

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0256-05

激光自混合微机电系统动态测试技术

张照云^{1,2} 高 杨^{1,3} 赵兴海¹ 赵 翔¹

¹ 中国工程物理研究院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900
² 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088
³ 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044

摘要 激光自混合干涉测量系统具有结构简单、紧凑、易准直、造价低廉等优点,能够取代传统干涉仪用于位移、距离、速度、振动等物理量的测量,将其引入到微机电系统(MEMS)动态测试中,能够发展成结构小巧、造价低廉的 MEMS 动态测试系统,非常适于微机械快速振动及精确测量的要求。基于三镜腔模型,讨论了激光自混合干涉动态测试原理;构建了激光自混合干涉动态测试系统,并对关键部件进行了详细分析;对物体在不同运动形式下进行了实验研究。结果表明激光自混合干涉能够敏感物体的不同运动形式,并支持 MEMS 动态测试系统。

关键词 激光测量;自混合;干涉测量;动态测试;微机电系统

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201037s1.0256

Micro-Electro-Mechanical System Dynamic Tests by Laser Self-Mixing Effect

Zhang Zhaoyun^{1,2} Gao Yang^{1,3} Zhao Xinghai¹ Zhao Xiang¹

¹ Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China
² Department of Graduate Student, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China
³ Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract Laser self-mixing interferometer has advantages of simple architecture, compact size, naturally self-aligned optical characteristics, and low cost. It can replace conventional interferometers to measure displacement, distance, velocity, vibration and other physical quantities. When it is used in the micro-electro-mechanical system (MEMS) dynamic measurement, a system with simple architecture and low cost can be developed, which is suitable for fast and accurate characterization measurement of vibrating micromachined devices. Based on the three-mirror cavity model, self-mixing interference measurement principle is discussed. The laser self-mixing interference MEMS dynamic measurement system is designed, and the key components are discussed detailedly. Experiments are studied when the target moves in different forms. The results prove that laser self-mixing can measure target's different movement forms. The laser self-mixing interference measurement system can support MEMS dynamic measurement.

Key words laser measurement; self-mixing; interference measurement; dynamic measurement; micro-electro-mechanical system

收稿日期: 2010-04-16; **收到修改稿日期:** 2010-06-12

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金重点课题(2007A05001)、中国工程物理研究院电子工程研究所科技创新基金(S20070202)、总装备部预研基金(9140A05070208ZW0502)和教育部访问学者基金资助课题。

作者简介: 张照云(1984—),男,硕士研究生,主要从事激光测量和微弱信号检测与处理等方面的研究。

E-mail: zzy_caep@163.com

导师简介: 高 杨(1972—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事微光机电系统方面的研究。

E-mail: gaoyang@caep.ac.cn

1 引言

近几年,微电子机械系统(MEMS)技术在基础理论研究、器件的设计制造和微系统的集成应用等方面都取得了重要的进展,但是与大范围的批量化生产和大规模的应用还有一定的距离,而缺乏有效的测试手段是主要制约因素之一。MEMS 测试技术是 MEMS 设计、仿真、制造及产品质量控制和性能评价的关键环节之一。由于 MEMS 器件的典型尺寸在毫米至微米量级^[1],具有集成度高和运动频率高等特点,非光学测试方法一般都要求在被测结构上附加相应的传感换能元件,这会影响微结构的完整性和机械特性,导致不可预计的误差。光学测试技术具有非接触、快速、精度高、灵敏度高和抗干扰能力强等优点,可实现大视场的测量,能够满足大多数 MEMS 测试的要求,如 Veeco 公司的 MEMS3500 以及 MEMS 运动测试仪 wykoNT1100 和美国圣地亚国家实验室的 MEMS 可靠性测试系统 ShMMeR 等^[2],但通常存在体积庞大、结构复杂和价格昂贵等缺点。因此,有必要开发体积小、结构简单和价格便宜的 MEMS 动态测试仪器。

