

· 综述与评论 ·

文章编号: 1005-6734(2003)05-0067-06

微机械陀螺仪的研制现状

谷庆红

(江南航天集团 3405 厂, 贵州 遵义 563124)

摘要: 介绍了当前国内外微机械陀螺仪的研制现状, 阐述了微机械陀螺仪的两种典型结构, 指出了微机械陀螺仪的发展方向。微机械陀螺仪正朝着小型化和低成本方向发展, 将会在集成式导航系统和运动控制系统中大量使用。

关键词: 微机械陀螺仪; 研制现状; 综述; 振动陀螺仪; 音叉调谐微机械陀螺仪

中图分类号: U666.12

文献标识码: A

Current State of MEMS Gyro Research

GU Qing-hong

(3405 Plant, Jiangnan Aerospace Group, Zunyi 563124, China)

Abstract: This paper summarizes the current state of MEMS gyro research, describes two kinds of MEMS gyro's typical structure up to date, and points out the developing trend of MEMS gyro. MEMS gyro is developing in the direction of miniature and low cost and largely applied to integrated navigation system and motion control system.

Key words: MEMS gyro; current state of research; summary; vibratory gyro; tuned fork MEMS gyro

1 引言

导弹的射击精度由惯导系统 (INS) 的精度来决定, 而惯导系统的精度、成本主要决定于惯性仪表 (陀螺仪和加速度计) 的精度和成本, 尤其是陀螺仪的漂移对惯导系统位置误差增长的影响是时间的三次方函数。但制造高精度陀螺仪不但技术难, 而且成本高。因此惯性界一直寻求各种有效方法来提高陀螺仪的精度, 降低惯导系统的成本。

陀螺仪的发展大致经历了下列几个过程: 从 20 世纪 50 年代的液浮陀螺仪到 70 年代的动力调谐陀螺仪 (又称挠性陀螺仪, DTG), 从 20 世纪 80 年代的环形激光陀螺仪 (RLG)、光纤陀螺仪 (FOG) 到 90 年代的振动陀螺仪以及目前研究报导较多的微机械电子系统陀螺仪 (简称微机械陀螺仪, MEMSG)。微机械陀螺仪在军事领域方面的应用尤为重要, 如利用电子隧穿技术制造的微加速度计重 6 g, 灵敏度 $10^{-7}g$, 完全能满足导航的要求; 最近研制出的振动式微机械陀螺仪重 100 mg, 机械器件尺寸为 $1.2\text{ cm} \times 1.2\text{ cm} \times 1.2\text{ cm}$, 偏置稳定性为 $1 \sim 10 (^{\circ})/h$, 功耗不到 1 W。由微机械陀螺仪和微加速度计组成的微型惯性测量组合 (MIMU), 没有转动的部件, 在寿命、可靠性、成本、体积和重量等方面都大于常规的惯性仪表。例如, 1985 年美国的“先进中程空空导弹”系统 IMU 的质量为 14 kg, 预计当采用成熟的 MIMU

收稿日期: 2003-07-26

作者简介: 谷庆红 (1975—), 女, 江南航天集团 3405 厂工程师, 从事科技情报与翻译方面的工作。

2.1.2 TFG 的生产

TFG 采用溶解晶片工艺生产,如图 2 所示。在膜片 1 步骤中,给涂漆的硅晶片上蚀刻出凹槽来确定玻璃上硅片的高度和旋转电容敏感片的缝隙。接下来是硼扩散步骤,它可确定结构的厚度。结构的形状特征由膜片 2 确定,微机械加工采用活性离子蚀刻(RIE)工艺。

玻璃晶片被单独处理,膜片 3 确定了玻璃凹槽和金属电极形状。硅晶片被倒置并粘接在玻璃晶片,由热、压强和静电场合成作用于硅片的硅原子和玻璃中的氧原子,形成较强的化学粘接,最后蚀刻溶解出未涂漆硅并剩下独立器件。在一个晶片上可制作出几百个敏感器。

