

The Structure Design of Micromachined Gyroscope Based on Resonant Tunneling Diodes*

WANG Ruirong, DU Kang, LI Mengwei, SHI Yunbo*, LIU Jun, LI Ping

(National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A novel electromagnetic drive micromachined gyroscope based on meso-piezoresistive effect is proposed and the structure is designed. The method of electromagnetic drive is used, which achieves the requirement of low operating voltage, large driven force and great displacement. The sensitivity of gyroscope is increased essentially by using the meso-piezoresistive effect of resonant tunneling diodes. The modal simulation and path analysis is processed using the ANSYS software, which determines the natural frequencies and location of the resonant tunneling diodes. According to the present process technology, the process design of gyroscope is presented and the structure fabrication is achieved.

Key words: electromagnetic drive; meso-piezoresistive effect; structure design; micromachined gyroscope.

EEACC: 7230; 2575; 0170G

基于共振隧穿二极管的微机械陀螺设计*

王瑞荣, 杜康, 李孟委, 石云波*, 刘俊, 李平

(中北大学电子测试国家重点实验室, 太原 030051)

摘要:介绍了一种基于介观压阻效应的新型电磁式微机械陀螺,并对陀螺进行了结构设计。该结构采用电磁驱动方式,实现了工作电压小、驱动力大、行程大的要求;采用共振隧穿二极管(RTD)所具有的介观压阻效应检测方式,本质上提高了陀螺的灵敏度。用ANSYS软件对结构进行了模态分析和路径分析,确定了结构的固有频率和RTD放置位置。结合目前工艺要求,对该陀螺进行了工艺设计并实现了结构加工。

关键词:电磁驱动;介观压阻效应;结构设计;微机械陀螺

中图分类号: TP212.12

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)05-0647-04

微机械陀螺是一种用来测量角度或角速度的仪器,是微传感器的重要组成部分^[1],具有体积小、重量轻、可靠性高、成本低等优点,逐渐成为MEMS领域研究的一个热点^[2]。微机械陀螺通常采用静电驱动方式。静电驱动方式利用两组电极之间的静电吸引力来实现,驱动力较小,系统阻尼为压膜阻尼,因此其品质因子(Q值)较低,一般需要在真空状态下工作,增加了封装的难度^[3]。电磁驱动方式的Q值较高,且加工工艺相对比较容易,已成为人们研究的热点。

共振隧穿二极管(RTD)是基于量子共振隧穿现象的一种两端纳米负阻器件^[4],器件结构的主要特点是:当采用两种不同材料形成异质结时,将在界面形成能带不连续性,而能带的不连续会形成量子阱。用分子束外延(MBE),在半绝缘的GaAs衬底上生长一个多层

超晶格材料结构^[5],它具有压阻效应^[6],从量子理论方面解释,其原理可描述为:在力学信号的作用下,量子阱薄膜结构(即RTD结构)中的应力分布会发生变化,应力分布的变化将产生内建电场,而内建电场会导致结构中量子能态发生变化,从而引起共振隧穿电流的变化。简而言之,外加的力学信号会引起RTD结构I-V特性曲线的变化,当偏置的共振隧穿电压固定时,力学信号和隧穿电流之间的关系就可以等效为力学信号与电阻变化量之间的关系。研究发现,RTD结构的压阻特性受温度的影响较硅压阻特性小,其灵敏度比硅压阻灵敏度的最大值要高5~6倍^[7]。

本文提出了一种新型的基于共振隧穿效应的电磁式微机械陀螺仪。该陀螺的驱动方式采用电磁驱动,电磁驱动方式利用磁场中产生的安培力来实现,

项目来源:国家自然科学基金资助(50675212)

收稿日期: 2009-11-23

修改日期: 2009-12-18

驱动力大,驱动模态主要是滑膜阻尼,阻尼小,因此驱动振幅大, Q 值较高,并且具有行程大和驱动电压低(一般小于 5V)等优点^[4-6]。检测方式采用共振隧穿二极管所具有的介观压阻效应检测,大幅度提高微陀螺仪的灵敏度;所设计的结构减小了驱动模态和检测模态之间的干扰,很好的解决了机械耦合现象。

1 结构设计及工作原理

电磁驱动是以永磁体提供匀强磁场,以通电金属导线在匀强磁场中产生的安培力作为陀螺的驱动力,以运动金属导线切割磁感线产生的感应电动势作为陀螺的反馈控制信号。由永磁体提供的匀强磁场可以最大程度上的简化结构设计的复杂性,同时减小了与静电梳齿工艺相比的复杂性。

