

# 基于 F-P 腔强度解调的微位移传感器

李春成 王 鸣 夏 巍 刘 强 郝 辉

(南京师范大学物理科学与技术学院 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要** 基于一次谐波腔长锁定技术,设计了一种基于法布里-珀罗(F-P)腔干涉的强度解调型微位移传感器。系统对 F-P 腔的初始腔长进行动态锁定,通过将 F-P 腔腔长的微小变化转化为强度信号,实现直接快速地对待测目标的微位移进行测量。详细地阐述了位移传感器的理论模型及一次谐波锁定 F-P 腔腔长的技术方案,实验中采用商用的高精度压电陶瓷平移台(PZT)模拟了实际物体的运动状态,实验结果表明,该系统对峰峰值在  $\lambda/4$ ( $\lambda$  为光波波长)以内、频率不高于 400 Hz 的微位移有很好的测量结果,频率误差小于 0.5 Hz,测量精度小于 1 nm。

**关键词** 传感器;法布里-珀罗干涉;微位移;强度解调;腔长锁定

**中图分类号** TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0628001

## A Novel Fabry-Pérot Micro-displacement Sensor Based on Intensity Demodulation Method

Li Chuncheng Wang Ming Xia Wei Liu Qiang Hao Hui

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology of Jiangsu Province, College of Physics Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

**Abstract** According to the first harmonic cavity-length locking technology, a novel kind of micro-displacement sensor, which combines Fabry-Pérot (F-P) interferometer and intensity demodulation method, has been developed. The initial length of the F-P cavity has been actively scanned and dynamically locked. And then the change of the F-P cavity-length induced by the motion of the target is coded on the variation of the optical output power of the cavity. As a consequence, a fast and direct micro-displacement sensing scheme through the intensity demodulation is available. The theoretical model of the displacement sensor and the technical scheme for actively locking the initial length of the F-P cavity through the first harmonic have been demonstrated in detail, respectively. Micro-displacement experiments provided by a commercial high-precision PZT with different vibrating parameters have been performed, and the experimental results agree well with the motion of the PZT within peak-to-peak amplitude of  $\lambda/4$  and frequency is no more than 400 Hz. The frequency error is less than 0.5 Hz, and the total measurement accuracy is less than 1 nm.

**Key words** sensors; Fabry-Pérot interference; micro displacement; intensity demodulation; cavity length lock

**OCIS codes** 120.5060; 120.2230; 120.3180; 120.3930

## 1 引 言

目前,由于微/纳机电系统(MEMS/NEMS)很好地融合了强大的功能性和微型化的优点,其在基础科学研究和应用科学研究领域发挥着越来越

重要的作用<sup>[1-2]</sup>。例如:这类微器件可以用于位移和加速度传感器、滤波器、超声换能器等<sup>[3-10]</sup>。随着这些设备的不断缩小,在其设计和制造过程中需要对器件尺寸进行测量表征,获得一些重要的参数,诸

**收稿日期**: 2013-12-14; **收到修改稿日期**: 2014-02-11

**基金项目**: 国家自然科学基金(91123015)、江苏省高校自然科学研究面上项目(11KJB510006)、江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX13\_389)

