

## 一种用于电容型体硅微陀螺的低噪声读出电路芯片

尹 韬<sup>①</sup> 杨海钢<sup>①</sup> 张 翀<sup>①②</sup> 吴其松<sup>①②</sup> 焦继伟<sup>③</sup> 宓斌玮<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

<sup>③</sup>(上海微系统与信息系统研究所 上海 200050)

**摘要:** 读出电路位于微传感器系统信号通路的最前端, 是决定系统性能的关键因素。本文针对音叉式体硅微陀螺的具体应用, 提出了一种低噪声电容读出电路, 芯片采用斩波技术降低了电路的低频  $1/f$  噪声、失调电压以及参考电压失配的影响, 提高了读出电路的分辨率和动态范围; 提出一种噪声电荷转移的分析方法, 用于分析和预测读出电路的噪声性能; 建立一种简化的微陀螺传感器仿真模型, 用于模拟读出电路对微传感器的响应。读出电路在  $0.35\ \mu\text{m}$  2P4M 标准 CMOS 工艺下设计流片, 并与微传感器进行了联合应用, 芯片面积为  $2\times 2.5\ \text{mm}^2$ , 在 5 V 电源电压, 100 kHz 的时钟频率下, 实现了  $4\ \text{aF}/\sqrt{\text{Hz}}$  的电容分辨率和 94 dB 的动态范围。

**关键词:** 微陀螺; 读出电路; 低噪声; 斩波

中图分类号: TN431.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0203-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01763

## A Low-Noise Readout Circuit for Bulk Micro-Machined Capacitive Gyroscope

Yin Tao<sup>①</sup> Yang Hai-gang<sup>①</sup> Zhang Chong<sup>①②</sup> Wu Qi-song<sup>①②</sup> Jiao Ji-wei<sup>③</sup> Mi Bin-wei<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

<sup>③</sup>(Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** Readout circuit is a key factor determining the performance of MEMS gyroscope system, being at the forefront of the signal loop. This paper presents a low-noise readout circuit for a bulk micromachined tuning fork gyroscope. Using the chopper technique, the circuit can improve the resolution and dynamic range by canceling  $1/f$  noise and offset of the amplifier, and mismatch between reference voltages. Theory predicting the resolution of the readout circuit is given which is based on noise charge transfer method. In order to simulate the response of the circuit with the vibrating gyroscope, a simplified time-varying capacitor model is also proposed. The chip measures  $2\times 2.5\ \text{mm}^2$  in a standard  $0.35\ \mu\text{m}$  2P4M CMOS process. Chip tests with the MEMS gyroscope prove the validity of the concepts proposed and show that the readout circuit achieves a resolution of  $4\ \text{aF}/\sqrt{\text{Hz}}$  with 94 dB dynamic range from a single 5 V supply.

**Key words:** Gyroscope; Readout circuit; Low noise; Chopper

### 1 引言

许多惯性测量的重要应用, 如全球定位系统(GPS)导航、汽车 ESP 自动控制系统、虚拟现实技术等, 都需要高精度、低偏移、低成本的 MEMS 陀螺仪<sup>[1]</sup>。电容型检测具有结构简单、分辨率高、抗干扰能力强、动态响应快、能在恶劣工况条件下工作等特点, 因此成为微陀螺的主要形式。微陀螺传感系统的性能受到 MEMS 工艺、传感器件、读出电路、封装等诸多方面的影响<sup>[2]</sup>, 但对大多数体硅微加工陀

螺来说, 系统的总噪声主要来自读出电路, 因此如何设计出低噪声电容读出电路成为提高微陀螺系统分辨率等性能的关键技术。对体硅微加工工艺而言, 传感器件与读出电路的单芯片集成是非常昂贵而且难以实现的, 因此微陀螺芯片与读出电路芯片的二次集成成为性能和成本间的折衷方案。

连续时间电压读出方式(CTV)在互连寄生电容很小的情况下有着优良的噪声性能, 更适用于传感器和读出电路单片集成的情况, 但需要为检测节点提供低噪声的直流偏置, 如何利用合理的芯片面积, 提供可靠而稳定的直流偏置对连续时间电压检测来说是一个挑战<sup>[3,4]</sup>。相比之下, 开关电容(SC)电荷读

