

文章编号 1004-924X(2012)11-2433-06

双波长集成光栅干涉微位移测量方法

陈 烽, 叶雄英*, 伍 康, 冯金扬

(清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京, 100084)

摘要:介绍了一种基于双波长激光的集成光栅干涉位移检测方法,利用该方法对硅-玻璃键合工艺制作的集成光栅位移敏感芯片进行了测试实验。实验系统主要由敏感芯片、波长为 640 nm 和 660 nm 的双波长半导体激光器、双光电二极管及检测电路组成,敏感芯片则由带反射面的可动部件和透明基底上的金属光栅组成。入射激光照射到光栅上产生衍射光斑,衍射光的光强随可动部件与光栅之间的距离变化,通过分别测量两个波长的衍射光强信号并交替切换选取灵敏度较高的输出信号,实现了一定范围内的扩量程位移测量,并得到绝对位置。实验结果表明,利用双波长集成光栅干涉位移检测方法测得敏感芯片可动部件与基底光栅的初始间隙为 7.522 μm ,并实现了间隙从 7.522 μm 到 6.904 μm 区间的高灵敏度位移测量,其噪声等效位移为 0.2 nm。

关 键 词:位移测量;集成光栅;双波长干涉法;扩量程

中图分类号:TP212.9;TH822 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2433

Displacement measurement method based on integrated grating interferometry with two-wavelength lasers

CHEN Feng, YE Xiong-ying*, WU Kang, FENG Jin-yang

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instruments and Mechanology,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

* Corresponding author, E-mail: xyue@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: A displacement detection method based on two-wavelength grating interferometry was presented. A measurement experiment was carried out by using an integrated grating sensor chip fabricated by silicon-glass bonding bulk process. The measurement setup consisted of a sensor chip, two lasers with wavelengths of 640 nm and 660 nm, two photodetectors and a data acquisition circuit. The sensor chip included moving parts with a reflective surface and a metal grating on the transparent substrate. In experiment, the laser beam illuminated the grating and the grating reflected the laser beam to form a diffraction pattern. As the intensity of the diffracted beams changed according to the displacement between movable structure and substrate, the displacement could be determined with an ex-

收稿日期:2012-05-23;修订日期:2012-06-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50730009, No. 91023027)

tended range than single wavelength and the absolute position could be obtained by measuring intensity signals of the two wavelengths respectively. Experimental results show that the initial gap between the moving part and the substrate is about $7.522 \mu\text{m}$ measured by proposed method and it can implement the displacement measurement in a range of 618 nm with a resolution of 0.2 nm .

Key words: displacement measurement; integrated grating; two wavelength interferometry; extended range

1 引言

近几年来,将光栅干涉技术与微机电系统(MEMS)相结合的集成光栅干涉微位移测量方法得到了越来越多的关注。S. R. Manali 等^[1,2]率先提出了用衍射光栅干涉位移检测方法测量原子力显微镜(AFM)探针的偏转,在 $10 \text{ Hz} \sim 1 \text{ kHz}$ 带宽下位移等效噪声约为 $2 \times 10^{-3} \text{ nm}$; Hall 等^[3]在透明基底上制作金属光栅,并利用金属可动结构作为反射面,形成敏感光栅,制作了微型麦克风,在 250 kHz 时其噪声水平为 $2 \times 10^{-5} \text{ nm/Hz}^{\frac{1}{2}}$;此外,这种测量方法还被运用于加速度计^[4]、红外传感器阵列^[5]以及生物和化学传感器^[6-8]等。

集成光栅干涉微位移测量方法虽然有很高的灵敏度和分辨率,但是其检测的输出光强随位移呈正弦变化,在正弦的波峰波谷处灵敏度极低,其最大可测范围小于 $\lambda/4$,而一般测量都取其线性度最好的 $\lambda/8$ 。本课题组^[9]研制了利用静电反馈控制将反射面与光栅之间的间距稳定在最灵敏的位置(波长 $1/8$ 的奇数倍)的高灵敏大量程加速度计。B. Van Gorp^[10]提出集成双光栅的方法用于 AFM 探针,通过双光电探测器分别接收存在 $\pi/2$ 相位差的双光栅的光强信号,交替使用两路信号的线性区域,扩大了位移测量量程。Ferhanoglu 等^[11]提出了基于双波长的光栅干涉位移检测方法,利用一对波长分别为 633 和 656 nm 的双波长光源将量程从单波长的 105 nm 扩展到 $1.7 \mu\text{m}$ 。此外, Ferhanoglu 等^[12]和 Shin 等^[13]研制了利用双波长干涉测量法的红外阵列传感器。比较这 3 种大量程测量方法,静电反馈法需要复杂的反馈控制,而集成双光栅对加工精度要求较高,需要保证两个光栅 $\pi/2$ 的相位差。双波长干涉法利用双波长光源即可实现大量程测量。

