

## 空间三轴陀螺反射镜放电环境损耗变化规律研究

郑辛, 李玉娇\*

北京自动化控制设备研究所, 北京 100074

**摘要** 利用空间三轴激光陀螺三个谐振腔光路相互垂直和腔镜共用特性,设计了一种反射镜在腔内氦氖放电等离子体作用下的损耗变化实时测量方法,研究了反射镜的损耗变化过程。实验表明,放电时反射镜的损耗迅速增加并趋于稳定,断电后损耗迅速下降而后趋于平缓并在后续放置过程中缓慢下降至初始值。进一步地,对断电后的陀螺开展了低温和高温实验,研究了反射镜损耗的变化规律。为研究等离子体作用下损耗变化的机理,基于气体放电流体模型,对激光陀螺腔内氦氖等离子体的特性进行了仿真,得到了腔内反射镜表面电子和主要离子的能量及分布。仿真结果表明:等离子体中的电子具有较高的能量,将使反射镜产生更多缺陷,改变反射镜的光学特性。研究结果对于进一步研究反射镜在等离子体作用下的稳定性具有重要意义。

**关键词** 物理光学; 激光陀螺; 空间三轴陀螺; 反射镜; 损耗; 放电等离子体

**中图分类号** V241.5 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL230669

## 1 引言

空间三轴激光陀螺在一个微晶玻璃基体上采用反射镜复用技术集成三个正交敏感环路,在相同的光学敏感尺寸下,其相比单轴陀螺结构在体积、重量、功耗、抗振动性能等方面具有综合优势,在各类武器装备中发挥着关键支撑作用。

随着军事需求的不断演变,新一代武器装备对更长时间保精度热待机的需求日益迫切,为了支撑武器装备更长航时工作,高精度激光陀螺的零漂性能(即精度保持性能)需要进一步提升。在激光陀螺工作过程中,反射镜一直暴露在氦氖气体放电等离子体和 632.8 nm 激光辐射环境下,长期工作后,其表面高反射薄膜的损耗显著增加,导致陀螺的功率发生漂移,影响正常工作,最终导致陀螺失效<sup>[1-2]</sup>。目前,在激光陀螺腔内等离子体作用下反射镜损耗的变化规律和机理鲜有报道。

笔者设计并搭建了一套空间三轴激光陀螺反射镜在等离子体作用下损耗的实时测量系统,研究了反射镜损耗的变化过程。之后进一步开展试验,研究了低温和高温环境对反射镜损耗变化的影响。最后结合气体放电流体模型,对激光陀螺谐振腔内氦氖气体的放电特性进行了仿真,得到了腔内电子、离子的能量及分布,同时对反射镜在等离子体环境下出现的损耗变化现象、损耗机理进行了探讨。研究结果对于进一步提升反射镜在等离子体作用下的稳定性具有重要的指导

意义。

## 2 实验

## 2.1 测量系统设计

如图 1 所示,空间三轴激光陀螺谐振腔呈正六面体结构,三个正方形谐振腔的光路相互垂直。采用腔镜共用技术,三个通道分布着三个球面镜(球面镜 1、球面镜 2 和球面镜 3)和三个平面镜(平面镜 1、平面镜 2 和平面镜 3)。定义 I 通道为  $CH_x$ ,由球面镜 2 (CM2)、球面镜 3 (CM3)、平面镜 2 (PM2)、平面镜 1 (PM1) 构成;定义 II 通道为  $CH_y$ ,由球面镜 1 (CM1)、球面镜 3 (CM3)、平面镜 3 (PM3)、平面镜 1 (PM1) 构成;定义 III 通道为  $CH_z$ ,由球面镜 1 (CM1)、球面镜 2

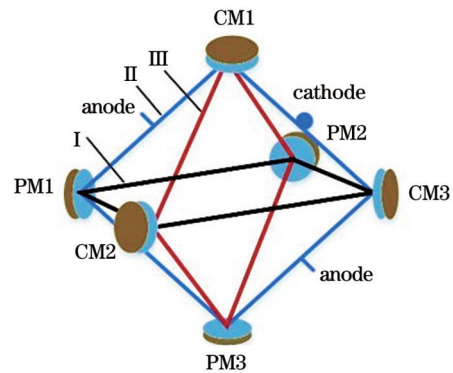


图 1 空间三轴激光陀螺结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of space triaxial ring laser gyro