**作者简介**: 李春成(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光自混合干涉进行纳米测量方面的研究。

E-mail: lcc2yn@hotmail.com

**导师简介**: 王 鸣(1950—),男,博士,教授,主要从事激光自混合有源集成传感技术、光纤 MEMS 器件的制作和光纤传感技术等方面的研究。E-mail: wangming@njnu.edu.cn(通信联系人)

如器件在纳米甚至皮米级范围内振动的幅度和相位,一旦这些参数被确定下来,能够有效地暴露出微小器件在生产加工过程中的潜在问题并以此作出相应的补偿。

由于微纳机电系统部件的尺寸小、质量轻,其部件典型的运动幅度在亚微米甚至是纳米量级,此外,某些器件的本征频率已经超过 1 GHz<sup>[11]</sup>,因此需要测量技术同时具有纳米精度及大的测量速度范围。目前,光学干涉测试方法主要是,路径稳定迈克耳孙干涉仪和法布里-珀罗(F-P)干涉仪,这两种方法可以满足室温条件下微纳机电系统对测试灵敏度及测试带宽的要求<sup>[12-13]</sup>。在路径稳定的迈克耳孙干涉仪中,测量光束严格地聚焦在发生微小运动的器件尺寸表面,并与参考光发生干涉;而在 F-P 干涉仪中,器件表面与衬底构成了一个低反射率的腔,器件表面发生的微小位移将改变 F-P 腔的腔长,从而调制光信号的输出强度。由于在实验中需要将干涉信号锁定在半条纹处从而进行强度解调,截止到目前,研究者采用的均是通过压电陶瓷(PZT)驱动参考镜实现腔长的锁定<sup>[14]</sup>。由于 PZT 的运动具有非线性,会对测量结果引入误差,此外,干涉仪中存在的机械运动限制了系统的调制带宽。本文将电光晶体引入 F-P 腔干涉仪中,并通过一次谐波腔长锁定技术可靠地将 F-P 腔干涉信号稳定在半条纹处,从而对待测目标的微小位移进行实时精确测量。同时,通过软件校正的方法,对温度漂移、光源的涨落等因素而引起的误差都有很强的抑制作用,从而能够很好地响应待测微小振动。

## 2 基于 F-P 干涉仪强度解调微小位移测量原理

### 2.1 测量原理

测量系统的示意图如图 1 所示,其中 BS 为光

棱镜,EOM 为电光调制器。系统中由参考镜(RM)和测量镜(Target)构成了的 F-P 腔,考虑到参考镜和测量镜的反射率较低,外部光反馈处于比较低的水平<sup>[15]</sup>,由光反馈引入的光频波动可以忽略<sup>[16]</sup>,那么由光电探测器 PD2 获得的 F-P 干涉信号可以简化为

$$I_{PD} = \frac{I_1 + I_2}{2} + \sqrt{I_1 I_2} \cos\{2k[d_0 + d(t)]\}, \quad (1)$$

式中  $I_1$  和  $I_2$  分别是参考镜反射的光波  $E_1$  和测量镜表面反射的光波  $E_2$  的光强, $d_0$  是参考镜与测量镜的初始距离,即初始腔长, $d(t)$  为被测物体的微小位移。因此,F-P 腔的干涉信号具有标准的余弦波形,通过提取干涉信号的位相,就可以达到对物体的位移进行测量的目的<sup>[17]</sup>。考虑物体的位移范围在纳米量级,即  $|d(t)| \ll d_0$ ,在测量时间段内可以认为  $d_0 \approx d_0 + d(t)$ ,那么在一阶近似下,(1)式可改写为

$$I_{PD} = \frac{I_1 + I_2}{2} + \sqrt{I_1 I_2} [\cos(2kd_0) - 2kd(t) \sin(2kd_0)], \quad (2)$$

其交流分量为

$$I_{ac} = -2kd(t) \sqrt{I_1 I_2} \sin(2kd_0). \quad (3)$$

因此,被测物体运动的振幅和相位都包含在干涉信号的交流分量  $I_{ac}$  中,其幅值依赖于初始距离  $d_0$ 。由于干涉信号的交流分量  $|I_{ac}|$  与被测物体的实时位移成简单的线性关系,因此可以通过直接强度解调的方法实现微位移的测量。

### 2.2 一次谐波锁定腔长的理论分析

若被测物体做简谐振动,根据(3)式可以得到,当  $d_0$  为  $\lambda/8$  ( $\lambda$  为光波波长)的奇数倍时,干涉信号输出幅值  $|I_{ac}|$  取极大值,此时干涉信号的幅度最强,信噪比最好,测量的结果最准确,如图 2 所示,其中  $I_{DC}$  为直流分量, $d_{amp}$  为 PZT 振动的幅值, $\omega_0$  为 PZT 振动的频率。因此需要动态调节 F-P 腔的初始腔

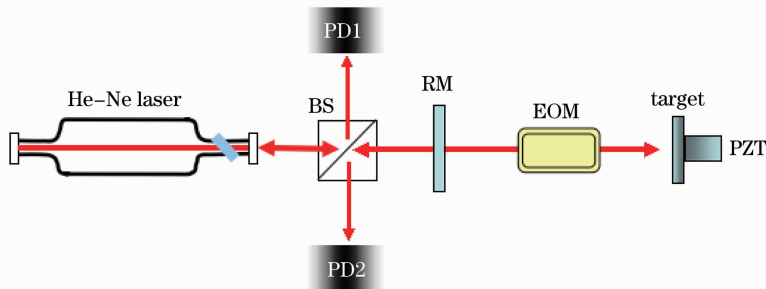


图 1 混合型干涉仪的实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the hybrid interferometer

