Design of Closed-Loop Readout Circuit Based on MEMS Capacitive Accelerometer*

XU Jiao[1], *ZHANG Yulong*[2], *YANG ZHongbao*,[2] *WU Cinan*[1], *LIU Zewen*[2]*

(1. *College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou* 550025, *China*;
2. *Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: A closed-loop accelerometer readout circuit for wafer-level packaging is designed. The influence of parasitic capacitance on the whole system is considered in the design of readout circuit based on capacitive microaccelerometer structure. The readout circuit is modeled and simulated by MATLAB SIMULINK. In the process of simulation, the influence of noise, parasitic parameters of wafer-level package and ordinary package and and the asymmetry of flow structure in actual process are analyzed and compared. The results show that the nonlinear error of the designed sensor and readout circuit is less than 0.5% in the range ±20 g_n; A stable time of 2 ms, for wafer level packaging; An output voltage sensitivity of a symmetrical comb structure based on a wafer-level package is 328 mV/g_n.

Key words: microaccelerometer; simulation model; mathematical modeling; Unequal comb teeth; wafer level encapsulation

EEACC: 7230M **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2021.02.004

基于 MEMS 电容式加速度计的闭环读出电路设计*

徐 娇[1], 张玉龙[2], 杨中宝[2], 吴次南[1], 刘泽文[2]*

(1. 贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

摘 要: 设计了面向圆片级封装的一种闭环加速度计读出电路。在基于电容式微加速度计结构的读出电路设计中考虑了寄生电容对整个系统的影响。用 MATLAB SIMULINK 对所设计的读出电路进行了建模仿真。在仿真过程中分析了噪声、圆片级封装与普通封装的寄生参数及实际工艺中流水结构的不对称性的影响并进行了比较。结果表明, 所设计传感器及读出电路的非线性误差在量程±20 g_n 范围内小于 0.5%; 圆片级封装的稳定时间在 2 ms, 小于普通封装的稳定时间; 基于圆片级封装的对称性梳齿结构的输出电压灵敏度为 328 mV/g_n。

关键词: 微加速度计; 仿真模型; 数学建模; 不对称梳齿; 圆片级封装

中图分类号: TP212 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2021)02-0162-06

加速度计在汽车、手机、航天航空等领域具有广泛的应用。市场对加速度性能、功耗和尺寸的要求越来越高。现代集成加速度计通常由传感器与读出电路两个部分组成, 传感器将得到的加速度转换成电流、电容等电学信号。读出电路将所得到的小信号经过一系列处理, 输出所需要的、便于检测的与加速度成比例的信号[1]。所以, 读出电路的品质对微加速度计的性能有很大的影响, 包括噪声水平、线性度和动态范围。将传感器和读出电路作为一个系统进行设计, 对实现高性能加速度计具有重要意义。

有许多文献对传感器的建模和仿真进行了研究, 仿真方法有 SIMULINK 电模型、SIMULINK 数字模型[2]、COMSOL 有限元分析等[3]; 读出电路结构有开环结构、闭环结构, 闭环结构有时分力反馈模型、Σ-Δ 闭环检测模型等。时分力反馈电路结构将连续时间转换为离散时间并进行仿真, 仿真结果与连续时间模型一致, 但实际电路中结构占用面积大、结构复杂[4]; Σ-Δ 闭环检测电路结构仿真中只有高

项目来源: 国家级重点研发计划项目(2018YFB2002800)
收稿日期: 2020-10-12 **修改日期**: 2021-01-04

阶结构性能优势,可用于提高动态范围等性能[5];闭环结构较开环结构具有明显的灵敏度及线性度优势[6-7],虽占用面积较大,但结构简单。

利用 MATLAB SIMULINK 仿真是目前加速度传感器仿真设计的最常用方法。Biter Boga 等人在设计读出电路时考虑到了噪声参数的因素影响,并得到总噪声为 58.7 $\mu g/\sqrt{Hz}$[8];Alice Lanniel 等人在传感器中分析了寄生参数对稳定时间的影响[9];Qian K 等人研究的传感器为梳齿不对称性的结构[10],并得到理论电压灵敏度为 2.02 mV/g_n,电压灵敏度误差小于 2%。加速度传感器的信号检测有多种方式[11],包括谐振式、压阻式、隧穿电流式、电容式等。其中闭环反馈电容式检测方法具有稳定性好、精度高的优点。本文所设计的闭环反馈读出电路由差分电容器、电容电压转换器、采样保持电路、PID 比例积分微分调节器以及二阶低通滤波器组成。对所设计的传感器及读出电路用 MATLAB SIMULINK 进行系统级别的建模与仿真。为了全面分析加速度计传感器结构及其读出电路对加速传感器性能的影响,设计仿真中考虑了圆片级封装的寄生参数、噪声影响及工艺导致的梳齿结构不对称等因素。

