

摘要: 随着 MEMS 技术的快速发展, 惯性器件微陀螺得到了广泛的发展和应用。MEMS 陀螺具有体积小、重量轻、成本低和可批量生产等独特优点, 在军事领域有着广阔的发展和应用前景, 受到了各军事强国的青睐。本文对 MEMS 陀螺的军事需求进行了初步介绍, 重点针对国内外典型 MEMS 陀螺器件的结构形式、基本原理、优缺点、关键性能指标进行了梳理和分析, 并对它们的应用前景进行了展望。随着微机电技术的发展和新型材料的应用, MEMS 陀螺的种类将进一步多样化, MEMS 陀螺将在惯性导航和自动控制等方面发挥越来越重要的作用。

关键词: MEMS; 陀螺; 惯性器件; 综述

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1006-883X(2016)04-0019-05

收稿日期: 2016-02-23

DOI:10.16204/j.cnki.sw.2016.04.003

MEMS 陀螺技术国内外发展现状简述

陈尚 张世军 穆星科 陈永强

中国运载火箭技术研究院研究发展中心, 北京 100076

一、前言

微机电系统 (Micro Electromechanical System, MEMS) 发展于 20 世纪 90 年代, 是在微电子制造技术发展的基础上随着精密微型机械制造技术的发展而成长起来的, 尺寸从微米到毫米级, 集微型传感器、微型执行器、微型传动结构、处理电路及接口于一体, 具有可批量生产、微型化、集成化及多学科交叉等特点。

以 MEMS 技术为基础的微陀螺是一种重要的微惯性器件。它以体积小、价格低、功耗小、可靠稳定、可批量生产等优点适用于各种制导航空弹药、微小飞行器、稳定平台、机器人等军事领域, 受到了各军事强国的青睐。

二、MEMS 陀螺的军事需求

在军事应用领域, MEMS 微陀螺主要用于导航制导、姿态测量与稳定以及引信等方面。各国竞相发展的各类远程制导炮弹、灵巧弹药以及各种常规炸弹制导化改造对惯导系统精度要求不是很高, 但要求成本低廉、反应时间短、动态范围宽、体积重量小、环境

适应能力强。从实践经验看, 低成本微惯性组合导航系统在上述武器装备建设中最具竞争力。微陀螺是微惯性系统的关键部件, 有着广阔的军事应用前景。

三、MEMS 陀螺的国外发展现状

Draper 实验室于 1985 年就着手微机械陀螺的研制, 先后研制了框架式角振动微陀螺、音叉式线振动微陀螺及振动轮式微陀螺。其漂移由 1994 年的 $4000^{\circ}/h$ 上升到 2000 年的 $10^{\circ}/h$ 。图 1 为 Draper 实验室 1993 年研制的新型音叉式线振动微陀螺仪^[1]。相对于

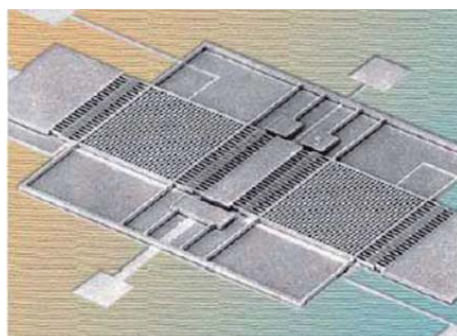


图 1 音叉式线振动陀螺

框架式结构的硅微机械陀螺，在性能指标上提升很大。该微陀螺在封装环境为 100mTorr 时的标度因数为 50mV/rad/s，非线性度小于 0.2%，驱动方向和检测方向上的 Q 值分别为 40000 和 5000。

1994 年，美国密歇根大学报道了一种振动式环形微机械陀螺^[2]，其主要结构为一系列弧形梁支撑圆环，在圆环的四周分布驱动及检测电极。由静电力使陀螺进入椭圆形驱动模态，角速度引入的柯氏力使其能量由第一模态向第二模态转移。在 2001 年使用 HARPSS 工艺进行加工制作的成品如图 2 所示^[3]。圆环直径为 1.1mm，结构厚度为 80 μ m，深宽比达 20:1，工作频率在 20kHz 左右。在其品质因数为 1200 时，其分辨率可达 0.01°/s/√Hz，减小寄生电容及提高品质因数可以大幅度地提高其分辨率。

