

# 由反射体旋转引起的聚焦激光束自混合干涉现象

郭 扬 钟金钢

暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632

**摘要** 在由反射物旋转引起的非聚焦激光束自混合干涉基础上, 研究观察了由反射体旋转引起的聚焦激光束自混合干涉现象。由此提出了一种聚焦激光束自混合干涉的角度测量方法。由于激光器出光口的孔径限制, 利用非聚焦激光束的自混合干涉角度测量范围很小。在光路中添加聚焦透镜, 使偏离出射光方向的激光束聚焦后重新反馈回激光谐振腔, 进而产生自混合干涉。从而使得引起自混合干涉现象的旋转角变化范围扩大了一个数量级以上。由此提出的利用聚焦激光束自混合干涉现象的角度测量方法, 测量范围可显著提高, 并随着聚焦透镜的焦距减小, 测量范围可逐步扩大。

**关键词** 激光光学; 光学测量; 自混合干涉; 角度测量

**中图分类号** O436

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0308003

## Focused Laser Self-Mixing Interference Caused by Rotatable Reflector

Guo Yang Zhong Jingang

*Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China*

**Abstract** Rotation of a reflector leads to a phenomenon of self-mixing interference (SMI) of a beam of unfocused laser. There are methods proposed for a measurement of angle by using the unfocused-laser SMI. However, the range of angle measurement is limited by the size of the utilized laser aperture. The SMI of the beam of focused laser is studied. A new approach to measure an angle by use of focus-laser SMI is proposed. The approach is able to achieve an angle measurement with an order of magnitude higher than the existent methods do. The increase of range in angle measurement by the proposed approach is achieved by placing a focusing lens into the optical path. The lens are used to collect the light, which deviates from emergent one, back into the resonator of laser. The SMI occurs as a consequence of the collected light. The proposed approach is experimentally validated. The experiments also show that the increase in the focal length of the utilized lens can enlarge the range of angle measurement.

**Key words** laser optics; optical metrology; self-mixing interference; angle measurement

**OCIS codes** 120.3180; 140.3430; 120.3940; 120.4570

## 1 引 言

激光自混合干涉是指当激光器的输出光在外部物体反射或散射后, 部分光反馈回激光器内部, 与腔内光相混合, 造成激光器输出光功率的变化<sup>[1-4]</sup>。与传统的干涉仪相比, 自混合干涉仪的结构具有简单、紧凑和易准直等特点, 使其在很多场合能够取代传统的干涉仪<sup>[5]</sup>。目前, 自混合干涉仪主要用于位移<sup>[6-9]</sup>、振动<sup>[10-11]</sup>、形貌<sup>[12]</sup>和加速度<sup>[13]</sup>的测量方面。自混合干涉仪在角度测量方面的应用较少, 钟金钢课题组<sup>[14]</sup>曾根据反射体旋转引起的激光束自混合干涉现象, 提出一个应用自混合干涉的角度测量方案。但由于激光自混合干涉的反

收稿日期: 2014-09-01; 收到修改稿日期: 2014-10-17

基金项目: 广东省科技计划项目(2013B060100001)

作者简介: 郭 扬(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: sifanguoyang@163.com

导师简介: 钟金钢(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: tzjg@jnu.edu.cn(通信联系人)

激光需要通过激光器出光口重新返回激光腔内部,激光器出光口的孔径太小,使得角度测量的范围也太小,限制了激光自混合干涉角度测量的应用。

由此,本文研究了由反射体旋转引起的聚焦激光束自混合干涉现象,提出了一种聚焦激光束自混合干涉的角度测量方法。在光路中添加聚焦透镜,使偏离光轴的激光聚焦后重新反馈回激光器内部进而产生干涉。实验结果显示,对 150 mm 长的氦氖激光器,在未聚焦的激光自混合干涉中,产生自混合干涉的角度变化范围大约为  $0.06^\circ$ ,而利用放大倍数为 20 倍的显微物镜对激光束进行聚焦后,角度变化范围增大到  $2.0^\circ$  左右,角度测量范围增大一个数量级以上,进一步提高显微物镜的放大倍数,减小聚焦透镜的焦距,角度测量范围还可进一步增加,将大大提高基于自混合干涉角度测量方法的应用范围。