1　电容加速度计结构及其原理

加速度计的传感器结构图如图 1 所示。它是由质量块、两个蛇型弹性梁以及 18 组梳齿所构成的。当有加速度作用于质量块时,梳齿间的距离发生变化,从而导致了电容的变化。

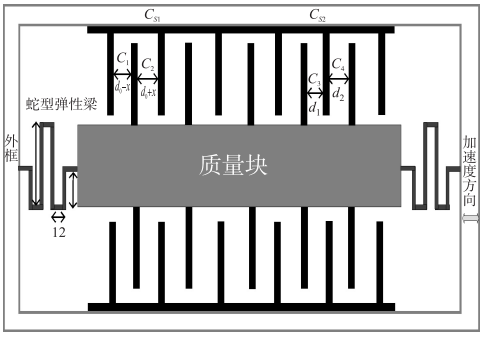


图 1　加速度计传感器结构

加速度计传感器的质量块的运动学方程可表示为:

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+b\frac{dx}{dt}+kx-F_{el}=ma \tag{1}$$

式(1)经过拉普拉斯变化为:

$$H(S)=\frac{x(s)}{a(s)}=\frac{1}{s^2+\frac{b}{m}s+\frac{k}{m}}=\frac{1}{s^2+\frac{w_0}{Q}s+w_0^2} \tag{2}$$

式中:m 为质量块的有效质量,a 为外部的加速度,b、k、F_{el}分别为阻尼系数、弹性系数和静电力;w_0 为系统的固有频率。因此,可得到阻尼系数:

$$w_0=\sqrt{\frac{k}{m}};\frac{b}{m}=\frac{w_0}{Q}=\frac{\sqrt{km}}{mQ} \tag{3}$$

如图 1 所示,此加速度计结构是由两个蛇型弹性梁组成,用来固定支撑质量块;它的弹性系数,如式(4)所示:

$$K_S=\frac{Etw^3}{L_1^3+L_2^3+L_3^3} \tag{4}$$

式中:E 为结构材料的杨性模量,t 为结构层厚度。

2　梳齿结构分析

2.1　对称结构

如果结构中的梳齿是对称的。如图 2 所示,无加速度时,系统处于平衡,梳齿间距离都为 d_0,此时电容值如式(5)所示;当有加速度作用于质量块时,梳齿间距离发生变化,电容值变化如式(6)所示($x \ll d_0$);电容差值如式(7)所示。

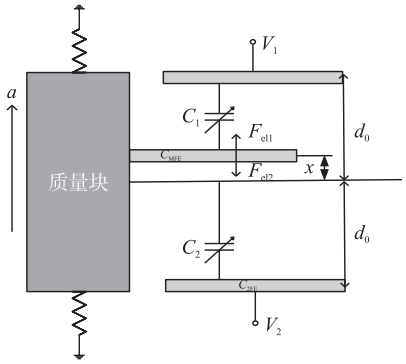


图 2　加速度计原理图

$$C_1=C_2=C_0=\frac{\varepsilon s}{d_0} \tag{5}$$

$$C_1=\frac{\varepsilon s}{d_0-x}=\frac{\frac{\varepsilon s}{d_0}}{1-\frac{x}{d_0}}=C_0\frac{1+\frac{x}{d_0}}{1-\frac{x^2}{d_0^2}}\approx C_0\left(1+\frac{x}{d_0}\right)$$
$$C_2=\frac{\varepsilon s}{d_0+x}=\frac{\frac{\varepsilon s}{d_0}}{1+\frac{x}{d_0}}=C_0\frac{1-\frac{x}{d_0}}{1-\frac{x^2}{d_0^2}}\approx C_0\left(1-\frac{x}{d_0}\right) \tag{6}$$