美国 Jet Propulsion Laboratory 实验室在 NASA 的资助下，一直致力于研究应用于航空航天领域的高性能 MEMS 陀螺。1997 年研制出一种四叶体式微机械陀螺仪 (JPL/Boeinggyroscope)^[4]，如图 3 所示。在中间装配了一根金属杆用来增大检测质量块的质量，金属杆直径为 50 μ m，长度为 5mm，并对器件进行了真空封装来提高其 Q 值。器件工作频率为 1.4425kHz，其驱动与检测模态的谐振频率差为 7Hz，性能测试结果：标度因数 24mV/°/s，偏置稳定性 7°/h，角度随机游走 6.3°/√hr。

1999 年，日本横滨技术中心的科研人员对 Draper 实验室提出的微陀螺结构进行了改进，为减小驱动模态与检测模态之间的交叉耦合从而减小正交误差，为驱动模态和检测模态设

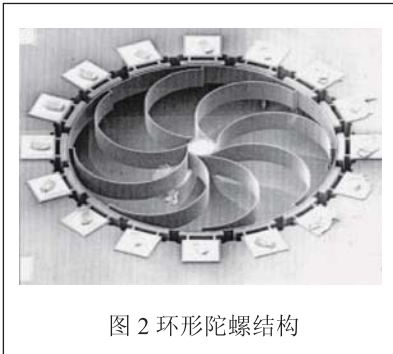


图 2 环形陀螺结构

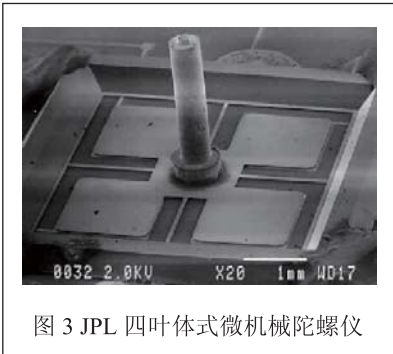


图 3 JPL 四叶体式微机械陀螺仪

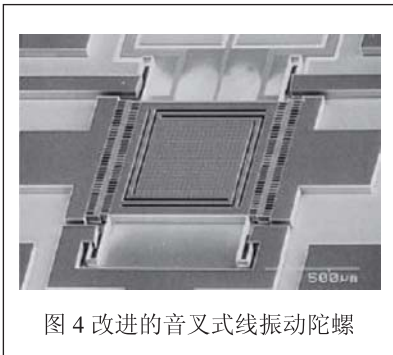


图 4 改进的音叉式线振动陀螺

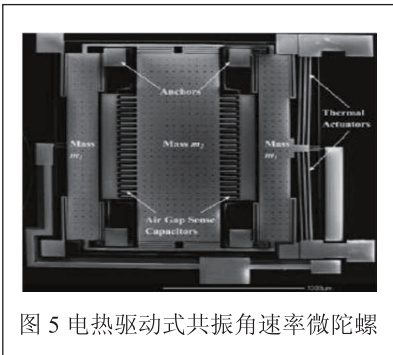


图 5 电热驱动式共振角速率微陀螺

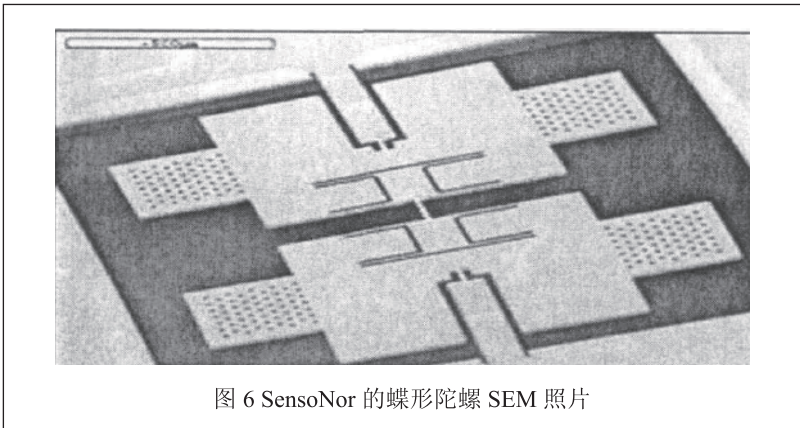
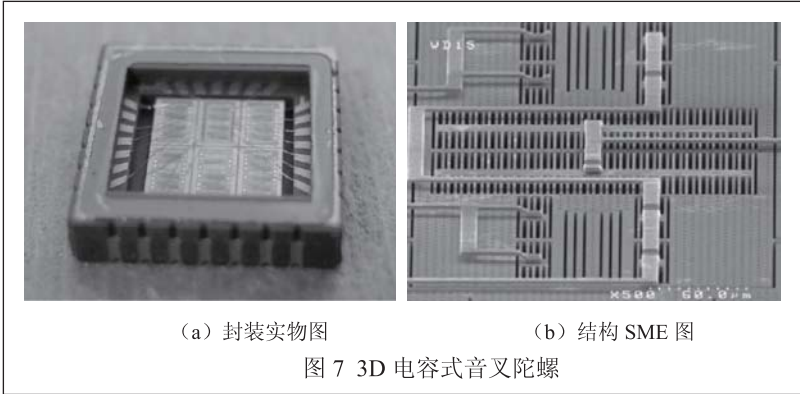


