

文章编号 1004-924X(2025)12-1916-13

四质量高频三轴 MEMS 陀螺设计及制造

魏雯强¹, 田慧敏¹, 蔡 麒¹, 崔 让¹, 李豪冉¹, 曹慧亮^{2*}

(1. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051;

2. 北京理工大学 集成电路与电子学院, 北京 100081)

摘要:针对现有单片三轴陀螺抗干扰能力弱, 体积大的特点, 本文设计了一种四质量高频三轴 MEMS 陀螺, 与传统的陀螺相比, 该器件具有较高的谐振频率(~ 30 kHz), 结构尺寸仅为 $3\text{ mm} \times 2.56\text{ mm}$ 。本文对设计的陀螺敏感结构形式及工作原理进行了描述, 并通过多目标遗传算法对敏感结构梁宽进行优化使其工作模态谐振频率高于 30 kHz, 驱动模态与检测模态的频差小于 200 Hz, 采用三晶圆键合技术对其制造, 并使用扫频测试系统对其进行了表征。实验结果显示其驱动、X 轴、Y 轴、Z 轴检测模态的谐振频率和品质因数分别为 29 692 Hz/1 274, 31 290 Hz/354, 29 881 Hz/305 和 30 721 Hz/393。结果验证了设计及研究方法的正确性, 为高频三轴 MEMS 陀螺的研制提供了一种可行的方案。

关键词:微机电陀螺仪; 单片三轴; 高频; 多目标优化

中图分类号:TH703; TP212 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253312.1916

CSTR:32169.14.OPE.20253312.1916

Design and fabrication of a quad-mass high-frequency triaxial MEMS gyroscope

WEI Wenqiang¹, TIAN Huimin¹, CAI Qi¹, CUI Rang¹, LI Haoran¹, CAO Huiliang^{2*}

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: caohuiliang1986@126.com

Abstract: To address the limited interference resistance and large size of conventional monolithic triaxial gyroscopes, a novel quad-mass high-frequency triaxial MEMS gyroscope was presented. Compared with traditional gyroscopes, this device had a relatively higher resonance frequency (~ 30 kHz), and the size of the sensitive structure was only $3\text{ mm} \times 2.56\text{ mm}$. This paper described the sensitive structural form and working principle of the designed gyroscope. Moreover, the width of the beams of the sensitive structure was optimized through a multi-objective genetic algorithm to make the resonance frequency of the working mode higher than 30 kHz and the frequency difference between the drive mode and the sense mode less than 200 Hz. It was fabricated using a three-wafer bonding technology and characterized by a swept-frequency testing system. The experimental results show that the resonance frequencies and quality factors of its drive mode, X-axis, Y-axis, and Z-axis sense mode are 29 692 Hz and 1 274, 31 290 Hz and 354, 29 881 Hz and 305, 30 721 Hz and 393, respectively. The results verify the correctness of the design and

收稿日期: 2025-03-04; 修订日期: 2025-03-25.

基金项目: 国家重点研发计划 (No. 2022YFB3205000); 国家自然科学基金项目 (No. 52475586, No. U2230206)

research methods, and provide a feasible solution for the development of high-frequency triaxial MEMS gyroscopes.

Key words: MEMS gyroscope; monolithic triaxial; high-frequency; multi-objective optimization

1 引 言

微机械陀螺被广泛应用于组合导航系统、飞行器制导与控制、汽车安全与导航、机器人及医疗仪器等领域^[1-5],具有体积小、成本低、可靠性高、易于集成等特点^[6-9]。传统的三轴陀螺将三个单轴陀螺正交安装集成一个三轴陀螺系统^[10],这种系统通常体积大,误差大,由于安装误差的存在会降低陀螺精度。为了克服这些问题,同时顺应小型化的发展趋势,研究人员提出了在同一个芯片上集成三个离散的单轴陀螺,以此来降低芯片尺寸和制造成本,但是,整体尺寸仍然受到单个陀螺仪设计的限制。此外,每个陀螺以不同的谐振频率进行工作,导致电路的复杂程度和功耗较高。近年来,单驱动三轴陀螺的研发成为 MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 陀螺仪的一个重要发展方向^[11],单驱动三轴陀螺结构可以大大降低陀螺的尺寸和功耗,其研究和发展受到了 MEMS 行业的广泛关注。

针对单驱动三轴陀螺英国纽卡斯大学率先提出了一种环形单片三轴陀螺结构,该结构的驱动及 Z 轴检测原理同环形单轴陀螺相同,并利用面外运动进行 X/Y 轴的检测,但是其驱动位移小,轴间耦合大^[12]。针对此研究者开始研发线振动驱动陀螺以增大其驱动位移,并通过添加解耦梁的方式减小轴间耦合,韩国科技教育大学提出的三轴陀螺其工作模态谐振频率约为 16 kHz^[13],韩国蔚山大学提出的三轴陀螺谐振频率约为 17 kHz^[14],加州大学戴维斯分校的谐振频率约为 28 kHz^[15],韩国浦项科技大学的谐振频率为 22 kHz^[16],日本东芝公司约为 20 kHz^[17],印度博拉理工学院仅为 8 kHz^[18],意法半导体的谐振频率为 20 kHz^[19-20]。国内东南大学提出的三轴陀螺尺寸为 10 mm×10 mm,工作模态谐振频率约为 7 kHz^[21],北京航天控制仪器研究所提出的三轴陀螺尺寸为 11.4 mm×11.4 mm,工作模态谐振频率约为 8.5 kHz^[22]。

现有的单驱动三轴陀螺工作模态谐振频率处

于 7~17 kHz 范围,该频段极易受到外界环境振动干扰,导致测量精度下降。在航空航天领域,飞行器发动机运转、气流冲击等产生的振动频率多集中在 10~20 kHz,这使得现有陀螺难以稳定、精准地测量姿态角速率。在自动驾驶场景中,车辆行驶时路面颠簸、发动机振动等产生的干扰,同样影响陀螺的性能,进而影响车辆运动状态监测的准确性。因此本文提出了一种高频振动三轴陀螺,其工作模态谐振频率(~30 kHz)高于外部振动的频率(一般为 10~20 kHz)^[23]以降低对外部振动的敏感性,增强其抗干扰能力。此外高频器件的另一个好处是,由于弯曲件和检测质量块的尺寸较小可以有效减小设计尺寸。本文加工完成的三轴谐振陀螺其大小仅为 4 mm×4 mm,远小于国内三轴陀螺的大小(≥ 10 mm×10 mm)。

本文首先介绍了四质量高频三轴 MEMS 陀螺的结构形式及工作原理,随后考虑到复杂的几何结构,利用多目标遗传算法对结构进行参数优化,使其工作模态谐振频率大于 30 kHz,驱动与检测模态频差小于 200 Hz,并对优化的陀螺结构进行模态仿真,使用三晶圆键合技术对其进行加工,并使用扫频测试系统对其工作模态谐振频率及 Q 值进行了测试,结果显示其驱动、X 轴、Y 轴、Z 轴检测模态的谐振频率和品质分别为 29 692 Hz 和 1 274, 31 290 Hz 和 354, 29 881 Hz 和 305, 30 721 Hz 和 393 证明了该方法的可行性。

