

文章编号 1004-924X(2016)08-1927-07

小型化硅微谐振式加速度计的实现与性能测试

赵健, 施芹, 夏国明, 裘安萍, 吴志强, 苏岩*

(南京理工大学 MEMS 惯性技术研究中心, 南京 210094)

摘要:设计了一款由微机电系统和专用集成电路构成的小型化硅微谐振式加速度计。该加速度计采用 80 μm 厚 SOI 工艺加工微机电系统(MEMS)结构,采取真空封装技术降低结构噪声。首先,采用振荡信号作为自动增益控制电路中斩波器的控制信号,降低了闪变噪声且不会引入额外的功耗。其次,使用线性区工作的乘法器取代传统的吉尔伯特单元,通过大幅降低系统总体供电电压来降低功耗。最后,采用复位计数器进行频率数字转换,在所关心的带宽内抑制量化噪声。实验显示:该加速度计在达到 $\pm 30\text{ g}$ 线性量程的前提下,实现了 $2.5\ \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的分辨率和 $1\ \mu\text{g}$ 的零偏不稳定性。此外,为了减小电路自身发热引起的温度漂移,该样机的功耗被控制在 $3.5\ \text{mW}$ 以内,系统集成后的尺寸约为 $45\ \text{mm}\times 30\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$ 。基于所述技术,系统在体积、功耗和性能方面均有较大的提升。

关键词:硅微谐振式加速度计;专用集成电路;SOI工艺;真空封装;小型化;低功耗

中图分类号:TH824.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162408.1927

Implementation and measurement of a miniaturized silicon resonant accelerometer

ZHAO Jian, SHI Qin, XIA Guo-ming, QIU An-ping, WU Zhi-qiang, SU Yan*

(MEMS Inertial Technology Research Center,
Nanjing University of Sci. & Tech., Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: suyan@mail.njust.edu.cn

Abstract: A miniaturized Silicon Resonant Accelerometer(SRA) consisting of a MEMS (Micro-electro-mechanical System) and an ASIC(Application Specific Integrated Circuit) readout circuit is designed. The MEMS sensor is fabricated by an 80 μm thick SOI process and the noise in the ASIC is reduced by a series of vacuum packaging technologies. Firstly, a vibration signal is used as the control signal of a chopper in automatic gain control circuit to reduce the flicker noise and extra power consumption. Then, a multiplier in the linear area multiplier is used to replace the traditional Gilbert unit to reduce power consumption by sharply reducing system power supply voltage. Finally, a reset counter is taken in digital frequency conversion to inhibit quantization noise in the concerned bandwidth. The experiments show that the proposed SRA achieves sub- μg bias instability and $2.5\ \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ velocity random walk within $\pm 30\text{ g}$ full scale. Moreover, to reduce the temperature drifting due to self heating, the power consumption of the SRA has been carefully limited under $3.5\ \text{mW}$. After integration, the

收稿日期:2016-02-10;修订日期:2016-03-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61301214)

entire prototype occupies a space of 45 mm×30 mm×20 mm. It is characterized by high performance, low power and good miniaturization.

Key words: Silicon Resonant Accelerometer(SRA); Application Specified Integrated Circuit (ASIC); SOI process; vacuum packaging; miniaturization; low power

1 引言

硅微谐振式加速度计是以微机械加工工艺为基础的 MEMS 惯性器件,作为 MEMS 传感器,相比传统加速度计具有可靠性高、体积小、重量轻等优点。同时,与其他类型的 MEMS 加速度计相比,具有线性好,标度因数稳定性高、输出信号准数字化等优点,已成为高性能 MEMS 加速度计研究中极具前景的方法之一^[1]。然而,目前对于中高精度导航应用领域,硅微谐振式加速度计性能与传统的机械伺服加速度计和石英振梁加速度计^[2]相比还存在一定差距,在保证足够线性量程的前提下,主要表现在分辨率和零偏不稳定性等指标上,因此许多科研机构都致力于提高该关键性能^[3]。新加坡国立大学于 2008 年研制的 MEMS-ASIC 硅微谐振式加速度计在仅仅消耗 23 mW 功率下,实现了 20 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的分辨率,和 4 μg 的零偏不稳定性^[4]。2015 年加州大学欧文分校的研究人员提出了一种基于静电负刚度调谐的硅微谐振式加速度计,实现了 10 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的分辨率与 6 μg 的零偏不稳定性,并且针对如何抑制非对称性带来的温度漂移进行了研究^[3]。国内科研院所如东南大学、清华大学、北京航天控制仪器研究所等也在致力于该方向的研究,并在性能上取得了较大进步,短时(1 h)零偏不稳定性普遍低于 30 μg ^[5-7]。但其主要基于商用分立器件实现硅微谐振式加速度计样机,难以针对需求定制测控电路,因此难以在性能、功耗和体积上有更进一步的突破。

