

文章编号 1004-924X(2009)08-1987-06

MEMS 陀螺仪器件级真空封装技术

施 芹, 苏 岩, 裘安萍, 朱欣华

(南京理工大学 MEMS 惯性技术研究中心, 江苏 南京 210094)

摘要: 为进一步提高 MEMS 陀螺仪的品质因数及其稳定性, 研究了 MEMS 陀螺仪器件级真空封装的高真空获取技术和真空保持技术。以 Z 轴 MEMS 陀螺仪动力学方程为基础, 分析了 MEMS 陀螺仪的误差信号与品质因数之间的关系, 并采用稀薄气体动力学分析具有高品质因数陀螺仪的空气阻尼。对早期真空封装陀螺仪品质因数的变化曲线进行了分析, 得出了腔体内残余气体是品质因数下降的主要原因。采用程序升温脱附质谱分析法 (TPD-MS) 分析陶瓷管壳和金属盖板的放气特性, 并选用了合适的吸气剂。最后, 改进了器件级真空封装流程。测试结果表明, 采用改进的器件级真空封装的陀螺仪品质因数最高可达 162 660, 约为早期真空封装陀螺仪品质因数的 14 倍, 且在一年内的变化 $< 0.05\%$ 。

关键词: MEMS 陀螺仪; 真空封装; 真空保持度; 吸气剂

中图分类号: TH824.3 **文献标识码:** A

Device level vacuum packaging technologies of MEMS gyroscopes

SHI Qin, SU Yan, QIU An-ping, ZHU Xin-hua

(*Department of Research Center of MEMS Inertial technology,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China*)

Abstract: The high vacuum acquisition and vacuum maintenance of device-level vacuum packaging for MEMS gyroscopes are studied to increase their quality factors and stability. The relationship between error signals and quality factors is analyzed based on the dynamics equations of Z-axis MEMS gyroscopes and the air damping of gyroscopes with high quality factors is analyzed using rarefied gas dynamics theory. The changes of quality factor of an early vacuum packaged gyroscope are analyzed, and the result shows that residual gasses in vacuum cavity result in the decreasing of vacuum level. A temperature programmed desorption-mass spectrometry (TPD-MS) is used to measure the contents of the evolution gases for the ceramic packages and the lids. According to the contents of trapped gases, the reasonable getter is chosen to absorb the gases and to keep the vacuum level of the cavity. Finally, the device-level vacuum packaging process is improved. The test results show that the quality factor of the gyroscope packaged with a new device-level vacuum packaging process is about 162 660, which is about 14 times those of previous vacuum packaged MEMS gyroscopes, and the change of quality factor is less than 0.05% within one year.

Key words: MEMS gyroscope; vacuum packaging; vacuum maintenance; getter

收稿日期: 2008-12-08; **修订日期:** 2009-03-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10572039, No. 10772086); 江苏省青蓝工程支持计划项目; 南京理工大学科研基金资助项目 (No. XKF09004)

1 引言

MEMS 陀螺仪具有体积小、成本低等特点,在军事、民用领域有着广泛的应用前景^[1]。目前,由于 MEMS 陀螺仪性能偏低,制约了其应用范围。当 MEMS 陀螺仪工作于低压环境时,可以获得较高的性能^[2-3]。因此,真空封装技术不仅是提高 MEMS 陀螺仪性能的关键技术之一,还决定了 MEMS 陀螺仪的可靠性、长期稳定性及其成本^[4]。真空封装技术是实现 MEMS 陀螺仪产业化的关键技术之一。

MEMS 陀螺仪的分子可分为圆片级封装和器件级封装。圆片级真空封装的全部工艺流程都可以在超净间里完成,这大大提高了 MEMS 器件的成品率,成功的圆片级封装将大大降低后续器件级封装的难度,圆片级封装是 MEMS 封装的发展趋势。目前,国外关于 MEMS 真空封装的研究主要集中在圆片级真空封装。由于国内缺乏圆片级真空封装的基础,包括加工条件、加工工艺和圆片级真空封装技术的认识深度,因此,国内实现 MEMS 器件的圆片级真空封装仍需较长时日。本课题组根据国内封装工艺水平,采用器件级真空封装技术实现 MEMS 陀螺仪的真空封装。

