

【引用格式】戴毓含, 马权坤, 邱翔, 等. 基于异质多维集成的微型三分量磁通门传感器[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(6): 580-587.

基于异质多维集成的微型三分量磁通门传感器

戴毓含¹, 马权坤¹, 邱翔^{2, 3, 4}, 吴涛⁵, 孙学成^{2, 3, 4}, 雷冲^{1, *}

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院 微纳电子学系 微米纳米加工技术全国重点实验室, 上海 200240; 2. 上海大学 机电工程与自动化学院 微电子研发中心, 上海 200444; 3. 教育部高级显示与系统应用重点实验室, 上海 200072; 4. 贵州航天测控技术研究所, 贵州 贵阳 550009; 5. 自然资源部第二海洋研究所海底地球科学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要 采用异质多维集成技术, 开发了一种 T 型微型三分量磁通门传感器。该传感器集成了基于微机电系统 (MEMS) 技术制造的具有钴基非晶带芯和螺线管励磁检测线圈的单轴螺线管磁通门芯片, 通过 PCB 基板的正交连接以及单轴磁通门芯片与基板的键合, 实现了三分量的全集成。测试结果显示: 传感器在 X、Y、Z 方向上的灵敏度分别为 1 068 V/T、1 072 V/T 和 1 069 V/T, 噪声功率谱密度分别为 0.069 nT $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz、0.136 nT $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz 和 0.102 nT $\sqrt{\text{Hz}}$ @1 Hz, 时间漂移峰值分别为 7.5 nT、23.5 nT、17.8 nT, 线性响应范围为 0~100 μT 。正交度测试表明: 该传感器 X-Y、X-Z、Y-Z 轴之间的正交偏差分别为 0.5°、1°、0.5°, 可以满足对地磁场三分量的有效测量。采用更精密的基板加工技术和更精准的键合对准符号图案可以进一步提高异质集成三分量磁通门传感器的正交度。这项研究为微型高精度磁场传感应用提供了重要的技术支持。

关键词 MEMS; 异质多维集成; 三分量; 磁通门传感器

中图分类号 TN929.3 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2024)06-0580-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.06.001

A Micro Triaxial Fluxgate Sensors Based on Heterogeneous Multidimensional Integration

DAI Yuhan¹, MA Quankun¹, QIU Xiang^{2, 3, 4}, WU Tao⁵, SUN Xuecheng^{2, 3, 4}, LEI Chong^{1, *}

(1. National Key Laboratory of Advanced Micro and Nano Manufacture Technology, Department of Micro/Nano Electronics, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Research and Development Center of Microelectronics, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 3. Key Laboratory of Advanced Display and System Applications of Ministry of Education, Shanghai 200072, China; 4. Guizhou Aerospace Institute of Measuring and Testing Technology, Guiyang 550009, China; 5. Key Laboratory of Submarine Geosciences, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China)

收稿日期: 2024-04-30

作者简介: 戴毓含 (2001-), 女, 硕士生, 主要从事磁通门传感器研究。

*通信作者: 雷冲, 男, 博士, 助理研究员, 主要从事微/纳米器件研究。

基金项目: 国家重大科研仪器研制专项项目“深海热液系统孔域原位多参数探测-观测装置”(42127807-03); 国家重点研发计划项目“深海硫化物资源移动式高效钻测技术与示范”(2023YFC2811100, 2023YFC2811104); 国家自然科学基金“基于巨磁阻效应(GMR)的磁生物传感器芯片对前列腺癌化过程中外泌体的特异性蛋白表达量的相关性研究”(52107239); 上海交通大学“深蓝计划”基金重点项目(SL2022ZD202); 上海交通大学医工交叉研究基金(YG2023QNA40); 上海市科委专业技术服务平台资助项目(19DZ2291103); 上海高校青年东方学者岗位计划(QD2020009)。

Abstract In this paper, a T-shaped micro triaxial fluxgate sensor is developed using heterogeneous multidimensional integration technology. The sensor integrates a uniaxial solenoid fluxgate chip fabricated using Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) technology, which features a cobalt-based amorphous band core and an excitation detection coil. By orthogonally connecting through a PCB substrate and bonding the uniaxial fluxgate chip to the substrate, a fully integrated triaxial configuration is achieved. Test results show that the sensor's sensitivities are 1 068 V/T for the X axis, 1 072 V/T for the Y axis, and 1 069 V/T for the Z axis. The corresponding noise power spectral densities are 0.069 nT $\sqrt{\text{Hz}}$, 0.136 nT $\sqrt{\text{Hz}}$, and 0.102 nT $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz for each respective axis. Time drift peaks are recorded at 7.5 nT for X , 23.5 nT for Y , and 17.8 nT for Z , with a linear response range from 0 to 100 μT . Orthogonality tests reveal deviations of 0.5° between X and Y , 1° between X and Z , and 0.5° between Y and Z , meeting the standards for precise measurement of the geomagnetic field's three components. Further improvements in the orthogonality of the heterogeneously integrated triaxial magnetic sensor can be achieved through more precise substrate machining and more accurate bonding alignment symbols. This research provides significant technical support for applications requiring small, high-precision magnetic field sensors.