2 敏感结构设计及理论分析

2.1 谐振结构设计

本文设计的四质量高频三轴 MEMS 陀螺如图 1 所示,该结构整体由四个两两对称的质量块组成,四个质量块由四角的折叠弹簧梁彼此连接以实现同步运动,并且通过口字形梁连接到中心框架以实现面外翻转,该结构整体大小为 3 mm×2.56 mm,与传统的三轴振动陀螺相比,该敏感结构具有相对较高的工作模态谐振频率,因此可以显著地降低外部振动的敏感。

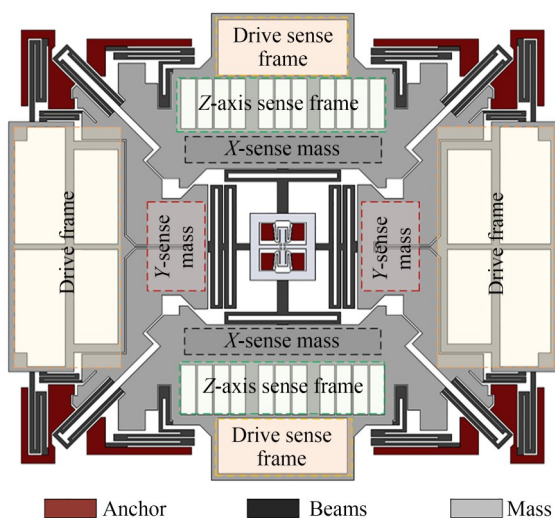


图 1 四质量高频三轴 MEMS 陀螺结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of quad-mass high-frequency triaxial MEMS gyroscope

振动陀螺工作原理为:位于左右两侧驱动框架的梳齿提供静电力使其质量块同时做朝向中心和远离中心的周期运动,上下质量块通过四周的耦合折叠梁做同步运动,因此其振型为周期性的膨胀和收缩,如图 2(a)所示,当有 Z 轴角速率输入时由于哥氏力的作用上下质量块发生扭转(面内运动),振型如图 2(b)所示,由质量块及固

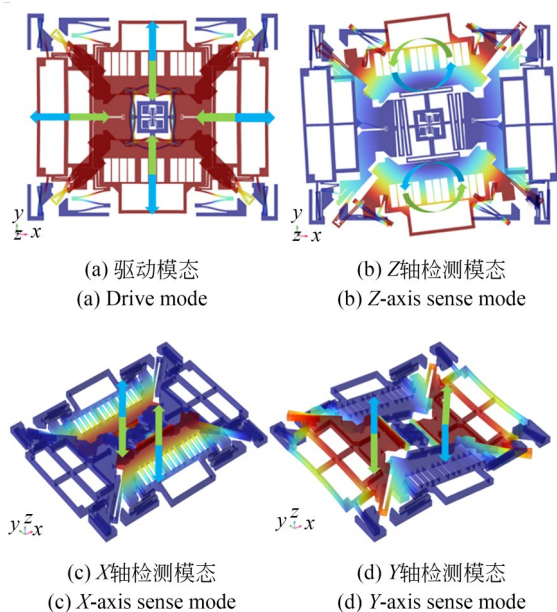


图 2 四质量高频三轴 MEMS 陀螺工作模式示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of the working modes of quad-mass high-frequency triaxial MEMS gyroscope

定电极组成的电容值发生变化,通过检测电容变化即可解算出角速率大小;当有 X/Y 轴角速率输入时,在哥氏力的作用下上下/左右质量块做面外翻转运动,振型如图 2(c)/(d)所示,由基底电极组成的电极对电容值发生变化,同理通过解算即可得出角速率的大小。

2.2 动力学模型的建立

MEMS 振动陀螺是以科氏效应为基本工作原理,体现为二阶质量、弹簧以及阻尼三者之间的能量转换,因此本文设计的四质量高频三轴 MEMS 陀螺的物理模型如图 3 所示。

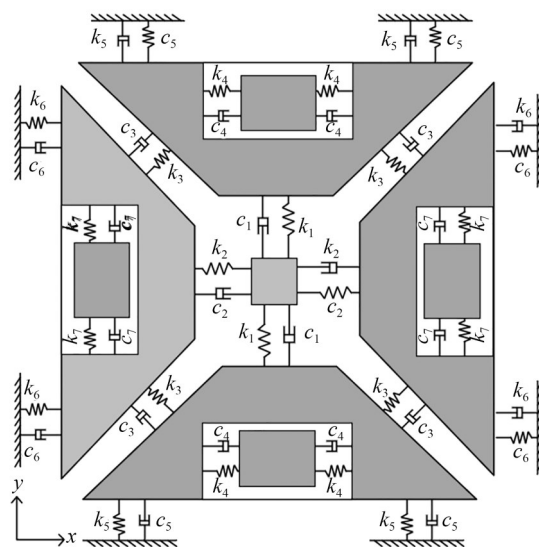


图 3 四质量高频三轴 MEMS 陀螺物理模型

Fig. 3 Physical model of quad-mass high-frequency triaxial MEMS gyroscope

本节对该陀螺的动力学进行了分析,假设其驱动广义坐标为 q ,且其所受的驱动力为 $F_d \sin(\omega_d t)$,则其驱动模式动力学方程可表示为:

$$m_d \ddot{q} + c_d \dot{q} + k_d q = F_d \sin(\omega_d t), \quad (1)$$

其中: m_d, c_d, k_d, ω_d 分别表示驱动模式的有效质量、阻尼、刚度及谐振模式角频率,且 $k_d = 2k_{1y} + 2k_{2x} + 4k_3 + 4k_{5x} + 4k_6$ 。

陀螺在闭环驱动控制电路的作用下,做位移为 q 的稳幅振动,输入 Z 轴角速度时,质量块受科氏力的作用绕 Z 轴做扭摆振动,振动幅度与输入角速度成正比,如图 4 所示,取 Z 轴检测质量块上一质量微元 dm ,振动单元的速度为 $v = \dot{q}$,对其进行计算。

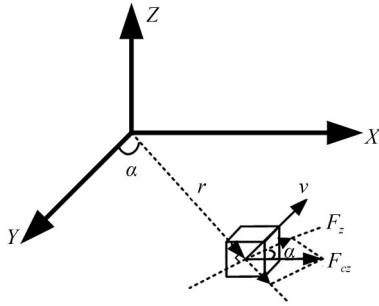


图 4 Z轴检测质量块上一微元

Fig. 4 A microelement of Z-axis sense mass

若 Z 轴输入的角速度为 Ω_z , 则其所受的科氏力大小为:

$$dF_{cz} = -2\dot{q}\Omega_z dm. \quad (2)$$

假设质量块-转动中心连线与 Y 轴的夹角为 α , 且该模态振型为绕中心转动, 则其有效科氏力为与力臂 r 垂直的分量即 $F_{cz}\cos\alpha$, 则科氏力矩为:

$$dM_{cz} = -r\cos\alpha dF_{cz}. \quad (3)$$

对整个质量块进行积分, 可得 Z 轴检测模态的科氏力矩为:

$$M_{cz} = \int dM_{cz} = 2\dot{q}\Omega_z \int r\cos\alpha dm = 2m_z r_z \Omega_z \dot{q}, \quad (4)$$

