

文章编号 1004-924X(2015)07-1990-06

高真空环境下硅微机械陀螺品质因数的温度特性

姜劭栋, 苏 岩, 裘安萍, 施 芹*

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:分析了温度在高真空环境下对硅微机械陀螺品质因数的影响机理。阐述了热弹性阻尼的复频率模型和硅材料的温度特性,建立了品质因数温度特性理论模型,并对理论模型进行了仿真验证和实验验证。理论计算得到常温下品质因数的温度系数为 $-9.76 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。利用 ANSYS 对品质因数的温度系数进行仿真分析,得到常温下品质因数温度系数的仿真值为 $-9.96 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。对硅微机械陀螺进行品质因数温度实验,得到常温下品质因数的温度系数为 $-9.02 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$,与理论计算结果相差 8.20%。实验结果表明:高真空环境下建立陀螺品质因数温度特性的理论模型可为陀螺的温度误差补偿提供理论依据,为陀螺的优化设计提供实际指导。

关键词:硅微机械陀螺;品质因数;温度特性;热弹性阻尼;高真空

中图分类号:TH824.3;V241.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1990

Temperature characteristics of quality factor of silicon micromachined gyroscope under high-vacuum environment

JIANG Shao-dong, SU Yan, QIU An-ping, SHI Qin*

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: sqinhy@mail.njust.edu.cn

Abstract: The influence mechanism of temperature on the quality factor of a Silicon Micromachined Gyroscope (SMG) under a high-vacuum environment was analyzed. The complex frequency model of thermoelastic damping and the temperature characteristics of silicon were presented. Then, the theoretical model of temperature characteristic of quality factor was set up, and the the simulation analysis and experimental verification were performed. The temperature coefficient of quality factor is $-9.76 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ at a normal temperature with a theoretical calculation. The ANSYS was used to simulate the temperature coefficient of quality factor, and the simulation result is $-9.96 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$. The temperature experiment for quality factor was carried out, and the temperature coefficient of quality factor is $-9.02 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, which is different from the theoretical calculation by 8.20%. The analytical results demonstrate that the theoretical model of temperature characteristic of quality factor in the high-vacuum environment provides theoretical basis for temperature compensation of the SMG and gives a guidance for optimization design of the SMG.

收稿日期:2014-11-10;**修订日期:**2015-01-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA040402);武器装备预研基金资助项目(No. 9140A09011011BQ02);江苏省研究生科研创新计划资助项目(No. CXZZB-0197)

Key words: silicon micromachined gyroscope; quality factor; temperature characteristic; thermoelastic damping; high vacuum

1 序 言

硅微机械陀螺是一种利用哥氏效应敏感物体转动角速率的微机电系统(MEMS)惯性传感器。它能够在同一块硅片上同时集成机械敏感结构和外围测控电路,具有成本低、体积小、重量轻、功耗低等优点,在军事、民用领域具有广阔的应用前景^[1-4]。自20世纪90年代以来,硅微机械陀螺一直处于快速发展中,并成为各国研究热点之一。

硅微机械陀螺的输出信号与其品质因数成正比,因此,几乎所有的硅微机械陀螺均采用真空封装方式来提高品质因数。陀螺品质因数的提高可以减小阻尼力,降低驱动力幅值,从而减小驱动力和阻尼力对检测轴向的影响,最终减小同相耦合误差,提高陀螺性能。此外,品质因数的提高还可以使驱动轴和检测轴的相移稳定,有助于后续电路的信号提取与处理^[5]。

对于高真空封装的硅微机械陀螺,气体阻尼可以忽略,造成其能量损耗的原因有热弹性阻尼、锚点阻尼、表面吸附阻尼和电阻尼^[6-8]。已有的研究表明,热弹性阻尼处于主导地位,是影响陀螺品质因数进一步提高的主要因素。陀螺的品质因数会随环境温度的变化而变化,从而影响陀螺的标度因数,造成陀螺漂移。因此,研究温度对品质因数的影响机理,建立品质因数的温度特性模型可为陀螺的温度误差补偿提供理论依据。

