

# Nd:YAG 微片激光回馈干涉仪

张永芹<sup>1,2</sup> 张松<sup>2</sup> 邓勇<sup>1</sup> 张书练<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019

<sup>2</sup>清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

**摘要** Nd:YAG 激光回馈干涉仪已实现仪器化,但在实际应用中仍然存在不足。测量了 Nd:YAG 微片激光器的基本参数,设计了红光指示装置、准直扩束装置和空气折射率补偿系统,完成了指示 1064 nm 的不可见光的同时实现了量程提高和波长补偿,得到了使用更方便、量程更大、应用范围更广、测量精度更高的实用 Nd:YAG 激光回馈干涉仪。

**关键词** 测量;回馈干涉仪;微片激光器;光回馈;Nd:YAG

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0302002

## Nd:YAG Microchip Laser Feedback Interferometer

Zhang Yongqin<sup>1,2</sup> Zhang Song<sup>2</sup> Deng Yong<sup>1</sup> Zhang Shulian<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract** At present, Nd:YAG laser feedback interferometer has been achieved. However, in the actual application some deficiencies still exist in this system. Basic parameters of Nd:YAG microchip laser are measured and the instruction of the invisible light with the wavelength of 1064 nm is realized, with the improvement of the measurement range and the compensation of air refractive index, by combining red indicating device, collimating and beam expanding device and the refractive index of air compensating system with the original Nd:YAG laser feedback interferometer. So Nd:YAG laser feedback interferometer is more convenient to use with a broader application and higher accuracy.

**Key words** measurement; feedback interferometer; microchip laser; optical feedback; Nd:YAG

**OCIS codes** 140.3425; 140.3518; 140.3530

## 1 引言

激光回馈是指在光学系统中用一个外反射物体将激光器输出的部分光束回馈到激光器谐振腔内,与激光器内部的光场混合,调制激光器的输出。通过对激光器输出光强的解调即可得到外部被测物体的信息。

任舟<sup>[1]</sup>研制的 Nd:YAG 激光回馈干涉仪将移频光回馈系统与相位外差测量技术结合,实现了高分辨率的非接触式运动位移测量。Nd:YAG 激光

回馈干涉仪由光学系统、光电处理系统及软件系统构成。其中光学系统由 Nd:YAG 微片激光器、分光镜、两个声光移频器、会聚透镜、参考镜和光电探测器组成。其基本原理为:频率为  $\omega$  的激光光束,经第一个声光移频器移频后分为两束,频率分别为  $\omega$  和  $\omega - \Omega_1$  ( $\Omega_1$  为第一个声光移频器的驱动频率);这两束光经第二个声光移频器后分为 4 束,频率分别为  $\omega, \omega - \Omega_1, \omega - \Omega_2$  和  $\omega - \Omega$  ( $\Omega_2$  为第二个声光移频器的驱动频率,  $\Omega = \Omega_2 - \Omega_1$ )。频率为  $\omega - \Omega$  的光

收稿日期: 2012-09-24; 收到修改稿日期: 2012-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(60827006)资助课题。

作者简介: 张永芹(1986—),女,硕士研究生,主要从事测试技术及仪器方面的研究。E-mail: yongqin2010@126.com

导师简介: 邓勇(1965—),男,高级工程师,硕士生导师,主要从事测试技术及仪器方面的研究。

E-mail: dengy@ntu.edu.cn(通信联系人)

经被测目标后沿原路返回至微片激光器形成频率为  $2\Omega$  的测量回馈光,同时频率为  $\omega$  的光束经参考反射镜后沿与测量回馈光平行的方向返回至微片激光器形成频率为  $\Omega$  的参考回馈光,测量回馈光和参考回馈光呈准共路关系。同时测量参考回馈光与测量回馈光的相位变化,两者之差即可准确反映被测目标的位移信息。

目前,Nd:YAG 激光回馈干涉仪已实现仪器化,但是在实际应用中仍存在以下几方面的不足:1)微片激光器发出的激光波长为 1064 nm,属不可见光,在调整和使用时需要用专门的感光卡,这给使用带来很大的不便;2)现有的 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的量程为 1 m,限制了回馈干涉仪的实际应用,需进一步扩大;3)此回馈干涉仪的数据采集系统中环境参数默认设为在一个标准大气压下的值,但实际使用环境并不是在一个标准大气压下,故应对波长进行补偿,以提高测量精度。针对上述问题,本文从基本理论出发找到解决问题的方案,在此理论基础上对 Nd:YAG 微片激光器的基本特性及参数进行了实验研究,根据基础实验数据设计加工了一套样机,并针对样机进行了效果检测实验。