本文介绍了一个硅微谐振式加速度计原理样机及性能测试,该样机基于真空封装的 MEMS 芯片以及专用集成电路芯片,采用一系列技术后使得最终系统能在体积、功耗和性能方面都有较大提升,同时样机也包含频率读出模块,可以在片上实现模数转换,具有较高的集成度。

2 硅微谐振式加速度计

2.1 MEMS 结构

硅微谐振式加速度计结构原理如图 1 所示。由 1 个质量块和 2 个杠杆-谐振器模块组成。当外界没有加速度输入时,谐振器在振荡电路的激励下,振动在其固有频率 f_0 上。当外界加速度 a 作用在 y 轴上时,杠杆会将质量块感受的惯性力进行放大,并且差分地施加在左右 2 个谐振器上,使它们的频率向相反方向变化^[8]:

$$f = f_0 \sqrt{1 + K_g a}, \quad (1)$$

其中: K_g 为谐振梁几何参数决定的常数,对于单个谐振器,这种输入输出关系存在较大的非线性,难以保证较大的量程。而通过检测两个谐振器的固有频率之差,可以很大程度上抑制非线性误差,实现大量程范围内较高线性度。同时,这种全差分的检测方式可以很大程度上抑制输出信号受温度的影响的共模误差。

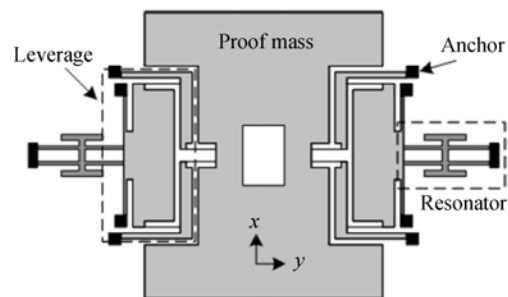


图 1 硅微谐振式加速度计示意图

Fig. 1 Schematic of silicon resonant accelerometer

在谐振器微振梁设计方面,传统分离的振梁设计存在相向运动模式和同向运动易发生干扰难以分离的缺点,因此将图 1 所示的谐振器两根振梁在其中间进行连接,消除了相向振动模式,仅保留同相振动模式。不仅解决了上述问题,也便于与抗干扰能力更强的全差分专用集成接口电路对接。同时相比于传统的振梁,该设计还能够使驱动以及检测极板之间仅用单基准电压偏置,在实

现相同偏置增益的情况下,偏置电压相比相向模态的设计降低了 50%,在部分场合下能够降低系统功耗。

2.2 工艺与封装

图 2 所示为硅微谐振式加速度计晶片侧剖面,该 MEMS 结构采用 80 μm 厚体硅 SOI 工艺加工制成。实现了较大的检测质量,可降低机械热噪声对系统的影响。同时采用晶圆级真空封装技术,降低了腔体内的气体阻尼,帮助谐振器实现较高的品质因数,从而降低结构的机械热噪声。相比于传统的器件级真空封装,晶圆级真空封装体积更小,成本更低,更有利于 MEMS 传感器实现小型化^[9]。