收稿日期: 2023-03-30; 修回日期: 2023-04-06; 录用日期: 2023-04-11; 网络首发日期: 2023-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(62103059)、装发共用技术项目(50917010102)

通信作者: \*13167382691@163.com

(CM2)、平面镜 3(PM3)、平面镜 2(PM2)构成。

由于反射镜共用,任意一个球面镜的装配位置会同时影响两个环形腔的损耗。因此,在实际生产中,为了保证三个轴向的性能一致,通常利用光腔衰荡法或谐振法测量三个环路的损耗,并通过调节三个球面镜使三个环路的损耗实现均分。但是,光腔衰荡法和谐振法均基于无源腔技术进行测量。以光腔衰荡法为例<sup>[1,3]</sup>,其通过测量已知能量的入射光在正方形无源谐振腔内的衰荡时间来确定谐振腔的总损耗,通过设计对比实验,可以得到待测镜片相对于标定镜片的损耗。但是激光陀螺工作时谐振腔为有源谐振腔,等离子体对入射光的增益放大作用将弥补入射光的损耗。因此,传统的光腔衰荡法无法实现放电等离子体作用下反射镜损耗的实时测量。笔者利用空间三轴激光陀螺三个谐振腔光路相互垂直以及腔镜共用的特点,设计了一种反射镜等离子体环境损耗的实时测量方法。例如,通道 I 和 II 共用球面镜 3 和平面镜 1,利用光腔衰荡法监测图 1 中通道 I 的损耗,过程中给通道 II 通电,会发现通道 I 的损耗增大。可见,由于球面镜 3 处在放电路径上,损耗增大是等离子体对球面镜 3 的作用引起的。每一个球面镜都可以通过选择损耗监测通道和通电通道测试其在等离子体作用下的损耗变化。

### 2.2 损耗监测试验

实验中使用的球面镜镀制了 SiO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 高反射系,其在 45°斜入射下反射光谱的中心波长为 632.8 nm。腔内充有一定比例的氦氖气体,放电电流为 0.5 mA。图 2 为监测 I 通道在 II 通道通电前、通电 1 h 到断电后 30 min 以及静置 15 d 整个过程中的损耗变化曲线,即球面镜 3 在腔内等离子体作用前后损耗的变化规律。未通电时, I 通道的损耗约为 0.02% (200 ppm); 通电后,损耗迅速增加,在 1 min 内即升至最大损耗值,损

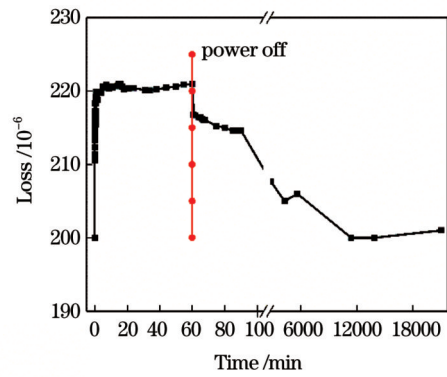


图 2 I 通道损耗随时间的变化曲线

Fig. 2 Loss change of channel I versus time

耗增至 0.022% (220 ppm), 之后趋于稳定; 断电后, 损耗快速下降至约 0.0215% (215 ppm), 并在 0.5 h 内趋于平缓; 在后续的静置过程中, 损耗值仍在缓慢地降低, 第 15 天时损耗降至 0.002% (200 ppm) 左右, 与通电前的损耗值相当。后续再次对 II 通道通电 1 h, 监测 I 通道的损耗变化情况, 进行重复性验证。结果表明: 反射镜在通电和断电过程中的损耗变化值和变化规律可复现。

### 2.3 断电后低温和高温实验

为了研究放电等离子体导致反射镜损耗变化的机理, 进一步研究了断电后低温和高温条件下反射镜损耗的变化。低温和高温实验在可控温箱中进行, 各实验参数和结果如表 1 所示。为了保证陀螺的初始状态一致, 每一次实验前都对该陀螺的 II 通道通电 1 h, 并监测 I 通道从开始放电到断开电源后 30 min 内的损耗变化, 然后对陀螺进行相应的低温和高温实验, 实验结束后再测试 I 通道的损耗, 以此判断实验是否可加速损耗值降低。低温和高温实验均分别进行了 2 次, 以验证重复性。