国内外研究人员对低真空环境下陀螺品质因数的温度特性已经有了一些研究^[9-11]。在低真空环境下,品质因数主要由气体阻尼决定。温度对品质因数的作用机理与高真空环境下完全不同,而对高真空环境下品质因数温度特性的研究目前未见报道。本文建立了高真空环境下陀螺品质因数温度特性的理论模型,并对理论模型进行了仿真验证和实验验证。

2 品质因数的温度特性

热弹性阻尼与温度具有高度相关性,故高真空环境下品质因数的温度系数可近似表示为:

$$TCQ = \frac{dQ}{dT} \frac{1}{Q} \approx \frac{dQ_{TED}}{dT} \frac{1}{Q_{TED}}. \quad (1)$$

式中: Q_{TED} 表示由热弹性阻尼导致的品质因数。如图1所示,温度会通过三种途径对品质因数产生影响。所以品质因数的温度系数可写为:

$$TCQ = TCQ_{TED} + TCQ_E + TCQ_\alpha, \quad (2)$$

式中: TCQ_{TED} 表示由热弹性阻尼与温度的关系导致的品质因数温度系数, TCQ_E 表示由杨氏模量随温度变化导致的品质因数温度系数, TCQ_α 表示由热膨胀系数随温度变化导致的品质因数温度系数。

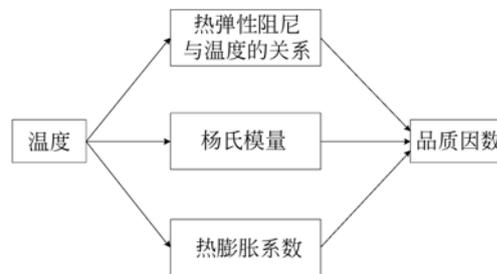


图1 品质因数温度特性示意图

Fig. 1 Scheme of temperature characteristics of quality factor

2.1 热弹性阻尼理论模型

国外研究人员已对热弹性阻尼进行了较为细致的研究,其中以 Lifshitz 和 Roukes 建立的复频率模型最具代表性^[12]。根据复频率模型,热弹性阻尼的理论公式为:

$$Q_{TED}^{-1} = \frac{6E\alpha^2 T_0}{C_v \xi^2} \left(1 - \frac{\sinh \xi + \sin \xi}{\xi (\cosh \xi + \cos \xi)} \right), \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量, α 为热膨胀系数, C_v 为定容比热容, T_0 为系统的初始温度。

$$\xi = \omega \sqrt{\frac{\omega_0 C_v}{2\kappa}}, \quad (4)$$

式中: κ 为热传导系数, ω 为陀螺驱动梁的宽度, ω_0 为陀螺的驱动频率。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{E\omega^3 h}{L^3 m}}, \quad (5)$$

式中: L 为驱动梁的长度, h 为结构的厚度, m 为驱动质量块的质量。

2.2 材料温度特性

硅具有理想的晶体结构以及与合金钢相媲美

的机械特性,因此成为微机械结构的理想材料。但是,作为半导体材料,硅对温度具有较高的敏感性。硅微机械陀螺的敏感结构采用[110]晶向的单晶硅加工而成。单晶硅[110]晶向的杨氏模量随温度的变化如图 2 所示^[13-14]。由图可知,常温下(20 °C)杨氏模量的温度系数 TCE 约为 $-50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

单晶硅的热膨胀系数与温度的关系为^[15]:

$$\alpha(T) = \{3.725\{1 - \exp[-5.88 \times 10^{-3}(T - 124)]\} + 5.548 \times 10^{-4} T\} \times 10^{-6}. \quad (6)$$

根据式(6)计算可得常温下单晶硅的热膨胀系数 α 约为 $2.60 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,热膨胀系数的温度系数 $TC\alpha$ 为 $3.20 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。

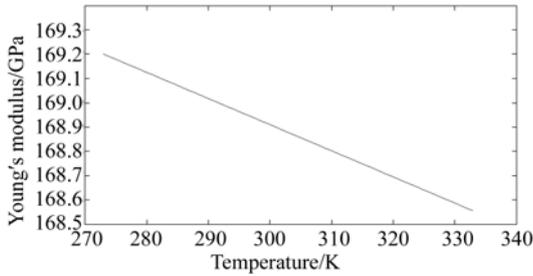


图 2 单晶硅[110]晶向的杨氏模量与温度关系

Fig. 2 Relationship between Young's modulus in [110] crystal direction of single crystal silicon and temperature