Key words MEMS; heterogeneous multidimensional integration; triaxial; fluxgate sensor

0 引言

磁通门传感器是一种用于测量恒定磁场或低频磁场的矢量传感器,它利用铁磁芯与磁场强度的非线性关系来测量外界的磁场强度^[1]。磁通门传感器具有灵敏度高、体积小等优点,被广泛应用于地磁探测^[2-4]、天体结构研究^[5-7]、生物医疗^[8-11]、便携电子设备^[12-13]等领域。

根据能够检测的磁场方向的数目,可以将磁通门传感器分为单分量磁通门传感器和多分量磁通门传感器。相较于单分量和双分量磁通门传感器,三分量磁通门传感器可以提供完整的空间磁场三分量矢量检测能力,适用于需要高精度磁场测量和空间定位的高端应用^[14]。随着技术的发展,三分量磁通门传感器的精度和可靠性都有了显著提升,它们在各种复杂和高技术的领域中变得越来越重要。传统的三分量磁通门传感器体积较大,结构相对复杂,限制了它们在小空间的应用,如新能源车辆和无人机。针对这些挑战,需要开发微型的三分量磁通门传感器。

微机电系统(MEMS)技术是一种集成微型机械元件、传感器、执行器和电子系统于一体的技术,能够在极小的尺寸上实现复杂的功能。利用MEMS技术可以实现磁通门传感器的微型化^[15]。1999年,LIAKOPOULOS和AHN利用MEMS技术成功制造了一种微磁通门传感器,尺寸可以缩小到几毫米级别,为生产高性能的微型传感器提供了可能性^[16]。

2013年,LEI等人采用MEMS技术制造了一种微型磁通门传感器,在0.54~1.05 mT的直流磁场中,功耗仅为1.7 mW的情况下,灵敏度达到了91.6 V/T,为生物医学和生物技术领域的磁珠检测提供了新的解决方案^[17]。2022年,WANG等人利用MEMS技术开发了尺寸为11.05 mm \times 2.35 mm \times 15 μm 的微磁通门磁力计,1 Hz噪声密度为500 pT $\sqrt{\text{Hz}}$,对直流磁场的检测能力达到6 nT^[18]。2024年,DYER发表了一个集成在单个印刷电路板上的平行棒磁通门磁力计,尺寸为5 cm \times 12 cm,重量为45 g,平均功耗为40 mW,通过采用新的非晶丝磁芯材料和可编程混合信号电子技术,1 Hz处的开环噪声谱密度为5 pT $\sqrt{\text{Hz}}$ ^[19]。

受限于MEMS技术的工艺特性,仅能实现平面二分量的磁通门传感器集成制造,关于全集成的三分量磁通门传感器的研究比较有限。2007年,GOLEMAN通过将磁性线材弯曲成3个互相正交的U形分支来构建三分量正交磁通门磁力计^[20]。2009年,KUBIK等人设计并实现了一种采用单个电镀铁芯的三分量磁通门传感器, X - Y - Z 3轴方向灵敏度分别为90 V/T、112 V/T、198 V/T^[21]。2015年,LU开发了一种新型三分量微型磁力计,它基于平面磁通门技术,并且集成了一个正交方向的铁磁性导通管,使得该设备能够进行三维磁场检测,在50 kHz的激励频率下,获得了122.4 V/T的平面灵敏度和11.6 V/T的垂直灵敏度,以及0.11 nT $\sqrt{\text{Hz}}$ 的磁场噪声水平^[22]。2017年,GAO设计了一种三分量

磁通门磁力计, 通过优化核心材料选择、精密电路设计以及先进的校准技术, 实现了 0~+100 000 nT 的动态测量范围^[23]。

作为一种高级的封装技术, SIP 封装技术旨在将多个功能组件集成进单一的封装中, 来实现更高的功能密度和优化的系统性能。根据设计类型和结构差异, SIP 技术主要分为二维系统级封装、堆叠系统级封装和三维系统级封装^[24]。2021 年, 中国奥肯思公司的李扬在《基于 SIP 技术的微系统》书中提出 4D 封装的概念^[25]。针对高度气密性封装的要求, 用多块基板以非平行方式进行连接。每块基板都可以安装元器件, 基板之间通过柔性电路或者焊接方式进行电气连接。通过立体折叠基板的方式, 可以将系统级封装 SIP 技术的 3D 集成扩展到 4D 集成。基于 SIP 的双面衬底异质多维集成封装技术为解决 MEMS 平面化集成制造技术的局限性, 实现功能多样化的立体结构的 MEMS 器件提供了一条很好的技术路线。2024 年, MA 等人利用 MEMS 技术开发了一种 U 型小型的三分量微磁通门传感器, 并且利用多维集成技术和最小二乘误差校正, 将总磁场的峰峰值从 2.4 μT 降至 0.22 μT ^[26]。

