

光激励和光检测微型硅谐振器研究*

高金山

(北方交通大学计算机科学系 北京 100044)

王家楨 童诗白

(清华大学自动化系 北京 100084)

提要 分析了光激励谐振器振动的检测问题,用调制激光束激励谐振器使其发生振动,并采用光学干涉的方法测量了这种微振动。

关键词 光纤传感器,硅微结构,谐振传感器

1 引 言

光纤传感器具有测量精度高、抗电磁干扰、适于易燃易爆场合的特点;微型硅谐振传感器具有频率输出、体积小、便于集成化等特点。光激励微型硅谐振传感器则是兼有这两种传感器优点的一种新型传感器。它的基本原理是用光来激励微型谐振器使其在固有频率下振动,外界物理参数(如温度、压力等)对谐振器的固有频率产生影响,检测这种频率的变化以达到测量物理参数的目的。这种传感器的研究在国外进展很快^[1-3]。国内开展这方面的研究始于 1990 年^[4],本文在制作微型硅谐振器的基础上,对谐振器的光激励和检测问题进行了研究。

2 问题的提出

文献[4]介绍了一种测量微型谐振器振动的所谓“激光反馈干涉的方法”,其检测原理见图 1。图中 b 为由铍青铜做成的悬臂梁, T 为 10 倍显微物镜。按照文献[4]的论述,He-Ne 激光器发出的光束,经过透镜聚焦,照到悬臂梁 b 的表面上,光反射后返回到 He-Ne 激光器的前腔镜 m , b 和 m 形成 F-P 腔。反射光的光功率会随 b, m 间的距离变化而变化。这样,在激光器后腔镜 n 外,放一个光电接收管就能检测悬臂梁 b 的振动。

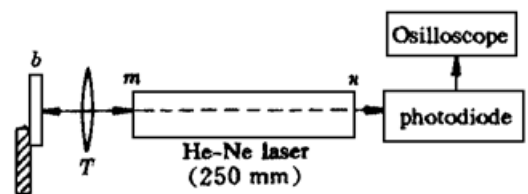


图 1 激光反馈干涉测振方法原理

Fig. 1 The principle of vibration detection based on feedback laser interference

这种方法存在如下问题:首先,根据 He-Ne 激光的工作原理,激光器发出的光束是不允许再返回到激光腔中去的。如果光束返回的话,可能造成激光器的异常谐振,使其不能稳定地工作。即使激光器能够维持工作的话,返回光束本身的位相和频率也要发生改变,不能再以此光

* 国家自然科学基金资助项目。

束为参照来检测物体的振动;再者,由悬臂梁返回的光束要分别穿过前腔镜 m 和后腔镜 n ,而两个反射镜尤其是后腔镜的反射率非常高,计算在后腔镜外的光功率是一个非常复杂的过程。而文献[4]只通过计算悬臂梁 b 处的反射光功率,进而认为在激光器尾部,可以测量激光器前端物体的振动。我们认为这种方法在理论上有待于进一步考虑和斟酌。

另外,在谐振器的制作方式上,文献[4]是把一段铍青铜夹持在有机塑料基座上。对于厚度只有 $15\ \mu\text{m}$ 的铍青铜片,采用一般的机械夹持的方法,很难将其夹紧。造成这种谐振器的根部边界条件不理想,品质因数降低,使谐振器难于在激光的激励下振动起来。

3 微型谐振器振动的激励与检测

要使谐振器在调制激光束的激励下发生机械振动,其厚度必须非常薄(约 $1\ \mu\text{m}$)。为此,作者使用了微型硅谐振器。谐振器的结构见图 2,其中 (a) 为桥型谐振器,尺寸为 $180\times 5\times 1\ (\mu\text{m})$; (b) 为硅膜谐振器,谐振膜为二氧化硅,边长为 $2\ \text{cm}$,厚度为 $0.6\ \mu\text{m}$ 。两种谐振器表面的镀层材料为金,厚度为 $100\ \text{nm}$ 。微型硅谐振器是采用半导体刻蚀技术在硅片上制作的。