近年来,一种新兴的测试技术——激光自混合干涉测试得到了迅速发展。激光自混合干涉已经用于位移^[3~5]、距离^[6]、速度^[7]和振动^[8]等物理量的测量。与传统的双光束干涉测量相比,具有很多独特的优势:1)结构简单、紧凑、牢固、易于小型化和造价低廉;2)系统可实现“自准直”和“自探测”,仪器调节十分方便;3)系统灵敏度高,可以实现纳米量级的位移或振动测量;4)适合弱光探测,可对粗糙表面进行测量,扩大了测量范围。

本文提出并探讨了基于激光自混合干涉的 MEMS 动态测试技术,有利于开发出结构简单、紧凑、易准直和价格便宜的新型 MEMS 动态测试系统。

2 测量原理

对于激光自混合干涉测量原理的推导,一般都基于三镜腔模型,该方法能形成一套含光反馈水平的数学模型,该数学模型已经得到了相关领域的公认。图 1 为三镜腔模型示意图,三镜面的反射系数分别为 r_1, r_2 和 r_3 。A 和 B 之间是激光器的内腔,长度为 L ;B 到待测运动物体 M 之间的距离是 L_{ext} 。当激光器发出的光经运动物体反射回激光器内腔中,将发生自混合。这相当于一个三镜腔结构:激光器的内腔(A 和 B 之间)和一个外腔(B 和 M 之间)。

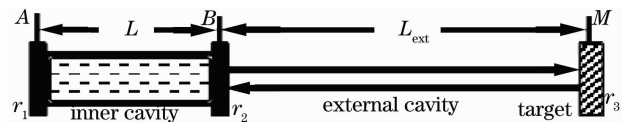


图 1 三镜腔自混合干涉示意图

Fig. 1 Schematic of a three-mirror cavity self-mixing interference

基于三镜腔模型可得激光自混合干涉测量理论模型^[9]

$$g_{th} = g_o - \frac{\xi}{L} \cos(2\pi f\tau_{ext}), \quad (1)$$

$$f = f_o - \frac{C}{2\pi\tau_{ext}} \sin(2\pi f\tau_{ext} + \arctan \alpha), \quad (2)$$

$$p = p_o [1 + m \cos(2\pi f\tau_{ext})], \quad (3)$$

式中 ξ 为外腔光耦合系数, g_o 为初始增益; g_{th} 为阈值增益; $f = f_o + \Delta f$, f_o 为激光器的初始频率, Δf 为反馈光作用下频率变化量; $\tau = 2L/c$ 为光在内腔往返所用时间, c 为真空中的光速; $\tau_{ext} = 2L_{ext}/c$ 为光在外腔往返所用时间; C 表示反馈强度的参数; α 为激光器线宽展宽因子。

(1)式描述了激光器的阈值增益随外腔长度的变化关系;(2)式决定了激光振荡频率,表明激光振荡频率是外腔长度的非线性函数,且依赖于参数 ξ ; 当外腔长度连续变化时,激光振荡频率将呈周期性非线性变化;(3)式表明激光器输出功率也随外腔长度变化而呈周期性变化,且其相位变化由(2)式表示的频率特性决定。

理论模型中的参数 C 和 α 对激光自混合干涉测量产生重要的影响^[4]。 C 的大小与被测物体的反射系数以及物体离激光器的距离有关。当 $C \leq 0.1$ 时,光反馈水平被定义为很弱光反馈,此时激光器输出的干涉信号波形为正弦波;当 $0.1 < C < 1$ 时,光反馈水平为弱光反馈,半导体激光器为单模,干涉信号为类锯齿波形,光学频率和输出强度是时间的单值函数;当 $1 \leq C < 4.6$ 时,为中等强度的光反馈,激光器不再为单模激光器,干涉信号为类锯齿波形,信号出现滞后现象,光学频率和输出光强不再是时间的单值函数;当 $C \geq 4.6$ 时,为强反馈,此时信号出现严重的迟滞效应,激光器处于不稳定工作状态。参数 α 的大小决定输出信号波形是否发生倾斜,以及倾斜的程度。当 α 的值较小,几乎为 0 时,信号不发生倾斜,当 α 增大到一定程度时,信号才开始发生倾斜。由于当 α 很大时, $\arctan \alpha \approx \pi/2$, 所以当 α 增大到