## 2 反射物体旋转角度变化引起的激光自混合干涉

如图 1 所示,外部反射物体的位移变化引起反馈光的光程发生变化,导致反馈光相位改变,使激光腔内产生自混合干涉而引起激光器输出功率呈现周期性变化。研究表明,在弱反馈的情况下,忽略多重反馈<sup>[15]</sup>,激光器输出功率的变化与传统双光束干涉信号相似<sup>[16]</sup>。

如图 2 所示,当激光束射入一旋转物体上,反射物体角度的变化将导致反馈光的光程发生改变,也会引起激光自混合干涉现象<sup>[14]</sup>,但由于反射物体角度的变化,使反馈光与出射光成一定角度,反馈光将会偏离出射光光轴,当偏离角度过大时,反馈光将偏离激光器出光口,使反馈光无法返回激光器内,激光自混合干涉现象消失。

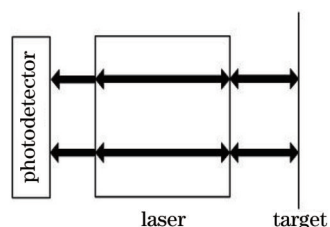


图 1 激光自混合干涉原理图

Fig.1 Schematic of laser self-mixing interference

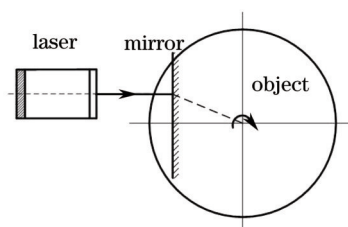


图 2 由反射体旋转引起的激光束自混合干涉现象原理图

Fig.2 Laser self-mixing interference caused by a rotatable reflector

图 3 为自混合干涉角度范围示意图。图 3(a) 为未添加显微物镜的自混合干涉角度范围示意图。激光器出光口直径为  $a$ , 出射光束的束宽也为  $a$ 。在几何光学近似下,当反射光束中心光线角度超出  $2\beta_1$  时,则完全无反馈光进入激光器内,无自混合干涉现象发生。当旋转体旋转  $\theta_1$  角度时,反射光束偏转的角度为  $2\theta_1$ ,那么当反射镜距离激光器为  $l_1$  时,产生自混合干涉的旋转角度范围为

$$\theta_1 = 2 \arctan\left(\frac{a}{2l_1}\right). \quad (1)$$

图 3(b) 为添加显微物镜后的聚焦激光束自混合干涉角度范围示意图。在反射光传播方向上添加一会聚透镜,将偏离的反射光向出射光光轴的方向会聚,使反馈光能继续返回激光器内,自混合干涉现象将不会消失,这使旋转物体旋转一个更大角度的范围都能产生自混合干涉现象。当选取的显微物镜焦距为  $f$  时,反射镜放置于显微物镜焦点处,自混合干涉角度范围为

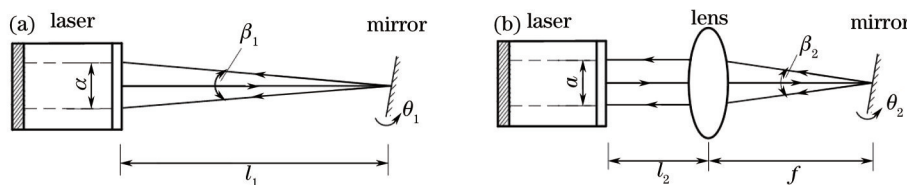


图 3 自混合干涉角度范围示意图。(a) 非聚焦激光束自混合干涉; (b) 聚焦激光束自混合干涉

Fig.3 Schematic of self-mixing interference angle range. (a) Unfocused self-mixing interference; (b) focused self-mixing interference

