

文章编号 1004-924X(2010)09-2022-06

谐振式 MEMS 温度传感器设计

马洪宇, 黄庆安, 秦 明

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 为了实现以频率输出为信号的气象温度测量, 提出了一种基于双层悬臂梁的谐振式微温度传感器。基于双悬臂梁不同材料热膨胀系数的差异会导致悬臂梁谐振频率偏移的原理, 采用压电方式同时实现悬臂梁的驱动及其谐振频率的检测, 从而实现温度的测量。根据硅基传感器的正面腐蚀工艺, 设计了谐振悬臂梁的双层结构, 采用有限元方法分析了悬臂梁的谐振模式、可利用的振型及其温度与各模式谐振频率的关系, 并利用多普勒振动系统对悬臂梁的谐振特性进行了研究。实验发现悬臂梁的二阶弯曲振型 Q 值相对于其它振型是最大的, 其 Q 值约为 150; 高阶振型特别是二阶弯曲振型适合用于以 ZnO 为压电材料的温度传感器的频率检测, 并且具有相对较高的灵敏度 (约为 20 Hz/°C) 和频率温度系数 ($1.9 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$)。结果表明, 微型温度传感器能够满足气象温度检测的要求, 并具有抗干扰能力强、灵敏度高、信号传输接口简单等优点。

关键词: 温度传感器; 微机电系统 (MEMS); 频率测量; 谐振; 悬臂梁

中图分类号: TP212.11 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2022

Design of resonant MEMS temperature sensor

MA Hong-yu, HUANG Qing-an, QIN Ming

(Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to realize meteorologic temperature measurement based on frequency outputs, a resonant micro-temperature sensor with a bilayer cantilever was proposed. According to the working principle that the resonant frequency of the microcantilever will be shifted due to the thermal expansion coefficient mismatch between the two-materials, the temperature variation could be detected by driving the cantilever and detecting the resonant frequency with piezoelectric excitation and detection. The structure of the temperature sensor was designed according to the front side fabrication process of silicon. Then, the resonant modes, detectable models and the effect of temperature on these models were analyzed by means of finite element method. The resonant characteristics were also researched with a polytech laser Doppler vibrometer. The results indicate that the 2nd resonant model of the cantilever has the largest Q factor about 150 as compared with other resonant models. Furthermore, the higher mode, particularly the 2nd resonant model is more suitable for detecting the resonant frequency of the temperature sensors by utilizing ZnO as piezoelectric materials and it can offer a relative higher sensitivity about 20 Hz/°C and temperature coefficient of frequency about $1.9 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$. These results show that the sensor can satisfy the requirements of meteorologic temperature measurement and

收稿日期: 2010-03-08; **修订日期:** 2010-04-05.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2009AA04Z322); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60901009)

has the advantages of high electrical stability, high sensitivity and simple signal transmission interface.

Key words: temperature sensor; Micro-electrical-mechanical System (MEMS); frequency measurement; resonance cantilever

1 引言

温度是科研、生产和生活中非常重要的一个参数。材料的各种性能几乎都与温度有关,因此温度传感器是一种应用广泛的传感器,温度的精确测量是生产、科研中一项非常重要的任务。温度的传统测量方法采用的是铂电阻、热敏电阻、热电偶以及硅基集成的温度传感器。铂电阻是最常用的电阻式温度传感器,它虽具有良好的线性度、重复性、稳定性和宽的温度范围,但是不便于集成制造。而诸如镍、锰的硫化物、硒化物等半导体化合物材料的电阻器的温度非线性都很高,并且与集成电路 IC 工艺不兼容。采用热电偶测温则需要提供一个恒定的参考温度环境(参考温度点)。以热敏二极管或三极管为敏感核心的集成温度传感器,虽然利用硅基工艺制造,与 IC 工艺完全兼容,但是它们的测温范围较窄($-50\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$),通常用于片上温度的监测^[1],且不能测量低于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度。这几种温度传感器与热电偶都不便于检测环境温度,尤其是气象环境温度。在众多的温度传感器中,石英晶体温度传感器^[2]的输出信号是频率信号,这不仅有利于二次仪表的数字化,还能提高传感器的抗干扰能力,便于远距离传输,将其应用在高精度的测试系统中,不但能节省模数转换器、简化系统,还可以提高系统的精度和可靠性。因此,石英谐振温度传感器以其分辨率高、输出为频率信号得到了重视及应用。但是,由于石英的各向异性特性以及它仅以石英振动频率的温度效应为检测原理,其精度取决于对石英晶体的切型,即切割的精确性;并且其加工工艺与硅微加工工艺不兼容,因此这种方法尚未应用于微机械器件中^[3]。