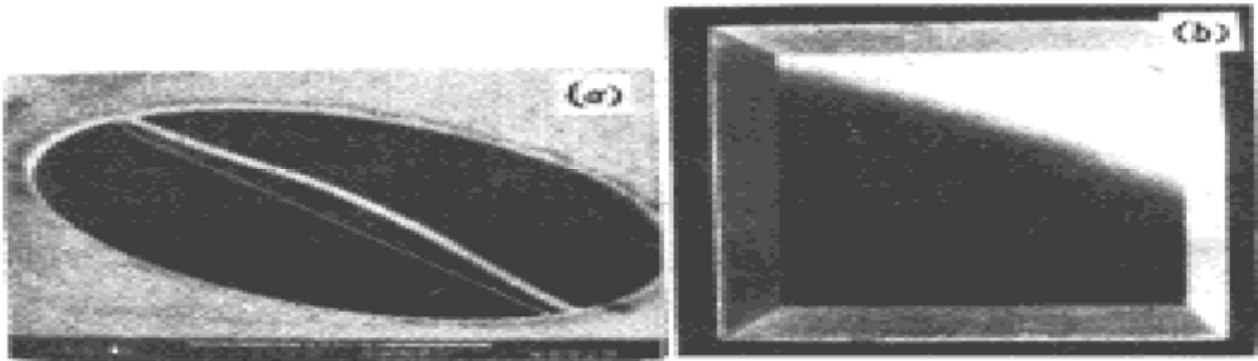


图 2 硅谐振器的显微照片。(a) 桥型谐振器;(b) 硅谐振膜

Fig. 2 Micrograph of the silicon resonators. (a) resonant membrane; (b) silicon bridge

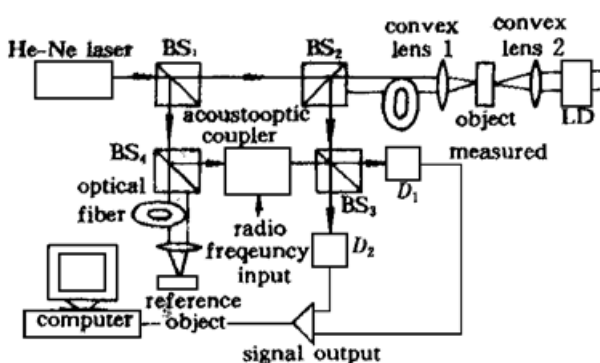


图 3 激光光纤测振仪双点差动测量原理

Fig. 3 The principle of double spot differential detection using a laser optical vibrometer

微型硅谐振器很小,在调制激光束的照射下产生振动的振幅也很小。为了能够正确地检测,我们使用了激光光纤测振仪^[3],其工作原理见图 3。测振仪的基本光路是改进型的 Mach-Zehnder 干涉仪。激光器射出的激光束经分光棱镜 BS_1 分成测量光束和参考光束。测量光束经分光棱镜 BS_2 和聚光镜 1,会聚成一个很小的光斑于被测物体悬梁 b 的表面。大部分反射光和散射光经聚光镜再次进入干涉仪,经分光棱镜 BS_2 转向分光棱镜 BS_3 。参考光束经分光棱镜 BS_4 分为两部分,其中一部分进入光纤和聚光镜 2,射到参考表面,与测量表面光束形成差动干涉工作方式。参考光束的另一部分进入声光调制器并被其

频移 $40\ \text{MHz}$,也进入分光棱镜 BS_3 ,与测量光束相遇发生干涉。测量光束携带了瞬时多普勒频移信息。多普勒频移与被测物体的瞬时速度成正比。激光光纤测振仪多普勒效应标定因子为:

物体以 1 m/s 的运动速度引入多普勒频移为 3.17 MHz。测量光束和参考光束的频差变化引起光强变化。干涉光强的变化经光电接收器 D_1 和 D_2 接收使其转换为电信号, 经放大器进入信号处理器。信号处理器中的本机振荡信号与光电检测信号混频, 经跟踪滤波后, 由速度解调器或幅度解调器进行处理, 再进入计算机进行数据处理和显示。

激光光纤测振仪的技术指标为: 氦氖激光输出功率为 1 mW; 工作距离为 30 mm 到 3 m; 速度解调方式, 四档设置, 每档从 0.1 Hz 到 500 kHz, 动态范围为 80 dB, 模拟输出电压为 ± 10 V, 最高分辨率为 0.5 $\mu\text{m/s}$, 线性度优于 0.5%; 幅度解调方式, 七档设置, 模拟输出电压为 ± 8 V, 最高分辨率为 0.008 μm , 线性度优于 0.1%。

实验中激励激光器为功率可调的半导体激光器, 最大输出功率为 10 mW。输出光束经聚焦透镜照向微谐振梁的中点。半导体激光器的控制端接方波发生器的输出。调节方波的频率, 当半导体激光器产生的调制光频率接近或等于微谐振器的固有频率时, 微型谐振器在光热作用下产生微振动。