其中: m_z 为 z 轴检测模态的有效质量, r_z 为等效距离, 假设微元 dm 在以该结构为原心的笛卡尔坐标系中的位置为 (x, y) , 则有:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (5)$$

$$\cos\alpha = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (6)$$

因此等效距离 r_z 计算方法为:

$$r_z = \frac{\int y dm}{m_z}. \quad (7)$$

m_z 则通过对 Z 轴检测质量块的质量微元 dm 积分的得到, 即:

$$m_z = \int dm. \quad (8)$$

同理进行 Y 轴检测模态科氏力矩的推导, 如图 5 所示, 取 Y 轴检测质量块上一质量微元 dm , 若 Y 轴输入角速度为 Ω_y , 则其所受的科氏力大小为:

$$dF_{cy} = -2\dot{q}\Omega_y dm. \quad (9)$$

假设质量块-转动中心连线与 X 轴的夹角为

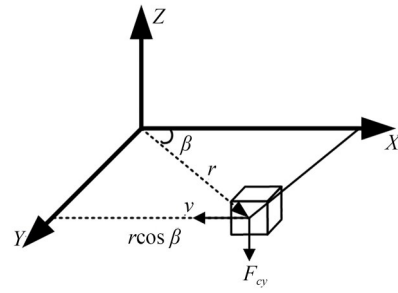


图 5 Y轴检测质量块上一微元

Fig. 5 A microelement of Y-axis sense mass

β , 且该模态振型为绕 Y 轴的面外摆动, 则其有效科氏力矩的有效力臂为垂直于 Y 轴的分量即 $r\cos\beta$, 则科氏力矩为:

$$dM_{cy} = -r\cos\beta dF_{cy}. \quad (10)$$

对整个质量块进行积分, 可得 Y 轴检测模态的科氏力矩为:

$$M_{cy} = \int dM_{cy} = 2\dot{q}\Omega_y \int r\cos\beta dm = 2m_y r_y \Omega_y \dot{q}, \quad (11)$$

其中: m_y 为 Y 轴检测模态的有效质量, r_y 为等效距离, X 轴检测的情况同 Y 轴类似, 因此该三轴陀螺的动力学方程式为:

$$\begin{cases} m_d \ddot{q} + c_d \dot{q} + k_d q = F_d \sin(\omega_d t) \\ I_x \ddot{\theta}_x + c_x \dot{\theta}_x + k_x \theta_x = 2m_x r_x \Omega_x \dot{q} \\ I_y \ddot{\theta}_y + c_y \dot{\theta}_y + k_y \theta_y = 2m_y r_y \Omega_y \dot{q} \\ I_z \ddot{\theta}_z + c_z \dot{\theta}_z + k_z \theta_z = 2m_z r_z \Omega_z \dot{q} \end{cases} \quad (12)$$

其中: $k_x = 2k_{1x} + 4k_{3x} + 4k_{5x}$; $k_y = 2k_{2y} + 4k_{3y} + 4k_{5y}$; $k_z = 2k_{1z} + 4k_{3z} + 4k_{5z}$, 对式 (12) 中的驱动模态动力学方程进行求解, 当驱动力频率与该结构驱动模态谐振频率相等时其驱动幅值达到最大为:

$$A_d = \frac{F_d Q_d}{k_d}, \quad (13)$$

其中: Q_d 为驱动模态品质因数, 由此式可知通过增大驱动力及驱动模态的 Q 值可增大驱动幅值。

对式 (12) 中的 X 轴检测模态动力学方程进行求解得其转动角度振幅:

$$\Theta_x = \frac{2m_x r_x \Omega_x \omega_d A_d}{I_x \sqrt{(\omega_x^2 - \omega_d^2)^2 + \left(\frac{\omega_x \omega_d}{Q_x}\right)^2}}. \quad (14)$$

对于开环检测其机械灵敏度 S_x 可以用转动角度振幅与输入角速度之比表征, 因此其机械灵

灵敏度为:

$$S_x = \frac{\Theta_x}{\Omega_x} = \frac{2m_x r_x \omega_d A_d}{I_x \sqrt{(\omega_x^2 - \omega_d^2)^2 + \left(\frac{\omega_x \omega_d}{Q_x}\right)^2}}. \quad (15)$$

由此式可知通过增大驱动幅值及缩小检测模态与驱动模态的频差有效提高其机械灵敏度, Y/Z轴检测的机械灵敏度与X轴类似, 因此不再进行赘述。

3 敏感结构优化及仿真

3.1 敏感结构优化

MOGA 方法(多目标遗传算法)是基于受控精英概念的流行 NSGA-II(非支配排序遗传算法 II)的变体。它支持多个目标和约束, 旨在寻找全局最优解。NSGA-II 算法使用快速非支配排序算法和拥挤距离比较算子的技术对种群中的不同个体进行排序, 迫使个体向 Pareto 前沿收敛并沿着 Pareto 前沿扩散。它还结合了精英策略的特点, 有效防止了最佳个体的丢失, 提高了算法的速度和鲁棒性^[24-25]。

与常规有限元迭代优化相比, MOGA 在陀螺敏感结构优化中展现出独特优势。常规有限元迭代优化处理多目标时, 常把多个目标合并成一个综合目标函数, 通过加权求解。但权重难以精准确定, 不同权重设置下得到的结果差异大, 且一次优化仅能得出一个解, 无法全面呈现多目标间的权衡情况。而 MOGA 能直接处理多个目标, 一次优化就能得到一组 Pareto 最优解, 清晰展示不同目标间的平衡关系, 为陀螺设计提供丰富多样的选择。比如在本研究中, 能同时满足工作模态谐振频率高于 30 kHz 且驱动与检测模态频差小于 200 Hz 等多个目标要求, 为设计提供了极大的灵活性。

常规有限元迭代优化基于梯度下降等局部搜索策略, 很容易陷入局部最优解。一旦搜索进入某个局部最优区域, 由于其依赖局部信息进行迭代, 很难跳出当前区域去寻找更优解。然而 MOGA 模拟自然遗传过程, 借助选择、交叉和变异操作, 在整个解空间进行搜索, 不依赖梯度信息。这使得它具备强大的全局搜索能力, 能有效