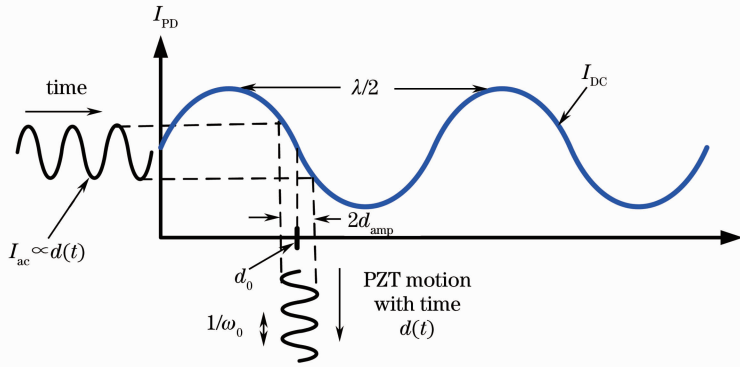


图 2 PD 探测的光强与腔长的关系示意曲线

Fig. 2 Output of a photodiode with regard to the cavity length

长,使干涉仪追踪待测的微小振动信号。

假设当前 F-P 腔腔长为  $d_0$ , 对应初始相位为  $\psi_0 = 4\pi d_0/\lambda$ , 由于腔内置有电光晶体, 利用晶体的电光效应产生一个高频正弦测试信号, 引起 F-P 腔相位变化量大小为  $A\sin(\Omega t)$ ,  $\Omega$  为调制的频率,  $A$  为调制深度, 施加调制后的 F-P 腔干涉信号为

$$I_{PD}(\psi') = \frac{I_1 + I_2}{2} + \sqrt{I_1 I_2} \cos[\psi_0 + 2A\sin(\Omega t)]. \quad (4)$$

式中  $\psi'$  为总相位。

由于调制深度较小, 一般  $A \ll \pi$ , 可以在  $\psi_0$  处做泰勒分析, 干涉信号可以做泰勒展开:

$$I_{PD}(\psi') = I_{PD}(\psi_0) + I_{PD}^{(1)}(\psi_0) 2A\sin(\Omega t) + \frac{1}{2!} I_{PD}^{(2)}(\psi_0) [2A\sin(\Omega t)]^2 + O(A^2), \quad (5)$$

式中  $I_{PD}^{(n)}(\psi_0)$  为  $n$  阶导函数, 将得到的干涉信号和调

制信号同相的参考信号  $\sin(\Omega t)$  相乘, 并计算其傅里叶展开, 有

$$F(\psi_0) = \frac{1}{T} \int_0^T \sin(\Omega t) I_{PD}(\psi') dt = \frac{1}{T} \int_0^T 2A \sin^2(\Omega t) \times [-I_1 I_2 \sin(\psi_0)] dt = AI_1 I_2 \sin(\psi_0). \quad (6)$$

因此, 在相同的测试信号条件下, 扫描 F-P 腔初始腔长时, (6) 式的输出信号正比于初始腔长的正弦函数, 测量其极大值出现的位置, 通过反馈将初始腔长锁定于  $d_0$  为  $\lambda/8$  的奇数倍, 在此基础之上, 可以对待测物体任意微小位移信号进行重构。

### 3 实验装置与软件程序

实验系统如图 3 所示, 光路部分包含一个 He-Ne 激光器 (632.8 nm, TEM00), 分光棱镜 (BS), 半透半反参考镜 (RM), 电光调制器 EOM (New Focus