2.3 品质因数温度特性的理论分析

2.3.1 热弹性阻尼与温度的关系对品质因数温度系数的影响

由式(3)可得,常温下热弹性阻尼与温度的关系所导致的品质因数温度系数为:

$$TCQ_{TED} = \frac{\partial Q_{TED}}{\partial T} \frac{1}{Q_{TED}} \Big|_{T=T_{nom}} = -\frac{1}{T_{nom} + 273} = -3.41 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}. \quad (7)$$

2.3.2 杨氏模量对品质因数温度系数的影响

杨氏模量与温度间的关系可表示为:

$$E = E_{nom}(1 + TCE \cdot \Delta T), \quad (8)$$

式中: E_{nom} 为常温时的杨氏模量, ΔT 为相对常温的温度差。

联立式(3)和式(8),可得常温下杨氏模量所导致的品质因数温度系数为:

$$TCQ_E = \frac{\partial Q_{TED}}{\partial E} \frac{dE}{dT} \frac{1}{Q_{TED}} \Big|_{T=T_{nom}} + \frac{\partial Q_{TED}}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial \omega_0} \frac{\partial \omega_0}{\partial E} \frac{dE}{dT} \frac{1}{Q_{TED}} \Big|_{T=T_{nom}} = -TCE \Big|_{T=T_{nom}} + TCE \cdot E \cdot \frac{\partial Q_{TED}}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial \omega_0} \frac{\partial \omega_0}{\partial E} \frac{1}{Q_{TED}} \Big|_{T=T_{nom}}. \quad (9)$$

2.3.3 热膨胀系数对品质因数温度系数的影响

考虑热膨胀效应时,驱动梁的长、宽、厚可分别表示为:

$$L = L_{nom}(1 + \alpha\Delta T), \quad w = w_{nom}(1 + \alpha\Delta T), \\ h = h_{nom}(1 + \alpha\Delta T), \quad (10)$$

式中: L_{nom} , w_{nom} , h_{nom} 分别为常温时驱动梁的长、宽和厚。

联立式(3)和式(10),可得常温下热膨胀系数所导致的品质因数温度系数为:

$$TCQ_\alpha = \frac{\partial Q_{TED}}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dT} \frac{1}{Q_{TED}} \Big|_{T=T_{nom}} + \frac{\partial Q_{TED}}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial \omega_0} \left[\frac{\partial \omega_0}{\partial w} \frac{dw}{dT} + \frac{\partial \omega_0}{\partial h} \frac{dh}{dT} + \frac{\partial \omega_0}{\partial L} \frac{dL}{dT} \right] \frac{1}{Q_{TED}} \Big|_{T=T_{nom}}, \quad (11)$$

式中:

$$\frac{\partial Q_{TED}}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dT} \frac{1}{Q_{TED}} = -2TC\alpha, \quad \frac{dw}{dT} = \alpha w_{nom}, \\ \frac{dh}{dT} = \alpha h_{nom}, \quad \frac{dL}{dT} = \alpha L_{nom}.$$

3 仿真分析

常温下,单晶硅的材料特性参数如表 1 所示。利用有限元仿真软件 ANSYS 对陀螺进行热弹性谐响应分析,得到陀螺驱动模态的热流量图如图 3 所示。

表 1 单晶硅材料特性参数

Tab. 1 Material parameters of single crystal silicon

名称	符号	数值	单位
杨氏模量	E	1.69×10^{11}	N/m^2
热膨胀系数	α	2.60×10^{-6}	$1/\text{K}$
密度	ρ	2.33×10^3	kg/m^3
泊松比	ν	0.27	—
定容比热容	C_v	1.66×10^6	$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{m}^3)$
热传导系数	κ	156	$\text{J}/(\text{K} \cdot \text{ms})$