避免陷入局部最优, 更有可能找到全局最优解。在陀螺结构优化中, 可充分探索梁宽等参数的各种组合, 挖掘出性能更优的设计方案。

对于陀螺敏感结构这种参数众多、关系复杂的优化问题, 常规有限元迭代优化需要精确的数学模型和梯度信息来进行迭代计算, 实现过程繁琐, 计算效率较低。而 MOGA 对数学模型的要求相对较低, 不需要精确的梯度计算。它通过群体进化操作, 能够有效处理参数间的复杂关系, 快速找到满足设计要求的结构参数组合, 大大提高了优化效率, 让复杂的陀螺结构优化得以高效实现。

在对敏感结构进行优化设计时首先要确定优化模型三要素, 即设计变量、约束条件以及目标函数^[26-27]。

3.1.1 确定设计变量

由于本文提出的三轴振动陀螺的结构形式复杂, 为避免参数优化过程中导致的定义失效, 本文将影响该敏感结构的梁宽作为变量并进行参数化建模, 其各参数设定如图 6 所示。

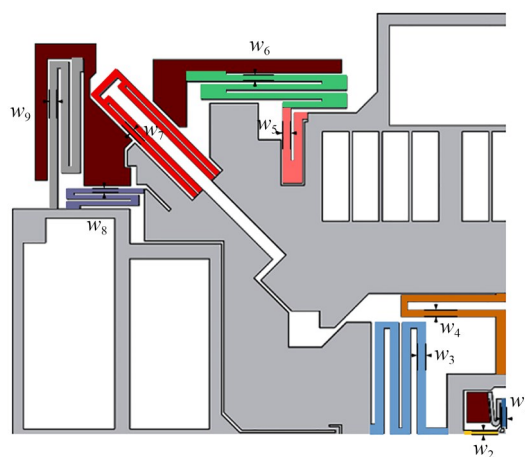


图 6 结构参数变量

Fig. 6 Structural parameter variables

3.1.2 确定约束条件

综合考虑三轴振动陀螺的设计要求以及实际加工情况, 实际变量应该满足如下条件:

$$l_i \leq w_i \leq h_i, i = 1, 2, 3, \dots, \quad (16)$$

其中: l_i 和 h_i 为设计变量的上限和下限, 具体在本文中其下限为 10 μm , 除 w_3, w_4, w_7 的上限为

30 μm 外,其余上限均为 20 μm。

3. 1. 3 确定目标函数

为降低对外部环境的敏感性,增强其抗干扰能力本文所设计的陀螺工作谐振频率应该设定在 30 kHz 以上,高于外部振动的频率范围,由式 (15)可知陀螺的机械灵敏度受驱动模态与检测模态频差的影响,其频差越小灵敏度越大,因此其频差应小于 200 Hz,所以选取其工作模态谐振频率及驱动模态与检测模态的频差为目标函数,因此其目标函数为:

$$\begin{cases} f_1(x)=f_d\geqslant 30\,000 \\ f_2(x)=f_x\geqslant 30\,000 \\ f_3(x)=f_y\geqslant 30\,000 \\ f_4(x)=f_z\geqslant 30\,000 \\ f_5(x)=|f_2-f_1|\leqslant 200 \\ f_6(x)=|f_3-f_1|\leqslant 200 \\ f_7(x)=|f_4-f_1|\leqslant 200 \end{cases}.$$

(17)

确定了优化模型三要素后即对其进行优化分析,三轴振动陀螺的优化设计流程如图 7 所示,其具体流程为首先根据变量设计情况利用三维建模软件对结构进行参数化建模,随后利用有限元分析软件对其进行仿真分析,之后使用多目标遗传算法对其进行寻优,最后找到合适的参数。

经过寻优,确定关键梁宽如表 1 所示。

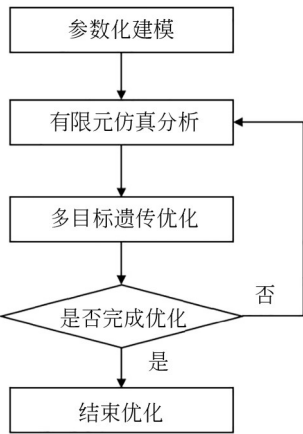


图 7 三轴 MEMS 陀螺参数优化设计流程

Fig. 7 Parameter optimization design process of triaxial MEMS gyroscope

表 1 三轴 MEMS 陀螺优化后参数

Tab. 1 Parameters of the triaxial MEMS gyroscope after optimization

参数	数值/μm	参数	数值/μm
w_1	14	w_2	11
w_3	24.53	w_4	19.77
w_5	19.85	w_6	14.01
w_7	25.47	w_8	12.79
w_9	15.15		

3. 2 模态仿真

为验证优化后三轴振动陀螺敏感结构是否符合要求,本文对优化后的三轴陀螺重新建模并进行模态仿真分析。

模态分析可以确定结构的振动特性,如固有频率以及振型等^[28],优化后敏感结构的模态仿真结果显示,其四个工作模态位于振动模态的前四阶,其谐振频率及驱动模态与检测模态的频差如表 2 所示,振型如图 2 所示,其工作模态谐振频率均大于 30 kHz,驱动与检测模态频差均小于 150 Hz。在结构设计时,需要保证工作模态与干扰模态的频差尽可能地大以减小模态间的相互干扰,优化后的第五阶模态谐振频率为 33 259 Hz,与工作模态的频差为 2 996 Hz,以上仿真结果表明该结构既可以避免模态干扰也能保证拥有较高的灵敏度。

表 2 仿真工作模态谐振频率及与驱动模态频差

Tab. 2 Simulated resonance frequencies of the working modes and frequency differences from the drive mode

模态	仿真谐振频率/Hz	与驱动模态频差/Hz
驱动模态	30 263	—
X 轴检测模态	30 173	90
Y 轴检测模态	30 125	137
Z 轴检测模态	30 116	147

4 敏感结构的制备

本文设计的四质量高频三轴 MEMS 陀螺使用三晶圆键合技术加工制造完成。其工艺流程制备图如图 8 所示,主要包含如下步骤:

(a) 使用深反应离子刻蚀对基底晶圆进行刻蚀,并填充 SiO₂使其形成面外电极及锚点基座;