本文采用异质多维集成技术结合 MEMS 技术, 开发了一款全集成的微型三分量磁通门传感器。该传感器的多维集成是通过 PCB 基板的正交连接和芯片与基板的唯一键合完成的, 实现了一个集成度高、轻巧、性能优越且紧凑的三分量磁传感器。本文还对其进行了正交性评估。

1 设计和制造

磁通门传感器的二次谐波输出信号与磁场具有最佳的线性相关性。这种特性允许磁通门在存在外部磁场时, 通过二次谐波输出电压来量化磁场的强度。二次谐波输出电压可以用公式 (1) 表达。

$$V_{2f} = K \cdot B_{\text{ext}} \cdot I_{\text{drive}} \cdot N \quad (1)$$

式中: K 为设备常数, 包括线圈的几何特性和磁芯材料的磁导率; B_{ext} 为外部磁场的磁感应强度; I_{drive} 为驱动电流的幅值; N 为检测线圈的匝数。

磁通门传感器的灵敏度 S , 定义为输出电压对磁场变化的响应程度, 可以通过公式 (2) 描述。式中: ΔV_{2f} 为二次谐波输出电压的变化量; ΔB_{ext} 为外部磁场的变化量。灵敏度的单位通常是 V/T, 表

示每特斯拉磁场变化产生的电压变化量。

$$S = \frac{\Delta V_{2f}}{\Delta B_{\text{ext}}} \quad (2)$$

设计了一种磁通门芯片, 采用了钴基非晶材料制作磁芯, 其厚度和宽度分别为 20 μm 和 600 μm 。根据公式 (1) 和 (2), 调整了线圈的匝数以及铁芯的尺寸: 激励线圈设定为 58 匝, 检测线圈则为 59 匝。该设计的灵敏度预期能够达到或超过 1 000 V/T。

MEMS 技术在制造平面磁通门传感器方面已经达到了高度成熟。在先前的研究^[27]中, 我们开发了一款基于平行工作方式的高效单轴磁通门传感器芯片。该设计包括 1 个螺线管式的激励线圈、1 个螺线管式的检测线圈、1 个磁芯, 制造采用了厚光刻胶基紫外光刻和电镀技术。图 1 为该磁通门传感器芯片的制造过程。在玻璃晶片的一侧, 制备 100 nm 厚的双面对准标记, 这一步骤对于确保磁通门传感器在复杂制程中各层之间的精确对接至关重要。螺线管线圈包括 2 层铜导线阵列, 通过图案化光刻形成凹槽然后电镀到玻璃基板或绝缘层上, 通过过孔上下连接在一起形成完整的螺线管线圈。线圈内部是一个高磁导率的磁芯。首先, 电镀底部导体和连接导体, 然后通过离子束蚀刻去除种子层 (图 1 (a)), 接着粘贴磁芯 (图 1 (b))。进行聚酰亚胺工艺, 包括旋涂、固化和抛光, 以使铜导线和磁芯电绝缘 (图 1 (c)), 并提供平坦层以提供相对光滑的表面。最后, 制作顶部铜导体以形成激励和检测线圈, 然后制作焊盘 (图 1 (d))。再次进行聚酰亚胺工艺, 抛光后仅露出焊盘 (图 1 (e)), 因此整个传感器由聚酰亚胺保护, 以避免振动和冲击损坏。这样制造出来的传感器芯片, 其激励线圈的电阻低于 2 Ω , 检测线圈的电阻低于 3 Ω 。每个芯片的体积为 10.8 mm \times 6 mm, 如图 2 (a) 所示。图 2 (b) 展示了芯片的对象参照片。