## 2 原 理

### 2.1 可见光指示

Nd:YAG 微片激光器发出波长为 1064 nm 的激光,属于不可见光。只要在系统中增加一路可见光,让其与 1064 nm 的不可见光共线的同时不干扰 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的正常工作即可起到指示的作用。

### 2.2 准直扩束

从理论上讲,激光回馈与激光相干长度无关,因此它的量程可以达到无穷大。但是由于激光功率有限、光束发散、大气的吸收等原因会导致光信号的衰减,从而限制量程。

限制 Nd:YAG 激光回馈干涉仪测量量程的主要因素是光束的发散,所以需要利用光学系统来改善光束的方向性,即压缩光束的发散角以提高回馈干涉仪的量程。

束腰大小为  $w_0$ ,发散角为  $\theta = 2\lambda w_0/\pi$  的高斯光束经焦距为  $f$  的单透镜后,像高斯光束的发散角<sup>[2~6]</sup>

$$\theta' = \frac{2\lambda w'_0}{\pi} = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{l}{f}\right)^2}{w_0^2} + \frac{\left(\frac{\pi w_0}{\lambda}\right)^2}{f^2}}. \quad (1)$$

由(1)式可看出对于给定的有限大小的束腰半径  $w_0$ ,无论  $f, l$  取什么数值,都不能使  $\theta' \rightarrow 0$ 。这表明从原则上讲高斯光束经单透镜后不可能转换成平面波,但在一定条件下, $\theta'$  可达到极小值。由条件  $\frac{\partial \theta'}{\partial l} = 0$  解得,当  $l = f$  时, $\theta'$  得到极小值,即

$$\theta'_{\min} = \frac{2w_0}{f}. \quad (2)$$

由此可得,当透镜的焦距  $f$  一定时,若入射高斯光束的束腰在透镜的后焦面上,即  $l = f$ ,则  $\theta'$  达到极小值。此时, $f$  越大, $\theta'$  越小,高斯光束的方向性越好。故若先用一个短焦距的透镜将高斯光束聚焦,以获得极小的腰斑,然后再用一个长焦距的透镜来改善其方向性,就能达到很好的准直效果。将上述的两个透镜按图 1 的方式组合起来就得到一个倒置的望远镜系统。

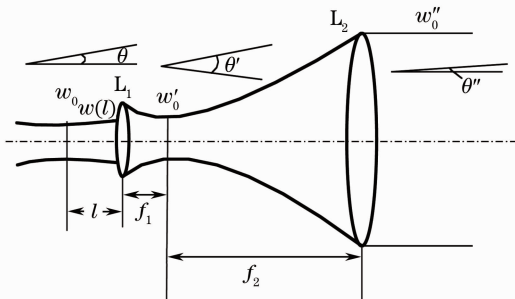


图 1 准直和扩束系统

Fig. 1 Collimating and beam expanding system

图 1 中  $L_1$  的焦距为  $f_1$ ,且满足  $f_1 \leq l$ ,所以得到极小的光斑

$$w'_0 = \frac{\lambda f_1}{\pi w(l)}, \quad (3)$$

式中  $w(l)$  为入射在短焦距透镜  $L_1$  表面上的光斑半径,由于  $w'_0$  恰好落在长焦距透镜  $L_2$  的后焦面上,所以腰斑为  $w'_0$  的高斯光束被  $L_2$  很好地准直。且经计算可得

$$\frac{\theta'_0}{\theta_0} = \frac{\theta'_0}{\theta'_0} \frac{\theta'_0}{\theta_0} = \frac{\pi w_0'^2}{\lambda f_2} \frac{w_0}{w'_0} = \frac{\pi}{\lambda f_2} w_0 w'_0, \quad (4)$$

从而可得倒置望远镜系统对高斯光束的准直倍率

$$M' = \frac{\theta_0}{\theta'_0} = \frac{f_2 w(l)}{f_1 w_0} = M \sqrt{1 + \left(\frac{l}{f}\right)^2} = M \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda l}{\pi w_0^2}\right)^2}, \quad (5)$$