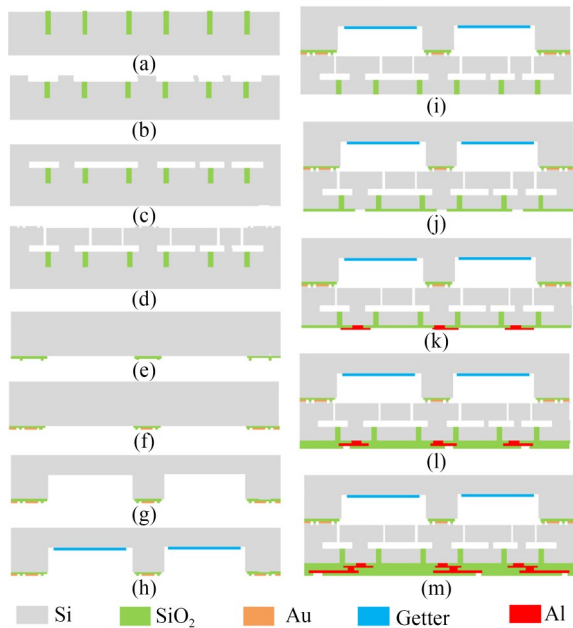


图8 加工工艺流程示意图

Fig. 8 Process flow diagram

- (b) 对基底晶圆进行刻蚀以形成锚点；
- (c) 将基底晶圆与器件层晶圆进行硅-硅键合,并将其减薄至 60 μm ；
- (d) 基底晶圆刻蚀金-硅键合层及敏感结构；
- (e) 在盖板晶圆上进行绝缘层及流动截止层的制备,流动截止层用于避免金-硅键合过程中金属的溢流；
- (f) 盖板晶圆进行金-硅键合金属层的制备；
- (g) 盖板晶圆空腔刻蚀；
- (h) 在盖板晶圆进行吸气剂制备；
- (i) 在类真空环境下进行金-硅键合完成晶圆级真空封装,并将基底晶圆减薄至露出氧化绝缘层；
- (j) 沉积第一层 SiO₂并图形化；
- (k) 沉积第一层金属 Al并图形化,完成第一层引线制备；
- (l) 沉积第二层 SiO₂并图形化；
- (m) 沉积第二层金属 Al并图形化,完成第二层引线制备,最后沉积一层 SiO₂并图形化,露出焊盘完成制备。

制备完成的谐振结构整体如图 9 所示,其大小为 4 mm $\times$ 4 mm,为验证陀螺结构的完整性,使用丹东奥龙射线仪器集团有限公司的 X 射线仪器(如图 10(a)所示)对键合后的谐振结构进行

观测其结果如图 10(b)所示。

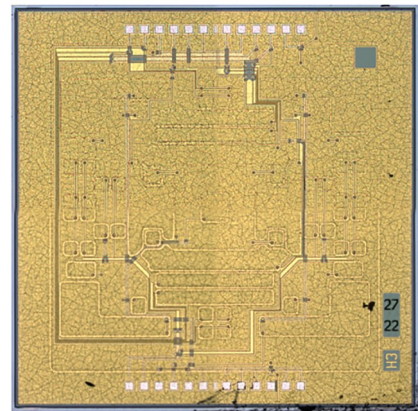


图9 加工完成的敏感结构

Fig. 9 Fabricated sensitive structure

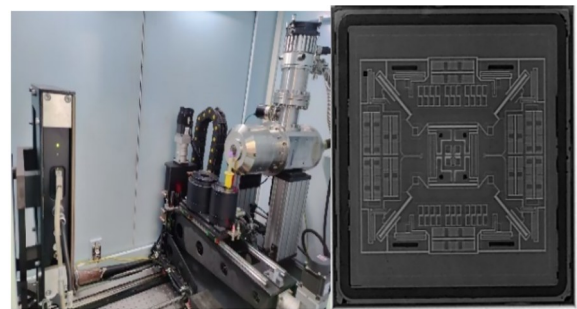


图10 X射线观测仪(a)及观测到的敏感结构(b)

Fig. 10 X-ray observation instrument (a) and observed sensitive structure (b)

5 敏感结构的表征

为测试加工完成的四质量高频三轴 MEMS 陀螺的谐振频率和品质因数,本文搭建了如图 11 所示的扫频测试系统,其由两个直流电源、锁相放大器以及测控电路构成,其中一台直流电源向谐振结构提供 17.5 V 的直流电压,另一台电源向测控电路提供 8 V 的供电电压,在进行扫频时锁相放大器通过测控电路向陀螺发送幅值为 1 V 的不同频率的交流电信号,敏感结构在直流和交流产生的驱动力作用下发生振动,进而引起检测电容的变化,其通过测控电路将电容信号转化为电压信号并传送给锁相放大器,其测试得到的幅频特性曲线如图 12 所示。

MEMS 陀螺的品质因数常见的测试方法为时域法与幅频特性法,由于本文对其进行了扫频

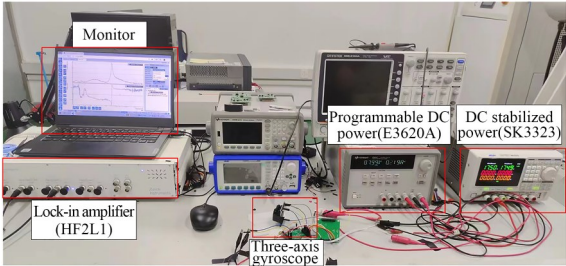


图 11 扫频测试系统

Fig. 11 Sweep-frequency testing system

分析,因此采用幅频特性法进行品质因数的计算,其具体计算方法为:幅频特性曲线的最高点对应的谐振频率为 f_0 ,幅值下降 3 dB 时的对应的两个频率点为 f_l 和 f_h ,则其品质因数为^[29]:

$$Q=\frac{f_0}{f_h-f_l}.$$

(18)

根据该计算方法,该振动陀螺的谐振频率及品质因数如表 3 所示。

表 3 工作模态谐振频率及品质因数测试结果

Tab. 3 Test results of the resonance frequencies of the working modes and the quality factors

模式	谐振频率/Hz	Q 值
驱动模式	29 692	1 274
X 轴检测	31 290	354
Y 轴检测	29 881	305
Z 轴检测	30 721	393

通过分析可知,其工作模态谐振频率测试结果与仿真结果最大相差 1.2 kHz,且驱动模态与检测模态频差最大值为 1.6 kHz,经分析加工误差可能是导致这一差异的核心因素,在深硅刻蚀的过程中,难以确保完全垂直,微小的刻蚀倾角