一定程度时, $\phi_0(t)$ 的值不发生变化。因此在设计激光自混合干涉测量系统时需要合理选择参数 C 和 α 。

图 2 为许多 MEMS 器件的典型结构, 如微陀螺、微加速度计或其他微谐振器等, 质量块被四个弹簧支撑在水平面上, 其中 D 为梳齿间距, y_D 为动静梳齿间距。为了测量或激励的方便, 很多梳齿被分布在可动质量块的两边。当给梳齿加上周期性的驱动电压 $V_0 + v_0 \sin(2\pi f_0 t)$ 时, 质量块在静电力作用下沿驱动轴振动(图 2 中的 y 轴)。为了设计的最佳化, 常常需要监测微系统在正弦电压 v_0 和静态直流电压 V_0 或其他外在条件, 如压力下的谐振频率和品质因数。下面介绍其具体的测量过程。

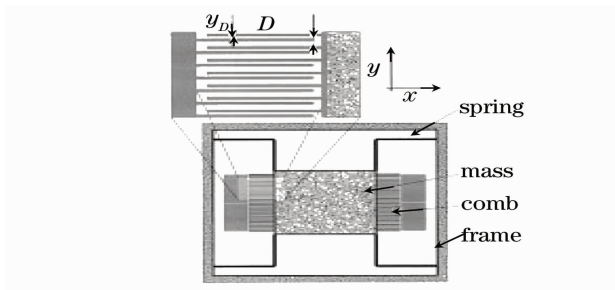


图 2 MEMS 振动质量块的结构示意图

Fig. 2 Schematic of MEMS vibrating mass structure

由(2)、(3)式可知, 当激光器发出的光被物体反射或散射回激光器时, 激光器的输出频率和功率特性受到调制。将(3)式的功率表示形式转化为光电探测器的电流输出形式, 可得

$$I = I_0 + I_{\max} \cos(2\pi f \tau_{\text{ext}}), \quad (4)$$

当为弱光反馈时, 激光器的输出光频几乎不发生变化, $f \approx f_0$ 。当物体运动位移为 $s(t)$, 初始距离为 s_0 时, 光电探测器输出电流可表示为

$$I = I_0 + I_{\max} \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda}[s(t) + s_0]\right\}, \quad (5)$$

式中 λ 为激光器的输出波长。

通过一定的信号处理方法可以得到物体运动位移 $s(t)$, 如条纹计数法, 如图 3 所示, 可以通过计数驱动信号半个周期内的条纹数得到物体的位移。当条纹数为 M 时(图 3 中 M 为 4), 物体振动幅度峰峰值为

