

文章编号: 0258-7025(2006)12-1661-04

一种硅微机械谐振器的单光源激振测振方法

刘英明^{1,2}, 王向朝¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 提出一种用于硅微机械谐振传感器研究的单光源激振测振新方法, 即微谐振器的激励及其谐振信号的测量使用同一光源。该方法采用全光纤斐索干涉仪结构, 将干涉信号与光源强度变化信号进行运算后, 通过选频技术解调出谐振器的振动信息, 同时采用贝塞尔函数比值法扩大了振动幅度的测量范围, 省去了一些难以获得准确数值的工作参数的计算。采用该方法实现了微悬臂梁结构形式的谐振器件的单光源激振与测振, 获得了器件的谐振频率约为8.81 kHz以及谐振状态下的振动幅度约为135 nm。实验结果与采用其他双光源激振测振方法基本一致, 新方法的可行性得到了验证。

关键词 测量; 光学检测; 硅微谐振器; 单光源系统; 光学激励

中图分类号 TH 744.3 **文献标识码** A

A Single Optical Source System for Exciting and Detecting the Vibration of Silicon Microresonator Sensors

LIU Ying-ming^{1,2}, WANG Xiang-zhao¹

¹ *Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*
² *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

Abstract A novel method for exciting and detecting vibration of silicon microresonator sensors is presented. A single laser diode is used for excitation and detection, and an all-fiber Fizeau interferometer is applied. The displacement signal of microresonator is demodulated from the interference signal, which is modified with the intensity change of the laser diode. The Bessel function ratio method is used to enlarge the measurement range. And some working parameters need not be measured. Using this method the resonance frequency about 8.81 kHz and the tested cantilever amplitude at resonance about 135 nm were obtained. The experimental results are consistent with those of other method, so practicability of the new method is proved.

Key words measurement; optical testing; silicon microresonator; single source system; optical excitation

1 引言

采用微结构器件, 如纳机电系统(NEMS)器件以及微机电系统(MEMS)器件对物质成分的属性及含量进行高精度检测的硅微谐振传感器, 由于其具有灵敏度高、响应速度快、尺寸小、成本低、性能可靠、可批量生产等优点, 是近年来国际上的研究热点

之一^[1~6]。其中, 采用光激励、光检测工作方式的硅微机械谐振传感器兼有多种先进技术的优点, 得到了该领域研究者的广泛关注^[3~6]。

目前该领域的相关研究中, 大多采用双光源实验装置^[3~8], 即微谐振器的激励及其谐振信号的测量采用两个不同光源, 这种实验方法虽然相对容易实现器件的激励和检测, 但是由于系统比较复杂, 限

收稿日期: 2006-04-12; **收到修改稿日期:** 2006-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(60578051)和上海市科委国际合作计划项目(051107085)资助课题。

作者简介: 刘英明(1976—), 男, 吉林梅河口人, 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室博士研究生, 主要从事纳米精度位移与振动激光测量, MEMS器件激光激振测振领域的研究工作。E-mail: ym_liu@siom.ac.cn

导师简介: 王向朝(1957—), 男, 辽宁凌源人, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师, 研究领域为信息光电子技术。E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

制了向多传感头系统的发展。为了解决这个问题，一些单光源的激振测振方法被提出^[9~12]。基于法

激光二极管在直流电流 i_0 和正弦电流 $\Delta i(t) = a\cos(\omega_c t + \theta)$ 的驱动下，波长和强度分别表示为

装置稳定谐振状态等缺点一直没有得到很好解决^[11,12]；基于光强调制检测方式的单光源方法，谐振信号的测量采用光强调制检测方式^[11]，易受外界干扰，测量精度较低；采用单光源短光脉冲激励微谐振器的方法^[12]，系统结构简单，但是信号处理比较困难，而且该方法存在对激光器功率要求高，需较大尺寸谐振器的缺点^[13]。

本文提出一种单光源激振测振方法，采用全光纤结构的斐索干涉仪实现谐振器振动信号的测量，同时干涉仪光源又作为谐振器的激励光源。该方法对光源等器件没有特殊要求，系统结构简单，易于实现微谐振器的光热激励，而且可以同时测量出谐振器的振动幅度。