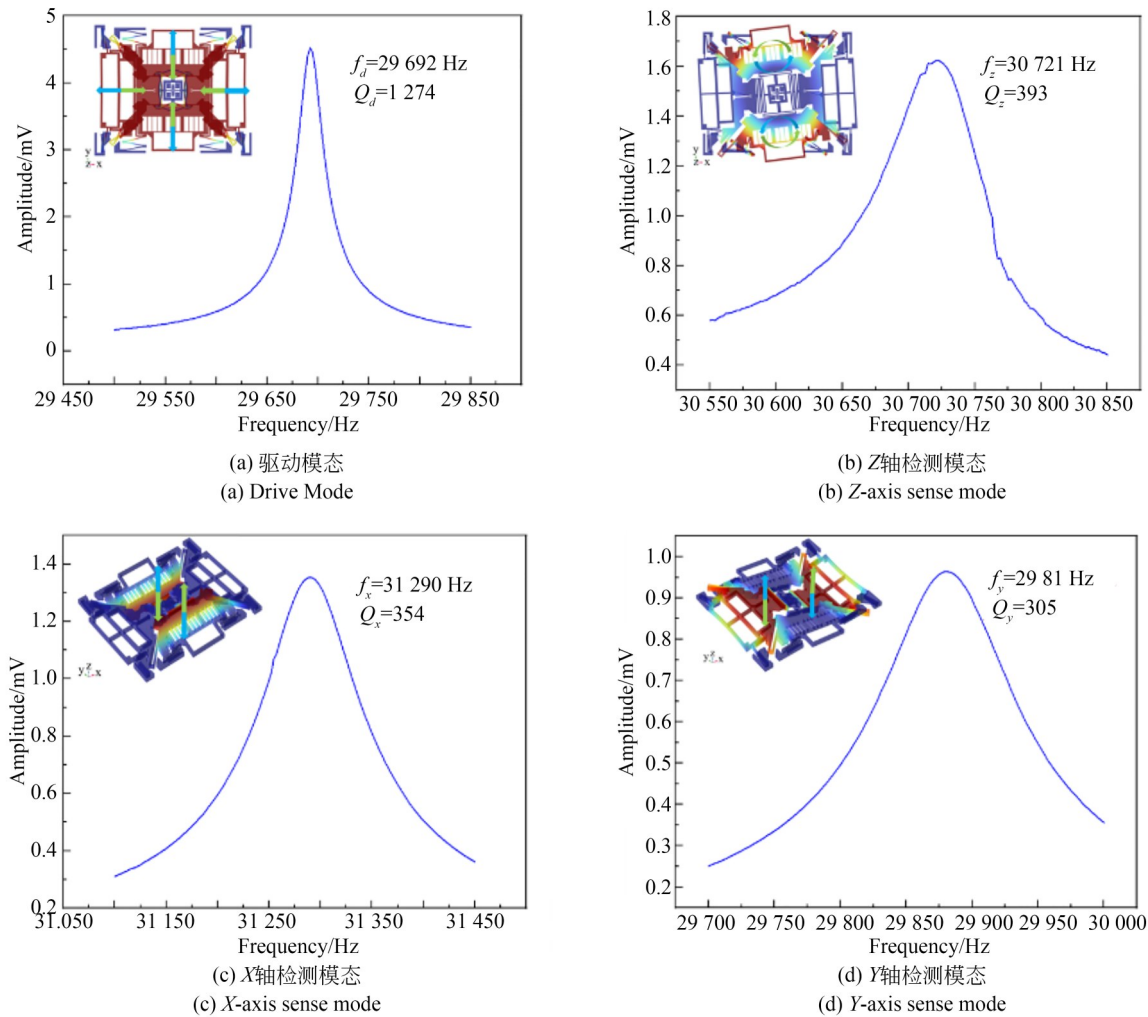


图 12 三轴 MEMS 陀螺幅频特性曲线

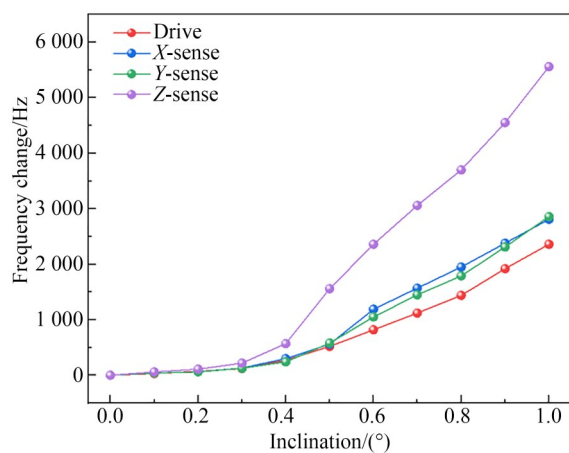
Fig. 12 Amplitude-frequency characteristic curves of the triaxial MEMS gyroscope

会对质量块和弹簧梁的实际几何形状与位置造成改变,本文通过有限元仿真软件对结构进行建模,对刻蚀倾角 $0^{\circ}\sim 1^{\circ}$ 进行了仿真分析,其对工作模式谐振频率及检测模式与驱动模式的频差的影响如图 13 所示。

图 13(a)展示了刻蚀倾角对工作模式谐振频率的影响。可以清晰地看到,随着刻蚀倾角的变化其对 Z 轴检测模式的频率变化最明显。图 13(b)呈现的是刻蚀倾角对检测模式与驱动模式频差的影响。在刻蚀倾角较小时,各检测模式与驱

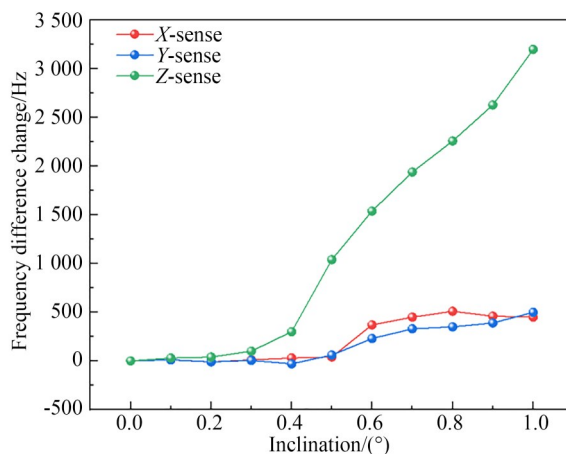
动模式的频差变化较小,但当刻蚀倾角超过一定值后,频差开始明显增大。由此可见,刻蚀倾角对频差有着不可小觑的影响,是导致实测频差远超仿真值的重要原因之一。

在结构加工的过程中由于晶圆键合过程以及制造环节等会产生热应力和机械应力,其改变材料的弹性性能,进而影响弹性模量,本文通过仿真模拟材料在不同应力水平下的情况,其对工作模式谐振频率及检测模式与驱动模式的频差的影响如图 14 所示,从图中可以看出材料应力



(a) 刻蚀倾角对工作模式谐振频率的影响

(a) Influence of etching tilt angle on the resonant frequency of the working mode

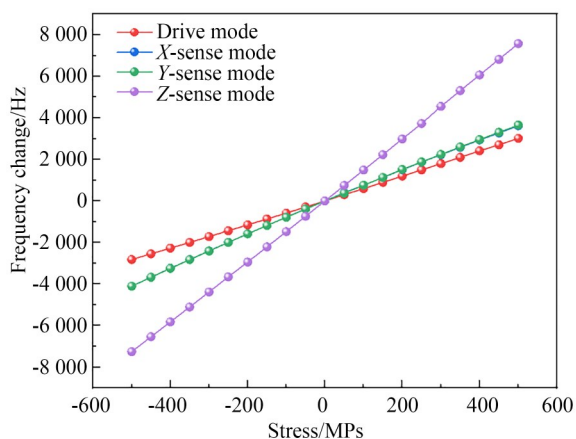


(b) 刻蚀倾角对检测模式与驱动模式频差的影响

(b) Influence of etching tilt angle on the frequency difference between the sense mode and the drive mode