MEMS 陀螺仪的器件级真空封装的难点是如何降低封装应力、提高真空度以及高真空保持度。选用合理的封装材料可以降低封装应力及其对器件性能的影响^[5-6],本文将在业已实现的器件级真空封装基础上研究如何提高真空度以及真空保持度。首先通过 Z 轴 MEMS 陀螺仪误差信号的分析,研究真空封装对陀螺仪的影响。采用稀薄气体动力学分析高品质因数情况下的陀螺仪空气阻尼。然后,分析早期器件级真空封装的陀螺仪品质因数跟踪测试曲线,进行了品质因数下降原因的分析,并提出解决方法。最终,给出采用改进的器件级真空封装流程的陀螺仪品质因数及其跟踪测试曲线。

2 MEMS 陀螺仪的阻尼分析

2.1 误差信号分析

本课题组研制的 MEMS 陀螺仪结构如图 1 所示,由可动激励梳齿、固定激励梳齿、可动检测

梳齿、固定检测梳齿、支承梁以及基座等组成,可动部分结构又通过基座固定在玻璃衬底上。固定激励梳齿和固定检测梳齿也固定在玻璃衬底上。该 MEMS 陀螺仪检测 Z 轴输入的角速率, X 轴、Y 轴分别为驱动轴和敏感轴。

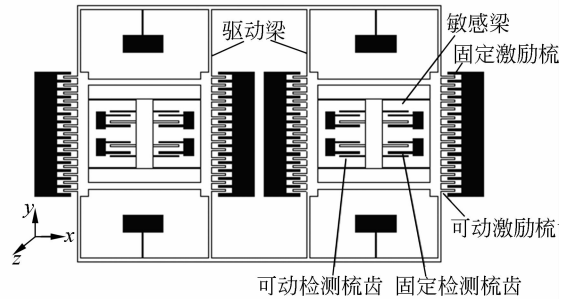


图 1 MEMS 陀螺仪结构示意图照片

Fig. 1 Sketch of MEMS gyroscope

MEMS 陀螺仪采用硅微机械加工工艺制备,虽然绝对加工精度高,但相对加工精度低。加工误差的存在引起 MEMS 陀螺仪驱动力、支撑梁的弹性力以及阻尼力耦合到检测轴上产生机械耦合误差^[7-8],此时该 MEMS 陀螺仪的动力学方程为

$$(m_x s^2 + b_x s + k_x)x + [(b_{xy} - 2m_y \Omega_1)s + k_{xy}]y = F_d, \quad (1)$$

$$[(b_{xy} + 2m_y \Omega_1)s + k_{xy}]x + (m_y s^2 + b_y s + k_y)y = \alpha F_d, \quad (2)$$

式中, m 为振动质量, x 轴为驱动轴, y 为检测轴, b 为阻尼系数, k 为机械刚度, k_{xy} 为正交耦合刚度, b_{xy} 为同向阻尼耦合到检测轴上, F_d 为驱动力, Ω_1 为输入角速率, α 为驱动力耦合到检测轴上系数。

驱动力为 $F_d = F_{d0} \sin(\omega_d t)$, 且驱动回路处于谐振状态, 忽略式(1)左边第二项, 则驱动位移和检测位移分别为

$$x = \frac{F_{d0} Q_s}{k_x} \sin\left(\omega_d t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

$$y(t) = \frac{2m_y \Omega_1 x_0 \omega_d \sin(\omega_d t + \theta) - F_s(t)}{m_y \sqrt{(\omega_y^2 - \omega_d^2)^2 + \left(\frac{\omega_y \omega_d}{Q_y}\right)^2}}, \quad (4)$$

式中, $F_s(t) = (b_{xy} - ab_x)x_0 \omega_d \sin(\omega_d t + \theta) + k_{xy} \cdot x_0 \cos(\omega_d t + \theta)$, ω_d 为驱动电压频率, $\omega_x = \sqrt{k_x/m_x}$ 、 $\omega_y = \sqrt{k_y/m_y}$ 分别为 MEMS 陀螺仪驱动模式和敏感模式的固有频率, $\theta = -\arctan(\omega_d \omega_y / (Q_y(\omega_y^2 -$

$\omega_d^2))$, $Q=m\omega/b$ 为 MEMS 陀螺仪品质因数。

由式(4)可知,弹性力 $k_{xy}x$ 所产生的机械耦合误差与提取的角速率信号同频,但相差 90° ,耦合驱动力 αF_d 和耦合阻尼力 $b_{xy}x_s$ 产生的机械耦合误差与提取的角速率信号同频同相。同频同相耦合信号无法通过电路技术消除,该信号的等效角速率为

$$\Omega_{\text{Eq}}=(b_{xy}-ab_x)/2m_y. \quad (5)$$

假设该等效角速率 $<10^\circ/\text{H}$,陀螺仪驱动模式的固有频率为 3 000 Hz,则 MEMS 陀螺仪驱动模式品质因数应 $>1.36 \times 10^5$ 。