为满足气象温度参数频率输出的精密测量要求,本文提出一种与 CMOS 工艺兼容的微电子机械(MEMS)谐振式温度传感器,它以双层悬臂梁作为温度敏感元件,采用压电激励和压电检测的工作方式将温度信号直接转换成频率输出信号。

微悬臂梁的谐振工作方式已被广泛用于生物、化学、加速度、湿度、力、热等传感器^[4-6],由于温度对这类传感器的输出频率具有不同程度的影响,通常需要进行温度补偿。本文基于热失配效应提出了以多层悬臂梁为关键敏感元件的谐振式微温度传感器。基于悬臂梁结构在传感器中的重要作用,对双层悬臂梁的温度-频率特性进行了分析、模拟;并对其谐振频谱进行了实验研究,以期获得较高的灵敏度和较好的频率输出特性。

2 传感器的结构设计及工艺

悬臂梁是 MEMS 传感器和驱动器中应用广泛的一种结构,近年来还被用作发电装置^[7-8],它作为传感器时有静态和谐振两种工作方式。对于谐振方式,微悬臂梁传感器的敏感原理通常是基于表面应力、质量的改变对谐振频率的影响。本文提出的微温度传感器的工作原理主要是基于双层悬臂梁中不同材料的热膨胀系数失配效应对谐振频率的影响。该传感器的基本结构如图 1 所示。

在悬臂梁的固定端附近用两块压电材料分别进行驱动产生谐振和检测谐振频率。传感器的敏感元件为 Al/SiO₂ 双层悬臂梁,其中金属 Al 具有相对较大的热膨胀系数,SiO₂ 用作金属的支撑材料^[9-10]。二者的热膨胀系数是 CMOS 材料中差值最大的。当温度变化时,在“双金属”效应作用

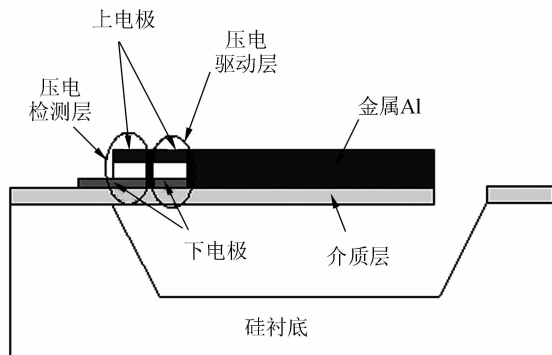


图 1 微温度传感器结构示意图

Fig. 1 Sketch structure of micro temperature sensor

下双层悬臂梁会发生静态偏转,从而使悬臂梁谐振频率发生偏移。利用压电材料检测出谐振频率的偏移,即可得到温度的变化量。

硅基压电 MEMS 悬臂梁,通常采用背面湿法腐蚀工艺进行加工,腐蚀液用的是 KOH 或 TMAH 碱性溶液,其中, KOH 溶液由于金属离子 K^+ 的存在,与 CMOS 工艺不兼容。硅的背面湿法腐蚀首先需要进行背面光刻以露出腐蚀窗口,因此,需要采用双面对准光刻机,但这会产生较大的误差而且需要腐蚀几乎整个硅片,因此,使用了较长的腐蚀时间从而增加了加工成本。另外,在背面腐蚀完成薄膜的腐蚀工艺后,还需要干法刻蚀工艺完成结构的释放。而正面腐蚀不仅可以在很大程度上减少腐蚀所用的时间,还避免了使用双面对准光刻工艺和成本更高的干法刻蚀工艺,因此简化了加工工艺,降低了加工成本。采用已试制成功的 TMAH 溶液可对硅片进行正面腐蚀得到所提出的双层悬臂梁结构,该溶液对金属 Al 层有较好的选择性—对 Al 没有腐蚀作用。