式中  $M = \frac{f_2}{f_1}$ ,为倒置望远镜系统中长短焦距透镜的焦距比,也就是通常所说的望远镜的准直倍率。

望远镜系统根据目镜光焦度的正负分为开普勒

望远镜系统和伽利略望远镜系统。开普勒望远镜系统由两正光焦距的透镜组成故成倒像,而伽利略望远镜系统的目镜为负光焦距的透镜,故成正像。并且对于相同放大率,伽利略望远镜的筒长小于开普勒望远镜的筒长,所以选用伽利略望远镜系统。

系统中由于  $w'_0$  并不能准确地落在  $L_1$  的前焦面上,所以望远镜系统允许做微小的调整。

### 2.3 空气折射率补偿

空气折射率影响着 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的测量精度,在实际使用时应对以下两方面进行补偿。首先是空气折射率的变化对波长值的影响,其次是将非 20 °C 下的测量值转化为 20 °C 下的示值。故补偿量为<sup>[7,8]</sup>

$$\delta\lambda = \delta\lambda_n + \delta\lambda_w = -\frac{\lambda_0}{n_s} \delta n_s - \frac{\lambda_0}{n_s} (t_w - 20) a, \quad (6)$$

式中  $\delta\lambda_n$ 、 $\delta\lambda_w$  分别表示上述两方面的补偿值,  $\lambda_0$  为激光在真空中的波长值,  $n_s$  为正常态(温度  $t = 20$  °C, 湿度  $f = 1333.22$  Pa(10 mmHg), 气压  $p = 101325$  Pa) 的空气折射率,  $t_w$ 、 $a$  分别为被测件的温

度和热膨胀系数。

根据 Edlen 公式,影响空气折射率的主要因素为温度、湿度及气压,且在正常态附近的微分关系式为

$$\delta n_s = (0.268\delta p - 92.9\delta t - 0.042\delta f) \times 10^{-8}, \quad (7)$$

式中  $\delta p$ 、 $\delta t$ 、 $\delta f$  为气压、温度、湿度相对于正常态的变化量。所以由(6)式和(7)式可得实际测量时的波长补偿量为

$$\delta\lambda = -\lambda_s [(0.268\delta p - 92.9\delta t - 0.042\delta f) \times 10^{-8} + (t_w - 20)a], \quad (8)$$

式中  $\lambda_s$  为正常态的波长值。

### 3 系统结构的设计及实验

图 2 为系统总体结构,图中 1 为 Nd:YAG 微片激光器,2 为分光镜,1、3 为半导体激光器,4 为声光移频器,1、5 为声光移频器,2、6 为会聚透镜,7 为参考反射镜,8 为分光镜,2、9 为扩束装置。

图 3 为设计加工的实验样机。

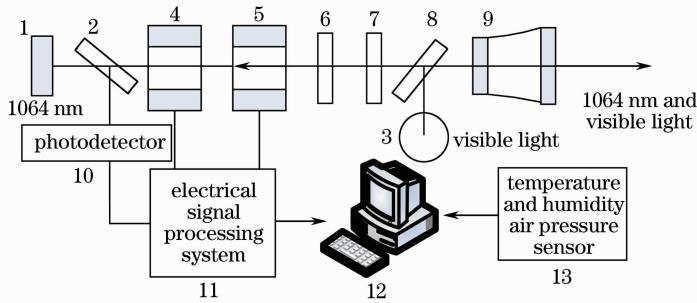


图 2 系统结构

Fig. 2 System configuration

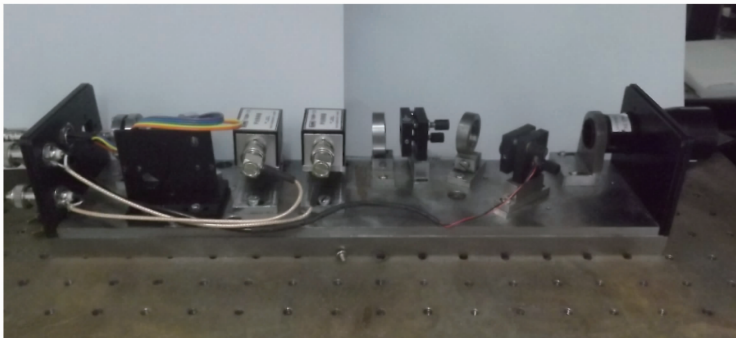


图 3 样机

Fig. 3 Prototype

#### 3.1 可见光指示装置的设计

可见光的光源可以是发出任意波段可见光的激光器,但由于半导体激光器体积小,利于仪器化,故采用能发出 650 nm 激光的半导体激光器。可见光位置的选择应符合两项要求:1) 可见光不能影响波