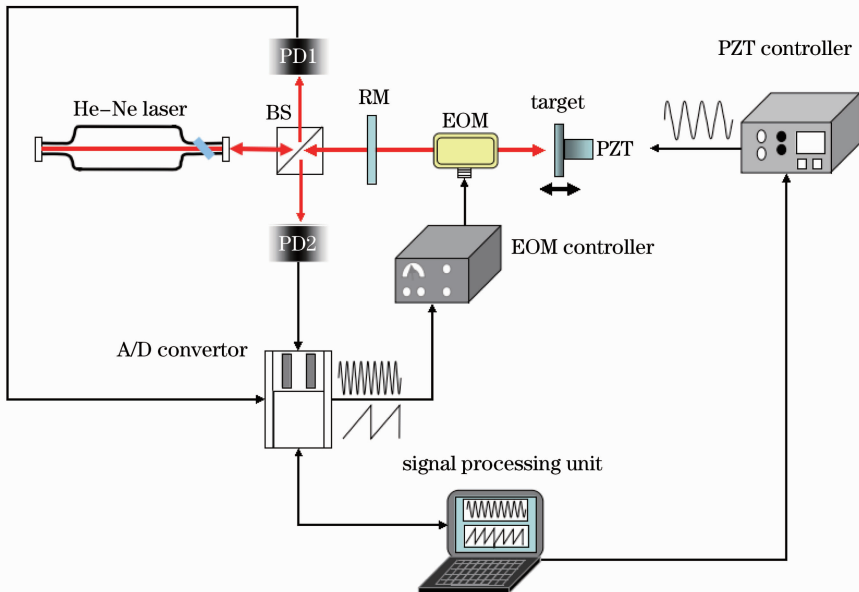


图 3 混合型干涉仪的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the hybrid interferometer

4002), 被测物体 (Target) 及两个光电探测器 (PD1 和 PD2)。被测物体是固定在平移台 (PZT) 上反射率约为 0.4 的硅片, 通过 PZT 的振动来模拟实际的微小振动, 信号处理与控制通过电计算机 (signal processin unit) 控制。首先, PD1 和 PD2 探测的干涉信号通过数据采集卡 (NI-6251) 进行 A/D 转换 (A/D convertor); 另外, 数据采集卡的模拟输出端接 EOM 控制器 (EOM controner), 来控制 EOM 的工作。采集到的信号送入计算机中由数据分析软件 Labview 实现信号的优劣判断与取舍。

实验中通过 Labview 软件控制数据采集卡 PCI-6251 的输出和采集过程的流程为如图 4 所示。

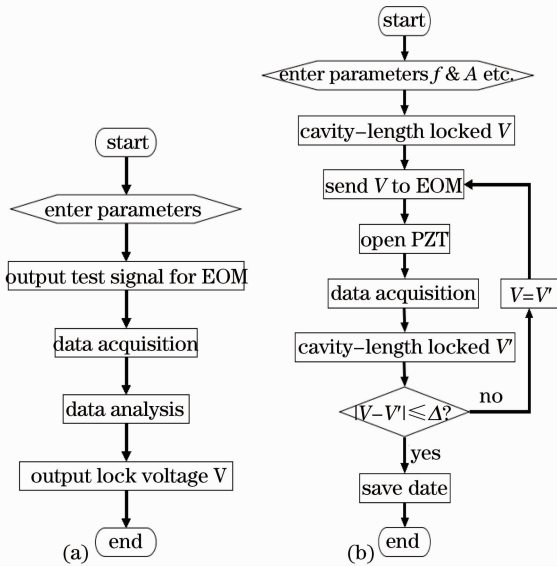


图 4 (a) 锁定流程图; (b) 测量过程流程图  
Fig. 4 (a) Flow chart of cavity locking scheme;  
(b) flow chart of the measurement process

图 4(a) 为锁定工作点过程, 首先读取预先输入的测试信号 (低频的锯齿信号和高频的正弦信号) 的频率  $f$ 、幅度  $A$ , 将采集卡的模拟信号输出端接到 EOM 的高压放大器上, 此时 EOM 就会使得通过它的光跟随输入信号产生相位变化。用采集卡采集 PD 的输出信号, 就可以得到如图 5(b) 中实线所示的干涉谱, 对所得干涉谱采用 Labview 的一次谐波锁定腔长的方法就可以得到静态工作点对应的扫描信号电压  $V$ 。Labview 的软件部分主要是通过对干涉谱进行锁相放大处理后, 取得信号高频振动的幅值变化关系, 如图 5(b) 中的虚线所示。虚线的极大值位置就对应静态工作点的位置, 取得虚线的极大值位置, 这样也就锁定了工作点的电压  $V$ 。