$$\Delta C=2C_0\frac{x}{d_0} \tag{7}$$

如果分别在固定电极 C_{1FE}、C_{2FE}加上交流电压 v_1、v_2。那么下面的静电力作用在移动电极板上如图 2 所示。

$$v_1=-v_2=V_1\sin(wt) \tag{8}$$

$$F_{el1}=\frac{\varepsilon s}{2}\frac{v_1^2}{(d_0-x)^2};F_{el2}=\frac{\varepsilon s}{2}\frac{v_1^2}{(d_0+x)^2}$$

$$F_{el}=F_{el1}-F_{el2}=\frac{\varepsilon s v_1^2}{2}\left[\frac{1}{(d_0-x)^2}-\frac{1}{(d_0+x)^2}\right]=$$

$$\frac{1}{2}\varepsilon s V_1^2\sin^2 wt\left[\frac{1}{(d_0-x)^2}-\frac{1}{(d_0+x)^2}\right]=$$

$$\frac{1}{4}\varepsilon s V_1^2(1-\cos^2 wt)\left[\frac{1}{(d_0-x)^2}-\frac{1}{(d_0+x)^2}\right]\approx$$

$$\frac{1}{4}\varepsilon s V_1^2\left[\frac{1}{(d_0-x)^2}-\frac{1}{(d_0+x)^2}\right] \quad (9)$$

2.2 不对称结构

在实际实验制作中,由于工艺的影响,梳齿结构很可能会发生不对称性,当梳齿不对称,则差分电容、静电力都会发生改变。为了分析工艺对性能的影响。假设一共 n 对梳齿电容,由式(5)~式(7)可得到,并用泰勒展开可表示为:

$$C_{s1}=\varepsilon s\left(\frac{n}{d_1+x}+\frac{n-1}{d_2-x}\right)\approx$$

$$\varepsilon s\left\{\frac{n}{d_1}\left[1-\frac{x}{d_1}+\left(\frac{x}{d_1}\right)^2\right]+\frac{n-1}{d_2}\left[1+\frac{x}{d_2}+\left(\frac{x}{d_2}\right)^2\right]\right\}$$

$$C_{s2}=\varepsilon s\left(\frac{n}{d_1-x}+\frac{n-1}{d_2+x}\right)\approx$$

$$\varepsilon s\left\{\frac{n}{d_1}\left[1+\frac{x}{d_1}+\left(\frac{x}{d_1}\right)^2\right]+\frac{n-1}{d_2}\left[1-\frac{x}{d_2}+\left(\frac{x}{d_2}\right)^2\right]\right\}$$

$$\Delta C=C_{S1}-C_{S2}=2\varepsilon s x\left(\frac{n}{d_1^2+x^2}-\frac{n-1}{d_2^2-x^2}\right)\approx$$

$$2\varepsilon s x\left(\frac{n}{d_1^2}-\frac{n-1}{d_2^2}\right) \quad (10)$$

由式(9)、式(10)得到此时的静电力为

$$F_{el}=\frac{\varepsilon s V_1^2}{2}\left[\frac{n}{(d_1-x)^2}-\frac{n}{(d_1+x)^2}+\frac{n-1}{(d_2-x)^2}-\frac{n-1}{(d_2+x)^2}\right] \quad (11)$$

将 d_1、d_2 的值设为三组对比数据分为 d_{10}、d_{20};d_{11}、d_{21};d_{12}、d_{22},其值如表一所示,并进行仿真对比分析。

3 加速度计及其读出电路等效电路的仿真模型

速度计的等效电路图如图 3 所示,由差分电容器、电容电压转换器、采样保持电路、PID 比例积分微分调节器、二阶低通滤波器及反馈电路组成。

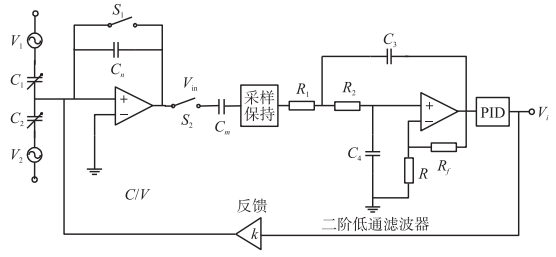


图 3 读出电路等效电路图

3.1 寄生参数及噪声分析

3.1.1 寄生参数

在实验制作和封装过程中,传感器及读出电路会产生很大的寄生电容。所以在仿真过程中需要将寄生电容 C_m 考虑在电路里。由图 3 可得如下方程:

$$SC_1(V_1-V_{in})+SC_2(V_2-V_{in})+SC_m(-V_{in})=0$$

$$V_{in}=\frac{C_1-C_2}{C_1+C_2+C_m}=\frac{V_1}{2C_0+C_m}\Delta C \quad (12)$$

圆片级封装,即将传感器与读出电路封装在一个芯片里,减少了传感器与读出电路的导线连接长度,从而减少了寄生电容。不同的封装会产生不同的寄生参数。

由电容公式 $C=\frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}=\varepsilon\varepsilon_0\frac{RL}{d}$

ε:介质介电常数;ε_0:真空介电常数;S:电极板正对面积;R:导线直径;d:导线到衬底的距离都为 0.05 μm;L:导线长度。若圆片级封装的导线长度 L_1 为 0.5 mm~1.0 mm,普通封装的导线长度 L_2 为 10 mm~20 mm。

可以得到,圆片级封装的寄生电容较普通封装减少 10 倍~20 倍。即圆片级封装的寄生电容为 4 pF~8 pF,普通封装的寄生电容为 40 pF~80 pF。

3.1.2 噪声分析

不同的噪声源会对加速度计产生不同的影响,所以对闭环电路来讲,需要对布朗噪声、放大器噪声及开关噪声考虑分析。

布朗噪声是由于质量块的热运动产生的,在系统中为白噪声输入[12],它表示为

$$a_n^2=\frac{4K_BTb}{9.8^2m^2}(g^2/HZ) \quad (13)$$

放大器噪声由热噪声和闪烁噪声组成,通常来讲,使用双相关采样可消除闪烁噪声[13],所以放大器噪声可表示为

$$V_{out\_thermal}=\sqrt{\frac{C_1+C_2}{C_n}\frac{K_BT}{C_m}\frac{1}{f_s}} \quad (14)$$

f_s 为采样频率;

KT/C 噪声是电路中主要的噪声源之一[14],其可表示为

$$V_{out\_KT/C}=\sqrt{\frac{4K_BT}{f_sC_n}} \quad (15)$$

3.2 SIMULINK 模型

本文采用二阶低通滤波器对读出电路进行处

理,所采用的二阶低通滤波器的基本原理图如图 3 所示[15];二阶低通滤波器的传递函数如下所示:

$$G(S)=\frac{V_0(S)}{V_i(S)}=\frac{A_{uf}}{\left(\frac{s}{w_n}\right)^2+\frac{1}{Qw_n}s+1}=\frac{A_{uf}}{a_2s^2+a_1s+1} \quad (16)$$

式中:A_{uf} 为通带增益;Q 为等效品质因数;$w_n=\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}$:特征角频率。当 $A_{uf}<3$ 时,滤波器才能正常工作,本文中的参数为 $A_{uf}=1.58$;$R_1=R_2=160\ \text{k}\Omega$;$C_1=C_2=1.2\ \text{nF}$;$a_2=1/w_n^2=0.000\ 192$,$a_1=1/Qw_n=0.009\ 796$。

当系统在平稳状态时,质量块的位移 x 必须为零,所以此时需要具有传递函数功能的比例积分微分调节器;因为系统采用的是闭环反馈结构读出电路,灵敏度及线性度性能较好。当零加速度作用于系统时,采用静电力作为反作用力,才能使质量块在两电极处处于平衡状态。