$$\theta_2 = 2 \arctan\left(\frac{a}{2f}\right), \quad (2)$$

由此可以看出,当添加显微物镜后,由于显微物镜焦距很短,自混合干涉角度范围明显增大,并且当显微物镜焦距减小(放大倍数增大)时,自混合干涉角度范围增大。

图4是反射物体旋转角度变化引起聚焦激光束自混合干涉原理图,图4中  $l$  为激光器出光口距离显微物镜前表面的距离,  $a$  为激光器出光口的直径,  $f$  为显微物镜焦距,并将反射镜放置在显微物镜焦点处。点  $O$  为旋转平台的旋转中心,  $r$  为平面镜到旋转中心  $O$  的距离,  $h$  为旋转中心  $O$  至出射激光束光轴的距离。

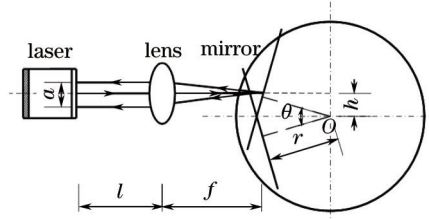


图4 聚焦激光束自混合干涉原理图

Fig.4 Schematic of focusing laser self-mixing interference

在弱反馈情况下,He-Ne激光器自混合干涉效应的光强表达式为<sup>[14,17]</sup>

$$I = I_0(1 + m \cos \Phi), \quad (3)$$

式中  $I$  为有反馈时的光强值;  $I_0$  为无反馈时的光强值;  $\Phi = \frac{4\pi L_0}{\lambda}$  为两干涉光束由光程差引起的相位差,  $L_0$  为外腔长,  $m$  为调制系数。

在图4所示的聚焦激光束情况下,将反射镜放置于显微物镜焦距处,当反射物旋转一小角度  $\theta$  时,反射光的光程改变  $\Delta L$  为

$$\Delta L = \left(h - r \tan \frac{\theta}{2}\right) \tan \theta, \quad (4)$$

在旋转角度  $\theta$  非常小(小于  $5^\circ$ )的情况下,可做如下近似

$$\begin{cases} \tan \theta \approx \theta, \\ \tan \theta \tan \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta^2}{2} \approx 0, \end{cases} \quad (5)$$

那么

$$\Delta L \approx h\theta, \quad (6)$$

则输出光强可近似为

$$I = \gamma(\theta)I_0 \left[1 + m \cos\left(4\pi \frac{L_0 + h\theta}{\lambda}\right)\right], \quad (7)$$

式中  $\gamma(\theta)$  为调制干涉花样包络的系数,在几何光学近似下,当  $\theta$  为零时,  $\gamma(\theta)$  最大为 1;当  $\theta$  大于(2)式表示的  $2 \arctan\left(\frac{a}{2f}\right)$  时,  $\gamma(\theta)$  最小为零。设定激光器为 TEM<sub>00</sub> 单模激光器,激光光强呈高斯分布。当反馈光高斯分布与输出光高斯分布完全重合时,自混合干涉信号振幅最大;当反馈光高斯分布与输出光高斯分布部分重合时,自混合干涉信号振幅减小;当反馈光高斯分布与输出光高斯分布完全分离时,自混合干涉现象消失。因此,自混合干涉信号也近似为高斯分布。设氦氖激光器波长为 632.8 nm,激光器距离透镜  $L_0 = 124.2$  mm,激光束偏离旋转中心的距离为  $h = 3.1$  mm,当选取放大倍数为 10 的显微物镜时,自混合干涉信号仿真图如图 5 所示。