本研究首先介绍了使用双波长光源扩大集成

光栅干涉位移检测量程的原理和方法,分析得出在一定范围内可实现绝对位置测量,利用国内的工艺条件制作的集成光栅位移敏感芯片,利用波长分别为 640 和 660 nm 的双波长激光和双光电二极管组成的检测系统对敏感芯片进行了测试,实现了基于双波长干涉法的大量程位移检测及绝对位置测量。

2 双波长集成光栅干涉位移检测原理

双波长集成光栅干涉位移的检测原理如图 1 所示。两束不同波长的平行相干光束透过玻璃基底照射到光栅上,其中一部分被光栅条底面直接反射形成一束衍射光束,另一部分透过光栅之间的间隙照射到可动部件底面的反射面反射回来透过光栅间隙形成第二束衍射光束,两束光束各自发生干涉。因此,对于某个波长的某个级次的两束衍射光之间存在 $4\pi nd/\lambda_{1,2}$ 的相移。因不同波长的光有不同的衍射角,故不同波长的衍射光能形成分开的光斑,可分别测量。

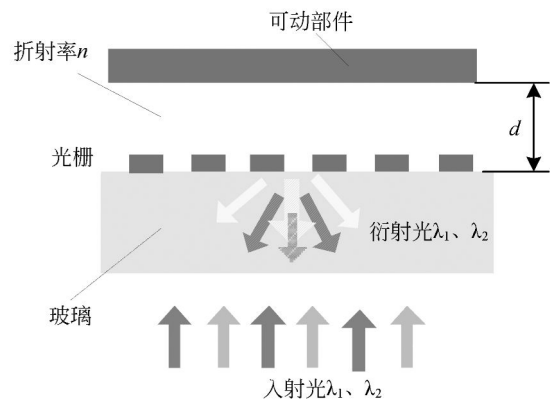


图 1 双波长集成光栅干涉位移检测原理图

Fig. 1 Schematic of the displacement detection method based on two-wavelength integrated grating interferometry

两个波长的一级衍射光的干涉光强 $I_{1,2}$ 与间隙 d 的关系为:

$$I_{1,2} = \frac{4I_{in1,2}}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{2\pi nd}{\lambda_{1,2}}\right), \quad (1)$$

其中:下标 1,2 分别表示两个波长相应的量, $I_{in1,2}$ 为入射光光强, n 为光栅和反射面间的介质折射率, λ 为入射光波长, d 为光栅与可动部件之间的间隙。光强 I 对 d 的 1 阶导数即为灵敏度 S , 有:

$$S_{1,2} = \frac{\partial I}{\partial d} = \left| \frac{8I_{in1,2}}{\pi\lambda_{1,2}} \sin\left(\frac{4\pi nd}{\lambda_{1,2}}\right) \right|. \quad (2)$$

对于每种波长,当 $d = \lambda/8 + m\lambda/4$ (m 为整数) 时,光强对位移变化的灵敏度最大; $d = m\lambda/4$ 时,灵敏度为 0,在该位置对位移不敏感。

双波长干涉的周期 D 与两个波长 $\lambda_{1,2}$ 满足:

$$\frac{4\pi nD}{\lambda_1} = \frac{4\pi nD}{\lambda_2} + 2\pi,$$

即:

$$D = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n|\lambda_1 - \lambda_2|}. \quad (3)$$

在双波长干涉测量中,设在空气中 2 个波长的入射光强相同,在不同的 d 位置通过切换利用灵敏度大的波长的干涉信号,可以得到对于任意的 d ,其归一化灵敏度为:

$$S_{max} = \max\left\{\left|\sin\left(\frac{4\pi d}{\lambda_1}\right)\right|, \left|\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sin\left(\frac{4\pi d}{\lambda_2}\right)\right|\right\}. \quad (4)$$