采用 SIMULINK 对读出电路进行建模仿真,如图 4 所示。

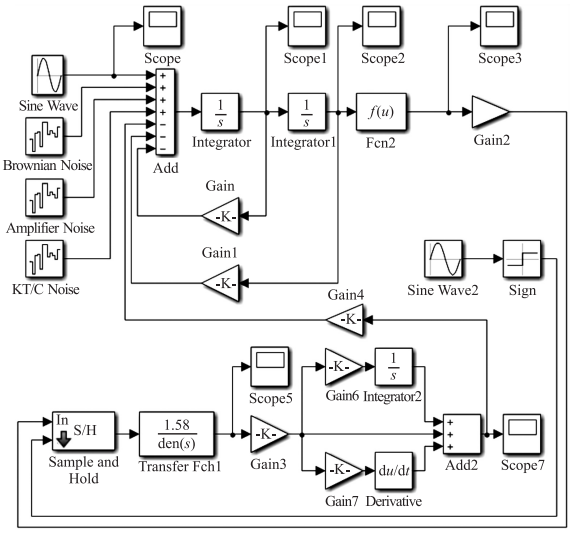


图 4　SIMULINK 模型

4　仿真及结果分析

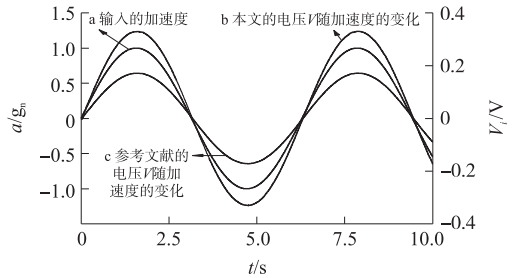
本文所采用的结构和参数如表 1 所示。

此读出电路的输入加速度信号、输出电压信号随采样时间的变化如图 5(a)中的 a、b 曲线。传感器质量块位移输出、差分电容输出与加速度输入间的关系如图 5(b)所示。

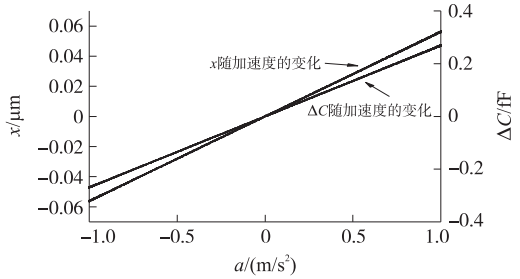
从图 5(a)可以看出,当输入正弦的加速度信号时,质量快位移和电压信号的输出具有一致的时变特性。为了验证本仿真的正确性,曲线 c 给出了利用 F. Chen 在 2017 年所发表的文献[16]中的参数仿真得到的输出电压信号,可以看到,采用我们的仿真模型所得到的结果与所发表的文献结果一致。从图 5(b)可以看出,位移输出、差分电容输出与加速度输入成线性关系。电容灵敏度 0.270 fF/g_n。

表 1　参数

参数	值	参数	值
m	7.4 mg	n	18 对
k	131.64 N/m	t	50 μm
E	169 GPa	W_S	6.5 μm
d_0	9 μm	L_1	275 μm
A	10.08 mm^2	L_2	20 μm
μ	1.8×10^{-5} NS/m	L_3	138 μm
梳齿重叠宽 W_f	5 μm	梳齿重叠长 L_f	220 μm
d_{10}	8 μm	d_{20}	10 μm
d_{11}	6 μm	d_{21}	12 μm
d_{12}	4 μm	d_{22}	14 μm



(a) 输入加速度a、输出电压V_i随采样时间的变化



(b) 位移x输出、差分电容ΔC输出随加速度输入的变化

图 5　输入加速度 a 与输出电压 V_i 随采样时间的变化和位移 x 输出与差分电容 ΔC 输出随加速度输入的变化

加速度 a 输出随位移 x 输入的变化如图 6 所示。

从图 6 可以看出,位移在±1 μm,即梳齿振动为梳齿间距 1/10 左右,该图表明利用我们的结构参数设计出的加速度量程为±20 g_n。

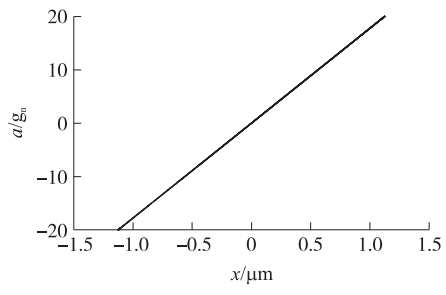


图 6　加速度 a 输出随位移 x 输入的变化

为了考虑工艺所影响的梳齿结构,对对称梳齿及不对称梳齿进行仿真分析。对称梳齿结构和不对称梳齿结构的输出电压与输入加速度之间的关系如图 7 所示。曲线 C、D、E、F 分别为传感器的对称梳齿结构、不对称梳齿结构 $d_{10}=8\ \mu m$;$d_{20}=10\ \mu m$、不对称梳齿结构 $d_{11}=6\ \mu m$;$d_{21}=12\ \mu m$、不对称梳齿结构 $d_{12}=4\ \mu m$;$d_{22}=14\ \mu m$ 的电压输出随加速度输入的曲线。