图 6 SensoNor 的蝶形陀螺 SEM 照片



(a) 封装实物图 (b) 结构 SME 图
图 7 3D 电容式音叉陀螺

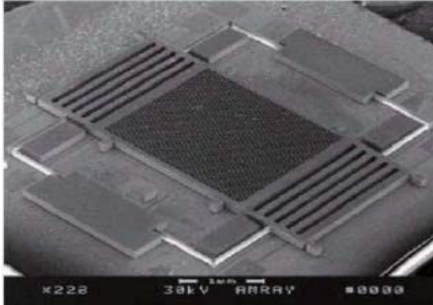


图 8 槽缝陀螺

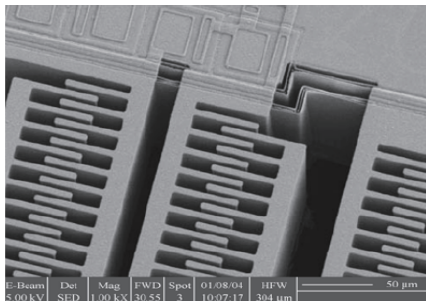


图 9 清华大学于 2006 年报道的陀螺结构

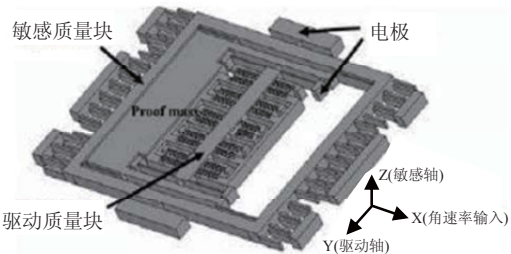


图 10 X 轴解耦微机械陀螺

计了独立的支承梁结构,如图 4 所示^[5],该陀螺基于 SOI 硅晶圆制造,交叉耦合度只有 1%,10Hz 带宽时的分辨率达到 0.07°/s。

2010 年,巴基斯坦应用科学与工程学院与加拿大皇后大学合作研制了一种电热驱动式共振角速率微陀螺仪,如图 5 所示,该微陀螺的结构由三个由同一个框架驱动的质量块组成,其敏感部件依靠热执行器进行驱动,通过检测电容的变化实现对柯氏力大小的测量。当驱动电压为 1.3V 2.99kHz 时,敏感部件在驱动方向振动幅值为 4.2μm,功率 0.36W,相对于梳齿驱

动的传统微陀螺具有很高的 Q 值^[6]。

2010 年,挪威 sensoNor 公司报道的蝶形陀螺属于偏转振动陀螺^[7],如图 6 所示。蝶形陀螺采用了音叉式的工作结构,驱动和检测模式均为反相的扭转振动。音叉结构有助于降低轴向加速度的干扰。其目标精度为:工作量程:±500deg/s,标度因素精度 ±300ppm,角度随机游走 0.002°/√hr,即 0.12°/hr√Hz,零偏稳定性 0.04°/hr,零偏重复性 0.1°/hr。

2013 年,法国电子与信息技术实验室研制了一种 3D 电容式音叉陀螺,如图 7 所示,其具有低寄生电容的^[8]。该微陀螺基于悬挂横向电极实现了面外敏感,在器件 Si 厚度为 30μm 的 SOI 晶圆上制作的微陀螺运动部件,通过在磷硅玻璃牺牲层的顶部沉积多晶硅来实现顶部电极和连接线的悬挂。这种 3D 设计方案采用横向悬挂电极,3D 敏感结构可以实现面外检测从而进一步降低微陀螺的寄生电容。

四、MEMS 陀螺的国内发展现状

我国在微陀螺领域的研究起步较晚,经过近些年的努力,关键技术研究有长足的进步,性能有大幅提高。清华大学、北京大学、东南大学、中北大学、上海微系统、航天时代电子公司、电子科技集团 26 所和 13 所等单位已经研制出具有一定精度的样机。