$$s(t) = M \frac{\lambda}{2 \cos a}, \quad (6)$$

式中 a 为物体振动方向跟光轴之间的夹角。

因此, 测量机械系统在不同频率驱动信号作用下的位移幅度值就可以得到其共振曲线, 进而得到谐振频率以及 Q 值大小, 如图 4 所示。

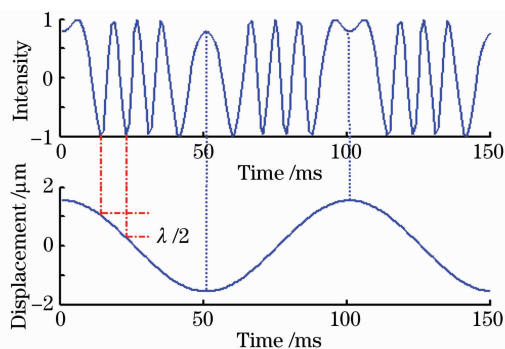


图 3 物体在正弦信号驱动下的信号波形

Fig. 3 Signal's waveform when the target moves as sine wave

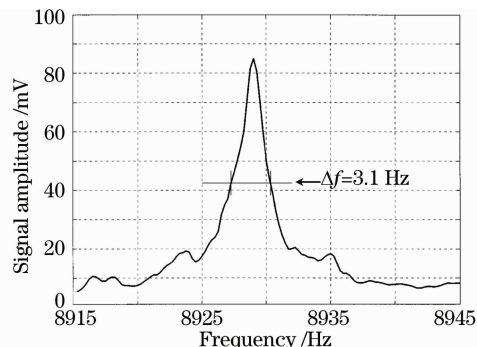


图 4 MEMS 部件共振曲线示意图

Fig. 4 Schematic of MEMS components resonance curve

3 测试系统

激光自混合干涉动态测试系统见图 5。半导体激光器(LD)发出的光经准直镜照射到 MEMS 器件上, 从 MEMS 器件表面反射(或散射)部分光进入激光器和腔内激光混合, 调制激光器的输出光功率和光频。因此输出光携带有 MEMS 器件的运动信息, 通过对光电探测器(PD)输出信号进行相应的信号处理就能够提取出物体的运动信息, 如振动幅度、谐振频率、迟滞效应和 Q 值等动态参数。可衰减器用来调节反馈光的水平, 使得反馈光的大小处于最佳测量。通过图 5 可以看出激光自混合干涉动态测试系统不需要大量的反射镜和透镜等光学镜片, 且为单光路测试, 系统结构简单, 光路易调节; 另外不需要显微镜和 CCD 摄像机等昂贵设备, 价格非常便宜。由于 PD 和准直镜都可以与激光器封装在一起, 因此激光自混合干涉动态测试系统能变得更加简单。

由于 LD 具有超小型、高效率 and 结构简单等优点, 能简单地用调制偏置电流的方法实现高频调制, 因此激光器一般选择 LD。但是现有的 LD 对温度变化非常敏感, 因此要对其进行精密温控。随着新结构和新技术的发展, 该问题能得到很好的解决, 如采用具有良好

温度特性的垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)^[10], 不需要进行精密温控,能够明显减少功耗和降低成本,使得激光自混合干涉动态测试系统进一步小型化和实用化。

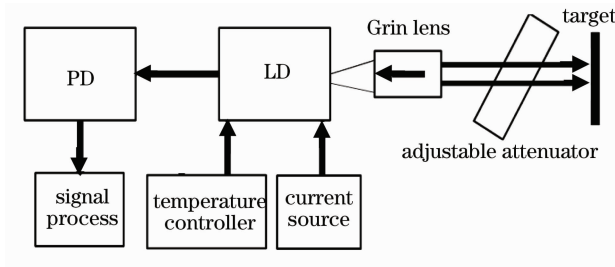


图5 激光自混合干涉动态测试系统
Fig.5 Laser self-mixing interference dynamic measurement system

信号处理部分是测试系统的核心部分。目前信号处理方法很多,各有优缺点,如位移测量中条纹计数法测量范围大的优点,但测量精度为半个波长;相位提取法测量精度高,但测量范围较小,仅为一个波长。激光自混合干涉测试系统配合不同的信号处理方法能够得到物体的不同信息,包括一些静态信息,如利用散斑特性能够得到物体表面的形貌。因此激光自混合干涉动态测试系统的拓展性很强,具有巨大的发展空间。

但是,现在激光自混合干涉动态测试系统距离工程实用化还有较大的差距,很多具体细节还没考虑进去(图5只是测试系统的原理框图)。如现在MEMS器件越做越小,需要解决缩小激光束光斑直径,光路对准的问题;现在的激光自混合干涉基本都是基于单点测