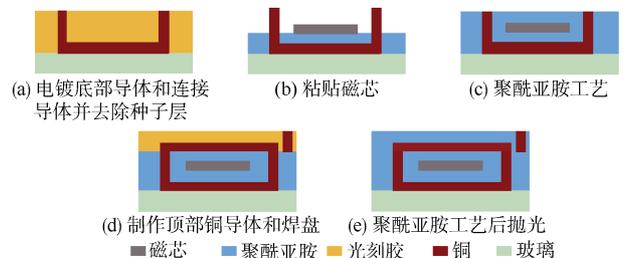


图 1 微型磁通门传感器制造步骤

Fig. 1 Manufacturing steps of micro fluxgate sensor

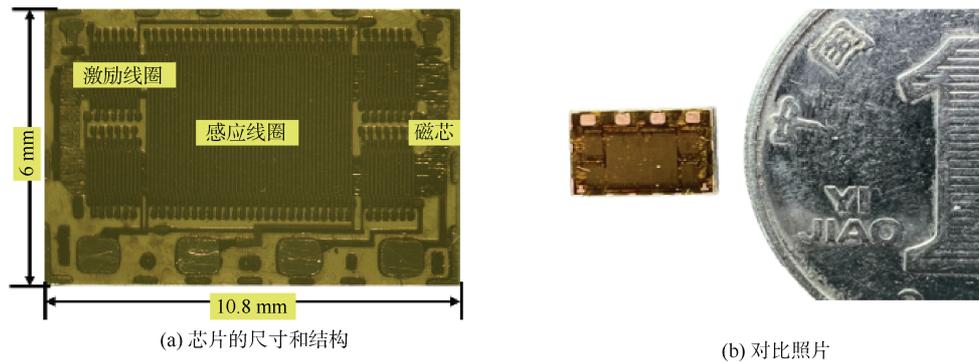
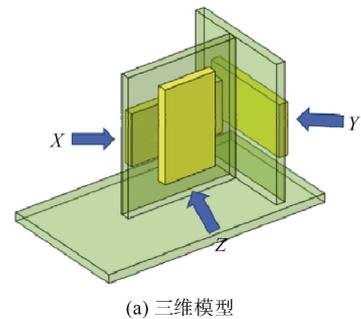
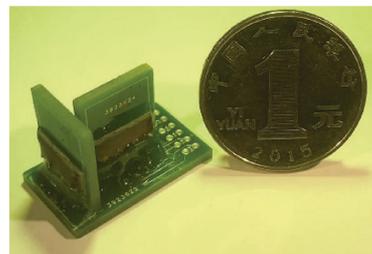


图 2 芯片的物理图像
Fig. 2 Physical images of chip

使用异质多维集成技术可以实现三分量集成。首先, 将芯片接合到基板以形成分量模块, XZ 分量在同一块基板的正反面, Y 分量在另一块单独的基板上。为了提高芯片和基板之间的定位精度, 在芯片内设计了用于键合对准的 T 形符号, 并在 PCB 基板上设计了相同的对准符号。然后, 3 个分量模块通过基板之间的柱孔重力自稳定方式实现正交连接, 形成 T 形结构, XZ 分量和 Y 分量基板安装在底板中, 如图 3 所示。将三分量磁通门传感器焊接固定在孔中后, 可以获得一个集成的三分量磁通传感器, 实现对地球磁场的三分量矢量测量。三分量传感器的总体设计尺寸为 $25.7 \text{ mm} \times 14.8 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$, 尺寸加工误差小于 $50 \text{ }\mu\text{m}$ 。三分量磁通门传感器的照片如图 4 所示。与传统的磁通门传感器相比, 本文设计制造的磁通门磁强计在尺寸上具有显著优势。



(a) 三维模型



(b) 物理图像

图 4 三分量磁通门传感器
Fig. 4 Three-component fluxgate sensor

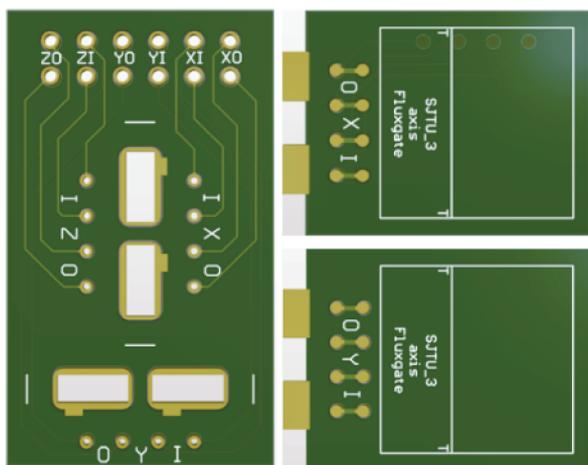


图 3 PCB 板 3D 视图
Fig. 3 3D view of PCB board

2 基本性能测试

2.1 测试系统

图 5 展示了采用开环测试系统对磁通门芯片进行基础特性检测的过程。其中, 正弦波激励电流由函数发生器 (Tektronix AFG3022) 和功率放大器电路生成。通过锁相放大器 (Stanford SR844) 对芯片输出的二次谐波电压信号进行读取。受直流电源 (InsTek PST3202) 控制的螺线管生成均匀的静态磁场供芯片测试使用, 该磁场经过 MEDA μmag 磁强计校正后, 空间均匀性达到 1 nT 。6 层非晶软磁薄带 (Metglas.2714A) 的屏蔽桶为测试提供零磁场环境。在此测试设置中, 芯片被置于螺线管中央, 而螺线管本身位于屏蔽桶中央。