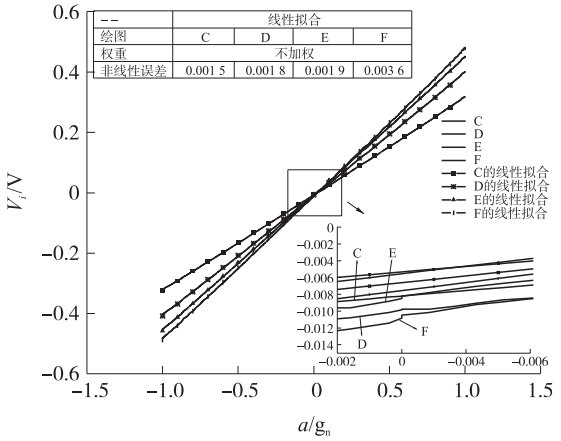


图 7 对称梳齿结构、不对称梳齿结构的非线性误差对比

从图 7 中可以看出,非线性误差均在 0.5% 内,非线性误差随着不对称结构的梳齿间距离差值的增加而逐渐变大。

圆片级封装与普通封装的输出电压与输入加速度之间的关系如图 8 所示。C、J 曲线分别为圆片级封装、普通封装。

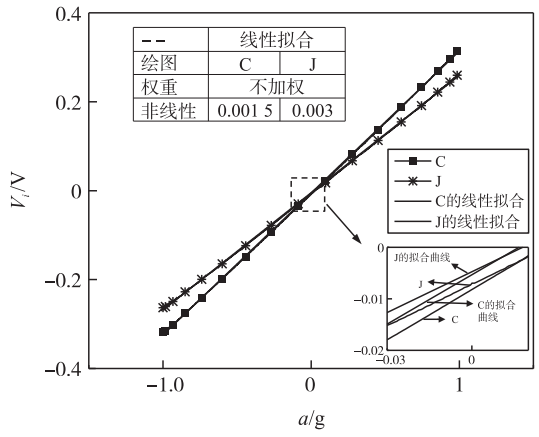


图 8 圆片级封装、普通封装的非线性误差对比

从图 8 中可以看出,本电路设计中,普通封装和圆片级封装的非线性误差均在 0.5%内,普通封装的非线性误差大于圆片级封装的非线性误差。

圆片级封装与普通封装的稳定时间如图 9 所示。从图 9 可以得到,圆片级封装的稳定时间在 2 ms,普通封装的稳定时间在 4 ms。

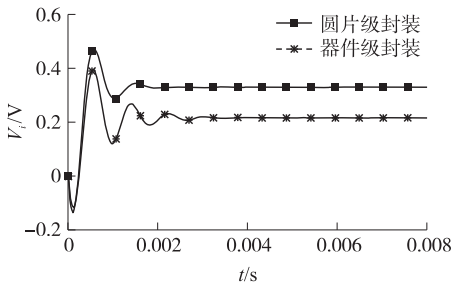


图 9 圆片级封装、器件级封装的稳定时间对比

5 结论

由电容式加速度计传感器的运动学理论与基本原理,设计了一款闭环反馈读出电路系统仿真模型。在 SIMULINK 仿真过程中分析了噪声、圆片级封装与普通封装的寄生参数比较及实际工艺中流水结构的不对称性。结果表明,位移、差分电容以及输出电压是与输入加速度成线性关系的;所设计传感器及读出电路的非线性误差在量程±20 g_n 范围内小于 0.5%;且对称梳齿结构的线性度优于不对称梳齿结构,随着不对称梳齿的距离差值逐渐增大时,非线性误差也在逐步变大;圆片级封装的非线性误差小于普通封装的非线性误差。圆片级封装的稳定时间在 2 ms,小于普通封装的稳定时间;基于圆片级封装的对称性梳齿结构的输出电压灵敏度为 31.922 mV/g_n。

此读出电路模型可减小非线性误差。为提高传感器性能,在实际工艺中,应将梳齿尽量对称化进行圆片级封装。

参考文献:

[1] Zhang Y, Liu X, Chen W. System-Level Modeling and Simulation of Force-Balance MEMS Accelerometers[J]. Journal of Semiconductors, 2008, 29.5: 917-922.