3 理论分析

3.1 复合悬臂梁的谐振频率

对长为 l , 宽为 w , 厚为 h 的矩形悬臂梁, 考虑小振幅无阻尼状态的振动, 其控制方程为^[11]:

$$\tilde{E}I \frac{\partial^4 \hat{y}}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 \hat{y}}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

其中 $\tilde{E} = E/(1-\nu^2)$, E 为杨氏模量, ν 为泊松比; I 为转动惯量, $I = \omega h^3/12$; A 为悬臂梁的截面积, $A = \omega h$, t 为时间。悬臂梁的边界条件为:

固支端:

$$\hat{y}(0) = \frac{\partial \hat{y}(0)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

自由端:

$$\frac{\partial^2 \hat{y}(l)}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 \hat{y}(l)}{\partial x^3} = 0, \quad (3)$$

设方程(1)有调和解, 可得:

$$\frac{\partial^4 \hat{Y}}{\partial x^4} - \frac{\rho A}{\tilde{E}I} \omega^2 \hat{Y} = 0, \quad (4)$$

于是 n 阶谐振频率为:

$$f_n = \frac{k_n^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{\tilde{E}I}{\rho A}}, \quad (5)$$

其中 k_n 是特征方程 $\cos(k_n)\cosh(k_n)+1=0$ 的解。

对于复合悬臂梁, $\tilde{E}I$ 由 $\tilde{E}I$ 代替^[10], 即:

$$\tilde{E}I = \frac{b[\tilde{E}_1^2 h_1^4 + \tilde{E}_2^2 h_2^4 + \tilde{E}_{12} h_2 h_1 (4h_1^2 + 6h_1 h_2 + 4h_2^2)]}{12(\tilde{E}_1 h_1 + \tilde{E}_2 h_2)}$$

而 ρA 则由 $\rho_1 A_1 + \rho_2 A_2$ 代替, 其中 h_1, h_2 分别是两种材料的厚度。

3.2 复合悬臂梁的静态分析

对于由两种材料构成的复合悬臂梁, 由于不同材料的热膨胀系数 (α_1, α_2) 存在差异, 当温度发生改变 (ΔT) 时, 悬臂梁的曲率 k 及曲率半径 r 为^[12]:

$$k = \frac{1}{r} = \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1)(1+m)^2 \Delta T}{h(3(1+m)^2 + (1+mn)(m^2 + \frac{1}{mn}))}, \quad (6)$$

其中 $m = h_1/h_2, n = E_1/E_2$ 。

对于多层悬臂梁而言, 温度变化时在“双金属”效应的作用下产生形变及应力并使其谐振频率发生偏移, 检测其频率的变化就可感知温度的变化。

3.3 悬臂梁谐振式温度传感器的驱动与检测

MEMS 谐振传感器的激励和检测是谐振传感器设计的关键部分。常用的激励方式有静电激励、电热激励、光热激励、电磁激励; 检测方式主要有电容检测、压阻检测、光学检测、电磁检测。

压电转换既可用于检测机械变形, 又可用于激励机械结构振动, 并且压电材料中的 ZnO、压电陶瓷(锆钛酸铅 PZT)及压电聚合物材料(聚偏二氟乙烯 PVF2 和 PVDF 及其共聚物)都已在 MEMS 器件中得到实现, 因此, 这里采用压电材料进行驱动和检测。由于 ZnO 可以采用磁控溅射或化学气相淀积(CVD)的方法形成均匀致密的薄膜, 并且它的加工工艺可与硅工艺兼容, 故选用 ZnO 作为微温度传感器的压电材料。

4 有限元仿真分析及实验

4.1 悬臂梁的温度场耦合有限元分析

利用 Solid5 模型建立了悬臂梁实体的 ANSYS 模型, 材料分别设为金属 Al 和 SiO_2 , 一端施加固定的边界条件(all DOF), 如图 2 所示。采用 Solid5 模型实现温度耦合场的分析, 通过有限元分析, 得到了复合悬臂梁前 5 阶振型及其对应的频率。图 3 为悬臂梁的振型示意图, 可见其中便