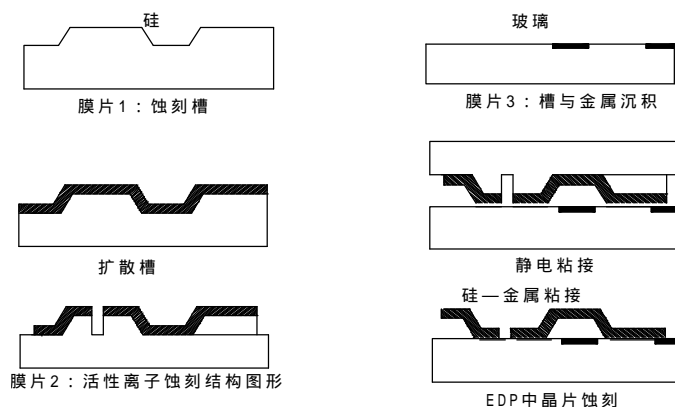


图2 CVG 陀螺玻璃上溶解晶片硅加工过程

2.1.3 TFG 的电子线路

TFG 电子线路的设计反映了陀螺工作可行性的基本要求,以及驱动回路和敏感回路的相互作用。驱动回路由一个自激振荡器组成,它可提供产生静电力的电压,驱动敏感质量产生运动。回路检测敏感质量的位置,将位置信号经过适当放大与相位调制来实现并维持驱动幅值恒定。保持驱动幅值的高精度恒定是稳定标定因数所必需的。驱动回路从敏感质量运动中

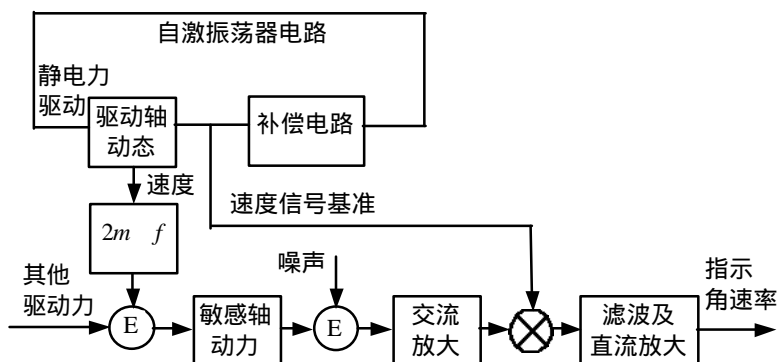


图3 TFG 陀螺电路系统框图

可精确获得对基本频带解调所需的基准信号。闭环再产生所需的相移也由电子线路提供,电子线路还可同时生成速度信号基准。该基准倍乘上敏感轴信号输出后,生成一个与速率输入成比例的基带信号。设备的频率响应由基带滤波器确定,基带滤波器的作用是消除后面转化过程中引入的更高的谐波信号,TFG 的有用带宽典型值为 1.0 ~ 1.5 kHz。

前置放大器可检测敏感质量位移变化中产生的电荷量,完成对速率敏感轴方向上产生的哥氏运动的检测。信噪比大体上是由传感器的灵敏度和前置放大器的输入电压噪声决定的。前置放大器的输出经过放大并传给前面所提的解调器,形成速率输入的基波信号。在通常的开路应用中,这种信号提供与输入速率成比例的输出;而在未来可能的闭合回路应用中,这种信号通过伺服控制置零,由敏感质量再平衡电压代表比例输出。

此电子线路的其它附加功能包括:自检测和/或自标定,偏置和标度因数自矫正和/或自补偿,其它一些具体应用时的接口功能。

2.2 国内研制的双框架角振动微机械陀螺仪

双框架角振动微机械陀螺仪是一种用于测量运动物体角速度的微型惯性器件,它是在硅微结构的

$\mu\text{m}/\text{nm}$ 技术基础上发展起来的一类技术难度较大的微机电系统,是当今微米/纳米技术发展的一个主要方向。双框架角振动微机械陀螺仪尤其在战术武器系统、稳定控制系统等方面有广泛的应用。