2 理 论

图 1 为用于硅微谐振器的单光源激振测振实验装置示意图。谐振器件是硅微悬臂梁，悬臂梁在激光照射下吸收光能，在器件内部形成一定梯度的温度场，产生交变热应力，使悬臂梁发生振动^[8~13]。激光二极管(LD)的出射光经过隔离器、耦合器和探头，一部分光在探头与空气交界的端面被反射，另一部分光经过探头准直后以平行光出射，经微悬臂梁表面反射后，又经探头进入光纤。被探头端面反射回去的参考光与微悬臂梁表面反射的物光进行干涉，产生的干涉信号经耦合器后，由光电探测器(PD₁)检测，再经前置放大电路后输出信号 $S_1(t)$

随驱动电流的变化系数。

设参考光和物光的振幅比为 1:1，PD₁ 检测到的干涉信号为^[14]

$$S_0(t) = I_B(t) + I_M(t)\cos[z_1\cos(\omega_c t + \theta) + \alpha_0 + \alpha(t)], \quad (3)$$

其中

$$I_B(t) = g(t - \tau_0) + g(t - \tau_r), \quad (4)$$

$$I_M(t) = 2\sqrt{g(t - \tau_0)g(t - \tau_r)}, \quad (5)$$

$$z_1 = 2\pi\beta_1 ar_0/\lambda_0^2, \quad (6)$$

$$\alpha_0 = 2\pi r_0/\lambda_0, \quad (7)$$

$$\alpha(t) = 4\pi r(t)/\lambda_0, \quad (8)$$

$I_B(t)$ 、 $I_M(t)$ 分别为干涉信号非相干部分和相干部分的幅度调制； $\tau_0 = l_0/c$ ， $\tau_r = l_r/c$ ， l_0 和 l_r 分别为物光和参考光的光程， c 为光速； r_0 为静止时探头端面与微悬臂梁端面的光程差； $r(t)$ 为微悬臂梁的振动位移。

封装在激光二极管中的 PD₂ 探测到的光源强度变化为

$$I(t) = \beta_2 \{i_0 + a\cos[\omega_c(t - \tau) + \theta]\}, \quad (9)$$

其中 τ 为光传播引起的时间延迟。将式(3)与式(9)相除，可以得到^[14]

$$S(t) = C + C\cos[z_1\cos(\omega_c t + \theta) + \alpha_0 + \alpha(t)], \quad (10)$$

其中常数 C 不随时间变化。设微悬臂梁的位移 $r(t) = A\cos(\omega_c t)$ ，则式(10)可以写为

$$S(t) = C + C\cos[z_1\cos(\omega_c t + \theta) +$$

耳函数 $J_n(z_2)$ ，就能够测量出悬臂梁的振动位移。然而贝塞耳函数的单值区间较小，将会限制系统的测量范围^[15]。此外，由于 r_0 难以准确测量，所以很难给出 $\sin(\alpha_0)$ 和 $\cos(\alpha_0)$ 的准确数值，导致直接从式 (13) 求解某阶贝塞耳函数存在困难。

为此采用如图 2 所示的信号处理系统对干涉信号进行处理。首先将 PD₁ 检测到的干涉信号 $S_0(t)$ 和 PD₂ 检测到的光源强度变化信号 $I(t)$ 同时送入除法器 DIV1，得到信号 $S(t)$ 。将 $S(t)$ 分为两路，一路信号和激光二极管正弦调制信号 $V(t)$ 输入乘法器 MUL1 和低通滤波器 LPF1 组成的鉴相电路 1，得到信号 S_1

$$S_1 = -K_1 C \sin \alpha_0 J_1(z_2), \quad (14)$$

其中 K_1 为鉴相电路 1 的增益。

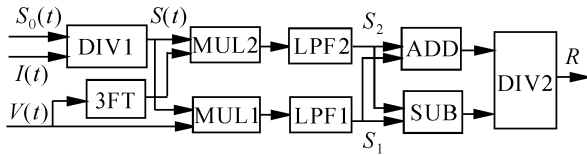


图 2 信号处理系统简图

Fig. 2 Schematic diagram of the signal processing system

将 $V(t)$ 送入三倍频电路 (3FT)，输出信号与 $S(t)$ 一起输入乘法器 MUL2 和低通滤波器 LPF2 组成的鉴相电路 2，得到信号 S_2

$$S_2 = K_2 C \sin \alpha_0 J_3(z_2), \quad (15)$$

其中 K_2 为鉴相电路 2 的增益。再将 S_1 与 S_2 分别输入加法器 ADD 和减法器 SUB，其结果经除法器 DIV2 运算后输出信号 R

$$R = \frac{S_1 + S_2}{S_1 - S_2} = \frac{-K_1 J_1(z_2) + K_2 J_3(z_2)}{-K_1 J_1(z_2) - K_2 J_3(z_2)} = f(A). \quad (16)$$

