文章编号 1004-924X(2010)12-2583-07

硅微谐振式加速度计的实现及性能测试

石 然,裘安萍,苏 岩
(南京理工大学 MEMS 惯性技术研究中心,江苏 南京 210094)

摘要: , DDSOG(Deep Dry Silicon on Glass)
, 、 。 、 3
, 。 ,
。 ,
, ±50 g, 143 Hz/g, 1.2 mg, 0.88 mg, 170 μg。
,DDSOG , ,
。

关 键 词:硅微谐振式加速度计;谐振器;差动结构;DDSOG
中图分类号:TH824.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101812.2583

Implementation and experiments of micromechanical differential silicon resonant accelerometer

SHI Ran, QIU An-ping, SU Yan

(*MEMS Inertial Technology Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: To improve the performance of MEMS accelerometers, a micromechanical Silicon Resonant Accelerometer (SRA) prototype fabricated by Deep Dry Silicon on Glass (DDSOG) process was introduced, and some experiments for the accelerometer were performed. The structure, processing methods and the interface circuit of SRA were discribed in detail. The SRA adopted the differential structure composed of two identical resonators to eliminate common mode errors, and used the micro lever mechanism to magnify the scale factor. An interface circuit using the Automatic Gain Control (AGC) circuit was designed to maintain the oscillator stability, which could drive the resonator to achieve self-oscillation and to detect the frequency output. The relation between input acceleration and SRA frequency output was researched and the performance parameters of the prototype resonant accelerameter were tested. The test results show these performance parameters to be the sensitivity in 143 Hz/*g*, input range in ±50 *g*, bias stability in 1.2 mg, bias repeatability in 0.88 mg and the threshold in 170 μ*g*. Moreover, it is found that the temperature coefficient of glass substrate is larger than that of

收稿日期:2010-03-12;**修订日期:**2010-05-28.
基金项目: (No. 9140A09022309BQ0221)

(a)

(a)Etch structure on silicon wafer

(b)

(b)Depositing metal electrodes on glass substrate

(c) -

(c)Bonding glass substrate to silicon wafer

(d) 、

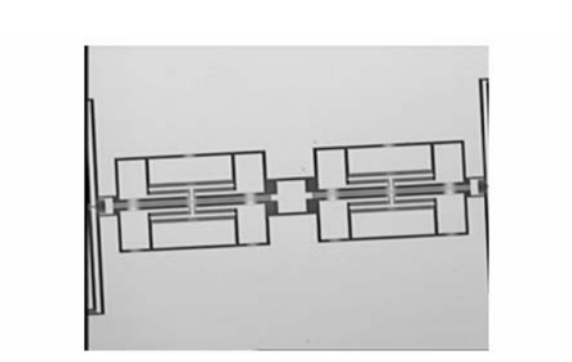
(d)Thinning and polishing on silicon wafer

(e) 、

(e)DRIE through silicon wafer to release structure

2 DDSOG

Fig. 2 Fabrication process of DDSOG



3

Fig. 3 Die photo of SRA

2.3 真空封装

,

, 。

, ;

, 。

, LCC

。 4 。

4

Fig. 4 Vacuum fabricated SRA

2.4 接口电路

、

,

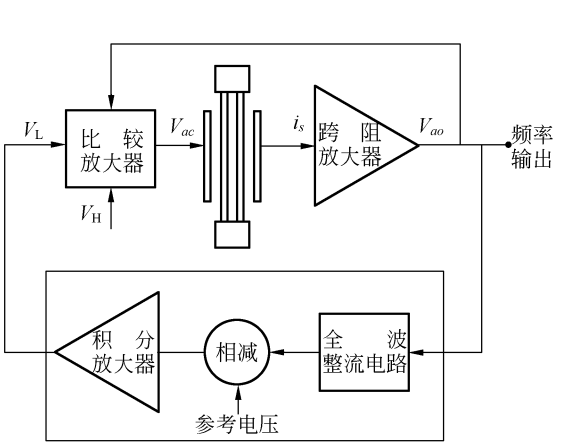
。

, 。

,

,

[5]。 5 ,



5

Fig. 5 Interface circuit for accelerometer

、 、

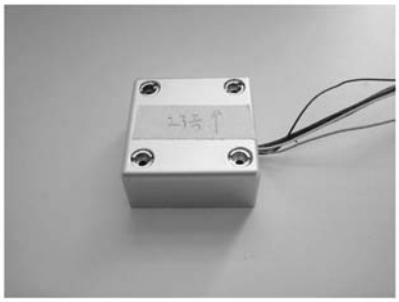
3 。

2.5 整表组装

PCB

， 。

6 。



6

Fig. 6 SRA prototype

3 工作机理

f a

[3]

$$f=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_{\text{eff}}}{M_{\text{eff}}}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{16.55Eh(\frac{w}{L})^3+4.85\frac{nMa}{4L}}{0.397\rho whL+m}}\ , \tag{1}$$