2.2.1 双框架角振动微机械陀螺仪的工作机理

其结构如图 4 所示,有内、外两个框架,内框架组件作驱动电极,外框架作敏感电极感测输入角速度。当驱动电极上加交变电压时,内板块受静电力的作用而扭转振动。这里若沿 z 轴有角速度输入,由于哥氏效应产生哥氏力,将会使外框架板块偏转而振动,即敏感电容有一个 $2C$ 变化量,这样就知道了输入角速度的大小。

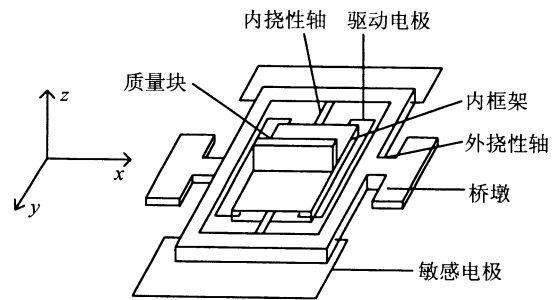


图 4 微机械双框架角振动陀螺仪

2.2.2 双框架角振动微机械陀螺仪的生产工艺

制造此陀螺仪的关键工艺由两部分组成:硅芯片制作和带电极的玻璃加工。陀螺仪的结构剖面图如图 5 所示。

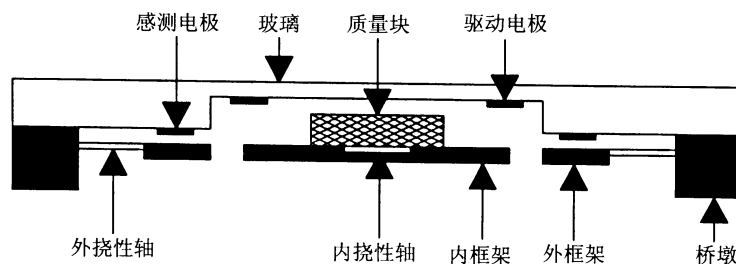


图 5 陀螺仪结构剖面图

2.2.2.1 硅芯片制作

选用 (100) 晶向、N 型硅抛光片。首先进行一次氧化,见图 6(a)。刻出腐蚀质量块的窗口,用 KOH 腐蚀出质量块,见图 6(b)。第二次光刻出桥墩窗口,腐蚀出桥墩同时加高质量块的高度,使其符合设计要求的高度,见图 6(c)。再生长氧化层,光刻出桥墩、框架的窗口,进行第一次浓硼扩散 ($N > 10^{19}/\text{cm}^3$),见图 6(d)。第三次生长氧化层,光刻出内外挠性轴图形,第二次浓硼扩散 ($N > 10^{19}/\text{cm}^3$),见图 6(e)。漂去硅表面的 SiO_2 ,清洗、烘干待静电键合。

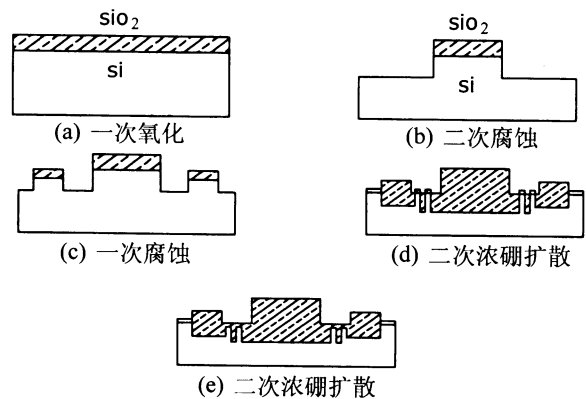


图 6 硅芯片制备工艺流程

2.2.2.2 带电极玻璃的加工

选用热膨胀系数尽量接近硅热膨胀系数的玻璃—4471 玻璃。先在玻璃上沉积耐 HF 腐蚀的保护金属,光刻出凹槽图形,用 $\text{HF}+\text{H}_2\text{O}$ 溶液腐蚀玻璃,在玻璃上形成凹槽;再沉积引线用金属薄膜,光刻出电极及其引线,清洗干净后待静电键合。

