

文章编号: 0253-2239(2003)05-0529-05

镀膜硅微机械谐振器光热激励的实验研究*

刘月明¹ 刘君华² 张少君³

{ 1 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048 }
{ 2 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049 }
{ 3 西安理工大学理学院, 西安 710048 }

摘要: 对镀膜双层硅微机械谐振器的光热激励进行了实验研究,在大气环境下对硅微谐振器进行了光激电拾实验测试和光激光拾实验测试。成功观测到了硅微谐振器的一阶、二阶和三阶谐振状态。在光激光拾实验测试中提出了一种新颖的“单光源实验测试方法”,即:使用同一光源同时实现硅微谐振器的光热激励和微弱谐振信号的提取,这与传统的“双光源实验方法”相比,简化了实验系统,有利于实用化开发。

关键词: 信息处理技术; 硅微谐振器; 双层结构; 光热激励; 单光源系统

中图分类号: TN202 文献标识码: A

1 引 言

硅微机械谐振传感器是近年来出现的一种新型传感器,这种新型传感器与其它种类传感器相比,具有体积小、易集成、成本低、精度高等优点^[1],硅微谐振传感器的核心为硅微机械谐振器,对硅微机械谐振器的光热激励实验研究主要集中在两个方面:一是硅微机械谐振器的光热激励,二是硅微谐振器信号的检测。目前对硅微谐振器通常采用电磁激励、静电激励、压电激励和电热激励等方法^[2,3],相比之下,光热激励是一种最具吸引力的方法,这种激励方法最终可导致一种极具优势的“全光型硅微谐振传感器”的出现。硅微谐振器在光热激励下的谐振信号,是一种极微弱信号,对它的提取,本文采用了压敏电阻拾取法和光学拾取法两种:压敏电阻拾取法主要是利用硅的微机械加工工艺,在硅微谐振器表面制作四个等值的压敏电阻,并连成惠斯通电桥的差动方式,当硅微谐振器出现谐振时,惠斯通电桥会有相应的谐振信号输出,从而检出硅微谐振器的谐振信息。

光学传感拾取法通常采用光纤传感器技术进行,一般可分为两个类型,即:光强调制检测方式和光干涉调制检测方式。两种检测方式相比,光强调制检测方式精度较低、简单可靠、容易控制,而光干

涉调制检测方式精度高、易受干扰、不易稳定。因此,在两种检测方式均能满足要求的前提下,优先选用光强调制检测方法。

追溯硅微机械谐振器的光热激励研究历史,最早从事该项研究的为英国 Strathclyde 大学的 Culshaw 教授为首的科研组。他们于 1985 年在 *Electron. Lett.* 杂志上首次发表了他们的研究成果^[4]。其后,世界各国有多个研究组开始从事该项目的研究,到目前为止,重要报道文献有 100 多篇^[7]。但这些文献对硅微谐振器光热激励的实验报道存在两方面的不足:一是所有的文献对硅微谐振器的光热激励实验研究仅限于一阶基本振型,未能对二阶和三阶振型进行实验研究,尽管已有其它激励形式下二阶和三阶振型的实验报道和光热激励下二、三阶振型的理论分析报道^[5,6];二是大多数文献对硅微谐振器的光热激励实验研究均为“双光源实验方法”^[7,8],即一套光源用于光热激励,另一套不同波长的光源用于谐振信号的提取。这种“双光源实验方法”系统比较复杂,且不利于实用化开发。虽然也有文献基于“法布里-珀罗干涉原理”提出了一种单光源实现方案,但这种单光源结构加工困难,抗干扰性能差,事实上这种工作方式下硅微谐振器的谐振只能持续几分钟^[9]。本文的实验研究克服了以上两方面的不足,一方面对硅微谐振器的光热激励一、二、三阶振型进行了实验研究,另一方面提出了一种结构简单、实用新颖的硅微谐振器光热激励的“单光源实验方法”,并成功地加以实现。

* 陕西省教委专项科研计划(00JK263)、国家自然科学基金(69776037)、西安理工大学博士启动金资助课题。

E-mail: L.yuming@263.net

收稿日期:2002-04-05

2 镀膜硅微机械谐振器的光热激振机理

对于硅微谐振器的结构,一般有三种形式,即:悬臂梁式、桥式和膜式。相比之下,悬臂梁式在实用化设计方面优于桥式和膜式,这主要有两个原因:一是硅微悬臂梁在加工和封装过程中形成的内应力比桥式和膜式要小得多,而这种内应力将影响传感器工作的精度^[10];二是与桥式和膜式硅微谐振器相比,悬臂梁式硅微谐振器容易起振,即:在相同激励源的前提下,悬臂梁式硅微谐振器的振幅远大于同尺寸桥式和膜式硅微谐振器的振幅^[11],而谐振器振幅的大小决定传感器信号信噪比的大小。