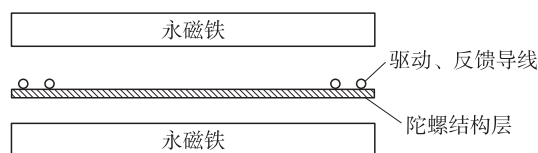


图 1 电磁驱动方案结构示意图

陀螺结构如图 2 所示,由外框、质量块、检测梁、驱动梁、阻尼孔组成。在质量块、驱动梁和检测梁的上表面制作有驱动导线和反馈导线,在质量块上均布有阻尼孔,在检测梁的根部制作有共振隧穿(RTD)敏感元件,用来检测应力的变化。

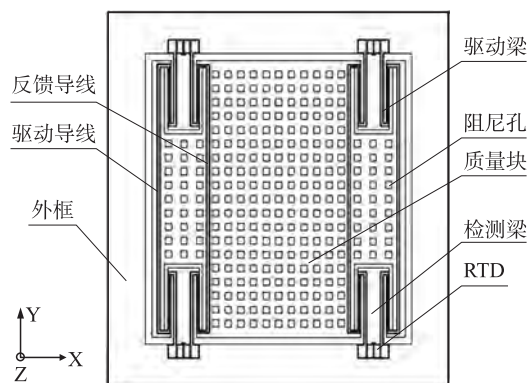


图 2 微机械陀螺结构示意图

工作原理 整个陀螺结构放置于 Z 轴方向的匀强磁场中,当驱动导线上通入交变电流时,驱动导线上产生交变驱动力,该交变驱动力的频率与陀螺的固有频率接近;在交变驱动力的作用下,质量块沿着驱动轴(X 轴)的方向往复运动,若此时在角速度输入轴(Y 轴)输入角速度,根据陀螺哥氏效应原理,质量块将会在敏感轴方向(Z 轴)产生进动,该进动位移量通过组合梁机构在检测梁的根部产生应力变化,通过检测 RTD 电信号的变化量就可以得到系统在 Y 方向输入的角速度大小。

结构设计时,驱动梁和检测梁通过连接块连接,通过适当的尺寸选择,使质量块在驱动方向(X 方向)运动时,驱动梁在 X 方向容易弯曲,而检测梁不发生弯曲,这样就使制作在检测梁根部的共振隧穿二极管器件的电学特性不发生变化;质量块在检测方向(Z 方向)运动时,检测梁容易弯曲,而驱动梁不发生形变,这样就使质量块上产生的哥氏力通过驱动梁传递到检测梁,进而使检测梁变形而导致其根部应力变化最大,从而使 RTD 的灵敏度最大。

采用相关理论和 ANSYS 软件仿真,并结合加工工艺要求,得到结构设计参数如表 1 所示。

表 1 陀螺结构参数

	um					
	外框	内框	质量块	检测梁	驱动梁	阻尼孔
长	5 400	4 200	4 000	1 000	850	100
宽	5 400	4 200	4 000	300	30	100
厚	70	70	60	30	60	60

2 有限元仿真

2.1 模态分析

通过模态分析,得到陀螺的前四阶模态振形,如图 3 所示。

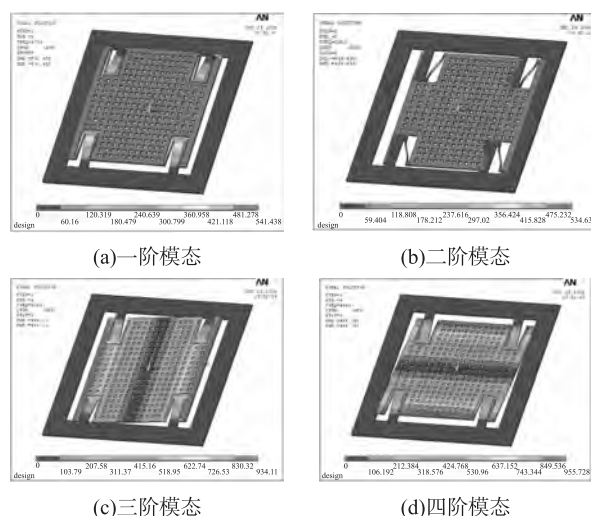


图 3 前四阶模态振形

一阶模态为陀螺的检测模态,沿 Z 方向做往复运动;二阶模态为陀螺的驱动模态,沿 X 方向做往复运动;三阶、四阶模态为陀螺的干扰模态,它们分别绕 Y 轴、 X 轴方向做扭转运动。从表 2 可以看出,工作模态频率低于干扰模态,这有利于微陀螺的稳定工作和抗干扰性^[10]。