在测量上, 激光光纤测振仪测量光会聚于谐振器中部, 参考光会聚于谐振器的根部。光纤测振仪的信号处理采用振幅解调方式, 灵敏度为 20 $\mu\text{m/V}$, 采样频率为 100 kHz, 跟踪滤波器采用 Fast 工作方式。

图 4 为尺寸 $1800 \times 200 \times 1.5$ (μm) 的桥型谐振器的振动波形。激励激光束的功率为 9 mW, 采用方波调制。测得谐振器的最大振幅为 470 nm, 谐振频率为 1.55 kHz。谐振频率的理论计算值为 1.41 kHz, 两者存在一定的误差, 产生误差的原因与镀层厚度以及谐振器的尺寸存在误差有关。图 5 为振动波形的 FFT 频谱图。

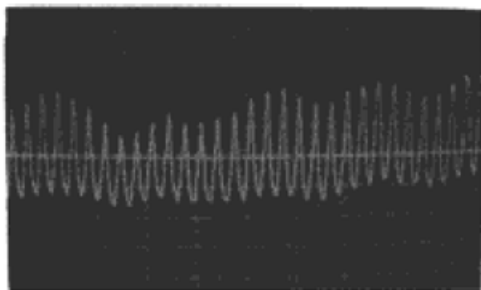


图 4 谐振器振动波形图

Fig. 4 Waveform of the vibrating resonator

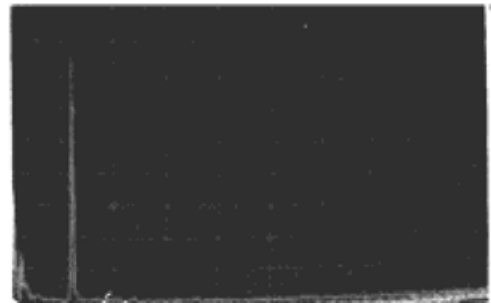


图 5 振动波形的 FFT 频谱图

Fig. 5 Vibrating signal analysed by a FFT program

4 结 论

利用单晶硅良好的机械特性可以制成微型谐振器, 以此作为感应元, 并与光纤技术结合, 可以组成全光型传感器, 其特点是频率输出, 属于数字化传感器。另外, 测量精度高, 抗电磁干扰性能强、适用于易燃易爆等场合。所以, 这种传感器具有广泛的应用前景。本文在实验的基础上, 分析了本研究课题在研究中所存在的问题, 对微型硅谐振器进行了光激励和检测实验, 为这种传感器的进一步实用化的研究提供了参考。

参 考 文 献

- 1 K. E. B. Thornton, D. Uttamchandani, B. Culshaw. Novel optically excited resonant pressure sensor. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(10) : 573~ 574
- 2 J. D. Zook, D. W. Burns, J. N. Schoess *et al.*. Optically resonant micro-beams, Editors: M. Edward Motamedi, Rockwell International Science Ctr., Thousand Oaks, CA, USA; Leo Beiser, Leo Beiser

- Inc., Flushing, NY, USA., Micro-Optics/Micromechanics and Laser Scanning and Shaping, Bellingham, Washington, 98227-0010, USA., published by SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1995, 6~ 16
- 3 J. D. Zook, D. W. Burns, W. R. Herb *et al.*. Optically excited self-resonant microbeams. *Sensors and Actuators*, 1996, **A52** : 92~ 98
- 4 Gu Lizhong, Cai Qingsheng, Hu Yi. Optically-excited Micro-cantilever beam resonator. *Applied Laser* (应用激光), 1991, **11**(5) : 214~ 216 (in Chinese)

The Research of Optically Excited and Interrogated Silicon Resonators

Gao Jinshan

(Computer Science and Technology Department, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Wang Jiazhen Tong Shibai

(Automation Department, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Silicon substrates have optical and mechanical properties that provide excellent opportunities for fiber-optic sensors. The microbeam forms a structure that functions as an optomechanical modulator. Modulated light can be use to excite the microbeam into resonance. The measured value (such as pressure) causes the deformation of the substrate and, consequently, varies the resonance frequency of the fundamental flexural mode through the intrinsic tension in the microbeam. When the beam vibrates, the incident light is modulated and the reflected light is used to sense vibration of the beam. Microbeams attached to the substrate at both ends are highly strain sensitive and form the basis of a variety of sensors, including pressure sensors, accelerometers, strain, vibration, and temperature sensors.

In this paper, the problems in measuring the vibration of microbeams are analyzed. A modulated light from a laser diode has been used to excite the microbeam into vibration. The vibration of the microbeam is measured by using a laser interferometric method. The test results suggest that this method can be used for precision measurement of microbeams.

Key words silicon microstructures, resonant sensors, fiber-optical sensors