这里,设 $\lambda_1 < \lambda_2$ 。例如,对于波长分别为 640 和 660 nm 的双波长干涉,其灵敏度 S 与间隙 d 的关系如图 2 所示。对于单独的 640 nm 波长的干涉测量,当要求测量归一化灵敏度大于 0.5 时,其有效量程为 107 nm;对于波长为 640 和 660 nm 的双波长干涉,其有效量程为 1.8 μm ;而对于双波长为 655 和 660 nm 的双波长干涉,其有效量程为 6 μm 。因此,双波长的测量范围远大于单波长,且当 2 个波长越接近,所得的双波长干涉测量法的周期越长,可测范围越大。

在使用基于双波长的集成光栅干涉法测量时,为使 2 束衍射光能分别被光电探测器的独立接收面接收,需使探测器与集成光栅芯片间的距离足够大,以使 2 个衍射光斑足够分开。如当光源光斑直径为 100 μm 、光栅周期为 7 μm 时,对于 640 和 660 nm 的光源,探测器与芯片的垂直距离

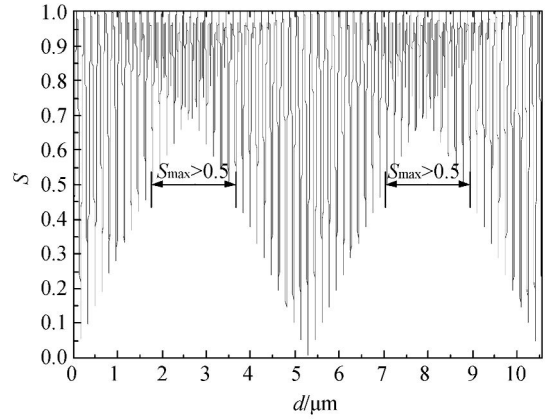


图 2 波长为 640 和 660 nm 的双波长干涉测量在一个双波长干涉的周期内的灵敏度与间隙的关系
Fig. 2 Normalized sensitivity versus gap using laser wavelengths of 640 and 660 nm in one period

需大于 3.47 cm;而对于 655 和 660 nm 的光源,距离则需大于 10.1 cm。因此在实际应用中既要考虑尽量增大双波长干涉法的可测量范围,同时还需考虑测量系统的空间尺寸,选择合适的两种波长来进行测量。

同时,理论上,在双波长干涉周期 D 内,对于任意一个位移点,双波长输出光强大小与位移间隙存在一一对应关系。因此,可以根据各波长输出的归一化光强 $i_{1,2}$ 与前一个点的归一化光强 $i'_{1,2}$,得到其对应的位置 $d'_{1,2}$ 为:

$$d'_{1,2} = \pm \frac{\lambda_{1,2}}{4\pi} \arccos(1 - 2i_{1,2}) + \frac{\lambda_{1,2}}{2} m_{1,2}, \quad (5)$$

其中:当 $\arccos(1 - 2i_{1,2}) > \arccos(1 - 2i'_{1,2})$ 时,第一项取正,当 $\arccos(1 - 2i_{1,2}) < \arccos(1 - 2i'_{1,2})$ 时,第一项取负。 $m_{1,2}$ 为从 0 开始的整数。对于 640 和 660 nm 的双波长测量,在一个双波长干涉周期 $D = 10.560 \mu\text{m}$ 范围内,对于任意一个位移点, m_1 取值从 0 到 33, m_2 取值从 0 到 32,且 m_1 比 m_2 始终大 0 或 1。通过改变 m_1 、 m_2 的取值,得到两种波长可能的对应位置 $d'_{1,2}$,令 $\Delta d = |d'_1 - d'_2|$,比较不同的 Δd ,当 Δd 最小时,对应的 $d_{1,2}$ 即为两种波长测得的绝对位置,选取两波长中灵敏度高的对应的位置作为绝对位置,便可实现高灵敏度大量程测量。绝对位置计算过程如图 3 所示。

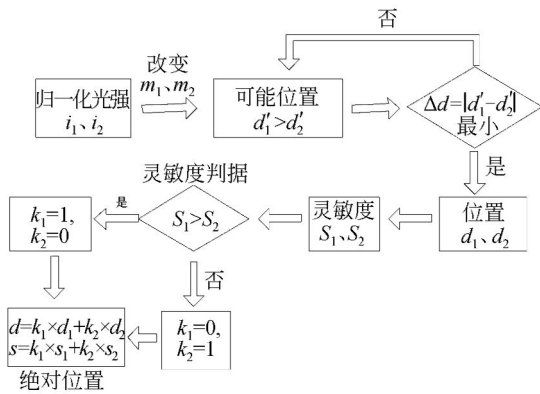


图 3 绝对位置计算流程

Fig. 3 Flowchart of the calculation of absolute position

对于实际测量, 归一化光强可定义为:

$$i_{Normalized} = \frac{I - I_V}{I_P - I_V}, \quad (6)$$

其中: I_P 和 I_V 分别为测量中对应的光强峰值值。

3 实验与结果

采用硅/玻璃键合体硅工艺制作的集成光栅干涉位移传感器作为敏感芯片^[14], 芯片结构及封装如图 4 所示, 以硅作为可动部件和固支结构, 可动部件与固支结构以铝支撑梁连接。可动部件中心区域淀积铝作为反射面。玻璃上的光栅条宽度为 $3.5 \mu\text{m}$, 间隙为 $3.5 \mu\text{m}$, 设计可动部件下反射面与玻璃基底距离为 $7.9 \mu\text{m}$ 。

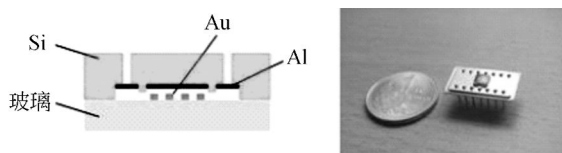


图 4 敏感芯片结构及封装的芯片

Fig. 4 Schematic of the structure of sensor chip and a photo of a packaged chip

测试装置如图 5 所示。选用功率为 13 mW 、光斑直径为 0.5 mm 、可同时同轴输出 640 nm 和 660 nm 波长的半导体激光器作为光源。从光源出来的光束经过直角反射棱镜、透镜聚焦到芯片的光

栅上, 衍射光经过平面光阑空间滤波器, 过滤掉一级以外的其他衍射光级次, 两波长的衍射光斑被双光电二极管的两个接收面分别接收, 通过 I-V 转换、放大和滤波电路, 经多功能数据采集卡 NI USB-6009 转换为数字信号输入计算机。

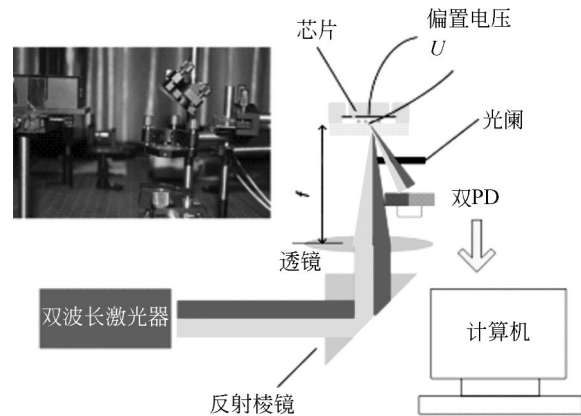
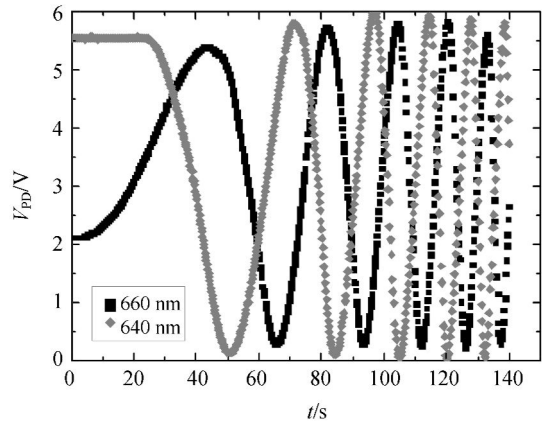


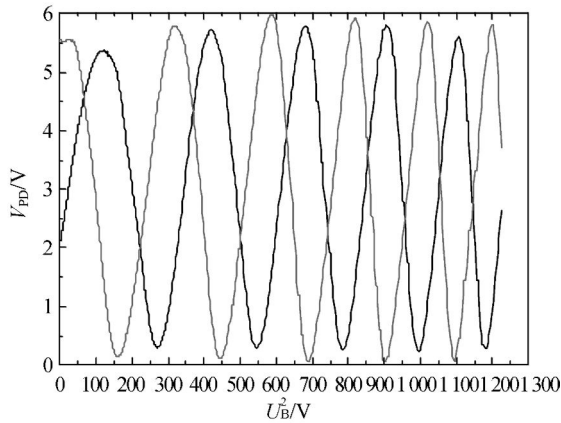
图 5 双波长集成光栅干涉位移测量系统及实验装置

Fig. 5 Setup of displacement measurement for two-wavelength integrated grating interferometry