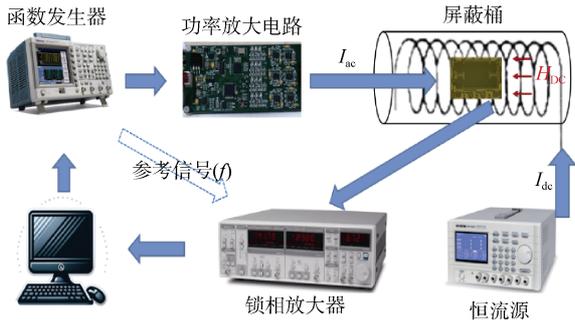


图 5 测试系统流程
Fig. 5 Test system process

2.2 灵敏度

图 6 展示了 X、Y 和 Z 轴磁通门芯片输出信号与外部磁场的关系曲线。激励信号为正弦波，激励频率为 500 kHz，激励电流为 80 mA。通过对 3 个传感器中的每个传感器进行线性拟合，得到以下结果，X-Y-Z 芯片的灵敏度分别为 1 068 V/T、1 072 V/T 和 1 069 V/T，3 个芯片之间的灵敏度最大误差为 4 V/T，平均误差小于 0.5%，具有很好的一致性。通过线性拟合，3 个芯片的线性范围均为 100 μ T。X-Y-Z 芯片的 COD 系数均在 0.999 03 以上。

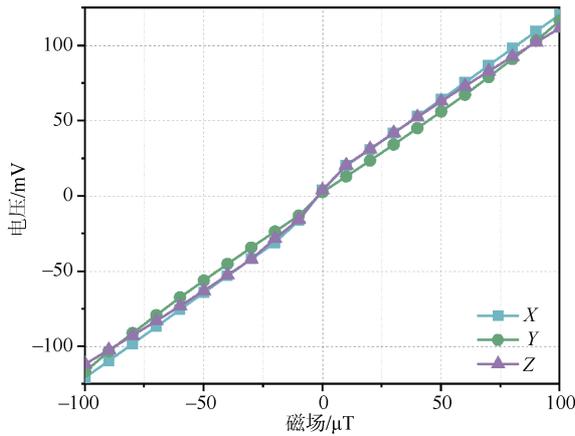


图 6 三分量磁通门传感器灵敏度曲线
Fig. 6 Three-component fluxgate sensor sensitivity curve

2.3 噪声参数

噪声的大小会直接影响传感器的分辨率。图 7 显示了放置在屏蔽桶内的 X、Y、Z 轴磁通门芯片在相同工作条件下的噪声功率谱密度曲线。X-Y-Z 芯片的 1 Hz 噪声功率谱密度为 0.069 nT \sqrt /Hz@1 Hz、0.136 nT \sqrt /Hz@1 Hz 和 0.102 nT \sqrt /Hz@1 Hz。X-Y-Z 芯片在 0.1~10 Hz 频率范围内的均方根噪声

分别为 0.464 nT、1.143 nT 和 0.752 nT。3 种芯片的噪声性能符合 1/f 噪声定律。

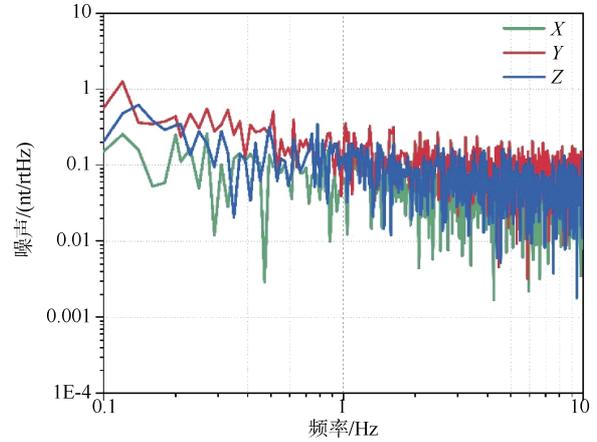


图 7 三分量磁通门传感器的噪声曲线
Fig. 7 Noise curve of three-component fluxgate sensor

2.4 时漂稳定性

X-Y-Z 芯片的长期漂移稳定性是通过在 500 kHz 激励频率和 80 mA RMS 激励电流下观察屏蔽桶中的输出信号 1 h 来测量的，如图 8 所示。X-Y-Z 芯片的零漂移平均磁场强度分别为 516 nT、561 nT 和 491 nT。X-Y-Z 芯片的标准偏差分别为 1.45 nT、3.94 nT 和 2.84 nT。X-Y-Z 芯片的峰峰值分别为 7.5 nT、23.5 nT 和 17.8 nT。其中，X 轴的峰峰值噪声明显小于 Y 轴和 Z 轴，可能是由制造误差和薄带的非均匀性导致。