微悬臂梁振动幅度 A 随信号 R 变化的模拟结果如图 3 所示 (令 $K_1 = K_2$)。可见，由于采用贝塞耳函数比值法，一定程度上减少了贝塞耳函数单值区间对

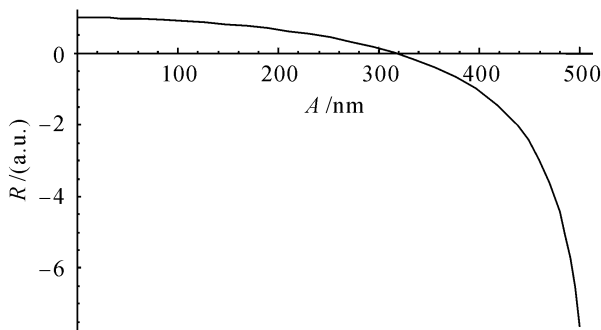


图 3 微悬臂梁振动幅度 A 随信号 R 变化的模拟结果

Fig. 3 Amplitude A of the cantilever versus output signal R

测量范围的限制 (采用一阶贝塞耳函数的单值区间约为 192 nm，采用三阶贝塞耳函数的单值区间约为 435 nm)。

3 实验

采用本文实验装置测量参考文献 [16] 中的样品 1 (Si/SiO₂/Al)，长约 1000 μm ，宽约 300 μm ，厚约 10 μm 。激光二极管中心波长为 1303.9 nm，最大输出功率为 2.5 mW，其波长调制系数 β_1 和强度调制系数 β_2 分别为 0.0188 nm/mA 和 0.1 mW/mA。实验时，调整探头与悬臂梁的初始距离，使 r_0 约为 100 μm ；调整激光二极管驱动电路的输入信号 $V(t)$ ，使 a 约为 1.5 mA (则 z_1 约为 0.0104)；鉴相电路 1 和鉴相电路 2 的增益均为 10。逐渐增大激光二极管交流调制信号 $V(t)$ 的频率，当调制频率远离谐振频率时，信号 R 的测量曲线如图 4(a) 所示，其平均值在 1 左右；当调制频率在 8.81 kHz 左右时，信号 R 的测量曲线变化如图 4(b) 所示，其大小约为 0.85，此时微悬臂梁达到谐振状态，其振动幅度约为 135 nm。

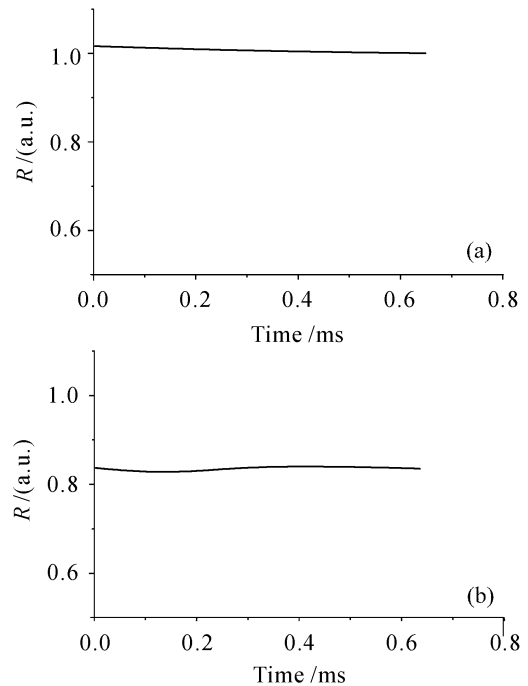


图 4 不同调制频率时信号 R 的测量曲线

(a) 远离谐振频率；(b) 约为 8.81 kHz

Fig. 4 Measurement curves of signal R when modulated frequency is different

(a) far-off resonance frequency; (b) about 8.81 kHz

采用本文的实验装置实现了硅微谐振器的单光源激振测振，获得了微悬臂梁的谐振频率。实验结果与参考文献 [16] 的测量结果 (振动幅度约为

119.51 nm)存在一定差别,一方面是由于相关器件及实验条件很难达到完全一致的原因,另一方面是采用了式(13)的近似,引入一定测量误差。期待进一步分析该误差对位移测量精度的影响,并通过相应的数据处理方法减少该误差。