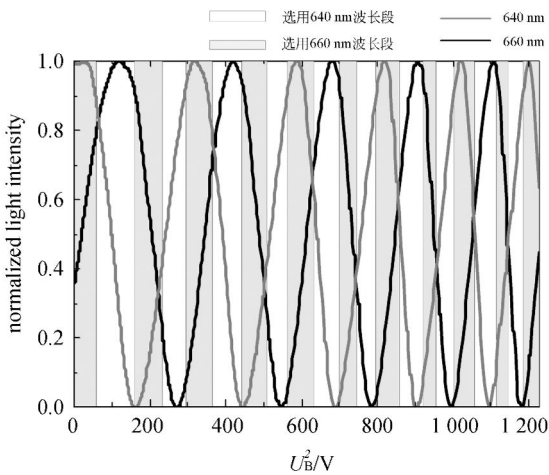
实验中在芯片可动部件与光栅电极之间施加 $0 \sim 35 \text{ V}$ 、步进 0.05 V 、间隔为 0.2 s 的偏置电压, 偏置电压变化导致可动部件与光栅的间隙 d 发生变化。双波长位移测试系统的采样频率为 5 Hz 。图 6(a) 为双波长干涉测量中 640 nm 和 660 nm 的光强信号电压随时间的变化关系图, 随着时间变化, 偏置电压越来越高, 双波长的输出电压变化也越来越快。图 6(b) 所示为光强信号分别随偏置电压平方 U_{B2} 的变化, 图 6(c) 为将图 6(b) 的输出光强电压通过式 (6) 归一化后的结果, 白和灰区间分别表示选用 640 nm 和 660 nm 的信号。利用归一化光强信号, 通过图 3 所示的流程计算得到绝对间隙, 结果如图 7 所示。由静电驱动知识可知, 当间隙变化量远小于可动部件与电极之间的初始间隙时, 可动部件位移与偏置电压平方成正比, 图 7 测得位移变化与偏置电压平方的变化基本符合这种关系。实验结果得到可动部件与基底的初始间隙为 $7.522 \mu\text{m}$, 与设计值 $7.9 \mu\text{m}$ 有一定偏差, 可能是由于加工偏差引起的。



(a)衍射光强随时间变化
(a) Diffraction intensity vs. time



(b)输出光强和偏置电压平方的关系
(b) Diffraction intensity of two wavelengths versus square of applied voltage



(c)光强归一化
(c) Normalized light intensity

图 6 双波长位移测量实验数据

Fig. 6 Experimental data of displacement measurement method based on two-wavelength

图 7 同时给出了双波长测量的归一化灵敏度,可以看出间隙从 $7.522 \mu\text{m}$ 变化到 $6.904 \mu\text{m}$ 的 A 区间,归一化灵敏度一直高于 0.5; B 区间也能测得位移,但其灵敏度较低。实验测得双光电二极管输出信号的噪声电压峰-峰值约为 5 mV,则对于高灵敏度的 A 段,其最大噪声等效位移为 0.2 nm。

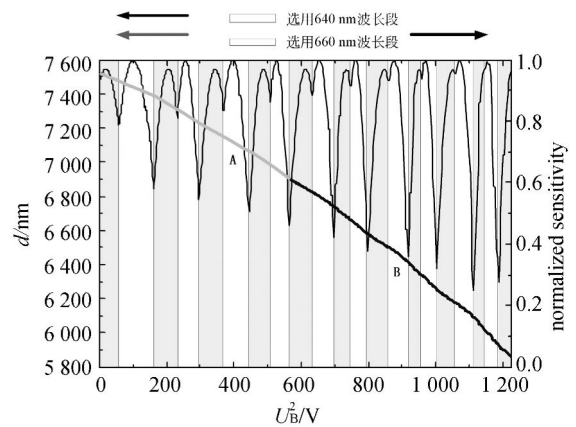


图 7 间隙及归一化灵敏度随偏置电压平方的变化
Fig. 7 Gap and normalized sensitivity versus square of applied voltage