试,怎样通过扫描技术获得全视场的信息。因此要使得激光自混合干涉动态测试系统成功用于MEMS动态测试还需要开展大量的工作,重点是MEMS器件动态特性的分析,即信号处理部分。

4 实验研究

为了验证该方法对MEMS部件运动测量的有效性,采用压电陶瓷微位移器(PZT)模拟了MEMS部件(如图2中的质量块)不同运动形式,得到了相应的自混合干涉现象。实验装置:激光器输出功率5 mW,波长1550 nm,压电陶瓷微位移器为WTYD101010,示波器为LeCroy 104 XS(1 GHz带宽,5 GHz采样率),信号发生器为Agilent 33250A。实验部分光路如图6所示,激光器固定在调整平台上,能进行五自由度的光路调节;PZT固定在位移平台上,能进行前后位置的调节,整个实验系统位于气浮隔振光学平台上。

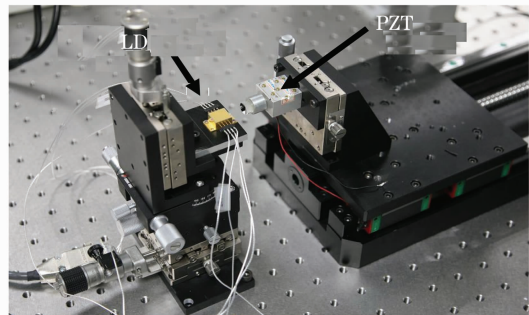
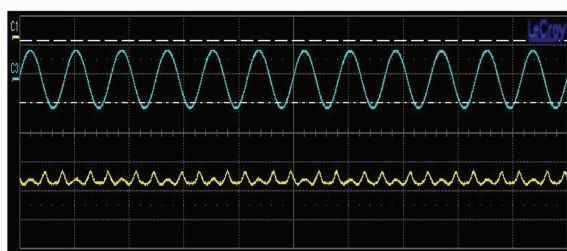
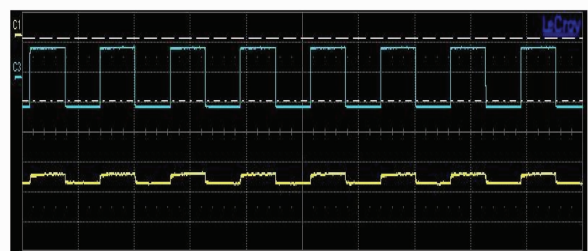


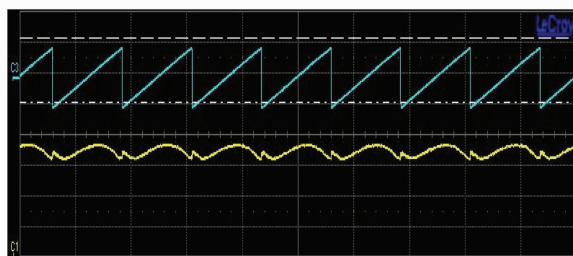
图6 激光自混合干涉测量光路图
Fig.6 Schematic of self-mixing interference



(a) sine wave



(b) square



(c) saw tooth

图7 PZT不同运动形式下的自混合干涉现象

Fig.7 Self-mixing interference phenomena with different movements of PZT

直接用信号发生器给 PZT 加上不同形式的驱动信号(信号幅度为 $10 V_{pp}$, 频率为 6 Hz, V_{pp} 为施加信号的峰峰值电压), 可得实验现象如图 7 所示, 上为 PZT 所加的驱动信号波形, 下为激光器输出信号波形, 自混合干涉现象非常明显。