长为 1064 nm 激光的调制;2) 尽量不改变原系统的结构。基于上述第一个要求,在系统中增加一个镀双色膜(对 1064 nm 激光部分反射,部分透射;对可见光全反射)的分光镜;基于第二个要求,将可见光与镀双色膜的分光镜放在原有系统的尾端,即参考

反射镜后,系统结构如图 2 所示。

### 3.2 扩束装置的设计及实验

扩束装置的设计及安装需要知道 Nd:YAG 微片激光器的一些基本参数,本文采用刀口法测量

Nd:YAG微片激光器的束腰半径、束腰位置及发散角,为扩束装置的设计提供了基本参数。

采用测量高斯光束光斑尺寸及束腰尺寸较为理想的刀口法进行测量<sup>[9,10]</sup>。实验原理如图 4 所示。

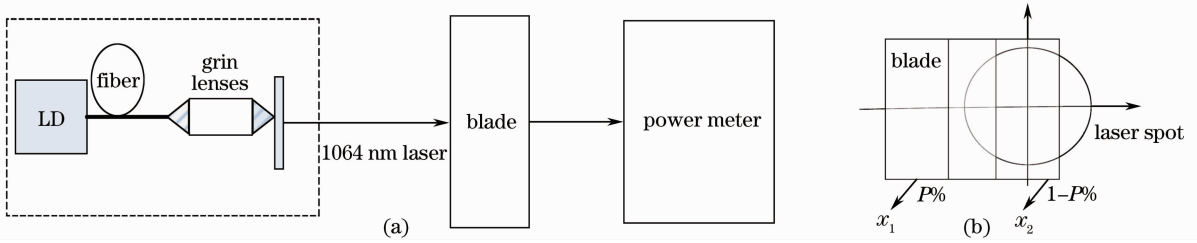


图 4 测量原理图。(a)实验装置示意图;(b)刀口切割光束示意图

Fig. 4 Principal diagram of measurement. (a) Schematic diagram of experimental apparatus; (b) schematic diagram of beam cutting

图 4(a)为刀口法测量高斯光束光斑半径的装置示意图。刀片被固定在光学平移台上,可沿与光束传播垂直方向切割光束。图 4(b)为刀口垂直切割光束示意图,当刀口移动到位置  $x_1$  时,刀片遮挡部分激光,透过刀口边缘激光功率为总功率的  $P\%$ ;当刀口移动到位置  $x_2$  时,透过刀口边缘激光功率为总功率的  $1-P\%$ 。采用较为常用的  $90\%/10\%$  刀口测量方法,取  $P\%=90\%$ ,测量透过刀口边缘激光功率占总功率百分比分别为  $90\%$  和  $10\%$  时刀口的位置  $x_1$  和  $x_2$ ,以确定刀口边缘与光斑中心的距离  $x=(x_2-x_1)/2$ ;由理论分析知此时光斑半径与  $x$  的比值为  $1.561$ ,所以将  $x$  乘以  $1.561$  即可得刀口处高斯光束光斑半径。在光束传播方向等间隔地测出一组  $\omega_n$ ,通过双曲线拟合方程  $\omega_n^2=A+BZ+CZ^2$

拟合出系数  $A, B, C, A=0.7766, B=0.0085, C=0.0007$ ,再由公式  $\omega_0 = \sqrt{A-B^2/(4C)}$  计算出高斯光束束腰半径。

实验测得 Nd:YAG 微片激光器的发散角为  $2.9 \text{ mrad}$ ,束腰半径为  $0.23 \text{ mm}$ ,束腰位置在微片激光器的中心。将参数代入准直扩束的基本原理式,确定扩束装置的透镜参数及安装位置。

由于激光器的光斑经扩束镜扩束后会变大,光斑过大会影响回馈干涉仪的测量精度,故扩束倍数不能太高。所以从厂家定制了  $2\times, 2.5\times, 3\times$  和  $4\times$  的扩束镜并分别装入系统进行实验以选择最佳扩束倍数。