为提高光激励效率,通常在硅微谐振器的表面镀上一层高光能吸收系数、低比热容、高热胀系数的材料。这样,整个硅微机械谐振器成为了双层结构或多层结构,但由于通常镀膜厚度较薄,因此目前的研究方法一般忽略了该层镀膜对硅微谐振器结构的影响,而作为单层材料进行分析^[12]。但事实上,这是一种简化但不准确的处理方法,特别是在镀膜层较厚时更是如此。为此,合理的处理方法应该充分考虑镀膜层对整个硅微谐振器结构的影响。

2.1 镀膜硅微谐振器的前三阶谐振频率

图 1 为镀膜硅微谐振器结构图,镀层的弹性模量、厚度、密度分别为 E_1 、 t_1 、 ρ_1 和 E_2 、 t_2 、 ρ_2 ,微悬臂梁的长度和宽度分别为 L 和 W ,为充分考虑镀膜对硅微谐振器的结构影响,需要将双层结构的有关材料参量进行等效处理,等效为单层材料再进行处理,这就是“参量等效法”。

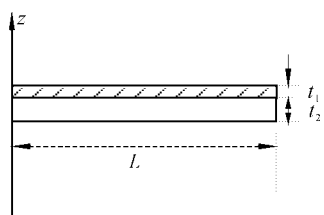


Fig. 1 Structure of the silicon microresonator

按照“参量等效法”和机械振动理论,可以建立镀膜硅微悬臂梁谐振器前三阶谐振固有频率为^[17]

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= 0.162 \frac{t_2}{L^2} \sqrt{K \frac{E_2}{\rho_2}}, \\ f_2 &= 1.028 \frac{t_2}{L^2} \sqrt{K \frac{E_2}{\rho_2}}, \\ f_3 &= 2.832 \frac{t_2}{L^2} \sqrt{K \frac{E_2}{\rho_2}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, K 为等效弹性模量,其值为

$$K = \frac{4 + 6 \left(\frac{t_1}{t_2} \right) + 4 \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 + \frac{E_1}{E_2} \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^3 + \frac{E_2}{E_1} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)}{\left(1 + \frac{t_2 E_2}{t_1 E_1} \right) \left(1 + \frac{\rho_1 t_1}{\rho_2 t_2} \right)}. \quad (2)$$

2.2 镀膜硅微谐振器的光热激振机理

对硅微谐振器光热激振机理的研究,可以揭示光热激振的物理本质,然而目前有关这个问题的研究却十分欠缺。英国的 Fatch 通过研究,于 1992 年提出了一种“光热效应”的计算模型,但这个模型未能顾及镀膜的影响,只分析了硅微谐振器光热激励的“轴向热应力效应”,硅微谐振器光热激励振幅的理论模型为^[13]

$$A_1 = \left[\frac{3\sqrt{3}L^3 \Omega Q P}{8\gamma_i^2 t W} \left(\frac{\rho}{E} \right)^{1/2} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

式中, L 、 W 、 t 分别为硅微谐振器的长、宽、厚, Q 为谐振器的品质因数, P 为硅微谐振器吸收的激励光功率, γ_i 为由边界条件确定的振型参量,对两端固定的硅微桥谐振器而言 $\gamma_i = 1.5\pi$, E 、 α 、 ρ 、 c 分别为谐振器材料的弹性模量、热胀系数、体密度和比热容, Ω 为与硅微谐振器材料有关的参量,其值为 $\Omega = \alpha/\rho c$ 。

Fatch 模型未能考虑硅微谐振器镀膜的影响,事实上硅微谐振器均有镀膜,成为双层结构,此时除需考虑 Fatch 提出的“轴向热应力效应”外,还需考虑由于双层材料热胀系数不同而引入的“光热双金属效应”。经过理论分析,得到了对应硅微谐振器“光热双金属效应”的硅桥谐振器振幅模型为^[17]

$$A_2 = y_{\max}(x, t) \Big|_{x=0} = 0.0122 \frac{QPL^3 [3(\alpha_1 - \alpha_2)E_1 E_2 t_1 t_2]}{t_2^4 \rho^{1/2} K_0^{3/2} E^{3/2} c W (E_1 t_1 + E_2 t_2)}, \quad (4)$$