由于环境温度的变化、光源的输出光强不稳定等因素会影响系统的准确性, 因此在 BS 中引出一

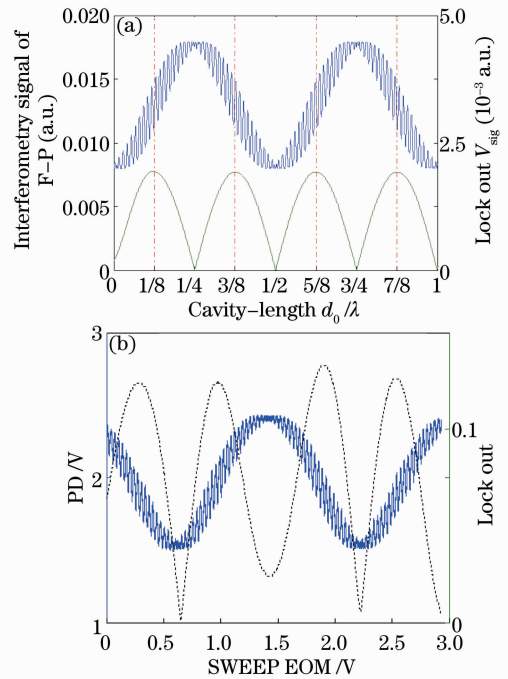


图 5 一次谐波锁定腔长 (a) 仿真图; (b) 实验图

Fig. 5 The first harmonic for locking the initial length of the F-P cavity. (a) Simulation results; (b) experiment results

路光直接进入 PD1 作为锁定静态工作点的参考, 通过 PD2 探测到的信号进行静态工作点的选取与测量。整个过程的流程如图 4(b) 所示, 先输入测试信号的频率  $f$ 、幅度  $A$  以及测量允许的偏差  $\Delta$  等参数, 然后锁定工作点得到静态工作点的电压  $V$ 。将此电压  $V$  通过采集卡加到 EOM 上后, 打开 PZT, 让 PZT 带动被测物体做小幅振动, 这样就可以在 PD 的输出端采集到干涉谱, 预存此时的干涉信号。再一次锁定工作点, 将得到的静态工作点电压  $V'$  与第一次锁定工作点时的电压  $V$  进行比较, 如果相差不超过预先设定的偏差  $\Delta$ , 就可以认为此次采集的数据有效并保存此次数据, 如若不然, 将此次的静态工作点电压作为锁定工作点电压加到 EOM 上, 再次测量采集, 直到满足条件为止。

图 5(a) 为锁定静态工作点的仿真结果, 从图 5 的两幅图可以看出, 理论与实验符合的很好, 也验证了一次谐波锁定腔长的方法的可行性。

## 4 实验与讨论

图 6 是实验中, 不同振动峰峰值与 PD 探测光强幅值的对应关系图, 其中 NO. 1、NO. 2、NO. 3 的数据分别对应三次不同时间段做的实验。对这三次实验结果取其平均值得到如图 6 中 average 曲

线,根据三次结果的平均值线性拟合的直线(如图 6 中直线所示)可以看出,PD 探测的光强的幅度与振动的幅值近似地呈线性关系。

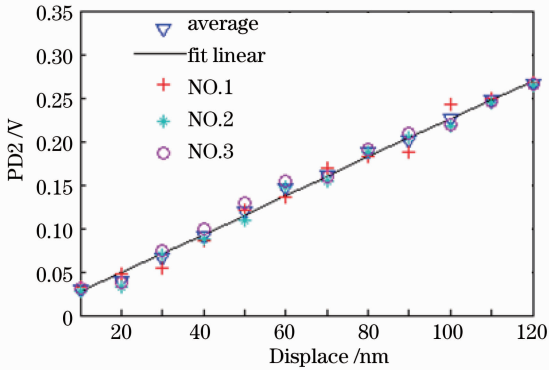


图 6 PD 测得信号幅值与 PZT 振动峰峰值关系图

Fig. 6 Relation between the measured amplitude of PD and the peak-to-peak amplitude of PZT vibration