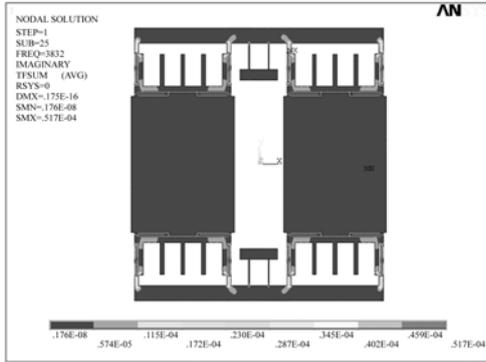


图 3 陀螺驱动模态热流量图

Fig. 3 Heat flow diagram of drive mode of gyroscope

利用 ETAB 命令读取敏感结构每个单元的应变能和所产生的热能, 利用 SSUM 命令将所有单元的应变能和所产生的热能求和。总应变能与总热能之比即为热弹性作用下的品质因数。

只考虑热弹性阻尼与温度的关系, 仿真结果如图 4 所示。对仿真结果进行拟合, 得到常温下 TCQ_{TED} 的仿真值为 $-3.52 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ 。

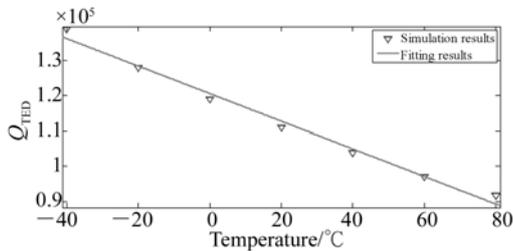


图 4 TCQ_{TED} 仿真结果

Fig. 4 Simulation results of TCQ_{TED}

根据图 2 可得不同温度下硅的杨氏模量, 当只考虑杨氏模量随温度变化对品质因数的影响时, 仿真结果如图 5 所示。根据拟合结果得到常

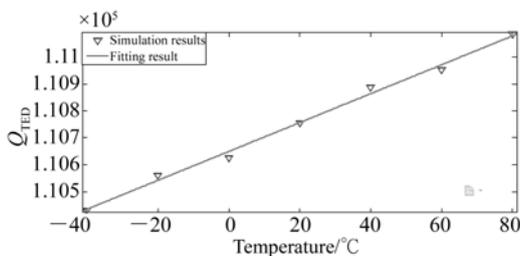


图 5 TCQ_E 仿真结果

Fig. 5 Simulation results of TCQ_E

温下 TCQ_E 的仿真值为 $4.86 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。根据式 (6) 可得不同温度下硅的热膨胀系数, 当只考虑热膨胀系数随温度变化对品质因数的影响时, 仿真结果如图 6 所示。根据拟合结果得到常温下 TCQ_a 的仿真值为 $-6.49 \times 10^{-3} / ^\circ\text{C}$ 。

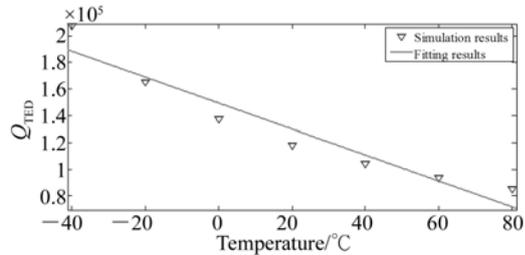


图 6 TCQ_a 仿真结果

Fig. 6 Simulation results of TCQ_a

品质因数温度系数的理论计算结果与仿真结果的对比如表 2 所示。所有理论值与仿真值的误差均小于 5%, 仿真验证了品质因数温度模型的正确性。

表 2 品质因数温度系数的理论值与仿真值

Tab. 2 Theoretical and simulation values of temperature characteristics of quality factor

温度系数	理论值	仿真值	误差 / %
TCQ_{TED}	-3.41×10^{-3}	-3.52×10^{-3}	3.13
TCQ_E	5.00×10^{-5}	4.86×10^{-5}	2.88
TCQ_a	-6.40×10^{-3}	-6.49×10^{-3}	1.39
TCQ	-9.76×10^{-3}	-9.96×10^{-3}	2.01