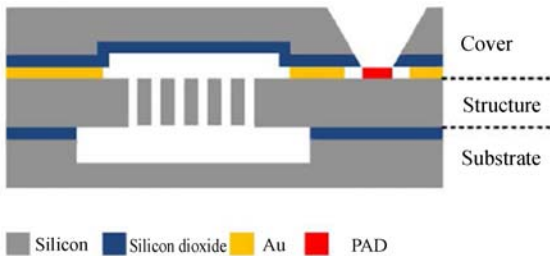


图 2 SOI 工艺与真空封装横截面示意图

Fig. 2 Cross-section diagram of vacuum package and SOI process in SRA

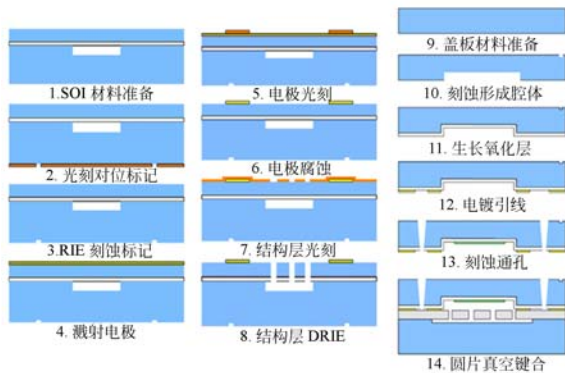


图 3 体硅 SOI 工艺流程图

Fig. 3 Flow diagram of SOI bulk silicon process

SOI 工艺流程如图 3 所示^[10],首先利用干法刻蚀技术在 SOI 圆片的顶层硅上形成敏感结构,腐蚀埋层二氧化硅实现敏感结构的释放。然后在盖板硅片表面生长厚氧化层实现盖板与敏感结构的电隔离,在氧化层上腐蚀出腔体后通过蒸发、电镀等在盖板表面形成金属引线布线并实现金硅键合的密封环,利用湿法腐蚀技术在盖板上形成通

孔。最后采用金-硅键合技术将盖板与底层 SOI 圆片键合,最终实现敏感结构的圆片级真空封装。

最后,对于温度效应,残余应力导致的温度漂移往往远大于杨氏模量随温度变化对系统输出的影响。因此在加工中,采取了一些措施来释放部分工艺产生的残余应力^[11],从而降低最终加速度计的温度效应。加工并完成封装后单个谐振器的温度系数被控制在 5 Hz/°C 以下,等效于 200 ppm/°C。

3 专用集成读出电路设计

硅微谐振式加速度计的读出电路设计与其结构设计共同决定加速度计的输出白噪声水平。读出电路还决定系统的零偏不稳定性和功耗,因此需要在降低噪声与降低功耗方面对其进行有针对性的设计。图 4 所示为硅微谐振式加速度计与其读出电路的系统框图。在其读出电路中,主要由振荡维持电路和频率读出电路组成。

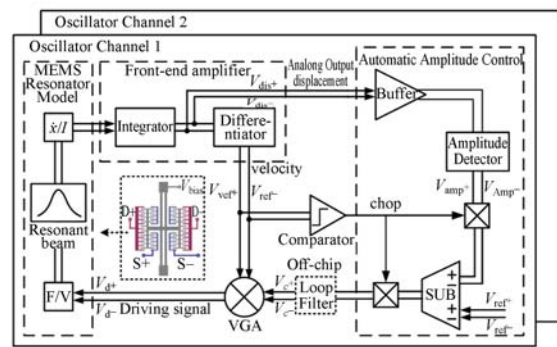


图 4 硅微谐振式加速度计及其读出电路原理框图

Fig. 4 Block diagram of overall system of proposed SRA

3.1 振荡电路系统

该加速度计的测控系统是由一个 MEMS 谐振器和接口电路组成的振荡器。MEMS 谐振器的微小振动由接口电容转换成微弱电流并由低噪声跨阻放大器拾取,转化为电压输出。同时,系统的自动增益控制(AAC)电路能够根据谐振器振动幅度调节激振信号大小,保证谐振器振动位移幅度的稳定。此外,为了降低 AAC 电路产生的闪变噪声,进一步提高谐振器振动的稳定性,从而降低其通过 A-S 效应对振动频率稳定性的影

响^[12],在 AAC 电路中加入了斩波调理电路来抑制闪变噪声。该斩波器所需的周期控制信号由前端放大器输出的正弦谐振信号通过比较器产生,无需外接晶振,极大地降低了振荡电路功耗。^[4]