图 5 是对配合目标也就是一个反射率为  $4\%$  的镜片的实验结果。 $\rightarrow$  为不加扩束镜时信号幅值随距

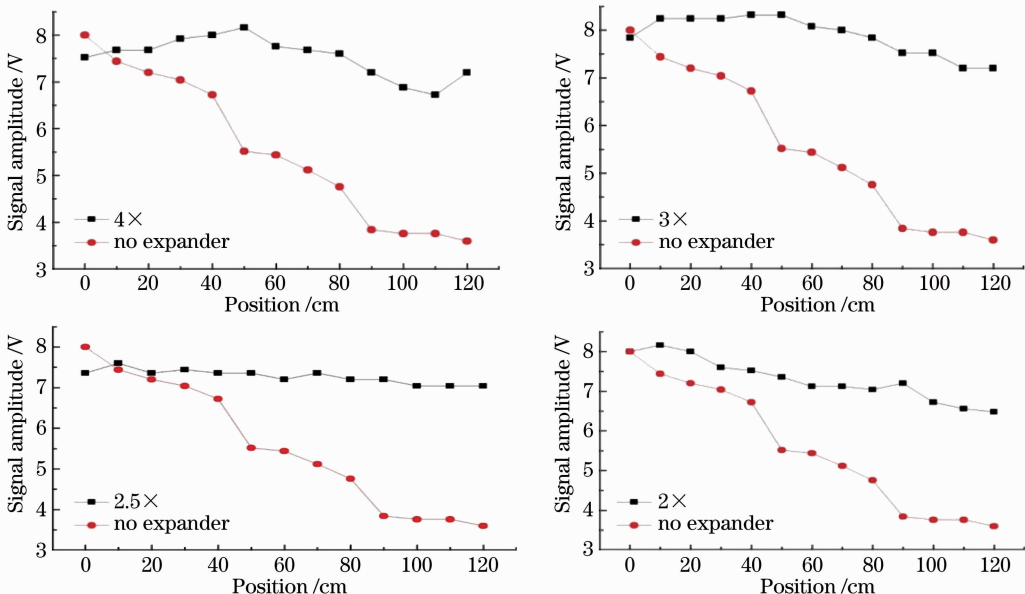


图 5 配合目标信号随距离的变化

Fig. 5 Change of signal with distance for coordinate target

离的变化。可以看到,信号幅值随距离下降很快,而当加上扩束镜之后,信号下降很缓慢。可见,对于配合目标来说,扩束效果非常理想,信号的下降速度大大减缓,量程大大增加。且由图 5 不难看出,此时 3× 和 2.5× 的扩束镜的扩束效果较为理想,信号大且相对稳定。

图 6 是对非配合目标也就是一个普通的铝块的实验结果。同样地,→ 为不加扩束镜时信号幅值随

距离的变化。可以看到,信号幅值随距离下降速度要比配合目标快得多,30 cm 后已经下降到 1 V 以下,不能用来测量,而且规律也不是很明显,而当加上扩束镜之后,信号虽然有较大起伏,但是在 120 cm 的范围内都可以保持在 2 V 以上,可以用来测量。且由图 6 不难看出,此时 4× 和 2.5× 的扩束镜的扩束效果较好。