4 结 论

提出了一种适用于硅微谐振传感器研究的单光源激振测振方法,采用全光纤斐索干涉仪结构,当干涉仪工作在特定条件下时,通过特殊的信号处理方法可以从干涉信号中解调出谐振器的振动信号。实验中采用该方法测得了微悬臂梁的谐振频率约为8.81 kHz及其谐振状态下的振动幅度约为135 nm。采用贝塞耳函数比值法的后期数据处理方法在一定程度上可以减少贝塞耳函数单值区间对测量范围的限制,而且省去了一些难以获得准确数值的工作参数的计算,如常数 C , 初始光程差 r_0 。但是该方法测量范围仍然有限,期待在信号处理中考虑贝塞耳函数的符号以便进一步扩大测量范围。

参 考 文 献

- 1 B. H. Kim, F. E. Prins, D. P. Kern *et al.*. Multicomponent analysis and prediction with a cantilever array based gas sensor [J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, **78**(1-3):12~18
- 2 A. Boisen, J. Thaysen, H. Jensenius *et al.*. Environmental sensors based on micromachined cantilevers with integrated read-out [J]. *Ultramicroscopy*, 2000, **82**:11~16
- 3 B. Ilic, Y. Yang, K. Aubin *et al.*. Enumeration of DNA molecules bound to a nanoelectromechanical oscillator [J]. *Nano Lett.*, 2005, **5**(5):925~929
- 4 Nickolay V. Lavrik, Panos G. Datskos. Femtogram mass detection using photothermally actuated nanomechanical resonators [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(16):2697~2699
- 5 Gao Jinshan, Wang Jiazhen, Tong Shibai. The research of optically excited and interrogated silicon resonators [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A25**(3):253~256
高金山,王家桢,童诗白. 光激励和光检测微型硅谐振器研究[J]. *中国激光*, 1998, **A25**(3):253~256
- 6 Yu Hao, Ding Chun, Wang Yuelin *et al.*. The relationship between silicon micromechanical resonators and excited point [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(10):1445~1448
喻浩,丁纯,王跃林等. 硅微机械谐振器特性与激励光斑位置关系的研究[J]. *光学学报*, 1998, **18**(10):1445~1448
- 7 Toshihiro Kobayashi, Jun Ohsawa, Tamio Hara *et al.*. Contactless measurement of Young's modulus using laser beam excitation and detection of vibration of thin-film microresonators [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(3):1178~1182
- 8 J. Lai, T. Perazzo, Z. Shi *et al.*. Optimization and performance of high-resolution micro-optomechanical thermal sensors [J]. *Sensors and Actuators A*, 1997, **58**(2):113~119
- 9 N. A. D. Stokes, R. M. A. Fatah, S. Venkatesh. Self-excited vibrations of optical microresonators [J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(13):777~778
- 10 J. David Zook, David W. Burns, William R. Herb *et al.*. Optically excited self-resonant microbeams [J]. *Sensors and Actuators A*, 1996, **58**(1-3):92~98
- 11 Liu Yueming, Liu Junhua, Zhang Shaojun. A laboratory study of photothermal excited silicon microresonators with coated film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5):529~533
刘月明,刘君华,张少君. 镀膜硅微机械谐振器光热激励的实验研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5):529~533
- 12 L. M. Zhang, D. Uttamchandani, B. Culshaw. Excitation of silicon microresonators using short optical pulses [J]. *Sensors and Actuators A*, 1990, **21**(1-3):391~393
- 13 D. R. Vincent, J. N. Ross. An all-optical single-fibre micromachined silicon resonant sensor: towards a commercial device [J]. *Sensors and Actuators A*, 1991, **25**(1-3):209~212
- 14 Xuefeng Wang, Xiangzhao Wang, Yingming Liu *et al.*. A sinusoidal phase-modulating fiber-optic interferometer insensitive to the intensity change of the light source [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2003, **35**:219~222
- 15 Dailin Li, Xiangzhao Wang, Yingming Liu. Double sinusoidal phase modulating laser diode interferometer for thickness measurements of transparent plates [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(6):328~330
- 16 Yingming Liu, Xiangzhao Wang, Xuefeng Wang. Study on silicon micro-resonators by using a novel optical excitation and detection apparatus [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5):309~310