表 1 实验参数与损耗测试结果

Table 1 Experimental parameters and loss test results

Experiment	Experiment parameter	Loss before the experiment	Loss after the experiment
Low temperature	-40 °C for 2 h	Experiment 1	0.0215% (215 ppm)
		Experiment 2	0.0215% (215 ppm)
High temperature	75 °C for 2 h	Experiment 3	0.0208% (208 ppm)
		Experiment 4	0.0215% (215 ppm)

在低温实验中, 陀螺断电 0.5 h 后将其放入温箱中进行降温处理。温箱的具体变温程序如下: 从 25 °C 降温至 -40 °C (用时 30 min), 在 -40 °C 保温 2 h, 接着在 30 min 内从 -40 °C 升温至 25 °C, 共运行 3 h。然后测试 I 通道损耗, 结果发现在两次实验中, 实验前后损耗均为 0.0215% (215 ppm)。这说明低温对球面镜损耗降低没有明显作用。在高温实验中, 陀螺断电 0.5 h 后将其放入温箱中进行升温处理。温箱的具体变温程序如下: 从 25 °C 升温至 75 °C (用时 30 min), 在 75 °C

保温 2 h, 接着在 30 min 内降温至 25 °C, 共运行 3 h。然后测试 I 通道的损耗, 结果显示, 在两次实验中, 实验前后的损耗均从 0.0215% (215 ppm) 降至 0.0208% (208 ppm)。这表明高温对损耗的降低具有一定的加速作用。

## 3 分析与讨论

### 3.1 激光陀螺腔内等离子体仿真

激光陀螺主要采用直流放电激励, 击穿后的气体

称为等离子体,包含正离子、电子和负离子等带电粒子,以及原子、分子、受激原子、亚稳态原子等不带电的粒子。由于带负电的粒子与带正电的粒子浓度几乎相等,故称为等离子体。反射镜在腔内等离子体的作用下损耗增大,因此有必要深入分析腔内等离子体中粒子的参数,尤其是反射镜处的粒子能量及分布等。基于气体放电流体动力学模型<sup>[4]</sup>,将等离子体看作是一种多成分的流体,通过求解一组电子密度和电子平均能量的漂移扩散方程,同时求解静电场方程(电势/电场),可以获得等离子体粒子密度、等离子体能量、空间电势和电场等物理量的宏观分布规律。不考虑流体运动引起的电子对流,电子密度和能量密度方程分别为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{\Gamma}_e = R_e, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot [-(u_e \cdot \mathbf{E})n_e - D_e \cdot \nabla n_e] + \mathbf{E} \cdot \mathbf{\Gamma}_e = R_e, \quad (2)$$

式中: $n_e$ 为电子密度,单位为 $\text{m}^{-3}$ ; $\mathbf{\Gamma}_e$ 为电子通量,单位为 $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $R_e$ 表示电子源,单位为 $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $n_e$ 为能量密度,单位为 $\text{eV}/\text{m}^3$ ; $u_e$ 为能量迁移率; $D_e$ 为能量扩散系数; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $R_e$ 为非弹性碰撞造成的电子能量损耗,单位为 $\text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中电子通量的公式为

$$\mathbf{\Gamma}_e = -(u_e \cdot \mathbf{E})n_e - D_e \cdot \nabla n_e. \quad (3)$$

根据电子迁移率 $u_e$ 和爱因斯坦关系,可得到电子扩散系数为 $D_e = u_e T_e$ ,能量迁移率为 $u_e = \frac{5}{3} u_e$ ,能量扩散系数为 $D_e = u_e T_e$ 。假设有 $M$ 个反应有助于电子密度增长或衰减,有 $P$ 个非弹性电子-中性碰撞(一般来说, $P$ 远大于 $M$ ),则电子源 $R_e$ 和电子能量损耗 $R_e$ 分别为