式中, K 如(2)式所示, ρ 、 E 、 c 分别为双层硅微谐振器材料的等效密度、等效弹性模量和等效比热,其表达式分别为

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\rho_1 t_1 + \rho_2 t_2}{t_1 + t_2}, \\ E &= \frac{E_1 t_1 + E_2 t_2}{t_1 + t_2}, \\ c &= \frac{\rho_1 c_1 t_1 + \rho_2 c_2 t_2}{\rho_1 t_1 + \rho_2 t_2}. \end{aligned}$$

根据材料力学独立载荷叠加原理,将光热激励的“轴向热应力效应”和“光热双金属效应”综合起来,即构成了硅微谐振器光热激励的模型,则图 1 中镀膜硅微谐振器的光热激振振幅应为(3)式和(4)式的叠加,即

$$A = |A_1| + |A_2|. \quad (5)$$

因此,对于镀膜硅微谐振器而言,其光热激励的机理除应考虑“轴向热应力效应外”,还应考虑“光热双金属效应”,且当镀膜较厚时,“光热双金属效应”的贡献将成为光热激励机理的最主要因素。

3 镀膜硅微谐振器的光热激励实验

3.1 镀膜硅微机械谐振器的制作

硅微机械谐振器的制作采用了硅微机械加工的湿法工艺,采用的腐蚀液为 KOH 腐蚀剂(氢氧化钾+水+异丙醇),为实现硅微谐振器谐振信号的压敏电阻拾取,事先利用半导体的扩硼工艺,在谐振器的根部应力敏感区制作了四个压敏电阻组成差动电桥。用光拾取谐振信号的硅微谐振器不需制作压敏电阻。硅微谐振器的镀膜层为 SiO_2 ,厚度 $1 \mu\text{m}$,最终为便于夹持测试,将每一个器件单元封装成 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 的单元。

3.2 光激电拾实验

硅微谐振器光激电拾实验装置如图 2 所示。测试对象为硅微悬臂梁谐振器,长度 $2000 \mu\text{m}$,宽度 $300 \mu\text{m}$,厚度未知,电热激励电阻 51Ω ,压敏电桥桥臂电阻 597Ω 。硅微谐振器的激励光源为 OS3-B 型带外调制激光源,激励光源在外调制源函数发生器 EM1642 作用下发出正弦调制的激励光(波长 $1.55 \mu\text{m}$),调制光沿光纤经五维微调架照射到硅微悬臂梁的自由端。电拾信号由硅微谐振器上的压敏电桥检测,电桥供电电压为 $+5 \text{ V}$,电桥输出的信号进入锁相放大器进行处理,可得到谐振信号 V_0 的值。同样通过示波器可观察谐振波形。

取光源 OS3-B 的静态工作点为 20 mA ,对应光强的变化范围从 0.4 mW 到 3.7 mW ,对硅微谐振器的前三阶谐振特性进行测试,得到了表 1 中的数据。

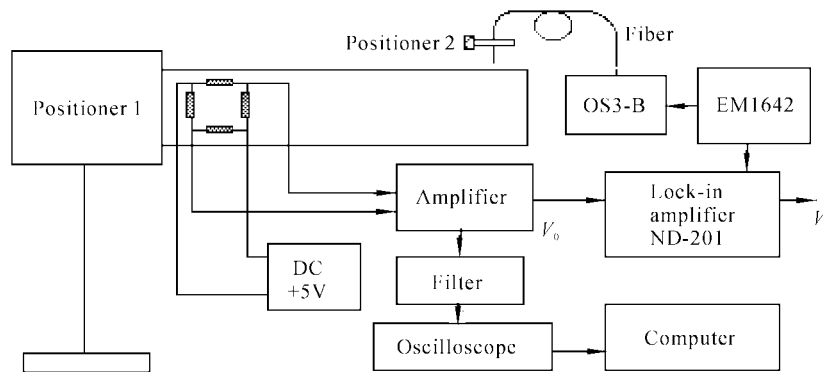


Fig. 2 Set-up of photothermal excitation and electrical sensing

Table 1. Experimental data of photothermal excitation and electrical sensing (corresponding to the first three resonant modes I、II and III)

I	Frequency f_1/kHz	5.80	5.81	5.82	5.83	5.84	5.86	5.88	5.90	5.94
	Output $V_0/\mu\text{V}$	7.3	8.0	10.8	14.5	18.1	16.3	12.5	11.0	8.0
II	Frequency f_2/kHz	36.23	36.50	36.70	36.78	36.80	36.81	36.88	36.97	36.97
	Output $V_0/\mu\text{V}$	9.6	9.9	11.0	16.6	17.7	16.4	14.2	12.1	12.1
III	Frequency f_3/kHz	102.35	102.63	102.72	102.77	102.84	102.91	103.19	103.36	104.0
	Output $V_0/\mu\text{V}$	14.4	14.9	15.7	17.5	18.0	17.0	15.6	15.4	14.5