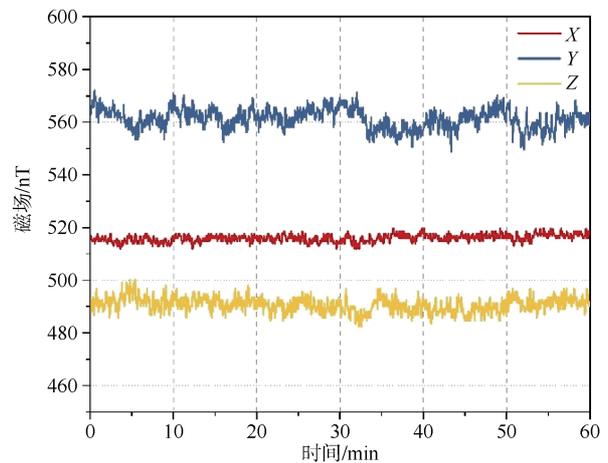


图 8 1 h 内的时间漂移
Fig. 8 Time drift within 1 hour

首先，在三分量磁通门传感器中，X 轴传感器

可能在加工过程中受益于更高的制造精度, 导致其在时漂测试中表现出更低的噪声峰峰值。其次, 薄带的非均匀性对传感器的性能有显著影响。磁通门传感器通常采用高磁导率的铁磁性材料薄带作为磁芯。然而, 薄带材料的非均匀性, 例如厚度不均匀性、磁畴分布不均匀等, 会导致传感器不同方向的响应特性不同。在 X 轴方向上, 如果薄带材料的均匀性较好, 其磁性特性会更加稳定, 从而降低了因材料非均匀性引起的磁噪声和漂移。相反, Y 轴和 Z 轴方向的薄带材料可能存在较大的不均匀性, 如厚度波动或磁畴各向异性, 这些不均匀性导致传感器在这些方向上感应到的磁场变化更大, 进而增加了噪声水平。尤其是在长时间测试期间, 材料的微观变化和应力松弛可能会对 Y 轴和 Z 轴的传感器产生更显著的影响, 从而在时漂测试中表现出更高的峰峰值噪声。

总之, MEMS 三分量磁通门传感器中每个分量磁通门芯片都具有小的标准偏差和高的稳定性。

2.5 正交度

正交度指的是三分量磁通门传感器 3 个磁轴之间的交角关系, 可用 3 个磁轴两两之间的非正交性来描述, 其单位为 $^\circ$, 用 θ_g 表示。

一般按照式 (3) 和式 (4) 来计算磁通门磁强计 Y 轴、 Z 轴与 X 轴之间的非正交性。其中, $\theta_{B, X-Y}$ 表示测量中磁通门磁强计 X 轴和 Y 轴的非正交度, $^\circ$; $\theta_{B, X-Z}$ 表示 X 轴和 Z 轴的非正交度; B_{X_0} 、 B_{Y_0} 、 B_{Z_0} 为在未复现磁场情况下, 磁通门磁强计各分量的初始示值, nT; B_{X_x} 、 B_{Y_x} 、 B_{Z_x} 为在外加磁场作用下, 磁通门磁强计各分量的示值, nT。

$$\theta_{B, X-Y} = \arcsin \frac{B_{Y_x} - B_{Y_0}}{B_{X_x} - B_{X_0}} \quad (3)$$

$$\theta_{B, X-Z} = \arcsin \frac{B_{Z_x} - B_{Z_0}}{B_{X_x} - B_{X_0}} \quad (4)$$

对 T 型三分量磁通门传感器的正角度进行测试, 将磁通门传感器放入磁场线圈工作区中心, 并调整探头, 使 X 轴与磁场线圈的磁轴平行。在磁场线圈未复现磁场时, 记录 3 个分量的示值。磁场线圈复现接近量程上限 90% 的磁场, 记录 X 、 Y 、 Z 轴的示值。分别计算 Y 轴、 Z 轴与 X 轴之间的非正

交性。调整探头, 使 Y 轴与磁场线圈的磁轴平行, 重复上述方法测量 Y 轴与 Z 轴的非正交性。

利用赫姆霍兹线圈对传感器施加外部磁场, 以 50 000 nT 和 10 000 nT 为标准参考磁场采集数据, 取差值进行计算正交度, 最终求得 X - Y 、 X - Z 、 Y - Z 之间的正交度偏差值, 具体见表 1。