将已制备好的硅芯片和已制备好电极的玻璃进行静电键合,最后用 EPW (乙二胺:邻苯二酚:水=7.5 ml:1.2 g:2.4 ml) 腐蚀硅,直至 EPW 腐蚀液中的反应自停止,最后形成图 5 所示的结构。

3 国内外微机械陀螺仪的发展现状

3.1 国外微机械陀螺仪的发展现状

20 世纪 80 年代以来, Draper(德雷珀)实验室(美)、JPL 公司(美)、LITTON(利顿)公司(美)、LITEF 公司(德)、SAGEM 公司(法)、AD 公司(美)、Vector 公司(俄)等相继开展微硅陀螺、微硅加速度计等微型惯性仪表的研究, 有的已形成产品, 进而进行微型惯性测量组合的研究。

美国国防部将 MEMS 技术列为国防部的关键技术, 美国国防高级研究计划局(DARPA)资助开发军用 MEMS 的经费每年达 5 000 万美元以上。德雷珀实验室从 1989 年开始研制微机械振动陀螺仪, 已封装实验了 200 个不同型号的微机械振动陀螺仪, 经受了加速度为 8000g 的冲击和离心试验。在 1991 年研制出一种微型惯性测量组合, 其体积为 2 cm×2 cm×0.5 cm, 质量为 5 g。它仅比普通惯导体积的万分之一多一点, 其中陀螺仪的漂移为 10 (°)/h。这一系统包括三个陀螺仪和三个加速度计, 以及相应的执行元件, 在一块 25.8 cm² 的硅片上便可制造出 4 000 个这样的微型惯性测量装置。

BEI 电子公司 Systron Donner 惯性分公司已采用 MEMS 技术, 批量生产出单轴、三轴固态石英压电陀螺, 其生产速度超过每月 800 只, 目前在国内市场上已可买到, 可用于高档汽车、导航、飞机、航天等领域。表 1 列出了 BEI 公司生产的一种高性能的单轴、固态石英音叉微机械振动陀螺仪 QRS11 的性能。

表 1 QRS11 的性能

电源	± 5 V (DC)
测量范围	± 50, 100, 200, 500, 1000 (°)/s
输出信号	± 2.5 V
恒温 100 s 内稳定度	0.002 (°)/s
分辨率	0.004 (°)/s
非线性度	0.05% (FS)
工作温度	- 40 ~ 80
最大外形尺寸/mm	直径 39 mm×长 17 mm
质量	60 g
典型寿命	10 年
主要特征	高性能惯性传感器、内部电路, 寿命长
主要应用	卫星天线, 导弹跟踪, 姿态控制, GPS 导航, 机器人, 导弹, 导航, 仪器

据报导, 此型号陀螺已应用于 Predator Tactial 导弹和 Maverick 导弹上。

日本在 1989 年成立了微机械研究会, 1992 年日本正式启动一项为期 10 年、耗资 1.9 亿美元的“微机械研究计划”, 着重发展 6 个方面的技术: 延伸微纳米技术、微装置技术、器件高度集成技术、场能利用技术、多分布与协同管理技术和智能材料利用技术。据报导, 日本住友精密工业公司和英国航天公司已合作研制成功一种硅微机械压电陀螺仪——CRS 系列振动陀螺仪。

