐照对 1064 nm 激光薄膜的性能影响[J]. 光电工程, 2016, 43(2): 46-49.
- [4] Yi Kui, Ma Ping, Qiu Hong, *et al.* Progress on large aperture transport mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 2902-2907.
易 葵, 马 平, 邱 红, 等. 大口径传输反射镜的研究进展[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(12): 2902-2907.
- [5] Curran R M, Crook T M, Zook J D. Measurement of optical absorption in very thin low-loss SiO₂ films[C]. MRS Proceedings, 1987, 105: 175-180.
- [6] Wang Zhiguo, Long Xingwu, Wang Fei. Research on Langmuir flow patterns in laser gyros[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502015.
汪之国, 龙兴武, 王 飞. 激光陀螺中朗缪尔流形的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502015.
- [7] Loukianov D, Rodloff R, Sorg H, *et al.* Optical gyros and their application[M]. Paris: RTO/NATO, 1999.
- [8] Li Bincheng, Gong Yuan. Review of cavity ring-down techniques for high reflectivity measurements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(2): 021203.
李斌成, 龚 元. 光腔衰荡高反射率测量技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(2): 021203.
- [9] Li B C, Cui H, Han Y L, *et al.* Simultaneous determination of optical loss, residual reflectance and transmittance of highly anti-reflective coatings with cavity ring down technique[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 29135-29142.
- [10] Jiang Yanan. Ring laser gyroscope[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985.
姜亚南. 环形激光陀螺[M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.