4 品质因数温度实验

本实验室研制的硅微机械陀螺敏感结构采用圆片级真空封装。首先利用金硅共晶键合工艺在真空环境中键合单晶硅盖板, 完成封装; 然后利用吸气剂实现圆片封装的长期真空气密性。图 7 所示为圆片级真空封装后的硅微机械陀螺敏感结构。将真空封装后的敏感结构置于 LCC (Leadless Chip Carriers) 陶瓷管壳中封装, 以便于测试陀螺敏感结构。

采用 Ring-down 法测量陀螺的品质因数。陀螺在静电力作用下稳定振动, 突然断开驱动电压, 陀螺会由受迫振动变为自由振动, 在阻尼的作

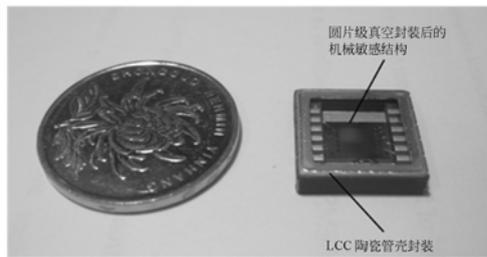


图 7 圆片级真空封装后的硅微机械陀螺敏感结构
Fig. 7 Sensitive structure of silicon micromechanical gyroscope with wafer level vacuum package

用下驱动振幅开始衰减。使用高速数据采集卡记录驱动振幅的衰减电压信号,如图 8 所示。采用指数方程拟合振幅衰减信号,得到衰减时间常数,进而得到陀螺的品质因数。

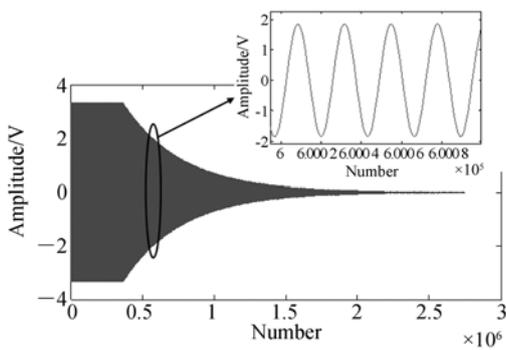


图 8 品质因数测试数据
Fig. 8 Test data of quality factor

将恒温温箱调节到 $-40, -20, 0, 20, 40, 60, 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并在每个温度点都保温 1 h, 待硅微机械陀螺与温箱内环境达到热平衡后再开始实验。每个温度点的实验结果如图 9 所示。拟合实验结果可以得到常温下的品质因数温度系数为 $-9.02 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$,

理论计算值与实验值相差 8.20%, 实验验证了品质因数温度模型的正确性。

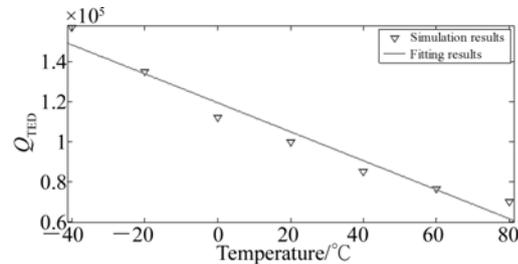


图 9 品质因数温度实验结果
Fig. 9 Experimental results of quality factor to temperature

5 结 论

本文分析了温度对高真空环境下硅微机械陀螺品质因数的影响机理, 阐述了热弹性阻尼的复频率模型和硅材料的温度特性。建立了品质因数温度特性理论模型, 计算得到常温下品质因数的温度系数为 $-9.76 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。利用 ANSYS 对品质因数的温度系数进行仿真分析, 得到常温下品质因数温度系数的仿真值为 $-9.96 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, 理论计算结果与仿真结果相差 2.01%。最后对硅微机械陀螺进行品质因数温度实验, 得到常温下品质因数的温度系数为 $-9.02 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, 理论计算结果与实验结果相差 8.20%, 由此证明了理论模型的正确性。

高真空环境下陀螺品质因数温度特性理论模型的建立, 不仅为陀螺的温度误差补偿提供了理论依据, 还为陀螺的优化设计提供了实际指导, 对提高陀螺的性能具有重大意义。

参考文献:

- [1] 施芹, 苏岩, 袁安萍, 等. MEMS 陀螺仪器件级真空封装技术[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1987-1992.
SHI Q, SU Y, QIU A P, *et al.*. Device level vacuum packaging technologies of MEMS gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1987-1992. (in Chinese)
- [2] 姜劲栋, 袁安萍, 施芹, 等. 硅微陀螺仪正交耦合系数的计算及验证[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 87-93.
JIANG SH D, QIU A P, SHI Q, *et al.*. Calculation and verification of quadrature coupling coefficient of silicon microgyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 87-93. (in Chinese)
- [3] 施芹, 袁安萍, 苏岩, 等. 硅微陀螺仪的机械耦合误差分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 893-898.

- SHI Q, QIU A P, SU Y, *et al.*. Mechanical coupling error of silicon microgyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (5): 893-898. (in Chinese)
- [4] 杨亮,苏岩,袁安萍,等. 高品质因数微机械陀螺的温度自补偿[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2870-2876.
- YANG L, SU Y, QIU A P, *et al.*. Self-temperature compensation for high quality factor micro-machined gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2870-2876. (in Chinese)
- [5] 贾方秀,袁安萍,施芹,等. 硅微振动陀螺仪设计与性能测试[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1273-1281.
- JIA F X, QIU A P, SHI Q. *et al.*. Design and experiment of micro machined vibratory gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1273-1281. (in Chinese)
- [6] DUWEL A, WEINSTEIN M, GORMAN J, *et al.*. Quality factors of MEMS gyros and the role of thermoelastic damping [C]. *Micro Electro Mechanical Systems, 2002 the Fifteenth IEEE International Conference on IEEE*, 2002: 214-219.
- [7] DUWEL A, GORMAN J, WEINSTEIN M, *et al.*. Experimental study of thermoelastic damping in MEMS gyros [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 103(1): 70-75.
- [8] XU Y, WANG R, DURGAM S K, *et al.*. Numerical models and experimental investigation of energy loss mechanisms in SOI-based tuning-fork gyroscopes [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 152(1): 63-74.
- [9] 夏敦柱,王寿荣,周百令. 硅微陀螺仪零偏温度性能补控方法设计[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(2): 290-294.
- XIA D ZH, WANG SH R, ZHOU B L. ZRO temperature dependency compensating-control design of micro-gyro [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2012, 42(2): 290-294. (in Chinese)
- [10] 陈淑铃,杨波,王寿荣. Z轴硅微机械陀螺仪温度特性研究 [J]. *电子器件*, 2008, 31(6): 1753-1756.
- YANG SH L, YANG B, WANG SH R. Research on thermal characteristic of Z-input silicon micromachined gyroscope [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2008, 31(6): 1753-1756. (in Chinese)
- [11] SHCHEGLOV K, EVAVS C, GUTIERREZ R. Temperature dependent characteristics of the JPL silicon MEMS gyroscope with inside frame driving [C]. *IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA*, 2000: 403-411.
- [12] LIFSHITZ R, ROUKES M L. Thermoelastic damping in micro-and nanomechanical systems [J]. *Physical Review B*, 2000, 61(8): 5600-5609.
- [13] JEONG J, CHUNG S, LEE S, *et al.*. Evaluation of elastic properties and temperature effects in Si thin films using an electrostatic microresonator [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(4): 524-530.
- [14] HOPCROFT M A, NIX W D, KENNY T W. What is the Young's modulus of silicon [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2010, 19(2): 229-238.
- [15] OKADA Y, TOKUMARU Y. Precise determination of lattice parameter and thermal expansion coefficient of silicon between 300 and 1500 K [J]. *Journal of Applied Physics*, 1984, 56(2):314-320.

作者简介:



姜劭栋(1986—),男,山东淄博人,博士研究生,2009年于南京理工大学获得学士学位,主要从事 MEMS 惯性传感技术的研究。E-mail: shdjiang_njust@163.com

通讯作者:



施芹(1977—),女,江苏东台人,副教授,2003年、2006年于东南大学分别获得硕士、博士学位,主要从事 MEMS 惯性技术的研究。E-mail: sqinhy@mail.njust.edu.cn