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j k_j N_n n_e, \quad (4)$$

$$R_e = \sum_{j=1}^P x_j k_j N_n n_e \Delta \epsilon_j, \quad (5)$$

式中: $x_j$ 是反应 $j$ 的目标物质的物质的量分数; $k_j$ 是反应 $j$ 的速率系数,单位为 $\text{m}^3/\text{s}$ ; $N_n$ 是总中性数密度, $\text{m}^{-3}$ ; $\Delta \epsilon_j$ 是反应 $j$ 的能量损耗,单位为 $\text{eV}$ 。 $k_j$ 表示为

$$k_j = \int_0^\infty \epsilon \sigma(\epsilon) f(\epsilon) d\epsilon, \quad (6)$$

式中: $\epsilon$ 表示能量,单位为 $\text{eV}$ ; $\sigma(\epsilon)$ 表示碰撞横截面,单位为 $\text{m}^2$ ; $f(\epsilon)$ 是电子能量分布函数。

对于重粒子(非电子物质),其扩散方程为

$$\rho \frac{\partial w_k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)w_k = \nabla \cdot \mathbf{j}_k + R_k, \quad (7)$$

式中: $w_k$ 为重粒子的质量分数; $\rho$ 为重粒子的密度; $\mathbf{u}$ 中性流的平均流速矢量,单位为 $\text{m}/\text{s}$ ; $\mathbf{j}_k$ 为质量通量; $R_k$ 为重粒子源,单位为 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。碰撞产生了新的带电粒子,这些带电粒子产生的静电场为

$$-\epsilon_0 \epsilon_r \nabla^2 V = \rho, \quad (8)$$

式中: $\epsilon_r$ 为相对介电常数; $\epsilon_0$ 为真空介电常数; $V$ 为电势,单位为 $\text{V}$ 。

结合激光陀螺结构和实际的边界条件,例如阴极设为接地,阳极表面设为金属接触等,利用 Comsol Multiphysic 6.0 软件对激光陀螺腔内氦氖等离子体进行了建模仿真。空间三轴激光陀螺是三个单轴陀螺的集成,从单个轴向分析,其基本配置与单轴陀螺完全相同。为降低计算难度和缩短计算时间,只对单轴激光陀螺进行建模仿真。又由于单轴陀螺为正方形环路,所以建模时只构建了参与放电的一侧,采用双阳极和单阴极结构,如图 3 所示。模型考虑了电子、 $\text{He}^+$ 、 $\text{Ne}^+$ 、 $\text{HeNe}^+$ 、 $\text{He}^*$ 、 $\text{Ne}^*$ 、 $\text{He}_2^+$ 、 $\text{Ne}_2^+$ 等粒子。代入各个碰撞反应的反应速率<sup>[5-6]</sup>和初始值,可对腔内各粒子的能量和分布进行仿真。图 3 是电子和 $\text{He}^+$ 能量分布的仿真结果,可见,电子和 $\text{He}^+$ 的能量在阴极内表面处最高(其他正离子的能量分布亦是如此)。图 3(a)中指出的贴反射镜处就是反射镜表面。图 4 是放电过程中反射镜表面选取的位置以及此处电子、 $\text{He}^+$ 和 $\text{Ne}^+$ 等主要粒子的能量及分布,图 4(b)和图 4(c)中横坐标(反射镜表面)指的是图 4(a)中红色直线所示位置,方向由 A 到 B, A 点为零点。纵坐标是相应位置的粒子能量。可见,在放电过程中,电子能量在 $6.3 \times 10^{-8} \text{ s}$ 时达到最大值,能量范围为 $6.6 \sim 10.5 \text{ eV}$ ,在 $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}$ 时