在 $10 V_{pp}$ 驱动信号下, PZT 有 $1 \mu\text{m}$ 左右的位移, 输出信号能出现一个完整的干涉条纹, 实验现象与理论分析吻合。从实验现象可观察, 激光自混合干涉能够对物体的不同运动形式敏感, 并且非常灵敏, 通过适当的信号处理方法就能够提取物体的运动信息。当然激光自混合干涉也能对高运动频率作出响应。图 8 为 PZT 在频率为 2 kHz 的正弦波驱动下的自混合干涉现象, 图 8 偏上部分为 PZT 高频振动情况下的驱动信号以及干涉信号波形, 为了看到其细节, 图 8 偏下部分为该波形的放大图。由图 8 可见, 物体在高频运动情况下, 也能出现明显的自混合干涉现象。

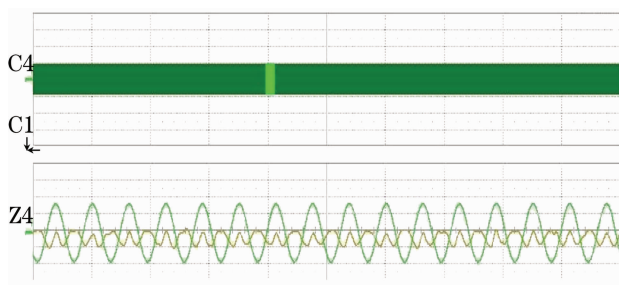


图 8 PZT 高频振动下的自混合干涉现象

Fig. 8 Self-mixing interference phenomena with high frequency vibration of PZT

5 结 论

将一种新兴的光学测量技术——激光自混合干涉测量引入到 MEMS 动态测试中, 对其测量原理和测试系统进行了相应的分析介绍, 并进行了实验研究。实验结果表明, 激光自混合干涉能够敏感物体的不同运动形式, 通过相应的信号处理能够得到物

体的运动信息, 如谐振式微陀螺的振动幅度、谐振频率和 Q 值等。目前国内的报道大多基于实验研究, 而工程开发研究较少。因此大力开展工程实用化研究, 将该技术用于 MEMS 动态测试中, 能够得到系统结构简单、易准直、造价低廉的 MEMS 动态测试系统, 具有较好的发展前景。

参 考 文 献

- 1 W. M. Wang, W. j. O. Boyle, K. T. V. Grattan. Fiber-optic Doppler velocimeter that incorporates active optical feedback from a diode laser[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(11): 819~821
- 2 V. Skvortzov, C. C. Yong, L. L. Byeung *et al.*. Development of a gyro test system at samsung advanced institute of technology [C]. Position Location and Navigation Symposium, PLANS 2004, 26~29, April 2004: 133~142
- 3 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]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(5): 1557~1558
- 4 G. Plantier, C. Bes, T. Bosch. Behavioral model of a self-mixing laser diode sensor[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(9): 1157~1166
- 5 P. King, G. J. Steward. Metrology with an optical maser[J]. *New Science*, 1963, **17**(3): 180~182
- 6 J. Kato, N. Kikuchi. Optical feedback displacement sensor using a laser diode and its performance improvement[J]. *Measurement and Technology*, 1995, **6**(1): 45~52
- 7 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
- 8 Yu Yanguang, Qiang Xifu, Wei Zhenlu *et al.*. A differential displacement system using laser self-mixing interference effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1269~1273
- 禹延光, 强锡富, 魏振禄 等. 差动型激光自混合干涉式位移测量系统[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1269~1273
- 9 Zhang Zhaoyun, Gao Yang, Zhao Xinghai *et al.*. Velocity measurement by the self-mixing effect[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(52): 182~187
- 张照云, 高 杨, 赵兴海 等. 激光自混合干涉测速技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(52): 182~187
- 10 Xu Jun. Research on Velocimeter and Range Finder Utilizing Self-Mixing Effect in Single-Mode VCSEL and Three Dimensional Imaging[D]. Anhui: University of Science & Technology of China, 2006
- 徐 军. 单模 VCSEL 自混合测速、测距及三维图像技术的研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2006