表 1 各轴向正交度偏差值
Table 1 Deviation value of orthogonality in each axis

| 轴向 | X - Y | X - Z | Y - Z |
|------------------|-----------|-----------|-----------|
| 正交度偏差值/ $^\circ$ | 0.5 | 1 | 0.5 |

结果表明: 本文采用的 PCB 基板柱孔重力自稳定正交连接, 单轴磁通门芯片与基板键合的集成方法具有较好的正交精度, 尤其是 X - Y 、 Y - Z 之间 0.5° 的偏差显示了较高的精度。同时, 同一块基板两侧的 X - Z 轴之间相对较大的偏差 (1°), 突出了 PCB 基板对准符号印刷精度不足的问题。这表明: 在基板制造和加工过程中, 仍需进一步的精确度提升。

当前的封装工艺中, 正交性误差主要来源于基板的加工误差。基板的机械公差、对准标记的精度, 以及在焊接或键合过程中引入的偏差, 都会导致三分量传感器之间的正交性受到影响。为了提高传感器的正交性, 未来可以通过多种途径来规避这些误差。

首先, 提高基板加工的精度是一个重要的方向。使用更加精密的加工设备和技术, 如激光切割可以显著减少机械公差。此外, 在基板上刻蚀更精细的对准标记, 也可以在焊接或键合过程中提供更加准确的对准参考, 帮助更精确地定位芯片和基板之间的关系。

其次, 更换更好的基板材料, 例如陶瓷基板或玻璃基板进行一体化加工, 可以大幅提升整体的机械稳定性和对准精度。陶瓷基板具有优异的热稳定性和低膨胀系数, 能够有效减少因温度变化引起的尺寸变化和应力, 从而降低正交性误差。玻璃基板则提供了极高的平整度和表面质量, 适合在精密制造中实现高精度对准和低应力的封装。

最后, 优化对准和键合技术是另一种有效的

方法。采用精密的自动化对准设备,可以极大地提高芯片和基板之间的对准精度。同时,使用先进的键合技术,如激光辅助键合,可以减少焊接或粘接过程中由于机械应力和位置偏差引起的误差。

另外,可以考虑在 MEMS 流片制造过程中,设计将 X 轴和 Y 轴传感器的结构集成在同一个芯片上。这样可以确保 X 轴和 Y 轴之间的相对位置和对准精度在制造过程中得到精确控制。这种方法能够在制造过程中确保 X 轴和 Y 轴之间的相对位置和对准精度,可以显著减少 X 轴和 Y 轴之间的正交误差。在这种集成方式下,后续封装时只需要考虑 Z 轴的对准问题。通过这种方式,不仅可以降低正交性误差,还能简化封装过程、提高生产效率,但增加了芯片面积。

总结来说,通过改进基板加工和对准精度、优化封装和键合技术,以及在流片时先集成 X 轴和 Y 轴等措施,可以有效降低正交性误差,提升三分量磁通门传感器的精度和稳定性。这些方法不仅可以提高传感器的整体性能,还能简化制造和封装过程,降低生产成本,为实现高精度和高可靠性的多分量磁场测量提供坚实的技术支持。

3 结束语

基于 SIP 多维集成技术,实现了一种 T 型微型三分量磁通门传感器。传感器的总体设计尺寸为 $25.7\text{ mm} \times 14.8\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ 。 X - Y - Z 芯片的灵敏度分别为 $1\ 068\text{ V/T}$ 、 $1\ 072\text{ V/T}$ 和 $1\ 069\text{ V/T}$,灵敏度误差小于 0.5%。3 种芯片的线性范围均为 $0\sim 100\ \mu\text{T}$ 。 X - Y - Z 芯片的噪声功率谱密度为 $0.069\text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{ HZ}$ 、 $0.136\text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{ HZ}$ 和 $0.102\text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{ HZ}$ 。 X - Y - Z 芯片的时间漂移峰峰值分别为 7.5 nT 、 23.5 nT 和 17.8 nT 。经过正交度测试, X - Y 、 X - Z 、 Y - Z 之间的正交度偏差分别为 0.5° 、 1° 、 0.5° 。在未来的研究中,关键的改进方向是提升基板的制造和对准精度。通过采用更精确的对准技术和改进的制造工艺,减少角度误差,从而提高传感器的整体性能和可靠性。这将是进一步提升三分量磁通门传感器精度的重要步骤。