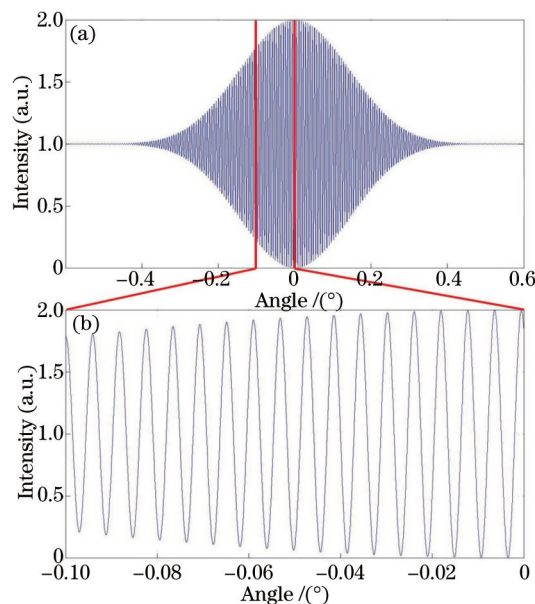


图 5 (a) 聚焦激光束自混合干涉信号模拟图; (b)为图(a)中角度区间为 $[-0.1^{\circ}, 0^{\circ}]$ 的模拟信号

Fig.5 (a) Simulation of focusing laser self-mixing interference; (b) magnified section of Fig.(a) in the angle range of  $[-0.1^{\circ}, 0^{\circ}]$

### 3 实 验

为观察聚焦激光束自混合干涉现象,搭建如图6所示的实验装置。

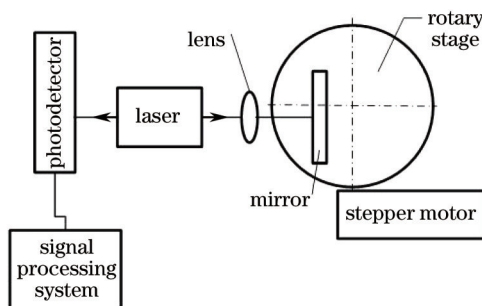


图 6 聚焦激光束自混合干涉实验装置图

Fig.6 Experimental setup of focusing laser self-mixing interference

实验选用长 150 mm、功率 0.8 mW、输出波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光器为光源,激光器出射光经过一个放大倍数为 10(20)、数值孔径为 0.25(0.40)的显微物镜,入射到一个反射率约为 4% 的平面反射镜前表面,平面反射镜放置在一个由步进电机推动的旋转平台上。自混合干涉信号由放置在激光器尾光出口处的光电探测器获取,再将信号传入信号处理系统进行处理。

图 7 为未添加显微物镜时由反射物旋转引起的激光自混合干涉信号,此时实验测得  $l_1 = 116.4 \text{ mm}$ ,  $h = 3.5 \text{ mm}$ 。图 8 和图 9 分别为选取放大倍数为 10 倍和 20 倍的显微物镜所获得的聚焦激光束自混合干涉信号,此时实验测得  $l_2 = 116.4 \text{ mm}$ ,  $h = 3.1 \text{ mm}$ 。可以明显看出:1) 由反射物旋转引起的激光自混合干涉角度变化范围约为  $0.06^{\circ}$ ,而添加显微物镜后的聚焦激光束自混合干涉角度变化范围,提高一个数量级以上,10 倍显微物镜能增大到  $1.0^{\circ}$  左右,而 20 倍显微物镜能增大到  $2.0^{\circ}$  左右;2) 实验所得由反射物引起的聚焦激光束自混合干涉信号与模拟结果基本吻合;3) 当所选取的显微物镜放大倍数增加,焦距变短时,干涉角度范围随之增加。

需要指出的是,(4)式给出的光程差变化与旋转角度的关系,只有当旋转角度很小(小于  $5^{\circ}$ )的情况下,可以看成是由(6)式给出的近似线性关系,因此当所选取的显微物镜焦距变短,干涉角度范围随之增加时,角度的检测精度会随之降低,但在小于  $5^{\circ}$  的范围内可以保持较高的检测精度。