2003 年,中科院上海微系统研究所的研究人员研制了一种槽缝陀螺,结构如图 8 所示^[9]。该陀螺基于深层反应离子刻蚀(DRIE)工艺制备,采用静电式驱动,电容式检测。其驱动模式频率为 460Hz, Q 值为 102.5 检测模式频率为 550Hz, Q 值为 106.5,在大气环境下的标度因数为 20mV/°/s,非线性度为 0.56%。

清华大学在 2006 年报道了一种微机械陀螺无需转台的标度因数确定方法,陀螺结构如图 9 所示^[10],在大气下工作,结构厚度为 80μm,深宽比达 25。

北京大学在 2008 年报道了一种大气下工作的单质量块双解耦陀螺^[11],如图 10 所示。驱动与检测都采用变面积电容,所受阻尼主要为滑膜阻尼。此陀螺检测的角速度为 X 方向输入的角速度,外框随 X 轴输入的角速度大小产生绕 y 轴的扭转运动。测试结果为:标度因数为 3mV/°/s,量程 ±300°/s,噪声基

底为 $0.1^\circ/\text{s}\sqrt{\text{Hz}}$ ，相当于 $360^\circ/\text{hr}\sqrt{\text{Hz}}$ 。

2014 年，同济大学研制了一种可用于高 g 冲击环境的音叉陀螺仪，如图 11 所示^[12]。该微陀螺采用由中间的连梁连接的双对称框架结构以提高它的耐冲击性，通过体硅微机械加工技术在 $300\mu\text{m}$ 厚硅片上加工而成，其工作频率达到 10kHz 。微陀螺驱动和检测模态的工作频率分别为 10240Hz 和 11160Hz ，沿 X 轴陀螺仪的耐冲击性为 15000g ，Y 轴为 14000g ，Z 轴为 11000g 。

2015 年，中北大学设计了基于静电梳齿驱动介观压光效应检测的微机械陀螺，该微陀螺的工作原理可表述为：当交变电场施加在静电驱动梳齿电容上时，质量块在静电驱动力的作用下往复振动。当敏感方向有角速度输入时，由柯氏效应原理，将在检测方向产生交变柯氏力，柯氏力驱动质量块和中框在检测方向产生振动，检测梁的弯曲是布置与梁上的光子晶体产生应变（应力），通过检测光子晶体的透射率变化即可解算出输入角速度的大小。其结构如图 12 所示^[6]。

五、结束语

本文根据对国内外 MEMS 陀螺进行了充分调研，并对它们的基本原理、优缺点和技术指标进行了简单

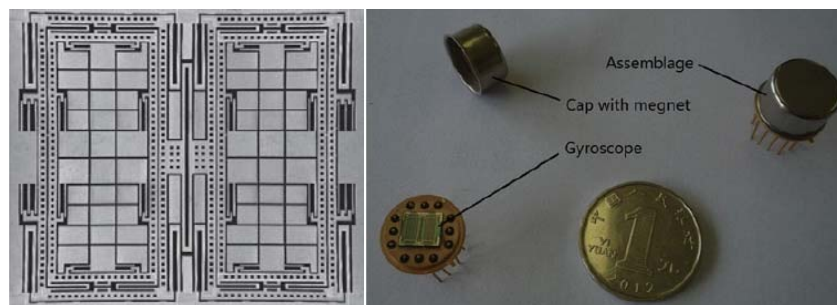


图 11 同济大学研制的音叉陀螺仪

的介绍。这几种 MEMS 陀螺都具有体积小、重量轻、成本低和批量生产等独特优点，使得它们都较适合应用在惯性导航、自动控制等相关领域，因而具有广阔的应用前景。随着微机电技术的发展和新型材料的应用，MEMS 陀螺的种类将进一步多样化，MEMS 陀螺将在惯性导航和自动控制等方面发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] Bernstein J, Cho S, King A T, et al. A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope[C]. Micro Electro Mechanical Systems, 1993, MEMS'93, Proceedings An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems. IEEE. Piscataway: IEEE, 1993. 143-148.
- [2] M. W. Putty and K. Najafi. A micromachined vibrating ring gyroscope[C]. Solid State Sensor and Actuator Workshop. Hilton Head: Transducer Research Foundation, 1994. 213-220
- [3] F. Ayazi and K. Najafi. A HARPSS polysilicon vibrating ring gyroscope[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2001, 10(2): 169-179.
- [4] T. K. Tang, R. C. Gutierrez, J. Z. Wilcox, C. Stelk V. Vorperian, et al, Silicon bulk micromachined vibratory gyroscope for microspacecraft[C]. Space Sciencecraft Control and Tracking in the New Millennium. Proc. SPIE 2810. Bellingham: SPIE, 1996.
- [5] Mochida Y, Tamura M, Ohwada K. A micromachined vibrating rate gyroscope with independent beams for the drive and detection modes[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 80(2): 170-178.
- [6] 朱京. 基于介观压阻效应的微机械陀螺设计与研究 [D]. 山西: 中北大学, 2015.
- [7] D. Lapadatu, B. Blixhavn, R. Holm, and T. Kvisteroy, SAR500 - A high-precision high-stability butterfly gyroscope with north seeking capability[C], Position Location and Navigation