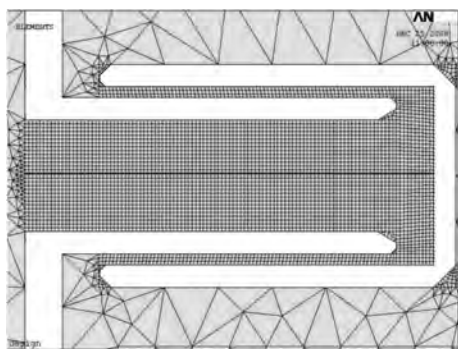
表 2 前四阶模态分析频率表

	Hz			
阶数	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶
固有频率	3 714.2	3 919.7	5 052.6	5 339.9

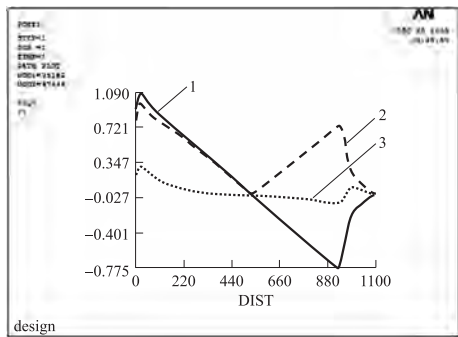
2.2 路径分析

路径分析目的是为了得到检测梁上共振隧穿二极管的具体位置^[11], 路径为检测梁的中心区域, 路径的选取图如图 4(a) 中的直线所示, 路径分析后的应力曲线图如图 4(b) 所示。

图 4(b) 中显示了三条曲线。分析可知, 最大应力不在检测梁的根部, 而是在距检测梁根部有一小段距离。为了使共振隧穿二极管具有最大的灵敏度, 必须将共振隧穿二极管放置在检测梁上最大应力处, 现对该区域进行细化, 找出最大应力区域。通过 ANSYS 软件中 List Path Items 功能可显示出最大应力值, 部分应力值如表 3 所示。



(a) 路径选取图



(b) 路径分析应力曲线图

图 4 路径分析图

表 3 部分应力值数表

距检测梁根部的距离/ μm	X 方向应力/ MPa	Y 方向应力/ MPa	总应力/ MPa
18.150	0.296 54	1.074 7	0.974 47
18.700	0.297 81	1.079 4	0.977 44
19.250	0.299 08	1.084 1	0.980 42
19.800	0.300 36	1.088 8	0.983 41
20.350	0.300 54	1.089 7	0.983 29
20.900	0.300 10	1.088 3	0.981 38
21.450	0.299 67	1.087 0	0.979 48
22.000	0.299 23	1.085 6	0.977 57
22.550	0.298 79	1.084 3	0.975 67

结合图 4 和表 3 可知, 曲线 1 反应的是 Y 方向应力, 即检测梁纵向应力; 曲线 2 反应的是总应力; 曲线 3 反应的是 X 方向应力, 即检测梁横向应力。为提高陀螺的检测灵敏度, RTD 应放置在检测梁上应力最大处。由表 3 数据可知, 距检测梁根部 $20.35 \mu\text{m}$ 处的纵向应力最大, 考虑到工艺精度, 最终确定 RTD 放置在距检测梁根部 $20 \mu\text{m}$ 处较为合适。

2.3 工艺流程设计及制造

目前, MEMS 器件的加工工艺有体加工工艺、表面加工工艺和 LIGA 加工工艺^[12]。本文所设计的陀螺采用砷化镓衬底材料制作, 主要包括共振隧穿二极管的加工和陀螺的加工。通过与相关加工单位探讨, 确定了共振隧穿二极管的加工采用砷化镓表面加工工艺, 陀螺的结构加工采用砷化镓体加工技术制得, 具体加工工艺流程如图 5、图 6 所示。

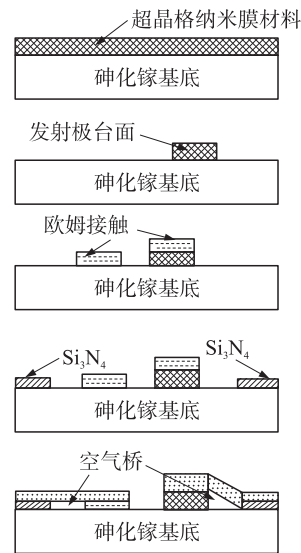


图 5 RTD 加工工艺流程

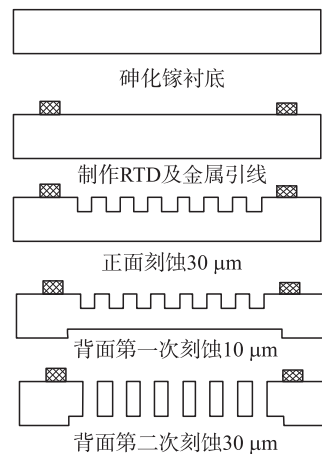


图 6 陀螺加工工艺流程

共振隧穿二极管利用 GaAs 材料制作, 加工工艺使用砷化镓表面加工, 具体的工艺流程如图 5 所示, 主要包括包含以下几个重要步骤: ①薄膜层淀

积;②发射极的制作;③欧姆接触;④集电极的制作;⑤空气桥工艺的形成。

陀螺的加工工艺采用双向加工工艺流程,主要由砷化镓衬底备片的清洗、RTD 器件及驱动、反馈导线的制作、砷化镓衬底的减薄、正面结构的刻蚀、背面一次刻蚀和背面二次刻蚀等几项工艺步骤组成。具体的工艺过程如图6所示。