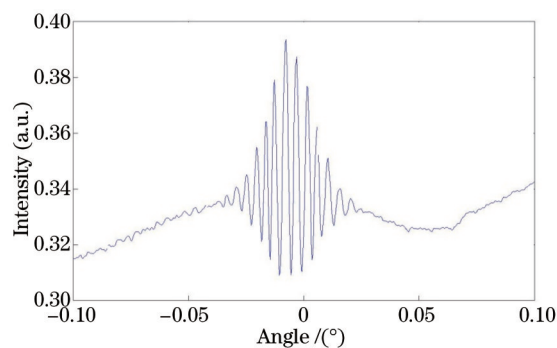


图7 未添加显微镜时的自混合干涉信号

Fig.7 Signal of laser self-mixing interference without microscope objective

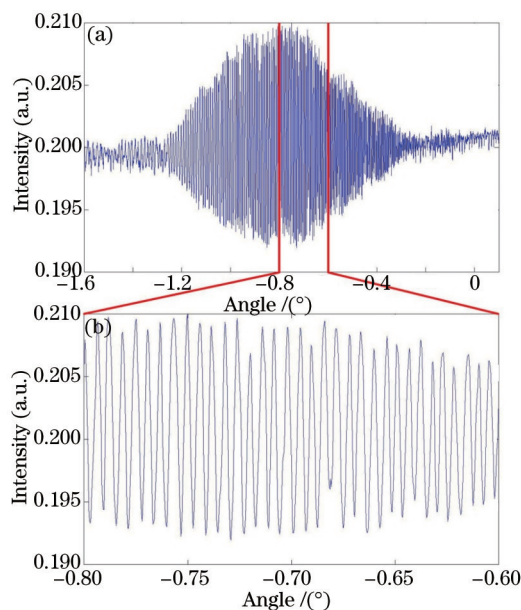


图8 (a) 显微镜放大倍数为10倍的聚焦激光束自混合干涉信号; (b) 为图(a)中角度区间为 $[-0.8^{\circ}, 0.6^{\circ}]$ 的干涉信号

Fig.8 (a) Signal of focusing laser self-mixing interference with microscope objective magnification of 10 times; (b) magnified section of Fig.(a) in the angle range of  $[-0.8^{\circ}, 0.6^{\circ}]$

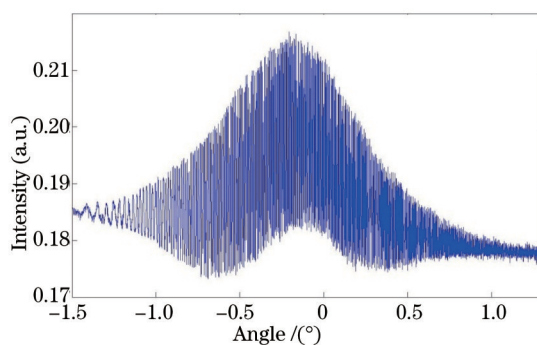


图9 显微镜放大倍数为20倍的聚焦激光束自混合干涉信号

Fig.9 Signal of focusing laser self-mixing interference with microscope objective magnification of 20 times

## 4 结 论

在由反射物旋转引起的非聚焦激光束自混合干涉基础上,研究了由反射物旋转引起的聚焦激光束的自混合干涉现象。理论分析和实验结果表明,相对于非聚焦激光束的自混合干涉,引起聚焦激光束自混合干涉现象的旋转角度变化范围可显著扩大到一个数量级以上,并随着聚焦透镜的焦距减小,旋转角度的变化范围可