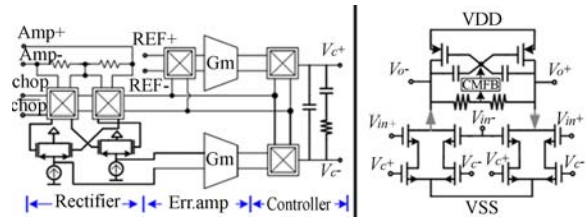
3.2 关键模拟集成电路设计

图 5 所示为振荡电路中各主要模块的电路原理图。其中图 5(a)为低噪声的带通形式跨阻放大器。由第一级运放组成的积分器和第二级运放组成的微分器组成,保证谐振频率附近信号通过的同时,尽可能抑制带外干扰信号和噪声。积分器的输入共模电压由 MOS 管构成的伪电阻 R_b 进行偏置,节省了芯片面积。这种结构可以同时产生正比于谐振器振动位移和速度的电压信号,方便进行自动幅度控制。其输入电流到输出电压之间的传递函数为:

$$H_{vel}(s) = \frac{C_2 R_b R_f s}{(R_b C_1 s + 1)(R_f C_3 s + 1)} \quad (2)$$

虽然接口电容 C_p 不在该式中,不会影响接口电路功能,但它会传递第一级运放的输入等效电压噪声,因此在实际使用中,需要使其尽可能降低。根据式(2),在谐振器工作频段附近,放大器的跨阻增益为 $(C_2/C_1)R_f$,相比于传统的跨阻放大器,这种形式可以使用较小的阻值来实现较大的等效跨阻增益,从而缓解放大器带宽、噪声、功耗之间的相互制约。适用于谐振式加速度计的敏感信号检测。最终,该放大器在满足基本设计指标的同时,仅仅产生 $7 fA/\sqrt{Hz}$ 的噪声,并且仅消耗 $600 \mu W$ 功率^[13]。

图 5(b)所示为自动增益控制电路,由幅度检测器、减法器 and 环路滤波器等组成。其中幅度检测器通过双输入的源跟随器来实现,其在输入幅度较大时接近绝对值运算特性,在输入幅度较小时接近平方运算的特性,从而实现幅度提取。减法器由一对跨导将检测到的幅值和参考电压转换



(b) 自动增益控制电路 (c) 可变增益放大器
(b) AAC circuit (c) VGA

图 5 关键的模拟电路原理图

Fig. 5 Schematics of key analog circuits

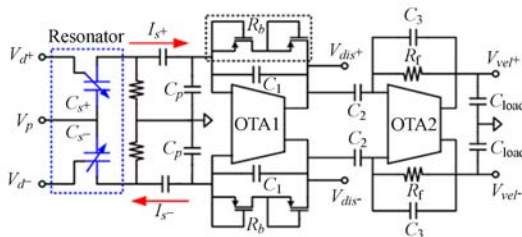
为电流后在电流域相减,得到幅度控制的误差。同时环路滤波器采用锁相环中的被动二型二阶滤波器实现,该滤波器中的积分器不仅可以消除幅度的稳态误差,而且可以滤除滤波器之后,MEMS 结构之前的噪声源所引起的幅度抖动。同时,为了能够消除减法器引入系统的闪变噪声,采用斩波技术,将低频的幅度信号和参考信号调制到高频,通过减法器后再解调,可以避免信号受到减法器中的闪变噪声的污染,最终能够降低传感器的输出零偏不稳定性。

图 5(c)所示为可变增益放大器,该模块将幅度增益控制电路所产生的控制信号作用到振荡环路中,使其实现稳幅振荡。在传统的电路中,该环节多采用基于吉尔伯特单元的乘法器实现,需要较高的电源电压,消耗较大的功耗,是系统功耗的瓶颈之一。因此,采用了一种 MOS 管在线性区工作的可变增益放大器结构,使其供电电压可以降低到 $1.5 V$,并且仍然保证了较高的线性度和较低的噪声,从而降低了系统整体的供电电压和功耗。^[14]

3.3 测频电路

频率读出电路在 FPGA 中实现,采用复位计数器的原理,如图 6 所示。由计数器,采样延时环节和减法器组成。其中,计数器由高频基准时钟驱动自由循环计数。采样延时环节由 2 个串联的 D 触发器组成,并且由图 4 中比较器输出的振荡信号触发,每当上升沿到来时,第一个 D 触发器将当前时刻的保持值传递给下一个触发器,之后采样计数器的输出。通过前后 D 触发器的减法运算,就可以得到在模拟信号两个上升沿之间,计数器输出值之差,从而间接得到比较器输出振荡信号的频率^[15-16]。