[2] Strache S, Wunderlich R, Droste D, et al. MATLAB/Simulink Model of a MEMS Accelerometer Read-Out Circuit[J]. Procedia Engineering, 2010, 5(5): 508-511.

[3] Nazdrowicz J, Szermer M, Maj C, et al. Different Methods of Capacitive Comb Drive MEMS Accelerometer Simulations[C]//In 2018 Baltic URSI Symposium(URSI). IEEE. 2018: 254-256.

[4] Sun Z Y, Yin L, Yu J H. A Closed-Loop Readout Interface for MEMS Accelerometer with Time-Multiplexing Electrostatic Force Feedback[J]. Modern Physics Letters B, 2019, 33(35): 1950447.

[5] Liu, Xiaowei, Xu, et al. Nonlinearity Analysis of Closed-Loop Sigma Delta Micro-Mechanical; Accelerometer [J]. Key Engineering Materials, 2013, 565: 380-386.

[6] Grigorie, Teodor Lucian. The MATLAB/Simulink Modeling and Numerical Simulation of an Analogue Capacitive Micro-Accelerometer. Part 1: Open loop[C]//International Conference on Perspective Technologies & Methods in Mems Design. IEEE, 2008.

[7] Zhang Tingting, Li Haojiong, Huang Jingqing, et al. An s-z Domain Transformation Method for the Readout Circuit Design of Closed-

loop Micromechanical Capacitive Accelerometer[C]//8th IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit(EDSSC). 2012.

[8] Boga B, Ocak I E, Kulah H, et al. Modeling of a Capacitive Σ-Δ MEMS Accelerometer System Including the Noise Components and Verification with Test Results[C]//IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems. IEEE, 2009.

[9] Lanniel A, Boeser T, Aichholz L, et al. Impact of Parasitics on the Settling Time of a Readout Circuit for High Performance MEMS Accelerometers[C]//IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems(INERTIAL). IEEE, 2019.

[10] Qian K, Luo W, Yu Q. Research on Electromechanical Model of Micro-Accelerometer Based on SOI Technology[C]//IEEE International Conference on Asic. IEEE, 2011.

[11] Zhang H, Wei X, Jiang Z. Comparison Study of Three Readout Methods for a Capacitive MEMS Accelerometer[C]//IEEE SENSORS. IEEE, 2018.

[12] Qi, Guo, Qiao. A High-Temperature, Low-Noise Readout ASIC for MEMS-Based Accelerometers[J]. Sensors, 2019, 20(1): 241.

[13] Zhong L, Lai X, Song H, et al. Differential Capacitive Readout Circuit Using Oversampling Successive Approximation Technique[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems. I, Regular papers, 2018, 65(12): 4072-4085.

[14] 李世银,张楠,武中文,等. 基于小波分析的 MEMS 加速度计去噪优化算法[J]. 传感技术学报,2018,31(5):705-709.

[15] Grigorie, Teodor Lucian. The MATLAB/Simulink Modeling and Numerical Simulation of an Analogue Capacitive Micro-Accelerometer. Part 2: Closed Loop[C]//International Conference on Perspective Technologies & Methods in Mems Design. IEEE, 2008.

[16] Fang C, Yi Z, Wang J, et al. A Single-Side Fabricated Tri-axis (111)-Silicon Micro-Accelerometer with Electromechanical Sigma-Delta Modulation[J]. IEEE Sensors Journal, 2017(99): 1-1.

徐　娇(1996—),女,吉林长春人,贵州大学大数据与信息工程学院硕士研究生,研究方向为微加速度计、读出电路;

吴次南(1962—),男,江西人,博士,贵州大学大数据与信息工程学院教授,研究方向为光电子学、光谱学、理论物理等;

刘泽文(1960—),男,安徽人,博士,清华大学微电子学研究所教授,研究方向为微电子和微系统工艺技术,RF MEMS 器件,集成传感器等,liuzw@tsinghua.edu.cn。