根据图 6 中的拟合直线得到的光强与位移的对应关系,实验中用此对应关系来计算振动的幅值大小,进而恢复出物体实际振动的波形。

如图 7 所示是 PZT 的频率为 100 Hz, PZT 的振动幅值分别为 30、45、60 nm 时测量到的数据。可以看出在频率相同、振幅不同时测量得到的光强信号,随着振幅的增大,PD 测得的信号幅值也在增大。如图 7(a)~(c)所示根据图 6 中的拟合直线恢复的振动幅值分别为 29.64、45.13、61.59 nm,测量误差分别为 0.36、0.13、1.59 nm。

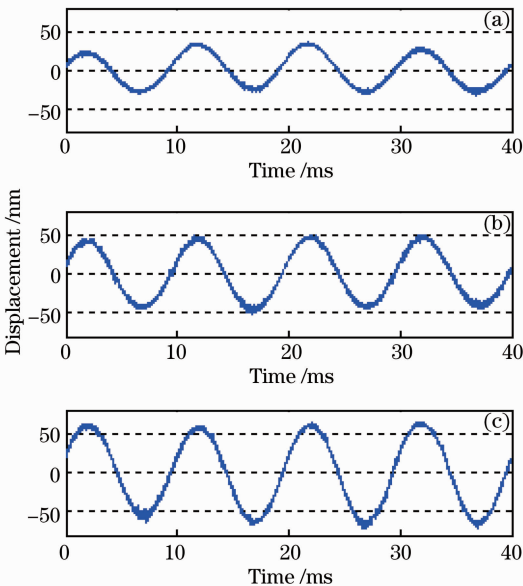


图 7 不同振幅条件下重构 PZT 振动波形。(a) 30 nm; (b) 45 nm; (c) 60 nm

Fig. 7 Reconstructed vibration waveform of PZT at different amplitude. (a) 30 nm; (b) 45 nm; (c) 60 nm

对峰峰值为 100 nm,也就是幅值为 50 nm 时的振动分别测量了 100、200、400 Hz 时的实验数据,如图 8(a)~(c)所示。测得频率分别为 99.88、199.33、399.97 Hz,测得的振动幅值分别为 50.33、50.35、50.78 nm。从实验数据可以看出,频率的最大误差小于 1 Hz,振幅的最大误差小于 1 nm。

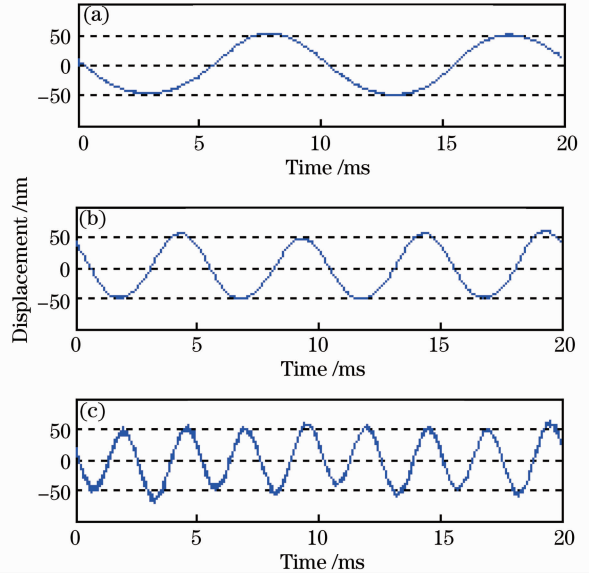


图 8 不同频率条件下重构的 PZT 振动波形。

(a) 100 Hz; (b) 200 Hz; (c) 400 Hz

Fig. 8 Reconstructed vibration waveform of PZT at different frequencies. (a) 100 Hz; (b) 200 Hz; (c) 400 Hz

## 5 结 论

提出了一种基于一次谐波动态锁定腔长的 F-P 微位移传感器,通过将 F-P 腔干涉信号锁定在半条纹处,实现待测目标微小位移的实时精确测量。系统的结构稳定、可靠,利用电光晶体直接调制光束的相位,相比 PZT 调制具有更高的调制精度和更广的调制带宽。对 PZT 的纳米级的微小振动测量结果表明,系统在  $\lambda/4$  的振幅范围内可以获得优于 1 nm 的测量精度。由于采用了强度解调方法,有效地提高了测量系统的带宽范围,对于尺寸和质量非常小的 MEMS/NEMS 器件,其本征频率往往高达数百兆赫兹,基于强度解调的位移传感器无疑将成为对微纳器件微小运动进行测量的有力工具。