同时,由于在振荡信号采样的上升沿会落在



(a) 前端放大器
(a) Front-end TIA

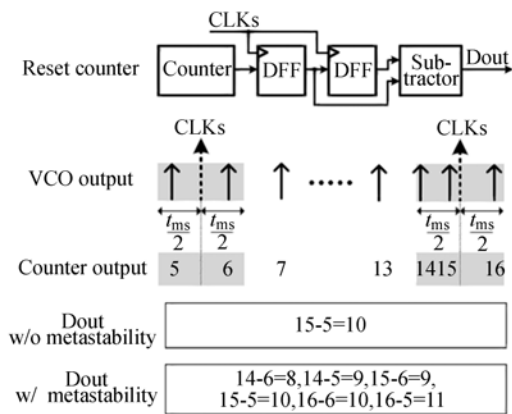


图 6 复位计数器工作原理图^[16]

Fig. 6 Operational principle of reset counter

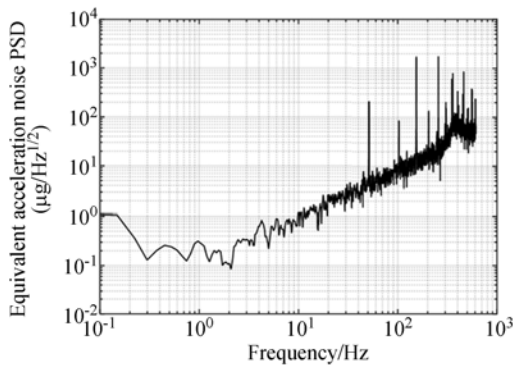


图 7 测频电路输出量化噪声功率谱

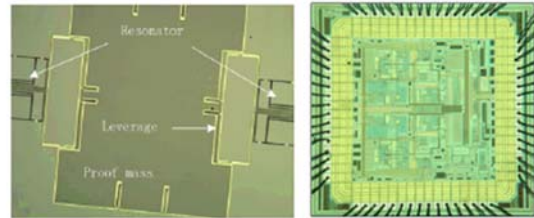
Fig. 7 Power spectrum density of quantization noise in the output of frequency measurement circuit

基准时钟 2 个上升沿之间,因此 D 触发器每一次对计数器采样都会产生一个周期量化误差,等价于相位量化误差。该随机相位误差会在求频率的过程中经过差分运算,从而其低频部分会被抑制,因此这种频率读出电路可以在低频段实现较低的量化噪声,适合作为谐振式加速度计的模数转换。图 7 所示为该读出电路在实际测量理想信号发生器时的输出功率谱,当计数器时钟设置为 12 MHz 时,量化噪声经过一阶微分整形,量化噪声从高频到低频以 20 dB/dec 的速度衰减,在低频端的等效加速度分辨率低于 $1 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$,低于模拟电路所产生的噪声,满足设计需求。

4 实验与测试

在 MEMS 与 ASIC 芯片设计与实现的基础

上,制作了小型化的 PCB 和外壳,实现了完整的加速度计样机,如图 8 所示。MEMS 芯片和 ASIC 芯片布置在小型化 PCB 正中,以提高从有源电路芯片到无源 MEMS 芯片之间传热路径的对称性,从而减小样机在启动过程中的温度漂移。



(a)MEMS 传感器显微照片 (b)ASIC 显微照片
(a)MEMS Sensor (b)ASIC Chip



(C)小型化样机照片

(c)Assembled prototype

图 8 主要的芯片照片与小型化样机照片

Fig. 8 Micrographics of (a) MEMS sensor, (b) ASIC readout circuit and (c) the photo of assembled prototype