进一步增加。因此,利用聚焦激光束的自混合干涉效应可大大提高测量反射物旋转角度的应用范围。

## 参 考 文 献

- 1 R Lang, K Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 34-355.
- 2 Ma Junshan, Wang Xiangzhao, Fang Zujie, *et al.*. Experimental study on self-mixing interferometer in laser diode[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(1): 29-32.  
马军山, 王向朝, 方祖捷, 等. 激光自混合干涉仪的实验研究[J]. *中国激光*, 2001, 28(1): 29-32.
- 3 Ding Yingchun, Zhang Shulian, Li Yan. Research on the mode of self-mixing interference in He-Ne laser[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(6): 16-17.  
丁迎春, 张书练, 李 岩. He-Ne激光自混合干涉的模式研究[J]. *激光杂志*, 2003, 24(6): 16-17.
- 4 Xia Wei, Hao Hui, Wang Feng, *et al.*. Analysis and test for the dynamic performance of laser self-mixing interferometer based on phase modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1208003.  
夏 巍, 郝 辉, 王 峰, 等. 相位调制型激光自混合干涉仪的动态特性分析及测试[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1208003.
- 5 Mao Wei, Zhang Shulian, Zhang Lianqing, *et al.*. Optical feedback effect and the optical feedback interferometry for sensing application[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 16-22.  
毛 威, 张书练, 张连清, 等. 激光回馈效应及其传感应用研究的进展[J]. *光学技术*, 2007, 33(1): 16-22.
- 6 T Yoshino, M Nara, S Mnatzakanian, *et al.*. Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurements[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(5): 892-897.
- 7 Liu Qiang, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. Implementation of real-time displacement precision measurement technology for sinusoidal phase-shifting laser self-mixing interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0612011.  
刘 强, 王 鸣, 夏 巍. 正弦相位调制型激光自混合干涉仪的实时位移测量技术[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0612011.
- 8 Yang Zhenyu, Wang Ming, Xia Wei, *et al.*. Testing and analysis of large-range displacement measurement precision in sinusoidal phase-modulating self-mixing interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412007.  
杨振宇, 王 鸣, 夏 巍, 等. 正弦相位调制自混合干涉大范围位移测量精度测试与分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412007.
- 9 N Servagent, T Bosch, M Lescure. A laser displacement sensor using the self-mixing effect for modal analysis and defect detection [J]. *Instrumentation and Measurement*, 1997, 46(4): 847-850.
- 10 P A Roos, M Stephens, C E Wieman. Laser vibrometer based on optical-feedback-induced frequency modulation of a single-mode laser diode[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(34): 6754-6761.
- 11 Ji Xinxin, Liu Jinsong, Wang Cheng, *et al.*. Vibration characteristic of loudspeaker researched with self-mixing interference fringe counting method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(1): 97-101.  
季新昕, 刘劲松, 王 程, 等. 利用自混合干涉效应的条纹计数法对扬声器振动特性的实验研究[J]. *应用光学*, 2007, 28(1): 97-101.
- 12 T Bosch, N Servagent, R Chellali, *et al.*. Three-dimensional object construction using a self-mixing type scanning laser range finder [J]. *Instrumentation and Measurement*, 1998, 47(5): 1326-1329.
- 13 Yang Ying, Li Xingfei, Li Hongyu, *et al.*. Acceleration sensor based on laser self-mixing interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228003.  
杨 颖, 李醒飞, 李洪宇, 等. 基于激光自混合效应的加速度传感器[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0228003.
- 14 Zhong Jingang, Zhang Xianhua, Ju Zhixiang. Absolute small-angle measurement based on optical feedback interferometry[J]. *Chin Opt Lett*, 2008, 6(11): 830-832.
- 15 Huan Hai, Wang Ming, Hao Hui, *et al.*. Theory and experiment study on self-mixing interference with multiple external reflectors [J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(11): 1373-1377.  
宦 海, 王 鸣, 郝 辉, 等. 多外腔自混合干涉现象的理论与实验[J]. *中国激光*, 2004, 31(11): 1373-1377.
- 16 W M Wang, W J O Boyle, K T V Grattan, *et al.*. Self-mixing interference in a diode laser: experimental observations and theoretical analysis[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(9): 1551-1558.
- 17 W M Wang, K T V Grattan, A W Palmer, *et al.*. Self-mixing interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(9): 1577-1587.

栏目编辑: 宋梅梅