可见,MEMS 陀螺仪需要高品质因数即真空封装,以降低耦合到检测轴上的驱动力和阻尼力。

2.2 MEMS 陀螺仪空气阻尼分析^[9]

MEMS 陀螺仪在空气环境下的品质因数约为 150~200,当真空封装陀螺仪的品质因数达十万以上时,真空封装陀螺仪的腔体内气压很低。当腔体内气压较低时,气体分子间的碰撞大大减小,甚至于不可能,而气体阻尼的产生是由气体分子与振动结构的碰撞而产生的,此时克努森数大于 10($K_n > 10$),气体属于自由分子流区。自由分子流区的气体分子的速度分布函数是平衡态的分布,即麦克斯韦分布

$$f_0=n\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2}\exp\left[-\frac{m}{2\pi kT}(u'^2+v'^2+w'^2)\right], \quad (6)$$

式中, n 是气体分子数密度, $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K,为玻耳兹曼常数, M 为气体分子质量, T 为绝对温度, u' 、 v' 、 w' 是分子速度 \bar{V} 在 x 、 y 、 z 轴上的三个分量。

假设活动结构以 \bar{U} 的速度运动通过静止气体,且 \bar{U} 与结构表面法向量垂直,气体分子与结构表面碰撞时,分子发生漫反射和镜面反射。设在结构表面分子有 σ 部分漫反射,而 $(1-\sigma)$ 部分作镜面反射,作用在微结构上的剪应力为

$$\tau=\frac{\sigma}{2-\sigma}\rho U\sqrt{\frac{R_g T}{2\pi}}, \quad (7)$$

式中, R_g 为气体常数, $\rho=mn$ 为气体质量密度。

同理,阻尼系数为

$$b_M=\frac{\sigma}{2-\sigma}\rho A\sqrt{\frac{R_g T}{2\pi}}. \quad (8)$$

式(8)表明,气体属于自由分子流区时,作用在微结构上的气体阻尼系数与气体分子密度成正

比。而温度不变时,气体密度与压强成正比,则腔体内压强可表示为

$$P_a=P_0\frac{m\omega_x}{Q_x}\frac{2-\sigma}{\sigma}\frac{\sqrt{2\pi}}{\rho_0 A\sqrt{R_g T}}, \quad (9)$$

式中, ρ_0 、 P_0 分别为标准大气压时的空气密度和压强, P_a 为真空封装时封装管壳内的气体压强。

对于采用体硅工艺加工的硅微器件, $\sigma=0.8$,当品质因数为 1.4×10^5 时,腔体内的压强约为 12 Pa。

可见,当 MEMS 陀螺仪的品质因数超过十万时,腔体内的气压很小,约为几十帕。腔体内有微量气体分子的变化都会引起气压的较大变化,从而改变陀螺仪的品质因数。

3 真空度及其保持度解决方案

本课题组采用钎焊技术实现 MEMS 陀螺仪的真空封装,采用 LCC(Leadless Chip Carrier)表面贴装形式的陶瓷管壳,焊料为共晶金锡(Au/St)合金,盖板为镀金的合金,器件级真空封装的 MEMS 陀螺仪表头如图 2 所示。为提高 MEMS 陀螺仪的真空保持度,对前期真空封装好的陀螺仪品质因数进行了跟踪测试,历时一年,如图 3 所示。由图中曲线可知,MEMS 陀螺仪真空封装后的品质因数为 11 887,存储 1 个月后其品质因数为 10 919,下降了 8.14%,存储一年后,品质因数只为最初的 60.4%。

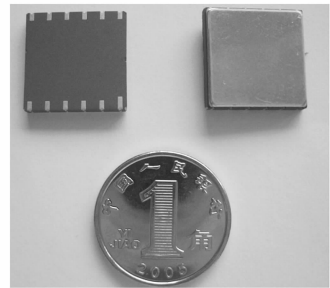


图 2 陶瓷封装的 MEMS 陀螺仪

Fig. 2 MEMS gyroscope packaged with ceramic

腔体内的气体分子数变化的主要原因是:(1)吸附在腔体表面和陀螺仪芯片表面的气体缓慢释放;(2)封接处有缺陷,产生漏气;(3)外界气体通过封装壳体或盖板向腔体内渗透^[10]。