由表 1 的实验数据可见,硅微谐振器的一阶、二阶和三阶谐振频率分别为

$$f_1 = 5.84 \text{ kHz},$$

$$f_2 = 36.80 \text{ kHz}$$

$$f_3 = 102.84 \text{ kHz}.$$

由以上实验数据可以看出,前三阶谐振频率的比值为: $f_1:f_2:f_3=1:6.3:17.6$,这与(1)式中的前三阶谐振频率的理论比值吻合的很好。另外,由实

验数据可见系统存在同频干扰,分析其原因主要有两个:一是由于测试系统比较复杂,无法真正做到一点接地造成的干扰;二是硅微谐振器在激励光作用下热挠曲导致电桥的同频干扰输出。

3.3 光激光拾实验

下面首先推导单光源光激光拾谐振信号的形式。稳定化光源 OS3-B 在本身提供的直流偏置和外调制的交流共同激励下,共同激励激光管发光,则

其发出的激励光强表达式为

$$P_{in} = P_D + P_0 \sin \omega t, \quad (6)$$

式中, P_D 为 OS3-B 本身提供的直流输出光强, P_0 为外调制信号导致的光源光强变化的幅值, ω 为外调制信号的角频率。采用的单光源光激光拾实验装置

如图 3 所示。由光源 OS3-B 发出的激励光 P_{in} 照射到硅微悬臂梁谐振器的自由端, 当硅微悬臂梁振动时, 由微悬臂梁表面反射回光路的检测光为

$$P_{out} = \delta P_{in} = \delta P_D + \delta P_0 \sin \omega t, \quad (7)$$

δ 为微悬臂梁表面反射光返回光路的耦合系数。

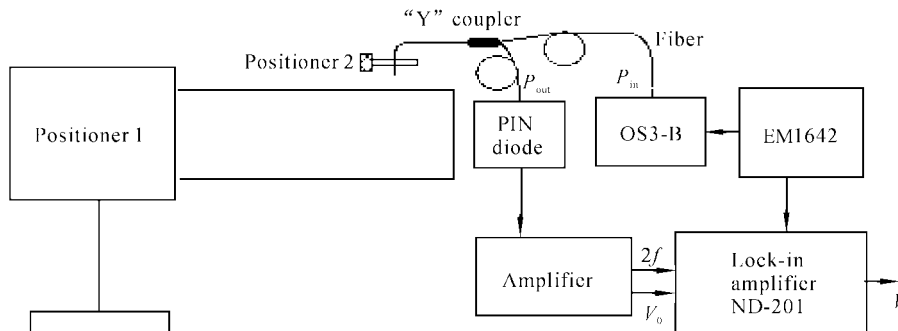


Fig. 3 Set-up of photothermal excitation and optical sensing

当硅微悬臂梁谐振器在 P_{in} 激励下产生谐振时, 经微梁表面返回光路的光受到微梁谐振信号的调制, 此调制信号取决于微梁的谐振状态, 可表达为

$$\psi = \beta \sin(\omega t + \varphi), \quad (8)$$

式中, β 为取决于谐振器振幅的调制耦合系数, ω 为谐振角频率, φ 为微谐振器相对于激励的相位滞后。综合(7)式和(8)式可得微梁谐振时耦合回光路的检测光为

$$P'_{out} = \psi P_{out} = \frac{P_0 \delta \beta}{2} \cos \varphi + P_D \delta \beta \sin(\omega t + \varphi) - \frac{P_0 \delta \beta}{2} \cos(2\omega t + \varphi), \quad (9)$$

上式中共有三项组成: 第一项为恒流成分, 第二项为基频成分, 第三项为二倍频成分。其中基频和二倍频成分均可用来检测谐振信号, 因为这两项的振幅里均含有受谐振器振幅调制的系数 β , 当谐振器达到

谐振状态时, 振幅最大, β 最大, 故由 β 可以检测到硅微谐振器的谐振频率点。实验中首先试图利用(9)式的基频成分进行硅微谐振器的谐振检测, 但实测时无法将硅微谐振器的谐振信号与系统中的同频干扰加以区分。