于压电驱动及检测的有如图所示的 1,2,4 阶弯曲振型。

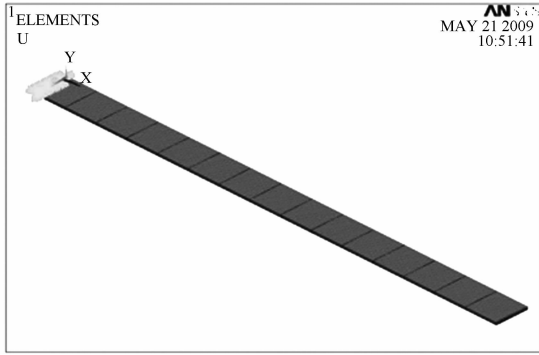


图 2 悬臂梁的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of cantilever

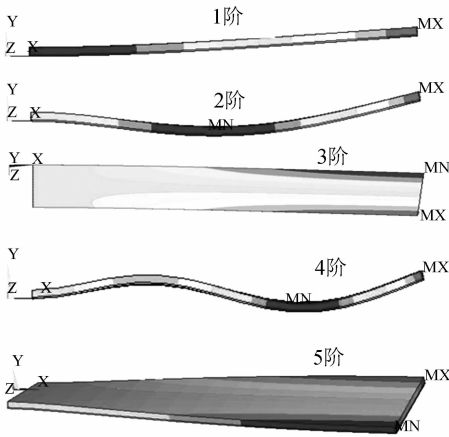


图 3 双层悬臂梁的前五阶振型

Fig. 3 The first five resonant models of bimaterial cantilever

对双层悬臂梁主体结构施加不同的温度场进行有限元分析,得到了如图 4 所示的便于压电检测的振型的温度-频率关系。不同尺寸悬臂梁各振型的灵敏度如表 1 所示。

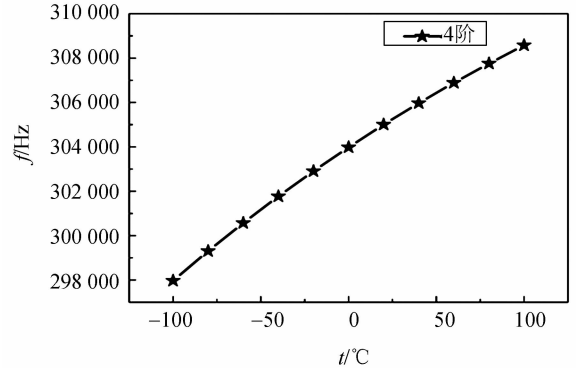
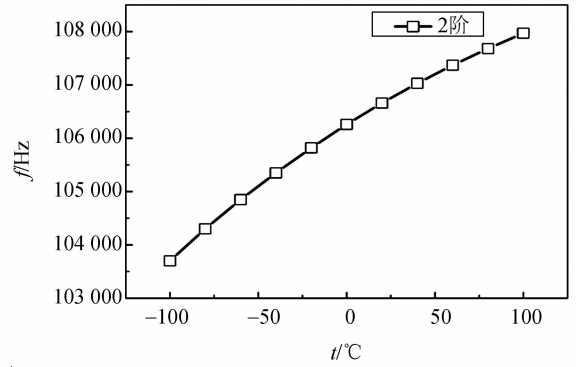


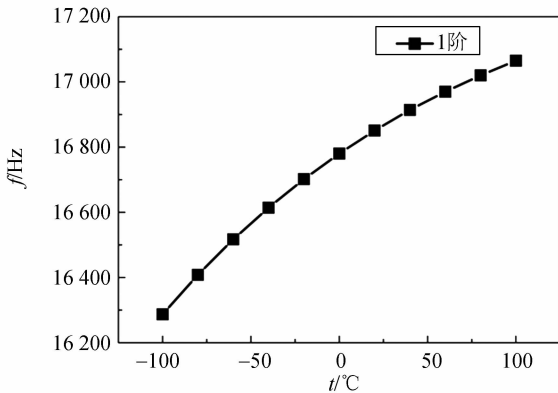
图 4 不同振型的温度-频率关系

Fig. 4 Temperature-frequency responses of some resonant models

表 1 不同尺寸悬臂梁的振型及其灵敏度 (Hz/°C)