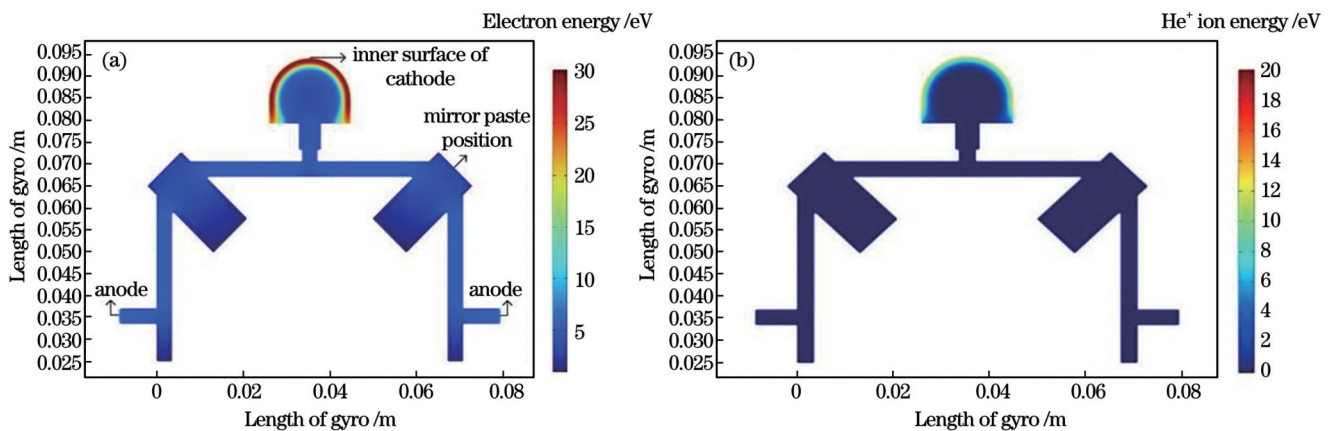


图 3 粒子能量分布仿真结果。(a)电子能量;(b) $\text{He}^+$ 能量

Fig. 3 Simulated energy distribution diagrams. (a) Electron energy; (b)  $\text{He}^+$  ion energy



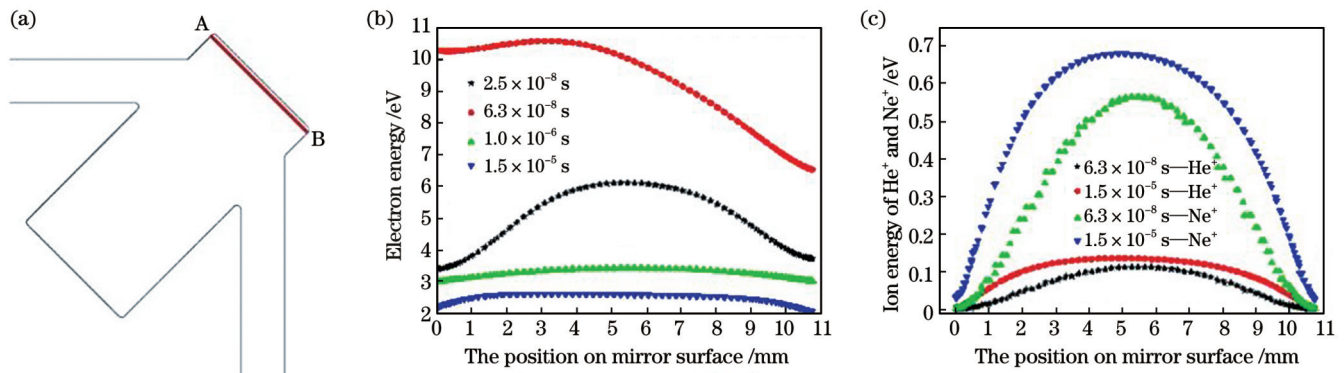


图4 放电过程中反射镜表面电子和离子能量分布的仿真结果。(a)反射镜表面位置示意图;(b)电子能量;(c)He<sup>+</sup>和Ne<sup>+</sup>能量  
Fig. 4 Simulated energy distribution diagrams of electron and ions of He<sup>+</sup> and Ne<sup>+</sup> in the discharge process. (a) Schematic diagram of the position on mirror surface; (b) electron energy; (c) He<sup>+</sup> and Ne<sup>+</sup> ions energy

放电达到平衡状态,电子能量范围为2.1~3 eV。在整个放电过程中,He<sup>+</sup>和Ne<sup>+</sup>的能量均小于1 eV。因此,放电等离子体中能量较高的粒子主要是电子。