然后开始研究利用(9)式的二倍频成分实现谐振检测, 这种方法的主要困难在于从光电二极管(PIN)输出的信号为二倍频成分, 而同步激励源函数发生器只能提供基频的参考信号, 但所使用的锁相放大器 ND-201 具备对同步二倍频成分的检测功能。使用这种方法测得了硅微谐振器一阶振型的数据, 如表 2 所示, 由表中数据可以看出, 此方法检测到了硅微谐振器的谐振点在 5.84 kHz, 与 3.2 中光激电拾结果一致。

Table 2. Experimental data of photothermal excitation and optical sensing (corresponding to the first resonant mode)

Frequency f_1 /kHz	5.33	5.51	5.69	5.82	5.84	5.86	6.01	6.20	6.40
Output V_0 /μV	5.2	8.5	10.8	12.2	13.0	12.7	10.4	7.9	5.0

术方案有着十分重要的意义。

结束语 本文对镀膜硅微机械谐振器进行了实验测试研究, 使用电拾和光拾两种方法对硅微谐振器的光热激振进行了测试, 成功的观察到了器件的前三阶谐振, 而谐振器件二、三阶振型是研究谐振器内应力和材料性质的途径之一, 对传感器的实用化开发具有现实意义。在硅微谐振器的光拾取方案中, 提出了一种新颖的单光源实验测试方法, 并成功的加以实现, 在考虑做进一步的传感器开发时, 单光源技

参 考 文 献

- Liu Yueming, Liu Junhua, Zhang Shaojun. The technical features and developing trends of micromachined silicon sensors. *Instrument Technique and Sensor* (仪表技术与传感器), 2000, (2):1~3,20 (in Chinese)
- Churenkov A V. Silicon micromechanical optical waveguide for sensing and modulation. *Sensors and Actuators*, 1996, **A57**(1):21~27

- 3 Wang Yaqiang, Jin Zhonghe, Wang Yuelin *et al.*. A novel silicon micromechanical resonant viscosity vacuum gauge. *Vacuum Science and Technology* (真空科学与技术), 1997, **17**(3):153~159 (in Chinese)
- 4 Venkatech S, Culshaw B. Optically activated vibrations in a micromachined silicon structure. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(8):315~317
- 5 Houmady M, Farnault F, Kawakatsu H *et al.*. Applications of dynamic techniques for accurate determination of silicon Nitride Young's moduli. *Proc. of International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*. Chicago, Jun 16~19, 1997: 615~618
- 6 Yu Hao, Ding Chun, Wang Yuelin *et al.*. The relationship between silicon micromechanical resonators and excited point. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(10): 1445~1448 (in Chinese)
- 7 Liu Yueming. *Study on Theory and Techniques of Photothermal Excitation of Silicon Microresonators* (硅微机械谐振器光热激励理论及技术研究). [Ph. D. Dissertation]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2001. 5~10 (in Chinese)
- 8 Thornton K E B, Uttamchandani D, Culshaw B. Novel optical excited resonant pressure sensors. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(10): 573~574
- 9 Stokes N A D, Fatch R M A, Venkatesh S. Self-excited vibration of optical microresonator. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(12):777~778
- 10 Ericson F, Greck S, Soderkvist J *et al.*. High-sensitivity surface micromachined structures for intenal stress and stress gradient evaluation. *J. Micromech. Microeng.*, 1997, **7**(1):30~36
- 11 Rao Y J, Culshaw B. Comparison between optically excited vibration of silicon cantilever and bridge microresonators. *Sensors and Actuators*, 1992, **A30**(3): 203~208
- 12 Wolfelscheider H, Kist R, Knoll G *et al.*. Optically excited and intergrated micomechanical silicon cantilever structure. *Proc. SPIE*, 1987, **798**:61~66
- 13 Fatch R M A. Mechanisms of optical activations of micromechanical resonators. *Sensors and Actuators*, 1992, **A33**(3):229~236

A Laboratory Study of Photothermal Excited Silicon Microresonators with Coated Film

Liu Yueming¹ Liu Junhua² Zhang Shaojun³

1 College of Machinery and Precision Instrumentation, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048

2 College of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

3 School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048

(Received 5 April 2002)

Abstracts: An experimental study on the photothermal excitation of bi-layered silicon microresonator is presented. Two methods are used to test the microresonators in the air environment, including the photothermal excitation and electrical sensing method. Corresponding vibration waves of the first three modes are observed in the experiments successfully. By using single optical source, a new method is presented to realize the photothermal excitation and optical sensing at the same time which is more suitable for further application than the traditional two optical sources system.

Key words: information processing technique; silicon microresonator; bi-layered structure; photothermal excitation; single optical source system