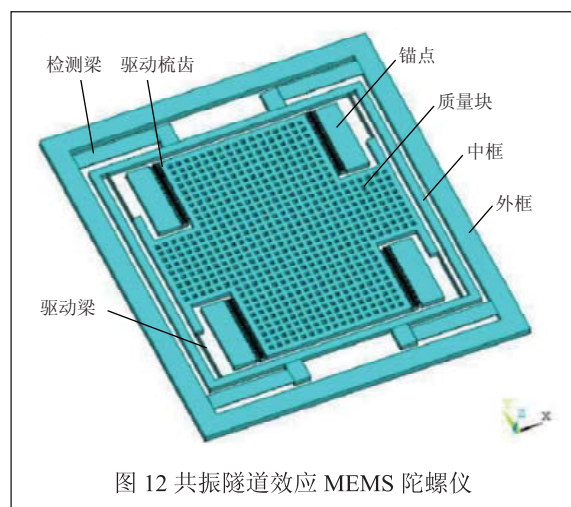


图 12 共振隧道效应 MEMS 陀螺仪

Symposium (PLANS), 2010IEEE/ION. Piscataway:IEEE, 2010. 6-13.

[8]Walther A, Desloges B, Lejuste C, et al. Development of a 3D capacitive gyroscope with reduced parasitic capacitance[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(2): 025013-25020

[9] Bin Xiong, Lufeng Che, Yuelin Wang, A novel bulk micromachined gyroscope with slots structure working at atmosphere[J], Sensors and Actuators A: Physical, 2003,107(2):137-145

[10] Gaiser Alexander, GAO Zhong-yu(高钟毓), ZHOU Bin(周斌), ZHANG Rong(张嵘), CHEN Zhi-yong(陈志勇). Scale factor determination of micro-machined angular rate sensors without a turntable[J], Tsinghua Science & Technology, 2006, 11(5):533-537

[11]X. S. Liu, Z. C. Yang, X. Z. Chi, J. Cui, H. T. Ding, et al. An x-axis micromachined gyroscope with doubly decoupled oscillation modes[C], Micro Electro Mechanical Systems, 2008. MEMS 2008. IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. Piscataway:IEEE, 2008. 860-863.

[12]Zhou J, Jiang T, Jiao J, et al. Design and fabrication of a micromachined gyroscope with high shock resistance[J]. Microsystem technologies, 2014, 20(1): 137-144.

A brief review on the development of MEMS gyroscopes at home and abroad

CHEN Shang, ZHANG Shi-jun, MU Xing-ke, CHEN Yong-qiang

(China Academy of Launch Vehicle Technology R&D Center, Beijing 100076, China)

Abstract: With the rapid development of MEMS technology, micro gyro inertial devices get extensive development and application. With many unique advantages of small volume, light weight, low cost, mass production and others, MEMS gyros have broad prospects for development and application in many military fields, thus get the favour of military powers. In this paper, the preliminary introduction of the military requirements for MEMS gyros are presented with focus on the structures, basic principles, advantages and disadvantages, key performance indicators of typical MEMS gyroscope devices at home and abroad, and the application prospects

of these devices are discussed. With the development of micro-electro-mechanical technology and application of new materials, the types of MEMS gyroscopes will diversified further, MEMS gyroscopes will play more and more important roles in inertial navigation and automatic control.

Keywords: MEMS; gyroscope; inertial device; review

作者简介

陈尚, 中国运载火箭技术研究院研究发展中心工程师, 主要研究方向为微系统结构设计。

通信地址: 北京市 9200 信箱 38 分箱

邮编: 100076

邮箱: chenshang99@163.com

张世军, 中国运载火箭技术研究院研究发展中心工程师, 主要研究方向为飞行器结构设计。

穆星科, 中国运载火箭技术研究院研究发展中心工程师, 主要研究方向为飞行器结构设计。

陈永强, 中国运载火箭技术研究院研究发展中心高级工程师, 主要研究方向为飞行器结构设计。