3.1 国内微机械陀螺仪的发展现状

我国微机械的研究始于 1989 年, 现已研制出数百微米大小的静电电机和直径为 3 mm 的压电电机。据报导, 国内现已做出了微型加速度计的样机, 并已取得了一些数据。清华大学导航与控制教研组的陀

螺技术十分成熟,已发展了高精度静电陀螺的成熟技术,姿态漂移仅为每小时万分之五,并已掌握微机械与光波导陀螺技术。东南大学精密仪器及机械系科学研究中心也不断进行关键部件、微机械陀螺仪和新型惯性装置与 GPS 组合系统的开发研究,满足广阔的军民两用市场的需要。

从 1995 年末开始,国防科工委便投入 6000 万元以上的经费主要用于惯性器件的基础性研究,并且硅微机械陀螺技术已纳入 863 计划中。计划中提出的微机械陀螺仪欲达到的参考技术指标如下:

最大测量范围:	$\pm 50 \sim \pm 500 (^{\circ})/s$	交叉耦合:	0.5%
阈值:	$0.004 \sim 0.01 (^{\circ})/s$	零位漂移:	$0.1 \sim 0.5 ((^{\circ}) \cdot s^{-1})/h$
分辨率:	$0.004 \sim 0.01 (^{\circ})/s$	MTBF:	5 000 h
线性度:	0.1 ~ 0.5%	工作温度:	- 40 ~ + 85

4 微机械陀螺仪的发展趋势

微机械陀螺仪在过去几年受到了人们的广泛关注,但由于多方面的原因,它没有像微加速度计那样在市场上大量应用。这从另外一个方面表明了开发和应用微机械陀螺仪的潜力是很大的,因此应积极开展微机械惯性器件的研制,围绕关键技术、材料、特殊工艺和微型设计等方面进行研制。

今后微机械陀螺仪的主要研究内容为:

进一步研究微机械振动陀螺仪的结构及电路的优化设计,实现惯性级高性能的要求,其中高灵敏度、低噪声、低漂移和大动态范围的测试电路是提高微机械陀螺仪的关键所在;

研究微机械振动陀螺仪的体加工和表面加工技术;

研究电路的模块设计及加工技术;

完善微机械振动陀螺系统的封装及测试标定。

微机械陀螺仪的发展方向是集成化的惯性测量单元,即将惯性计和测试电路集成在一起的测量系统,另外还应加强微米/纳米技术的研究,只有这样才能真正实现微机械惯性器件的单片集成优势。我们应从根本上改变惯性器件的型式,密切跟踪世界高新技术,迎头赶上世界先进水平。

参考文献:

- [1] 邵良杰,罗晓章.微机械双框架陀螺仪的机理研究[J].传感器技术,1999,(5):7-9.
- [2] 陈德英.新颖双框架角振动微机械陀螺仪的制作[J].传感器技术,1999,(5):25-27.
- [3] Kourepenis A, Borenstein J, Conneiy J, et al.微机电系统(MEMS)惯性传感器的性能[J].惯导与仪表,2001,(4):1-11.
- [4] Ash M E. Draper 实验室微机械惯性敏感器的研制情况及近期测试结果[J].惯导与仪表,2001,(2):1-7.
- [5] 李志信,罗小兵,过增元.MEMS 在惯性测量中的应用[J].传感器技术,2001,(7):58-60.
- [6] 李志信,罗小兵,过增元.MEMS 技术的现状及发展趋势[J].传感器技术,2001,(9):58-60.
- [7] 徐景硕.惯性传感器技术及发展[J].传感器技术,2001,(5):1-3.
- [8] 刘光辉,亢春梅.MEMS 技术的现状和发展趋势[J].传感器技术,2001,(1):52-56.
- [9] 周世勤,鲁政,孙道秋.微机械惯性仪表研制现状跟踪研究[R].航天情报研究报告,2000:40-42.
- [10] 亢春梅,曹金名,刘光辉.国外 MEMS 技术的现状及其在军事领域中的应用.传感器技术[J],2002,(6):4-7.