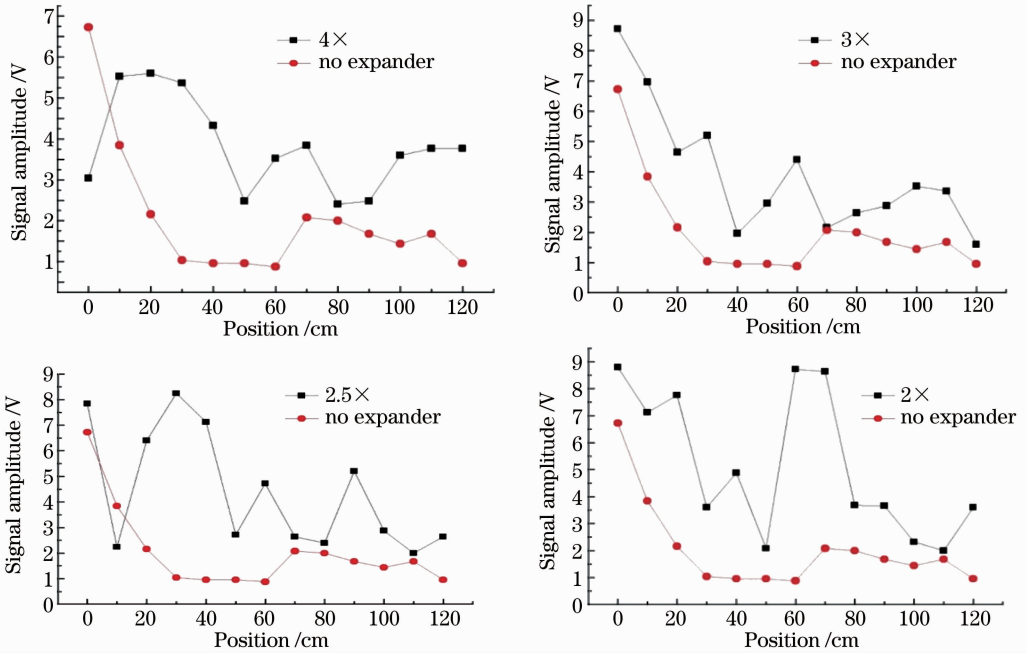


图 6 非配合目标信号随距离的变化

Fig. 6 Change of signal with distance for incoordinate target

由以上两组实验可知扩束效果非常明显,且扩束倍数为 3× 时效果最为理想,此时信号幅值大,且相对稳定。选用 3× 的扩束镜作为扩束准直系统,不同目标的反射光强度不同。为了获得回馈干涉仪

对于不同粗糙度目标的量程,用标准的粗糙度样块进行了量程标定实验。能产生 2 V 以上信号的最远距离即为量程。实验结果如表 1 所示。

表 1 量程标定

Table 1 Calibrated span

	Ra									
Processing methods	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	
Grind	>5	>5	>5							
Plan abrasion			>5(8.4)	>5(5.92)	>5(4.08)	>5(4.72)				
Wrot						>5(3.36)	>5(3.6)	>5(3.2)	>5(2.88)	
End milling						1.5(2.64)	1.5(2.4)	1.5(2.24)	1.5(2)	
Cylindrical grinding			1.5(4.72)	1.5(3.76)	1.5(3.68)	1.5(4.16)				
Turning						1(7.44)	1(5.2)	1(5.76)	1(6.32)	

### 3.3 空气折射率补偿系统及实验

空气折射率补偿主要有自动补偿、手动补偿和利用光干涉法直接测量空气折射率三种方法。本文采用自动补偿法,因为这种方法适用于实时现场测量<sup>[4,5]</sup>。图 7 是自动补偿的原理框图。温度、湿度、

气压传感器及物体温度传感器将数据经数据采集卡(DAQ)送入计算机中按(8)式进行补偿。

自动补偿系统中空气温湿度传感器的温度精度为±0.2℃,大气压力传感器的精度为±0.2 kPa,相对湿度传感器精度为±3%,物体温度传感器精

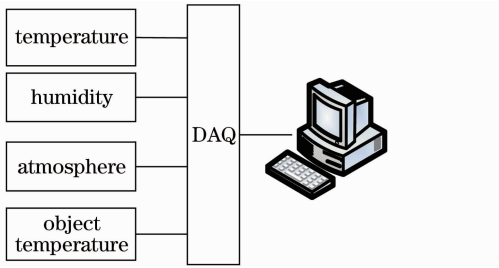


图 7 自动补偿的原理框图

Fig. 7 Block diagram of automatic competition

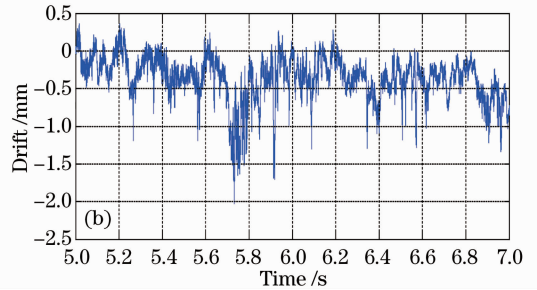
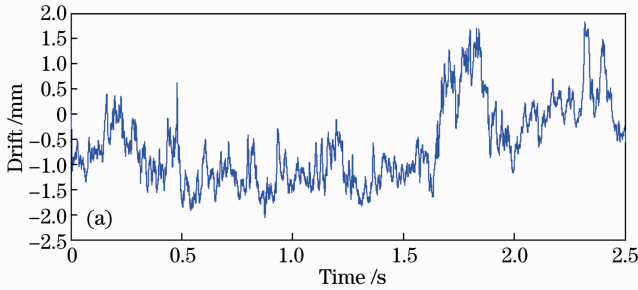