为了验证所设计小型化样机的性能,首先对其进行量程与非线性测试。图 9 所示为样机在离心实验条件下的输出响应。实验结果表明,该样机能够在 $\pm 30 \text{ g}$ 的满量程内实现小于 100 ppm 的非线性度。之后,将谐振器固定在地基上,对其进行静态零偏稳定性测试。共进行了 3 组实验,时长为 1 h,实验结果如图 10 所示。样机的在 1 Hz 采样率的条件下, 1σ 零偏稳定性达到 $10 \mu\text{g}$,同时其峰峰值小于 $30 \mu\text{g}$,在开机的前 20 min 内收到传感器自身发热的影响,之后主要受到漂移和噪声的影响。同时为了得到其噪声性能,计算了输出信号的 ALLAN 方差,结果表明,该传感器可以实现约为 $1 \mu\text{g}$ 的零偏不稳定性 and $2.5 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的分辨率,接近部分石英振梁加速度计的性能^[17]。

最后样机整体尺寸为 45 mm × 30 mm × 20 mm,同时仅仅工作在 1.5 V 的单电源供电条件下(MEMS 偏置电压为 5~10 V,不消耗功耗),消耗 3.5 mW 的功耗(不包括 FPGA)。表 1 总结了小型化样机的主要性能参数。

表 1 SRA 主要性能指标

Tab.1 Key performance specifications of proposed SRA

零偏稳定性(1σ)	10 μg
不稳定性(Allan Variance)	<1 μg
速度随机游走	2.5 μg/√Hz
谐振频率	18 kHz
标度因数	195 Hz/g
标度因数重复性	>10 ppm
量程	±30 g
非线性度	100 ppm
供电电压	1.5 V
功耗	3.5 mW

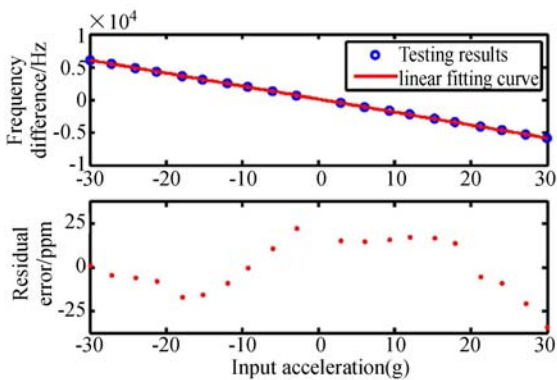


图 9 离心实验响应及线性拟合残差

Fig.9 Response of centrifugal test and the residual error after linear fitting

参考文献:

[1] ZWAHLEN P, et al.. Breakthrough in high performance inertial navigation grade sigma-delta MEMS accelerometer [C]. *IEEE PLANS Conference*, 2012:15-19.
 [2] BEITIA J, CLIFFORD A, FELL C. Quartz pendulous accelerometers for navigation and tactical grade

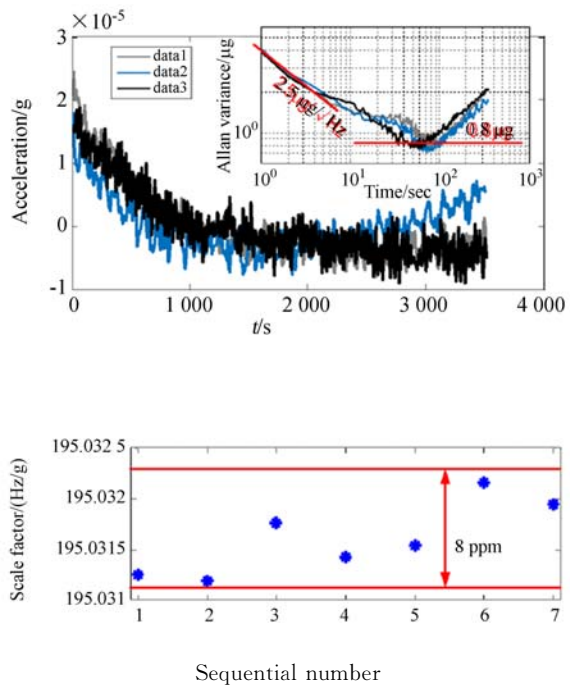


图 10 零偏稳定性与标度因数重复性测试

Fig.10 Measurement results of (A) bias stability and (B) repeatability of scale factor