K_{eff} ； M_{eff}

； E ； ρ ； L, w, h 、 、 ； m ； M ； n 。

a 0 ，

$$f=f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{16.55Eh(\frac{w}{L})^3}{0.397\rho whL+m}}\ , \tag{2}$$

f_0 。

(2) (1)

$$f=f_0\sqrt{1+\frac{0.073nML^2}{Ehw^3}a}\ . \tag{3}$$

$$\Delta f=f_0\sqrt{1+\frac{0.073nML^2}{Ehw^3}a}-f_0\sqrt{1-\frac{0.073nML^2}{Ehw^3}a}=f_0\frac{0.073nML^2}{Ehw^3}a+\frac{1}{8}f_0(\frac{0.073nML^2}{Ehw^3}a)^3, \tag{4}$$

$f_0\frac{0.073nML^2}{Ehw^3}$,

。

1

。

表 1 设计参数

Tab. 1 Designed parameters of SRA

/μm	16
/μm	8
/μm	4
/μm	4
/μm	8
/μm	1 000
/μm	30×660
/μm	6×300
/μm	60
/kg	1.27×10^{-6}
/(Hz/g)	95

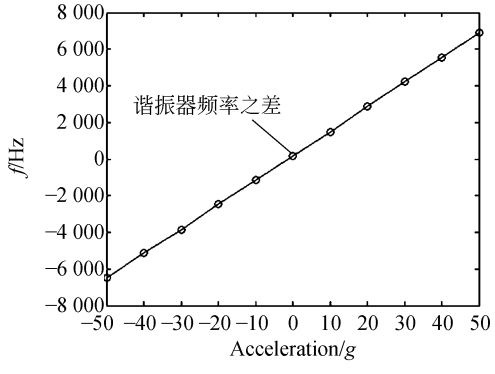
4 性能测试

4.1 量程及标度因数的测试

， ，

。 ， ， 10 g 1 ， 50 g。 ， 。 7 ， ±50 g， 143 Hz/g， 0.32%。

18.008 kHz 18.182 kHz。



7

Fig. 7 Results of centrifuge test for SRA

4.2 零位测试

,

1 h , 7 ,

8 。 (5)

(6)

,

1.2 mg, 0.88 mg。

$$\sigma_{K_{0m}}=\sqrt{\frac{1}{l-1}\sum_{i=1}^{l}(K_{0mi}-\overline{K}_{0m})^2}$$

, (5)

$$K_{0w}=\frac{1}{n}\sum_{m=1}^{n}\sigma_{K_{0m}}$$

$$\overline{K}_0=\frac{1}{n}\sum_{m=1}^{n}\overline{K}_{0m}$$

$$K_{0r}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{m=1}^{n}(K_0-\overline{K}_{0m})^2}$$

, (6)