### 3.2 损耗变化机理探讨

反射镜组成材料SiO<sub>2</sub>和Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>的结合能分别约为7 eV和4.2 eV<sup>[7-8]</sup>,膜层中存在较多缺陷,吸收峰约为3.6 eV<sup>[9]</sup>。可见,放电过程中存在电子能量高于材料结合能的时刻,稳定后的电子能量与缺陷吸收峰相当,因此电子对高反膜的轰击将破坏膜层,产生更多缺陷,改变高反膜的透反特性及损耗特性<sup>[10-13]</sup>。通常,可以对反射镜进行高温热循环来消除高反膜中的电子、空穴等缺陷和杂质,降低高反膜的损耗。因此,本实验中断电后的低温过程不能加速降低损耗。高温实验后,反射镜的损耗从0.0215%(215 ppm)降至0.0208%(208 ppm),但反射镜的热处理温度通常约为几百摄氏度,75℃下反射镜膜层中的大部分缺陷和杂质都不能被充分消除,因此损耗的降低非常有限。

## 4 结 论

首先,针对传统的光腔衰荡法无法实现放电环境下激光陀螺反射镜损耗的测量问题,设计了一套准确有效的空间三轴激光陀螺反射镜在等离子体环境中损耗的实时测量系统。基于此实时测量系统发现:反射镜与放电等离子体作用后其损耗迅速增加并趋于稳定,断电后损耗迅速下降然后趋于平缓,短时间放电后其损耗可在后续放置过程中缓慢下降至初始值。接着,根据此损耗变化现象设计了相应的实验,在实验中发现高温对反射镜损耗恢复具有积极作用。最后,为了深入研究损耗增大的机理,对陀螺腔内电子和离子的能量和分布进行了仿真分析,结果表明:电子能量较高,将导致膜层产生更多缺陷。后续可以通过降低反射镜表面电子能量以及增强反射镜抗电子损伤能力等方法来提高激光陀螺反射镜在腔内等离子体中的稳定性,从而使激光陀螺的长期工作稳定性进一步提升。

### 参 考 文 献

- [1] 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.  
Zhai L, Wang T, Bai M S, et al. Real-time loss measurement of reflecting mirrors applied in plasma environment[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0712001.
- [2] Cole B E. UV and plasma stable high-reflectance multilayer dielectric mirror: EP89122262.2[P]. 1989-02-12.
- [3] 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.  
Li B C, Gong Y. Review of cavity ring-down techniques for high reflectivity measurements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(2): 021203.
- [4] 吴健, 韩文, 程珍珍, 等. 基于流体模型的碳纳米管电离式传感器的结构优化方法[J]. 物理学报, 2021, 70(9): 090701.  
Wu J, Han W, Cheng Z Z, et al. Structure optimization of carbon nanotube ionization sensor based on fluid model[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(9): 090701.
- [5] Kristya V. The kinetics of charged particles in the cathode layer of glow discharge in a helium-neon mixture[J]. High Temperature, 1996, 34: 191-196.
- [6] Jánký J, Trunec D. Numerical modeling of dielectric barrier discharge in neon[J]. Czechoslovak Journal of Physics, 2006, 56(2): B781-B786.
- [7] Cho H J, Jeon Y Z. Design and fabrication of super mirrors on the zerodur substrate[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7786: 778611.
- [8] Zhang J Y, Boyd I W. Pulsed laser deposition of tantalum pentoxide film[J]. Applied Physics A, 2000, 70(6): 657-661.
- [9] 刘新, 单凡, 陈仙, 等. 非晶SiO<sub>2</sub>薄膜中氧双键缺陷电子及光学特性的第一性原理研究[J]. 原子与分子物理学报, 2015, 32(5): 875-878.  
Liu X, Shan F, Chen X, et al. First principles study of the electronic and optical properties of silanone groups in amorphous SiO<sub>2</sub> thin films[J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2015, 32(5): 875-878.
- [10] Du D, Liu X, Korn G, et al. Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO<sub>2</sub> with pulse widths from 7 ns to 150 fs[J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(23): 3071-3073.
- [11] Stuart B C, Feit M D, Herman S, et al. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. Physical Review B, 1996, 53(4): 1749-1761.
- [12] Arnold D, Cartier E. Theory of laser-induced free-electron heating and impact ionization in wide-band-gap solids[J]. Physical Review B, 1992, 46(23): 15102-15115.
- [13] Sokolowski-Tinten K, von der Linde D. Generation of dense electron-hole plasmas in silicon[J]. Physical Review B, 2000, 61(4): 2643-2650.