5 结 论

本文介绍了小型化硅微谐振式加速度计,主要由在 80 μm 厚度 SOI 工艺下制成的 MEMS 芯片和标准 0.35 μm 工艺制成的 ASIC 芯片组成。通过合理设计加速度计结构,以及在电路设计中采取了多项降低噪声和功耗的技术,最终样机在 ±30 g 量程下,实现了 1 μg 的零偏不稳定性 and 2.5 μg/√Hz 的分辨率。并且仅仅消耗 3.5 mW 功耗。为硅微谐振式加速度计在中等精度导航应用打下了基础。

systems [C]. *IEEE Inertial Sensors and Systems, Karlsruhe, Germany*, 2015:1-20.
 [3] SERGEI A. ZOTOV. High quality factor resonant MEMS accelerometer with continuous thermal compensation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15 (9):5045-5052.
 [4] LIN He, et al.. A CMOS readout circuit for SOI resonant accelerometer with 4 μg bias stability and

- 20 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ resolution [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2008, 43(6): 1480-1490.
- [5] 石然, 袁安萍, 苏岩. 硅微谐振式加速度计的实现及性能测试[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12): 2583-2589.
- SHI R, QIU A P, SU Y. Implementation and experiments of micromechanical differential silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2583-2589. (in Chinese)
- [6] 王岩, 张玲, 邢朝洋. 硅微谐振加速度计高精度相位闭环控制系统设计与实现[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 688-692.
- WANG Y, ZHANG L, XING CH Y. Design and implement of high precision phase closed-loop control system for silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 688-692. (in Chinese)
- [7] 王帆, 董景新, 赵淑明. 硅微振梁式加速度计的温度检测及闭环控制[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1590-1597.
- WANG F, DONG J X, ZHAO SH M. Temperature measurement and close loop control of silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2583-2589. (in Chinese)
- [8] HOPKINS, RALPH. The silicon oscillating accelerometer: A high-performance MEMS accelerometer for precision navigation and strategic guidance applications [J]. *Technology Digest*, 2006.
- [9] XIA G M, QIU A P, SHI Q, et al.. A wafer level vacuum packaged silicon vibration beam accelerometer [J]. *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS)*, 2015: 1-4.
- [10] 姜绍栋. 硅微机械陀螺敏感结构的理论研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- JIANG SH D. *Theoretical Reserch on Sensitive Structure of Silicon Micromachined Gyroscope* [D]. Nanjing: naging University of Science and Technology, 2015.
- [11] 袁安萍, 董金虎. 硅微谐振式加速度计的温度效应及补偿[J]. *纳米技术与精密工程*, 2012, 10(3): 215-219.
- QIU A P, DONG J H. Temperature effect and compensation of silicon resonant accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 10(3): 215-219. (in Chinese)
- [12] SEUNGBAE L, CLARK T C N. Influence of automatic level control on micromechanical resonator oscillator phase noise [C]. *IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition*, 2013: 341-349.
- [13] ZHAO Y, ZHAO J. A Sub- μg bias-instability MEMS oscillating accelerometer with an ultra-low-noise read-out circuit in CMOS [J]. *Journal of Solid-State Circuits*, 2015, 50(9): 2113-2126.
- [14] GUNHEE H, EDGAR S S. CMOS Transconductance multipliers: A tutorial [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Analog and Digital Signal Processing*, 1998, 45(12): 1550-1563.
- [15] JAEWOOK K. Analysis and design of voltage-controlled oscillator based analog-to-digital converter [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2010, 57(1): 18-30.
- [16] JELLE V R, GEORGES G. An energy-efficient capacitance-controlled oscillator-based sensor interface for MEMS sensors [C]. *IEEE Asian Solid-State Circuits Conference, Singapore*, 2013: 405-408.
- [17] LORET T. Navigation grade accelerometer with quartz vibrating beam [C]. *Inertial Sensors and Systems, Karlsruhe, Germany*, 2014: 1-14.

作者简介:



赵健(1989—),男,陕西汉中,博士研究生,2011年于南京理工大学获得学士学位,主要从事MEMS传感器读出电路的研究。E-mail: elfevil007@126.com

导师简介:



苏岩(1967—),男,江苏苏州人,教授,博士生导师,1996年、2001年于东南大学分别获得硕士、博士学位,主要从事MEMS传感技术研究。E-mail: suyan@mail.njust.edu.cn