4 结 论

研究了双波长集成光栅干涉微位移检测方法,在合适的初始间隙的情况下,通过交替切换利用两种波长中灵敏度较大的输出信号,实现了远大于单波长干涉的测量范围,同时,可以在一定范围内实现绝对位置测量。利用硅/玻璃键合体硅工艺制作的集成光栅敏感芯片,通过静电驱动使敏感芯片的可动部件产生位移,利用双波长干涉,测得芯片可动部件与光栅间的起始间隙为 $7.522 \mu\text{m}$,实现了可动部件约为 $1.659 \mu\text{m}$ 的位移测量。在间隙从 $7.522 \mu\text{m}$ 到 $6.904 \mu\text{m}$ 区间 618 nm 的位移测量范围,其最大噪声等效位移为 0.2 nm。实验结果表明利用双波长集成光栅干涉测量法使集成光栅位移测量量程得到了扩展,并实现了一定范围内的绝对位置测量。

参考文献:

- [1] MANALIS S R, MINNE S C, ATALAR A, *et al.*. Interdigital cantilevers for atomic force microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(25): 3944-3946.
- [2] YARALIOGLU G G, ATALAR A, MANALIS S R, *et al.*. Analysis and design of an interdigital cantilever as a displacement sensor [J]. *Appl. Phys.*, 1998, 83(12): 7405-7414.
- [3] HALL N A, DEGERTEKIN F L. Integrated optical interferometric detection method for micromachined capacitive acoustic transducers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(20): 3859-3861.
- [4] LOH N C, SCHMIDT M A, MANALIS S R. Sub-10 cm³ interferometric accelerometer with nano-g resolution [J]. *JMEMS*, 2002, 11(3): 182-187.
- [5] TORUN H, UREY H. Uncooled thermo-mechanical detector array with optical readout [J]. *Opto-Electron. Rev.*, 2006, 14(1): 55-60.
- [6] SAVRAN C A, BURG T P, FRITZ J, *et al.*. Microfabricated mechanical biosensor with inherently differential readout [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(8): 1659-1661.
- [7] TORUN H. A micromachined membrane-based active probe for biomolecular mechanics measurement [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(16): 53-55.
- [8] LOH N C, SCHMIDT M A, MANALIS S R. Sub-10 cm interferometric accelerometer with nano-g resolution [J]. *Microelectromech. Syst.*, 2002, 11(3): 182-187.
- [9] 伍康, 叶雄鹰, 陈烽, 等. 带有力反馈控制的三明治式微机械干涉加速度计 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2011, 9(1): 21-25.
- WU K, YE X Y, CHEN F, *et al.*. Micromachined sandwich interferometric accelerometer with force feedback control [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2011, 9(1): 21-25. (in Chinese)
- [10] GORP B V, ONARAN A G, DEGERTEKIN F L. Integrated dual grating method for extended range interferometric displacement detection in probe microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(8): 083101-3.
- [11] FERHANOGLY O, TOY M F, UREY H. Two-wavelength grating interferometry for MEMS sensors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, 19(23): 1895-1897.
- [12] FERHANOGLU O, UREY H. Sensitivity enhancement of bimaterial MOEMS thermal imaging sensor array using 2- λ readout [C]. *Proc. SPIE*, 2010, 7718.
- [13] SHIN D, KIN B. A laser interferometer encoder with two micromachined gratings generating phase-shifted quadrature [J]. *Micromech. Microeng.*, 2011, 21(8): 085036-1-9.
- [14] 伍康, 叶雄鹰, 刘力涛, 等. 集成光栅干涉微位移测量方法研究 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2009, 7(1): 56-59.
- WU K, YE X Y, LIU L T, *et al.*. Micro-displacement measurement based on integrated diffraction grating [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009, 7(1): 56-59. (in Chinese)

作者简介:



陈 烽(1984—),男,浙江绍兴人,博士研究生,2006年于清华大学获学士学位,主要从事 MEMS 传感器方面的研究。E-mail: chen-f02 @ mails. th. edu. cn



伍 康(1982—),男,湖南石门人,博士研究生,2009年于清华大学获博士学位,主要从事超低频垂直隔振方面的研究。E-mail: wuk05 @ mails. th. edu. cn



叶雄鹰(1961—),女,博士,教授,博士生导师,1989年于日本东京大学获博士学位,主要从事微/纳机电系统,特别是微流控技术、微/纳传感器方面的研究。E-mail: xyye @ mail. tsinghua. edu. cn



冯金扬(1984—),男,湖南郴州人,博士研究生,2006年于华中科技大学获学士学位,主要从事 MEMS 传感器方面的研究。E-mail: fengjy06 @ mails. th. edu. cn