加工完成后的陀螺照片如图7所示。

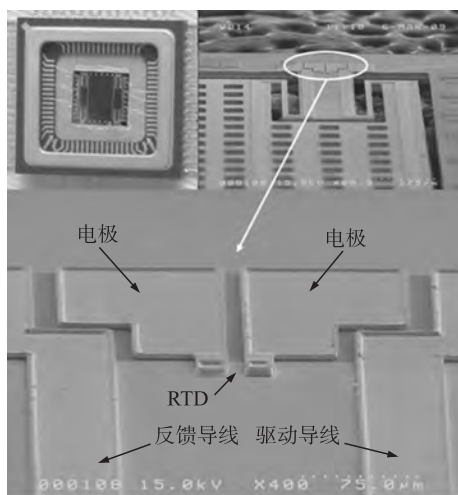


图7 陀螺封装和 RTD 结构

3 结论

本文设计了一种新型的电磁式微机械陀螺,采用电磁驱动,共振隧穿二极管具有的介观压阻效应检测方式。电磁驱动方式的采用实现了大驱动力、大行程谐振运动,满足微机械器件低功耗要求,且实现结构相较于静电驱动要简洁得多,采用共振隧穿二极管所具有的介观压阻效应检测方式,实现了高灵敏度测量,利于提高本发明所述陀螺仪的检测精度和分辨率,

使检测数据更加精确、可靠。利用 ANSYS 软件进行了模态仿真和路径分析,确定了陀螺的结构参数和 RTD 的放置位置。结合目前的工艺水平提出了可行的加工工艺流程并实现了结构的加工。

参考文献:

- [1] 李林,李锦明,张文栋. 梳齿式微机械陀螺支撑系统的结构仿真与分析[J]. 传感技术学报,2006,19(4):1144-1147.
- [2] 陈伟平,王浩,韩天,等. 双自由度双解耦陀螺的结构设计与仿真[J]. 传感技术学报,2008,21(2):261-264.
- [3] 陈永,焦继伟,熊斌,等. 一种基于滑膜阻尼效应的新型微机械陀螺[J]. 中国机械工程,2004,15(2):103-105.
- [4] 张文栋,王建,薛晨阳,等. 基于共振隧穿二极管的 GaAs 悬臂式声传感器研究[J]. 传感技术学报,2006,19(5):2293-2296.
- [5] 张世林,牛萍娟,梁惠来,等. 量子共振隧穿二极管的频率特性与分析[J]. 半导体学报,2002,23(11):1192-1195.
- [6] 温廷敦,张文栋. 介观压阻效应[J]. 微纳电子技术,2003(7-8):41-43.
- [7] 毛海央,熊继军,张文栋,等. 共振隧穿二极管的压阻特性测试与研究[J]. 半导体学报,2006,27(10):1789-1793.
- [8] Mao Haiyang, Xiong Jijun, Zhang Wendong, et al. Piezoresistive Properties of Resonant Tunneling Diodes[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(10): 1789-1793.
- [9] Wen Tingdun, Zhang Wendong. Mesoscopic Piezoresistive Effect [J]. Micro Nano electronic technology, 2003, 40(7): 41-43.
- [10] Zhang Wendong, Wang Jian, Xue Chengyang, et al. Research of Cantilever Acoustic Sensor Based on Resonant Tunneling Diode [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 2293-2296.
- [11] 樊尚春,王路达,郭占社. 新型谐振式微机械陀螺设计与仿真[J]. 中国惯性技术学报,2009,17(1):63-66.
- [12] 邵蕴秋. ANSYS8.0 有限元分析[M]. 中国铁道出版社,2004.
- [13] 李锦明,郭慧芳,刘俊. 一种三框架电容式硅微机械陀螺结构设计及仿真[J]. 传感技术学报,2008,21(2):258-260.



王瑞(1985-),女,汉族,硕士研究生,主要研究方向为 MEMS 惯性器件的设计、制造及测试等,ruirongwang@live.cn;



石云波(1972-),男,汉族,在读博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为 MEMS、微惯性器件等,shiyunbo@nuc.edu.cn.