## 参 考 文 献

- 1 Cheng Xiaohui, Zhao Yang, Li Dacheng. Applications of Fabry-Perot interferometer in length measurement [J]. Laser Technology, 1999, 23(6): 134-137.
- 程晓辉, 赵洋, 李达成. F-P 干涉仪在长度测量领域的应用 [J]. 激光技术, 1999, 23(6): 134-137.

- 2 H G Craighead. Nanoelectromechanical systems [J]. Science, 2000, 290(5496): 1532—2000.
- 3 Cheng Xiaohui, Zhao Yang, Li Dacheng. Review on optical nanometrology[J]. Optical Technique, 1999, 33(3): 73—77.  
程晓辉, 赵 洋, 李达成. 光学纳米测量方法及发展趋势[J]. 光学技术, 1999, 33(3): 73—77.
- 4 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-Perot cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0406006.  
张 乐, 吴 波, 叶 雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0406006.
- 5 Chen Benyong, Li Dacheng, Zhu Ruoguo. A lgorithm for automatic tracing of interference fringeand its application to nanometer measurement[J]. Optical Technique, 2006, 27(1): 63—67.  
陈本永, 李达成, 朱若谷. 基于干涉条纹跟踪实现纳米级位移测量的方法研究[J]. 光学技术, 2006, 27(1): 63—67.
- 6 Zhang Tao, Leng Changlin, Zhong Ying. MEMS dynamic testing technique based on differential laser Doppler effect [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 27(1): 63—67.  
张 涛, 冷长林, 钟 莹. 基于激光差动多普勒效应的 MEMS 动态测试技术[J]. 光学学报, 2006, 27(1): 63—67.
- 7 C Bes, T Bosch, G Plantier, *et al.*. Characterization of a self-mixing displacement sensor under moderate feedback [J]. Opt Eng, 2006, 45(8): 084402.
- 8 D F Han, M Wang, J P Zhou. Self-mixing speckle in an erbium-doped fiber ring laser and its application to velocity sensing[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2007, 19(17-20): 1398—1400.
- 9 Ge Yixian, Wang Ming, Chen Xuxing. A novel Fabry-Port MEMS fiber pressure sensor based on intensity demodulation method interferometry [J]. Chinese J Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 1832—1834.  
葛益娴, 王 鸣, 陈绪兴. 基于强度解调的 Fabry-Perot 型光纤 MEMS 压力传感器[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1832—1834.
- 10 Wei Xia, Ming Wang, Zhenyu Yang. High-accuracy sinusoidal phase-modulating self-mixing interferometer using an electro-optic modulator: development and evaluation [J]. Appl Opt, 2013, 52(4): B52—B59.
- 11 X M H Huang, M Manolidis, Seong Chan Jun. Nanomechanical hydrogen sensing [J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(14): 143104.
- 12 C Meyer, H Lorenz, K Karrai. Optical detection of quasi-static actuation of nanoelectromechanical systems[J]. Appl Phys Lett, 2003, 83(12): 2420—2422.
- 13 B E N Keeler, D W Carr, J P Sullivan. Experimental demonstration of a laterally deformable optical nanoelectromechanical system grating transducer[J]. Opt Lett, 2004, 29(11): 1182—1184.
- 14 J Knuuttila, P Tikka, M Salomaa. Scanning Michelson interferometer for imaging surface acoustic wave field[J]. Opt Lett, 2000, 25(9): 613—615 .
- 15 G Giuliani, *et al.*. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2002, S283—S294.
- 16 D Guo, *et al.*. Self-mixing interferometer based on sinusoidal phase modulating technique [J]. Opt Express, 2005, 13(5): 1537—1543.
- 17 Michael Yagoda Shagam. Nanomechanical Displacement Detection Using Fiber Optic Interferometry[D]. Boston: Boston University, 2004. 13—37.

栏目编辑: 殷建芳