Tab.1 Resonant models and sensitivities of different cantilevers

尺寸	1 阶	2 阶	4 阶	备注
$L=300 \mu\text{m}, w=20 \mu\text{m},$ $h_1=1.5 \mu\text{m}, h_2=0.3 \mu\text{m}$	3.9	21.4	53.1	
$L=200 \mu\text{m}, w=50 \mu\text{m},$ $h_1=1.5 \mu\text{m}, h_2=0.5 \mu\text{m}$	3.98	18.2	45.1	
$L=200 \mu\text{m}, w=80 \mu\text{m},$ $h_1=1.5 \mu\text{m}, h_2=0.5 \mu\text{m}$	5.25	19.5 ³	53.1 ⁵	^{3,5} 表示 3 阶 和 5 阶振型



4.2 相关实验

为了更详细地分析悬臂梁的弯曲谐振特性,采用多普勒振动测试系统(如图 5 所示)测试得到了微悬臂梁的振动频谱。图 6 给出了不同谐振模式下微悬臂梁根部附近位置的振幅相对于衬底振幅的放大因子,即品质因数 Q 。结果发现,悬臂梁弯曲振型中的高阶振型中的 2 阶振型具有最高的 Q 值——接近 150。由于实验测试是在空气环境中进行的,这说明在模态阻尼的作用下 2 阶弯曲振动模态表现出最好的 Q 值水平,这种振动模态最适合用于谐振频率的检测,即采用 2 阶弯曲振

动模态检测谐振频率可以得到较大的信号幅值。由于 Q 值是系统所存储的能量与阻尼所导致的每个周期耗散能量之比, Q 值高则系统的谐振与非谐振状态的区分更明显, 这还意味着为维持悬臂梁处于等幅谐振状态所需要的能量较小, 同时也说谐振结构与外界环境的隔离良好, 这也会提高传感器的抗干扰能力。通过图 6 还可以发现 3 阶弯曲振动模态的 Q 值比 1 阶弯曲振动的高。

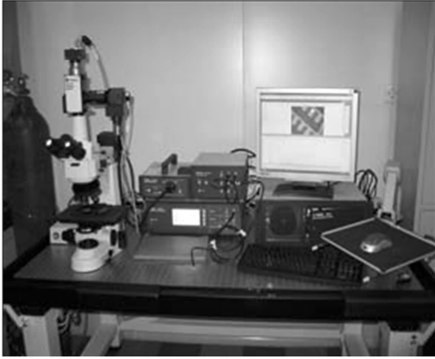


图 5 激光多普勒振动测试系统

Fig. 5 Laser Doppler vibrometer system

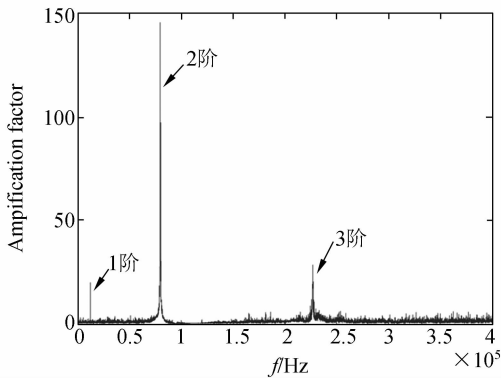


图 6 悬臂梁的弯曲振动频率特性

Fig. 6 Measured resonant characteristics of cantilever

由图 4 及表 1 可知, 高阶弯曲模态可具有高达 $53.1 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ 的灵敏度, 其线性度也明显比低阶振型好, 并且高阶振型还具有高的 Q 值, 采用压

电材料检测时相对于 1 阶振型易于获得性能较好的输出信号。其中的 2 阶弯曲振型的灵敏度可比 1 阶振型高 $3\sim 5$ 倍, 可达到 $20 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ 左右的水平, 分辨力可达 $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$, 并且其频率温度系数可达 $1.9 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$, 远高于常规悬臂梁谐振器的频率温度系数, 也优于常规的以二极管或三极管为敏感元件的 CMOS 温度传感器。

综上所述, 对所设计的微悬臂梁式温度传感器而言, 应利用高阶振型特别是 2 阶弯曲振型而不是常用的 1 阶弯曲振型进行温度的检测。使用 2 阶振型也会使基于 ZnO 构建(具有较低的压电系数)的谐振温度传感器的检测电路变得较为简单。