# Loss Variation of Space Triaxial Laser Gyro Mirrors Exposed to Discharge Plasma

Zheng Xin, Li Yujiao\*

*Beijing Institute of Automation and Control Equipment, Beijing 100074, China*

## Abstract

**Objective** To improve the long-term stability of a laser gyro, a real-time loss measurement system for space triaxial laser gyro mirrors exposed to He-Ne discharge plasma is designed. The loss-change process of the mirror in plasma is experimentally studied. The influence of low- and high-temperature environments on the variation law of loss is studied. Combined with the gas discharge fluid model, the discharge characteristics of the He-Ne plasma in the cavity of the laser gyro are simulated, and the energy and distribution of electrons and ions are obtained. The loss change mechanism in the plasma environment is discussed. The research results play an important role in further improving the stability of laser gyro mirrors under the action of plasma.

**Methods** Considering that the cavity ring-down and resonant measurements are both based on a passive cavity, the loss change process of a mirror in plasma cannot be measured. Therefore, a real-time loss measurement system for space triaxial laser gyro mirrors exposed to He-Ne discharge plasma was designed based on the characteristics of the orthogonal optical paths of three resonators and shared mirrors. For example, channels I and II shared concave mirror 3 and plane mirror 1 (Fig. 1), and the loss of channel I was monitored using the cavity ring-down method (Fig. 2). It was found that the loss of channel I increased when channel II was powered on. Since concave mirror 3 is in the discharge path, the increase in loss was caused by the action of the plasma on concave mirror 3. Based on this method, the loss of concave mirror 3 before and after plasma action in the cavity was monitored. The results showed that the loss increased rapidly and tended to be stable during discharge. Once the power supply was turned off, the loss decreased dramatically, flattened out, and finally dropped to the initial value in the subsequent natural standing process. Furthermore, the variation law of the loss under low- and high-temperature conditions after power failure was studied (Table 1). The experiments showed that high temperature had a positive effect on reducing the incremental portion of loss caused by the plasma, but low temperature did not.

**Results and Discussions** The loss of the mirror increases under the action of the plasma in the cavity; therefore, it is necessary to deeply analyze the parameters of the electrons and ions in the plasma, especially the energy and distribution of these particles located at the mirror. A gas-discharge fluid model is constructed in combination with the structure of the laser gyro. The simulation results show that the energies of the electrons and  $\text{He}^+$  are the highest at the inner surface of the cathode (Fig. 3). During the discharge process, the energy range of electron is 6.6–10.5 eV (Fig. 4) on the mirror, and when the discharge reaches equilibrium, the energy range of electron is 2.1–3 eV on the mirror. The electron energy is higher than the binding energies of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  in the discharge process, and the electron energy is equivalent to the defect absorption peak when the discharge reaches equilibrium. Therefore, the electrons will produce more defects in the mirror, leading to changes in its reflection and loss characteristics. In general, a high temperature can be applied to the mirror to eliminate defects and impurities in the mirror, such as electrons and holes, to reduce the loss. Therefore, the loss is reduced after the high-temperature experiments. However, the heat treatment commonly used for the mirror is several hundred degrees Celsius, and most defects and impurities in the mirror cannot obtain enough energy to be completely eliminated at 75 °C, so the loss reduction is limited.

**Conclusions** In this study, an accurate and effective real-time measurement system for space triaxial laser gyro mirrors exposed to He-Ne discharge plasma is designed. The variation law of the loss before and after plasma action is studied. The corresponding experiments are designed based on the loss-change phenomenon. It is found that high temperatures have a positive effect on the loss recovery. Finally, the energy and distribution of the electrons and ions on the surface of the mirror are simulated. The simulation results show that the energy of the electrons is high enough to cause numerous defects in the mirror. Therefore, the stability of the laser gyro mirror in the plasma can be improved by reducing the electron energy on the surface of the mirror and enhancing its anti-electron damage ability, thereby improving the long-term stability of the laser gyro.

**Key words** physical optics; laser gyro; space triaxial gyro; mirror; loss; discharge plasma