当封接处有缺陷时,则真空封装失败。本课题

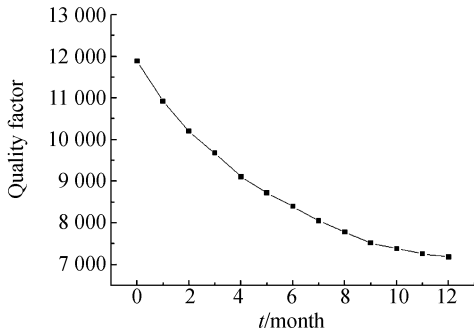


图 3 早期真空封装陀螺仪品质因数

Fig. 3 Quality factor of early vacuum packaged gyroscope

课题组采用了陶瓷封装管壳和金属盖板,渗透率 $< 10^{-17} \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{Pa})$,从壳体外渗透到腔体内的气体则大大小于其它两种方式产生的气体。从品质因数跟踪测试曲线可以看出,在封装后的三四个月内,品质因数变化很大,而此后品质因数下降趋于缓慢。因此,可以看出初期引起品质因数变化的主要原因是吸附在腔体表面和陀螺仪芯片表面气体的释放,随着时间的推移,气体释放逐渐缓慢。所以,提高真空保持度的关键是减小吸附在腔体表面和陀螺仪芯片表面的气体。

3.1 除气工艺

前期工作中,针对 MEMS 陀螺仪品质因数不高这一关键问题,研究了陀螺仪芯片的放气特性,采用了合理的真空烘烤工艺,使得陀螺仪的品质因数有所提高。然而,封装材料,如管壳和盖板的表面都粘附一定的气体,且材料内部都含有气体,对真空度以及真空保持度都有很大的影响。为此,针对封装管壳和盖板进行了放气特性研究。

采用程序升温脱附质谱分析法 (TPD-MS) 测试陶瓷管壳和金属盖板所含气体特性。将 10 只陶瓷管壳和金属盖板放置在真空炉内采用质谱仪测试气体,并调节真空炉内的温度。根据质谱仪的测试结果可知,材料所含的气体主要有 H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 。将测试结果绘制成温度与气体含量的关系曲线,如图 4 所示。图 4 中的曲线表明,陶瓷管壳和金属盖板中 H_2 、 H_2O 和 CO 的含量相同,且高于 CO_2 。当烘烤温度高于 250°C 时, CO_2 的含量明显增大,而温度高于 330°C 时,变化缓慢,且当温度高于 430°C 时, CO_2 含量逐渐减小,这是由于温度过高时, CO_2 会分解。当烘烤温度高于 280°C 时, H_2 、 H_2O 、 CO 含量明显增

大,且当温度达到 450°C 左右时, H_2O 、 CO 气体含量最大,而温度达到 490°C 左右时, H_2 气体含量最大,温度继续升高时,这三种气体质量无明显变化。因此,陶瓷管壳和金属盖板的烘烤温度可设定在 430°C 左右。

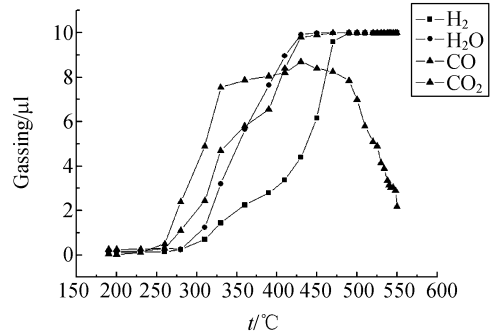


图 4 管壳和盖板的放气特性

Fig. 4 Gassing of packages and lids

MEMS 陀螺仪在经历高温时,会产生热应力,因此在进行贴片之前,可以将陶瓷管壳和金属盖板进行烘烤,温度设定为 430°C ,时间为 2 h。

3.2 吸气剂

吸气剂是用来获得、维持真空以及纯化气体等,能有效地吸着某些(种)气体分子的制剂或装置的通称,它可以通过控制压力或杂质纯度水平来维持合适的器件运行环境(真空环境或惰性气体环境),从而能增强最终器件的可靠性并延长其寿命。目前,国外已有将吸气剂应用于 MEMS 陀螺仪的成功范例^[11-12]。