图 8 零漂。(a)无补偿;(b)带补偿

Fig. 8 Drift. (a) Without competition; (b) with competition

## 4 结 论

对 Nd:YAG 微片激光器的基本参数进行了测量,为 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的优化提供了理论依据,同时通过红光指示装置、准直扩束装置和空气折射率补偿系统实现了 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的优化。其中红光指示装置使得仪器在使用时无需借助其他元器件或装置即可判断光束的方向,这极大方便了用户的使用;准直扩束装置扩大了系统的测量量程,即使是表面粗糙度为 6.3 的普通物体,其量程也可达到 5 m;空气折射率补偿系统补偿了因空气折射率变化带来的测量误差,提高了 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的测量精度。最终得到了使用更方便,量程更大,应用范围更广泛,测量精度更高的 Nd:YAG 激光回馈干涉仪。

## 参 考 文 献

- 1 Ren Zhou. Microchip Nd:YAG Laser Feedback Interferometer and Its Application[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011  
任 舟. 微片 Nd:YAG 微片激光回馈干涉仪及应用[D]. 北京:清华大学, 2011
- 2 Mao Menwei. Optical Engineering Foundation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007  
毛文炜. 光学工程基础[M]. 北京:清华大学出版社, 2007
- 3 Li Shijie, Jiang Yanan. Laser Fundamental [M]. Beijing: Publishing House of Mechanical Industry, 1988  
李士杰, 姜亚南. 激光基础[M]. 北京:机械工业出版社, 1988
- 4 Deng Yong, Zhang Yongqin, Yang Yuping. Research on angular drift of Nd:YAG microchip lasers[J]. *Laser & Optoelectronics*

度为 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。将带补偿的系统的零漂(即被测物不动时,由环境干扰及频率漂移引起的测量误差)与不带补偿的系统的零漂进行比较,如图 8 所示。

图 8(a)是不带补偿的系统的零漂,实验采集了近 7 h 的数据,系统的零漂为 200 nm,图 8(b)是带补偿系统的零漂,实验也近 7 h,系统的零漂为 150 nm。由此可见空气折射率补偿系统大大减小了系统的测量误差,且让其波动幅度减小,从而提高了测量精度。

*Progress*, 2012, **49**(5): 051404

邓 勇, 张永芹, 杨玉萍. Nd:YAG 微片激光器角漂移研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(5): 051404

5 Zhang Yongdong, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo *et al.*. Laser diode pumped efficient continuous wave and picoseconds Yb:YGG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202005

张永东, 魏志义, 张治国 等. 激光二极管抽运的高效率 Yb:YGG 激光器的连续及锁模运转[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202005

6 Jiang Menghua, Li Qiang, Lei Hong *et al.*. Study on producing non-tapered holes with adaptively collimating high peak power pulsed Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1003004

姜梦华, 李 强, 雷 旬 等. 高峰值功率自适应准直脉冲 Nd:YAG 激光加工无锥度直孔研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1003004

7 B Edlen. The reflective index of air[J]. *Metrologia*, 1966, **2**(2): 71~80

8 Xian Yimin, Xue Mei. Laser wavelength compensation[J]. *Tool Engineering*, 2004, **38**(9): 142~143

姜一民, 薛 梅. 激光波长补偿问题[J]. *工具技术*, 2004, **38**(9): 142~143

9 Fan Xinmin, Zheng Yi, Sun Qibing *et al.*. Experimental study on measuring the beam waist of Gaussian laser beam using a 90/10 knife-edge method [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(6): 541~543

樊心民, 郑 义, 孙启兵 等. 90/10 刀口法测量激光高斯光束束腰的实验研究[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(6): 541~543

10 Yang Xiaodong, Shao Jianxin, Liao Shenghong *et al.*. Investigation on measuring beam width of the Gaussian beam by knife-edge method [J]. *Laser & Infrared*, 2009, **39**(8): 829~832

杨晓冬, 邵建新, 廖生鸿 等. 刀口法测量高斯光束光斑半径研究[J]. *激光与红外*, 2009, **39**(8): 829~832