5 结 论

本文提出了一种基于硅基正面腐蚀加工的 CMOS 兼容的谐振式微温度传感器, 它以频率作为输出信号, 这使它成为一种准数字传感器。由于频率输出信号与幅值无关, 因此这种温度传感器具有抗干扰能力强、信号传输接口简单等优点。为使传感器具有足够高的灵敏度, 设计使用了 CMOS 工艺中热膨胀系数差值最大的 Al 和 SiO_2 构成的双层悬臂梁作为温度敏感元件。由于现有技术对频率信号的检测可达 1 Hz 的分辨率, 这使该微传感器可具有较高的分辨率。分析结果表明, 该传感器可具有较宽的工作温度范围及较低温度 ($< -50 \text{ }^\circ\text{C}$) 的测量能力。激光多普勒振动实验还指出, 对于压电检测的悬臂梁应优先选用 2 阶弯曲振型。2 阶弯曲振型较其它振动模态不但具有诸如较大的 Q 值(接近 150), 易于得到输出信号, 检测电路容易实现等优点还而且相对常用的 1 阶弯曲振动, 还具有较高的约为 $20 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ 的灵敏度以及 $1.9 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ 的频率温度系数, 这表明设计的谐振式微温度传感器可以满足气象温度检测的要求。

参考文献:

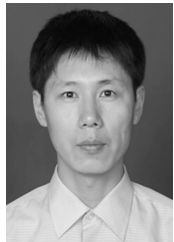
[1] BAKKER A, HUIJSING J H. CMOS smart temperature sensor: an overview [C]. *Proceeding of the First IEEE Sensors Conference, Orlando*, 2002:1423-1427.

[2] XU J, YOU B, LI X, *et al.*. Fully digital smart temperature sensor with quartz tuning fork resonator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 1453-1459.

[3] GREGORY T A K. *Micromachined transducers sourcebook* [M]. Boston: The McGraw-Hill, 1998.

- [4] MUTYALA M S K, BANDHANADHAM D, PAN L, *et al.*. Mechanical and electronic approaches to improve the sensitivity of microcantilever sensors [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2009, 25(1): 1-12.
- [5] FRITZ J. Cantilever biosensors [J]. *Analyst*, 2008, 133(7):855-863.
- [6] 梁晋涛,刘诗斌,刘君华,等. 碳纳米管压阻微悬臂梁红外热探测器[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4): 682-688.
LIANG J T, LIU S B, LIU J H, *et al.*. Micro-cantilever thermal infrared detector with carbon nanotubes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4):682-688. (in Chinese)
- [7] 袁江波,单小彪,谢涛,等. 悬臂梁单晶压电发电机的实验[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5):1072-1077.
YUAN J B, SHAN X B, XIE T, *et al.*. Experiment of monocrystal piezoelectric generator with cantilever beam structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5):1072-1077. (in Chinese)
- [8] 阚君武,唐可洪,王淑云,等. 压电悬臂梁发电装置的建模与仿真分析[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1):71-75.
KAN J W, TANG K H, WANG S Y, *et al.*. Modeling and simulation of piezoelectric cantilever generators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(1): 71-75. (in Chinese)
- [9] VOICULESCU I R, ZAGHLOU M E, MCGILL R A, *et al.*. Modelling and measurements of a composite microcantilever beam for chemical sensing applications [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2006, 220(10): 1601-1608.
- [10] PETERSEN K E. Dynamic micromechanics on silicon: Techniques and devices [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1978, 25(12):1241-1250.
- [11] BLEVINS R D. Formulas for natural frequency and mode shape [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 67(5): 1849-1849.
- [12] TIMOSHENKO S. Analysis of bi-metal thermostats [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1925, 11(3):233-255.

作者简介:



马洪宇(1972—),男,山东临沂人,博士研究生,讲师,1995年于东北大学获得学士学位,2001年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要研究方向为MEMS传感器设计及工艺研究。E-mail: maccaboy@seu.edu.cn



秦明(1967—),男,江苏扬州人,博士,教授,博士生导师,1994年、1997年于东南大学分别获得硕士、博士学位,现为东南大学MEMS教育部重点实验室副主任,主要从事硅微机械传感器设计及应用的研究。E-mail: mqin@seu.edu.cn