根据前面封装材料以及陀螺仪芯片放气特性的研究可知, H_2 、 H_2O 、 CO 、 CO_2 的含量较多,其中 H_2O 最多。根据气体类型,选用了三种类型的吸气剂,进行测试。将三种吸气剂分别固定在盖板上,根据各自的激活条件,激活吸气剂,其余条件一致。带有吸气剂的 MEMS 陀螺仪品质因数测试结果如表 1 所示。表 1 中数据表明,2 型吸

表 1 带有吸气剂的 MEMS 陀螺仪品质因数

Tab. 1 Quality factors of gyroscopes with getters

	吸气剂 1	吸气剂 2	吸气剂 3
1	35 278	144 820	65 849
2	31 785	157 051	67 587
3	41 480	149 287	59 743
4	37 928	148 970	61 732
5	38 957	151 074	54 670

气剂的吸气能力最强,且能满足陀螺仪要求,固采用 2 型吸气剂。

4 真空封装工艺流程和测试结果

为了提高 MEMS 陀螺仪的真空度及其真空保持度,真空封装采用吸气剂,并对前期的真空封装工艺进行了改进。器件级真空封装的 MEMS 陀螺仪的横截面图如图 5 所示,改进后的器件级真空封装工艺流程如图 6 所示。

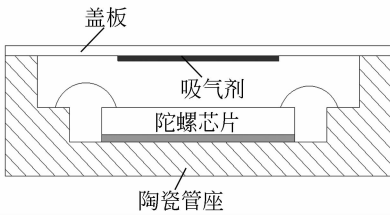


图 5 真空封装 MEMS 陀螺仪的剖面图

Fig. 5 Cross section of vacuum packaged MEMS gyroscope

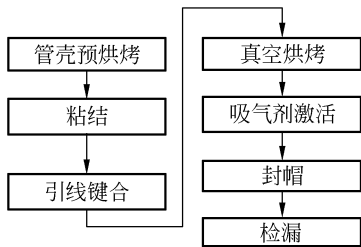


图 6 器件级真空封装流程图

Fig. 6 Device level vacuum packaging process

MEMS 陀螺仪的器件级真空封装共分为六道工艺,其中,管壳预烘烤时,将陶瓷管壳放入真空炉中,炉中气压为 1×10^{-4} Pa,温度为 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持温度不变,烘烤 2 h 以上。第二次真空烘烤时,将待封装 MEMS 陀螺仪和盖板放入真空炉中,炉中气压为 1×10^{-4} Pa,温度调节至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持温度不变,烘烤 15 h。根据吸气剂激活条件,设定激活温度和时间激活吸气剂。最后,温度升至 $410\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 3 min,进行封帽,然后降至室温。最后进行检漏。

图 7 为某一 MEMS 陀螺仪采用改进的器件级真空工艺封装的幅频响应曲线,其品质因数为 162 660。图 7 为该陀螺仪的品质因数跟踪测试曲线,历时一年,在此期间品质因数变化非常小,