本文开发的异质多维集成三分量磁通门传感

器具有集成度高、易于批量制造的优势,将推动地球磁场三分量检测在新能源汽车和无人机领域的应用。

参考文献

- [1] 樊业东. 基于 ANSYS 的磁通门传感器仿真设计[J]. 信息通信, 2019 (6): 22-23.
- [2] ZHANG K. A novel geomagnetic satellite constellation: science and applications[J]. Earth and Planetary Physics, 2023, 7 (1): 4-21.
- [3] NOSE M, KAWANO T, AOYAMA H. Application of magneto-impedance (MI) sensor to geomagnetic field measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2022, 127 (10): e2022JA030809.
- [4] 邱天巍, 谢建, 邹凡. 磁通门经纬仪分量测量法在机场磁偏角测量中的应用[J]. 地震地磁观测与研究, 2023, 44 (6): 48-55.
- [5] BAUMJOHANN W, MATSUOKA A, NARITA Y, et al. The BepiColombo-Mio magnetometer en route to Mercury[J]. Space Science Reviews, 2020, 216 (8): 1-33.
- [6] DU A M, ZHANG Y, LI H Y, et al. The Chinese Mars ROVER fluxgate magnetometers[J]. Space Science Reviews, 2020, 216 (8): 1-15.
- [7] BANFIELD D, RODRIGUEZ-MANFREDI J A, RUSSELL C T, et al. InSight Auxiliary Payload Sensor Suite (APSS) [J]. Space Science Reviews, 2019, 215 (1): 1-33.
- [8] TOPAL U, CAN H, CELIK O M, et al. Design of fluxgate sensors for different applications from geology to medicine[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2019, 32 (4): 839-844.
- [9] KOSHEV N, BUTORINA A, SKIDCHENKO E, et al. Evolution of MEG: a first MEG-feasible fluxgate magnetometer[J]. Human Brain Mapping, 2021, 42 (15): 4844-4856.
- [10] LUONG V S, NGUYEN A T, TO T L. Heart-rate monitoring device based on fluxgate sensors[C]// 2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). Dong Hoi: IEEE, 2019.
- [11] YALAZ M, TEPLYUK A, DEUSCHL G, et al. Dipole fit localization of the deep brain stimulation electrode using 3d magnetic field measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20 (16): 9550-9557.
- [12] 赖正喜. 基于磁通门传感器的高精度弱磁场便携检测系统[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [13] ANGELOPOULOS S, PRIFTIS P, ANASTASOPOULOS

- A, et al. Design and development of a high-sensitivity, portable, and low-cost fluxgate magnetometer[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2023, 59 (2): 1-8.
- [14] 刘轩铭. 小型化三轴磁通门磁强计设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.
- [15] 杨志强, 吴江妙, 宣仲义. 基于 MEMS 技术的磁通门传感器制备研究[J]. 机械制造, 2008, 46(4): 43-46.
- [16] LIAKOPOULOS T M, AHN C H. A micro-fluxgate magnetic sensor using micromachined planar solenoid coils[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 77 (1): 66-72.
- [17] LEI J, LEI C, WANG T, et al. A MEMS-fluxgate-based sensing system for the detection of Dynabeads[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23 (9): 095005.
- [18] WANG Z, SHEN Y, LEI C, et al. Highly-sensitive MEMS micro-fluxgate magnetometer[J]. IEEE Electron Device Letters, 2022, 43 (8): 1327-1330.
- [19] DYER T, GRIFFIN P F, RIIS E. Single-board low-noise fluxgate magnetometer[J]. Journal of Applied Physics, 2024, 135 (3): 034501
- [20] GOLEMAN K, SASADA I. A triaxial orthogonal fluxgate magnetometer made of a single magnetic wire with three U-Shaped branches[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43 (6): 2379-2381.
- [21] KUBIK J, VCELAK J, O'Donnell T, et al. Triaxial fluxgate sensor with electroplated core[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 152 (2): 139-145.
- [22] LU, C.C. and J. HUANG. A 3-axis miniature magnetic sensor based on a planar fluxgate magnetometer with an orthogonal fluxguide[J]. Sensors, 2015, 15 (6): 14727-14744.
- [23] GAO Y, LI Z H, LI Y T, et al. The design of high precision three axis fluxgate magnetometer[C]// The 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing: IEEE, 2017.
- [24] GAN X C, DENG J. Multi-chip assembly based on SiP technology[C]// The 3rd Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA 2017). Guilin: Atlantis Press, 2017.
- [25] 李扬. 基于 SIP 技术的微系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
- [26] MA Q K, DAI Y H, WU T, et al. A multidimensional integrated micro three-component fluxgate sensor based on microelectromechanical system technology[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 371: 115315.
- [27] LEI C, LEI J, YANG Z, et al. Improved micro fluxgate sensor with double-layer Fe-based amorphous core[J]. Microsystem Technologies, 2013, 19: 167-172.

(责任编辑: 曹晓霖)