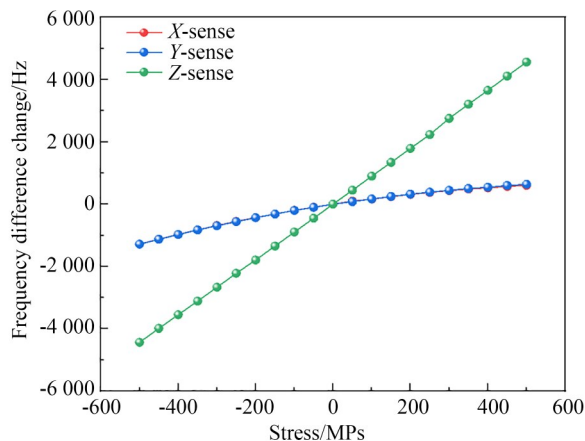
图 13 刻蚀倾角对工作模式谐振频率及检测模式与驱动模式的频差的影响

Fig. 13 Influence of etching tilt angle on the resonant frequency of working mode and the frequency difference between sense mode and drive mode



(a) 应力对工作模式谐振频率的影响

(a) Influence of stress on the resonant frequency of the working mode



(b) 应力对检测模式与驱动模式频差的影响

(b) Influence of stress on the frequency difference between the sense mode and the drive mode

图 14 应力对工作模式谐振频率及检测模式与驱动模式的频差的影响

Fig. 14 Influence of stress on the resonant frequency of working mode and the frequency difference between sense mode and drive mode

是致使频差异常增大的关键潜在因素,对陀螺性能的一致性可能产生严重影响。

为了有效降低刻蚀倾角对频差的影响,我们计划对刻蚀工艺参数展开精细化调整。通过精确控制刻蚀气体流量、射频功率以及反应腔压强等关键参数,提升刻蚀的垂直度。为减小应力对其影响,我们计划在键合之前,对晶圆进行退火

预处理,以此消除部分初始应力。在键合过程中,严格精确控制键合温度和压力的上升、下降速率,避免温度和压力的急剧变化产生过大的热应力和机械应力,以此有效减小实测驱动与检测模态频差,使其与仿真值更为接近,从而进一步提升陀螺的整体性能指标。与国内外的三轴陀螺的对比情况如表 4 所示。

表 4 与国内外单驱动三轴陀螺的比较

Tab. 4 Comparison with domestic and foreign single-drive triaxial gyroscopes

单位	结构尺寸/ mm ²	轴向	谐振频率/kHz	Q 值	单位	结构尺寸/ mm ²	轴向	谐振频率/kHz	Q 值
韩国科技教育大学 ^[13]	1.426×1.426	驱动	13.892	12 000	印度博拉理工学院 ^[18]	2.7×2.7	驱动	7.826 2	—
		X 轴	16.404	500			X 轴	7.311 7	—
		Y 轴	16.214	500			Y 轴	8.725 8	—
韩国蔚山大学 ^[14]	2×2	Z 轴	15.398	2 000	东南大学 ^[21]	10×10	Z 轴	8.564	—
		驱动	16.9	720			驱动	6.950 2	455
		X/Y 轴	16.47	4 370			X 轴	7.034 2	109
美国加州大学戴维斯分校 ^[15]	3.2×3.2	Z 轴	17.04	3 922	北京航天控制仪器研究所 ^[22]	6.5×6.5	Y 轴	7.040 5	107
		驱动	27.964	9 840			Z 轴	7.054 4	66
		X 轴	25.901	927			驱动	8.798	3412
韩国浦项科技大学 ^[16]	1.7×1.7	Y 轴	27.115 5	989	本文	3×2.56	X 轴	8.470	845.5
		Z 轴	30.559	6 744			Y 轴	8.450	564.3
		驱动	22.727	106			Z 轴	8.258	274 6
日本东芝公司 ^[17]	2.85×2.05	X/Y 轴	22.831	—			驱动	29.692	127 4
		Z 轴	17.241	—			X 轴	31.290	354
		驱动	20.6	—			Y 轴	29.881	305
		X 轴	24.2	—			Z 轴	30.721	393
		Y 轴	24.8	—					
		Z 轴	24.2	—					

并且该振动陀螺的品质因数整体较低,分析其原因可能是陀螺的真空度不高导致陀螺的空气阻尼较大。在未来的研究中我们拟通过提高键合真空度、增大吸气剂面积解决真空度较低的问题,通过增加调频电极等方式减小频差,以提高陀螺的灵敏度。

6 结 论

本文提出了一种四质量高频三轴 MEMS 陀螺,对其结构形式及工作原理进行了描述,并通过多目标遗传算法对该结构进行了优化使其工作模态谐振频率大于 30 kHz,驱动模态与检测模

态频差小于 200 Hz,使用三晶圆键合技术完成了敏感结构的制备,通过扫频法进行测试,其驱动、X 轴、Y 轴和 Z 轴检测模态的谐振频率及 Q 值分别为 29 692 Hz/1 274, 31 290 Hz/354, 29 881 Hz/305 和 30 721 Hz/393。

与国内外的三轴陀螺相比,本设计的四质量高频三轴 MEMS 陀螺在工作模态谐振频率方面具有一定优势,达到了接近 30 kHz 的设计目标,高于部分国际同类产品。在结构尺寸上,仅为 3 mm×2.56 mm,相较于一些国内陀螺,具有更好的小型化特性,在对空间要求苛刻的应用场景中更具竞争力。然而,在品质因数方面,与国际顶尖水平仍有差距,国际先进的高频

陀螺品质因数可达数千甚至更高,而本陀螺的品质因数整体较低,这限制了其测量精度和稳定性。此外,驱动与检测模态频差较大,仍有进一步优化的空间。未来,将持续改进工艺,提升真空度、优化结构设计并增加调频电极等,以缩小与国际先进水平的差距,进一步提升陀螺性能。

参考文献:

- [1] JIANG B, JIAO J, LI Y X, *et al.* An eight-mass MEMS gyro with area-variable comb capacitance [C]. 2024 IEEE 19th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS). May 2-5, 2024, Kyoto, Japan. IEEE, 2024: 1-4.
- [2] WANG C X, WU K, WANG X Y, *et al.* A MEMS disk gyroscope with high fabrication precision, high quality factor ($>810k$) and high overload characteristic ($>15\ 000\ g$) [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2740(1): 012062.
- [3] YANG Y J, SONG Y K, YAN X, *et al.* Low stress packaging of the small three-axis gyro [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2740(1): 012020.
- [4] LI K, CUI R, CAI Q, *et al.* A fusion algorithm for real-time temperature compensation and noise suppression with a double U-beam vibration ring gyroscope [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(6): 7614-7624.
- [5] TIAN H M, ZHANG Z H, LIU L, *et al.* Design and implementation of a CMOS-MEMS out-of-plane detection gyroscope [J]. *Micromachines*, 2024, 15(12): 1484.
- [6] 高阳, 贾佳, 孟琳, 等. MEMS速率陀螺仪力平衡控制回路相位误差分析与验证[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(20): 3059-3070.
- GAO Y, JIA J, MENG L, *et al.* Analysis and verification of phase error in force balance control loop of MEMS rate gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(20): 3059-3070. (in Chinese)
- [7] LI-XIA, LUO Z Z. Design and implementation of low temperature drift suppression for micro-machined gyroscope [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2024, 19(11): 1141-1147.
- [8] WANG F J, SU R, LIN S Q. Research on low temperature drift suppression of micro-machined gyroscope based on self-calibration technology [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2024, 19(1): 22-28.
- [9] 陈光武, 李文元, 于月. 基于模糊间隔阈值EMD的微机械陀螺消噪[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4): 922-931.
- CHEN G W, LI W Y, YU Y. MEMS gyro denoising based on fuzzy interval threshold EMD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 922-931. (in Chinese)
- [10] ZHAO W L, CHENG Y X, ZHAO S H, *et al.* Navigation grade MEMS IMU for A satellite [J]. *Micromachines*, 2021, 12(2): 151.
- [11] 魏雯强, 鲁征浩, 陈方, 等. 芯片级多轴集成微陀螺方案对比与发展趋势分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2023, 31(9): 932-939, 954.
- WEI W Q, LU Z H, CHEN F, *et al.* Comparison and development trend analysis of chip level multi axis integrated MEMS gyroscope [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2023, 31(9): 932-939, 954. (in Chinese)
- [12] GALLACHER B J, BURDESS J S, HARRIS A J. Principles of a three-axis vibrating gyroscope [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(4): 1333-1343.
- [13] IQBAL F, DIN H, LEE B. Single drive multi-axis gyroscope with high dynamic range, high linearity and wide bandwidth [J]. *Micromachines*, 2019, 10(6): 410.

作者贡献声明:

魏雯强:实验数据分析,论文构思和撰写;
田慧敏:调查研究,仿真分析;
蔡麒:结构建模;
崔让:数据测试;
李豪冉:测控系统;
曹慧亮:论文审核与指导。

- [14] JEON Y, KWON H, KIM H C, *et al.* Design and development of a 3-axis micro gyroscope with vibratory ring springs[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 87: 975-978.
- [15] SONMEZOGLU S, TAHERI-TEHRANI P, VALZASINA C, *et al.* Single-structure micromachined three-axis gyroscope with reduced drive-force coupling[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 36(9): 953-956.
- [16] SEOK S, MOON S, KIM B, *et al.* Design, analysis and experimental results of micromachined single-structure triaxis vibratory gyroscope with advanced coupling mechanism[J]. *Sensors and Materials*, 2018, 30(12): 2823.
- [17] YUZAWA A, GANDO R, MASUNISHI K, *et al.* A 3-Axis Catch-and-release gyroscope with pantograph vibration for low-power and fast start-up applications[C]. 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII). June 23-27, 2019, Berlin, Germany. IEEE, 2019: 430-433.
- [18] CHABBI P, RAO V K P. Design and fabrication of single drive tri-axis MEMS gyroscope[J]. *Measurement*, 2024, 227: 114307.
- [19] VIGNA B. Tri-axial MEMS gyroscopes and six degree-of-freedom motion sensors[C]. 2011 International Electron Devices Meeting, December 5-7, 2011, Washington, DC, USA. IEEE, 2011: 29.1.1-29.1.3.
- [20] PRANDI L, CAMINADA C, CORONATO L, *et al.* A low-power 3-axis digital-output mems gyroscope with single drive and multiplexed angular rate readout[C]. 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference. February 20-24, 2011, San Francisco, CA, USA. IEEE, 2011: 104-106.
- [21] XIA D Z, XU L. Coupling mechanism analysis and fabrication of triaxial gyroscopes in monolithic MIMU[J]. *Micromachines*, 2017, 8(10): 310.
- [22] 邢朝洋, 赵克, 徐宇新. 单片集成三轴微机电陀螺仪[J]. *导航与控制*, 2017, 16(2): 58-63.
- XING C Y, ZHAO K, XU Y X. Monolithic integrated tri-axis MEMS gyroscope[J]. *Navigation and Control*, 2017, 16(2): 58-63. (in Chinese)
- [23] WISHER S, SHAO P, NOROUZPOUR-SHIRAZI A, *et al.* A high-frequency epitaxially encapsulated single-drive quad-mass tri-axial resonant tuning fork gyroscope[C]. 2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). January 24-28, 2016, Shanghai, China. IEEE, 2016: 930-933.
- [24] 杨照林, 陈观慈, 张文斌, 等. 基于BP神经网络和NSGA-II算法的直流电磁泵结构优化[J]. *兵器装备工程学报*, 2025, 46(1): 182-190.
- YANG Z L, CHEN G C, ZHANG W B, *et al.* Structure optimization of DC-EMP based on BP neural network and NSGA-II algorithm[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2025, 46(1): 182-190. (in Chinese)
- [25] 钟飞, 徐丁宜. 一种改进NSGA-II算法的多目标优化研究与应用[J]. *机床与液压*, 2024, 52(22): 133-142.
- ZHONG F, XU D Y. Research and application of multi-objective optimization for an improved NSGA-II algorithm[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2024, 52(22): 133-142. (in Chinese)
- [26] 王海东, 李贵林, 王肇喜, 等. 基于多目标遗传算法的三轴振动夹具结构参数优化设计分析[J]. *航天器环境工程*, 2020, 37(2): 154-160.
- WANG H D, LI G L, WANG Z X, *et al.* Structural optimization design and analysis of triaxial vibration fixture based on multi-objective genetic algorithm[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2020, 37(2): 154-160. (in Chinese)
- [27] 李有堂, 连虎强. BFPC立柱结构仿生多目标优化设计[J]. *现代制造工程*, 2024(12): 87-93, 107.
- LI Y T, LIAN H Q. Bionic multi-objective optimization design of BFPC column structure[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2024(12): 87-93, 107. (in Chinese)
- [28] 寇志伟, 曹慧亮, 石云波, 等. 电容式环形微机电振动陀螺的设计[J]. *光学精密工程*, 2019, 27

(4): 842-848.

KOU Z W, CAO H L, SHI Y B, *et al.* Development of capacitive MEMS vibrating ring gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27 (4): 842-848. (in Chinese)

[29] MEMS 惯性器件芯片在片测试技术要: SJ 21262-2018 [S]. 2018.

Technical Requirements for MEMS Inertial Device Chip Measurement on Wafer: SJ 21262-2018 [S]. 2018. (in Chinese)

作者简介:



魏雯强(1997—),男,山西孝义人,博士研究生,2019年于中北大学获得工学学士学位,现就读于中北大学仪器与电子学院,主要从事MEMS惯性器件研究。E-mail: wenqiang1997@126.com

通讯作者:



曹慧亮(1986—),男,河北石家庄人,工学博士,2014年于东南大学获博士学位,2011-2012年赴美国佐治亚理工学院留学。现为北京理工大学集成电路与电子学院教授、博士生导师,主要从事MEMS传感器方面的研究。E-mail: caohuiliang1986@126.com