最大变化量小于 0.05%。图 7 和图 8 表明,采用吸气剂后,品质因数大大提高,且真空保持度得到有效提高。

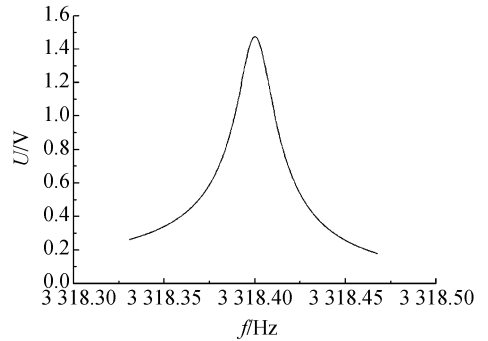


图 7 陀螺仪幅频响应曲线

Fig. 7 Frequency responded curve of gyroscope

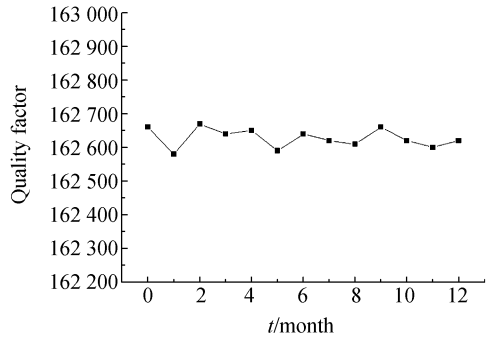


图 8 新工艺封装的陀螺仪品质因数

Fig. 8 Quality factor of gyroscope packaged with new process

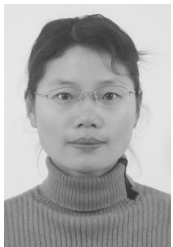
5 结 论

本文首先对 Z 轴 MEMS 陀螺仪进行了误差分析,真空封装可以降低耦合到检测轴上的驱动力和阻尼力,从而提高陀螺仪性能。采用稀薄气体动力学分析了器件级真空封装陀螺仪的气体特性,当陀螺仪品质因数超十万时,分子属于自由分子流区,陀螺仪腔体内气体压强约为十几帕斯卡。研究了陶瓷封装管壳和金属盖板的放气特性,对原有的器件级真空封装流程进行了改进,并选用了合理的吸气剂。实验结果表明,采用该器件级真空封装工艺封装的 MEMS 陀螺仪的品质因数可达 162 660,约为早期真空封装陀螺仪品质因数的 14 倍,且品质因数在一年内的最大变化量 $< 0.05\%$ 。

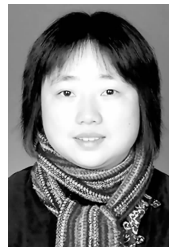
参考文献:

- [1] 刘危,解旭辉,李圣怡. 微机械惯性传感器的技术现状及展望[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 425-431. LIU W, XIE X H, LI SH Y. Present state and perspectives of micromachined inertial sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 425-431. (in Chinese)
- [2] THOMAS F M, JOSEPH W S. Vacuum packaging of MEMS inertial sensors[C]. *International Microelectronics and Packaging Society Conf.*, 2003: 386-391.
- [3] ROLAND G, THOMAS S. Low-cost wafer level vacuum packaging for MEMS[J]. *Materials Research Society Bulletin*, 2003, 28: 55-59.
- [4] CHOA S H. Reliability of vacuum packaged MEMS gyroscopes[J]. *Microelectronics Reliability*, 2005, 45: 361-369.
- [5] SHI Q, QIU A P, SU Y, *et al.*. Effects of adhesive on silicon microgyroscopes[C]. *Pro. of the 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 2007: 92-95.
- [6] 车录锋, 卢云, 徐志农. 铰链式高冲击微加速度传感器封装的有限元模拟[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 199-205. CHE L F, LU Y, XU ZH N. Finite element simulation on packaging of hinged high-g micromachined accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 199-205. (in Chinese)
- [7] MARC S W, ANTHONY K. Error sources in in-plane silicon tuning-fork MEMS gyroscopes [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(3): 479-491.
- [8] 施芹, 裘安萍, 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): 894-898. SHI Q, QIU A P, SU Y, *et al.*. Mechanical coupling error of silicon microgyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 894-898. (in Chinese)
- [9] 沈青. 稀薄气体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. SHEN Q. *Rarefield Gas Dynamics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [10] CHOA S H. Reliability of MEMS packaging: vacuum maintenance and packaging induced stress[J]. *Microsystem Technology*, 2005, 11: 1187-1196.
- [11] THOMAS F M, JOSEPH W S, JAMES G, *et al.*. Wafer level vacuum packaging of MEMS sensors[C]. *Electronic Component and Technology Conference*, 2005: 1081-1088.
- [12] MARCO M, MARCO A. Advanced getter solutions at wafer level to assure high reliability to the last generations MEMS[C]. *41st Annual International Reliability Physics Symposium*, 2003: 458-459.

作者简介:



施芹(1977—),女,江苏东台人,博士,讲师,分别于2003年、2006年在东南大学获得硕士、博士学位,主要从事MEMS惯性技术研究。E-mail: sqinhy@mail.njust.edu.cn



裘安萍(1971—),女,浙江宁波人,博士,教授,分别于1998年、2001年在东南大学获得硕士、博士学位,主要从事MEMS惯性技术研究。E-mail: apqiu@mail.njust.edu.cn



苏岩(1967—),男,江苏苏州人,博士,教授,博士生导师,分别于1996年、2001年在东南大学获得硕士、博士学位,主要从事MEMS惯性技术研究。E-mail: suyan@mail.njust.edu.cn



朱欣华(1964—),男,江苏苏州人,博士,教授,分别于1988年、2005年在东南大学获得硕士、博士学位,主要从事导航制导与控制技术研究。E-mail: zhuxinhua@mail.njust.edu.cn