,n ,l ,

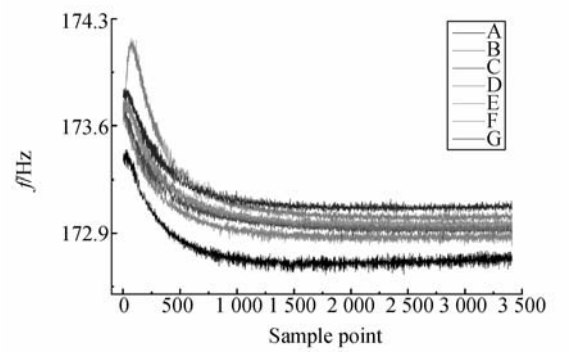
K_{0mi} m i ,$\overline{K}_{0m}$

m ,$\sigma_{K_{0m}}$ m

,K_{0w} ,K_{0m} m

,$\overline{K}_0$,K_{0r}

。



8

Fig. 8 SRA bias curve

4.3 整体性能参数

,

2 。

表 2 硅微谐振式加速度计的整体性能参数

Tab. 2 Performance parameters of SRA

/g	±50
/kHz	18.008,18.182
/(Hz/g)	143
/mg	1.2
/mg	0.88
/μg	170

, ,

, ,

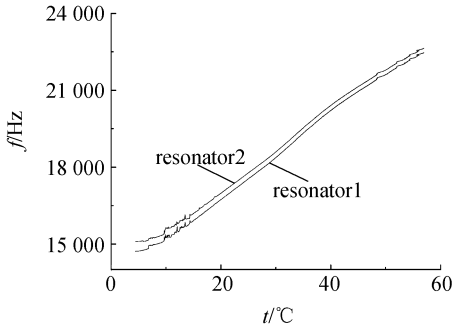
。 9

。 ,

。 , SOI

, ,

。



9

Fig. 9 Bias temperature sensitivity of resonators

5 结 论

DDSOG

。

、

, 。

, 。

: ±50 g, 143 Hz/g,

1.2 mg, 0.88 mg, 170 μg。

,

。

, SOI ,

, 。

致谢:本文中硅微谐振式加速度计样机的机械敏感结构芯片采用中国电子科技集团第 13 研究所的 DDSOG 工艺加工,感谢在此过程中杨拥军博士及其同事的帮助。

参考文献:

[1] HOPKINS R E, BORENSTEIN J T. The silicon oscillating accelerometer: a MEMS inertial instrument for strategic missile guidance [C]. *The Missile Sciences Conference*, 2000:45-51.

[2] SEOK S, KIM H, CHUN H. An inertial-grade laterally-driven MEMS differential resonant accelerometer [C]. *IEEE Sensors Conference*, *Vienna*, 2004:654-657.

[3] 裘安萍,庄瑞芬,施芹.
[J].中国惯性技术学报,2009,17(1):93-97.
QIU A P, ZHUNG R F, SHI Q. Structure design and simulation of micromechanical silicon oscillating accelerometer [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009,17(1):93-97. (in Chinese)

[4] 庄瑞芬.硅微谐振式加速度计结构设计技术研究[D]. : ,2009.
ZHUNG R F. *Structure design of silicon MEMS resonant accelerometer* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009. (in Chinese)

[5] . [M]. : ,2006.
LI J M. *Design of Capacitive MEMS Gyroscope* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)

[6] ROESSIG T A. *Integrated MEMS tuning fork oscillators for sensor applications* [D]. Berkeley: University of California, UMI, 1998.

[7] CENK A, ANDREI S. *MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness* [M]. New York: Springer, 2008.

[8] 赵声衡,赵英.晶体振荡器[M]. : ,2008.
ZHAO S H, ZHAO Y. *Crystal Oscillator* [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)

[9] 施芹,裘安萍,苏岩,等.硅微机械陀螺仪的机械耦合误差分析[J].光学 精密工程,2008,16(5):893-898.
SHI Q, QIU A P, SU Y, *et al*.. Mechanical coupling error of silicon microgyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 893-898. (in Chinese)

[10] ROESSIG T A, HOWE R T, PISANO A P, *et al*.. Surface-micromachined resonant accelerometer [C]. 1997 *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, *Chicago*, 1997, 6: 859-862.

[11] JIA Y B, HAO Y L, ZHANG R. Double tuning-fork resonant accelerometer [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2004,4(8):1812-1815.

[12] WOJCIECHOWSKI K E, BOSER B E, PISANO A P. A MEMS resonant strain sensor operated in air [C]. *Proc. 17th Int. IEEE Micro Electro Mech. Syst. Conf.*, 2004,1:841-845.

[13] 李建利,房建成,盛蔚,等.
MEMS [J].光学 精密工程,2008,16(3):484-491.
LI J L, FANG J C, SHENG W, *et al*.. Calculation and simulation of silicon MEMS gyroscope with dual-mass resonant output [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):484-491. (in Chinese)

[14] 施芹,苏岩,裘安萍,等. MEM
[J].光学 精密工程,2009,17(8):1987-1992.
SHI Q, SU Y, QIU A P, *et al*.. Device level vacuum packaging technologies of MEMS gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1987-1992. (in Chinese)

作者简介：

石 然(1986－)， ， ，
，2008
， MEMS
。E-mail：whatghosts@hotmail.com

裘安萍(1971－)， ， ，
， ，1998 、2001
、 ，
MEMS 。E-mail：apqiu@mail.njust.edu.cn

导师简介(通讯作者)：

苏 岩(1967－)， ， ，
， ，1996 、2001
、 ，
MEMS 。E-mail：suyan@mail.njust.edu.cn

●下期预告

垂直腔面发射半导体激光器自混合测速实验

吕 亮，张 可，戴绩俊，朱 军，甄胜来，郝文良，俞本立
(安徽大学 光电信息获取与控制教育部重点实验室，安徽 合肥 230039)

、 ， 、 、 、
。 ，
， 、 。
； 1 1.4
。 ，
17 s ， 。
， 。