2008-12-22 收到, 2009-06-22 改回

国家 863 计划项目(2007AA04Z349)资助课题

通信作者: 杨海钢 ic\_design\_group@mail.ie.ac.cn

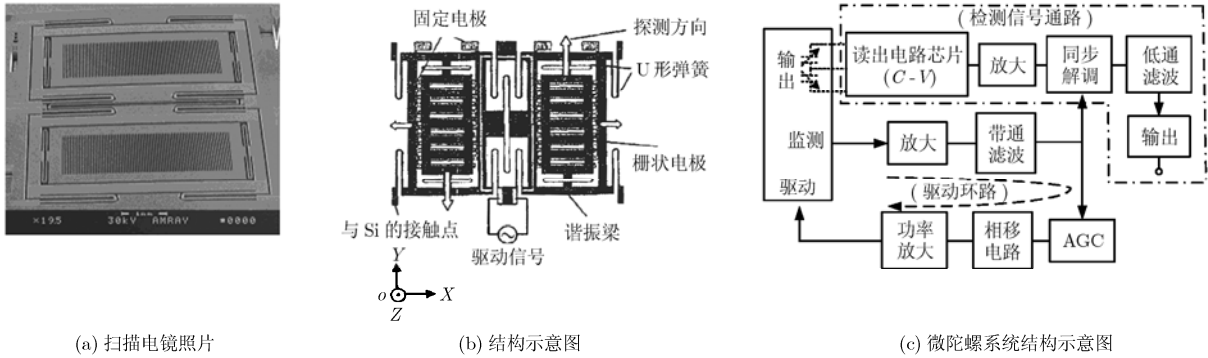


图 1 MEMS 陀螺

出方式更易于 CMOS 工艺实现, 并且容易为电路输入节点提供“虚地”, 降低了输入寄生电容的影响, 因此对微陀螺与读出电路无法单片集成的情况而言, SC 读出方式将成为复杂度和性能间的一种有效折衷方案<sup>[5-9]</sup>。

## 2 微陀螺系统结构

本文的体硅微加工陀螺采用电磁驱动的音叉式结构<sup>[10]</sup>, 如图 1(a)和 1(b)所示, 由制作在硅片上的驱动质量块、检测质量块(可动电极)、弹性梁以及固定电极组成。此陀螺在大气下工作, 谐振频率约为 3 kHz, 带宽约 100 Hz。工作时, 在驱动端输入交变电流, 驱动质量块在电磁力作用下, 作与驱动信号同频的简谐振动, 此时如有 Z 方向角速度输入, 检测质量块将在 Y 轴柯里奥利力(Coriolis)作用下振动, 从而引起其与固定电极间电容变化, 检测该电容变化即可测得角速度。

整个微陀螺系统的结构如图 1(c)所示, 由驱动环路和检测电路两部分组成<sup>[10]</sup>。其中驱动环路用于为陀螺提供驱动信号, 同时为检测电路提供解调信号; 检测电路用于将陀螺输出的电容变化转换为电压信号, 并作进一步处理, 通过同步解调电路得到角速度信号。

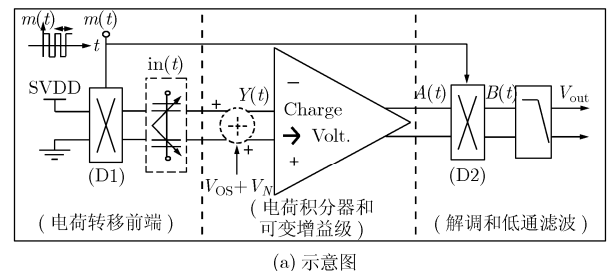
电容读出电路位于检测电路的信号通路最前端, 负责将微陀螺输出的微弱电容信号( $10^{-18}\text{F} \sim 10^{-12}\text{F}$  量级)转换为电压信号, 以作后续处理, 因此成为提高整个系统性能的关键部分。由于微陀螺输出的电容信号为几千赫兹频率, 处于 CMOS 器件低频  $1/f$  噪声影响严重的频段, 因此读出电路设计时必须首先消除此低频噪声的影响, 然后才能做进一步的白噪声性能优化, 以提高分辨率; 另外, 电路设计中还需要综合考虑参考电压稳定性、开关非理想因素等问题, 以从整体上提高读出电路性能。

## 3 读出电路原理与实现

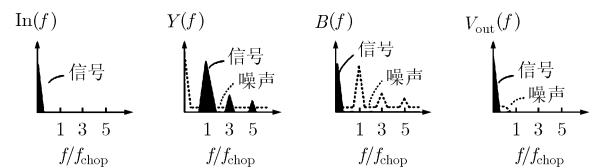
### 3.1 基本原理

读出电路的整体结构如图 2(a)所示, 由电荷转

移前端、电荷积分器、可编程增益级等部分构成。电路基于斩波技术, 在电荷转移前端通过斩波器 D1 对电荷信号进行斩波, 实现对微传感器电容信号的调制, 此调制信号经过电荷积分器和放大后, 在输出端经过斩波器 D2 的解调和低通滤波形成电压信号输出。电荷积分器和可变增益级的非理想失调  $V_{OS}$ 、噪声  $V_N$ , 则在输出端被斩波调制到高频, 并被低通滤波器滤除, 频域原理如图 2(b)所示。



(a) 示意图



(b) 原理

图 2 基于斩波技术的电容读出电路结构

设图 2(a)中电荷积分器和增益级的输入等效噪声为  $S_{N_{in}} = S_{N_0}(1 + f_k/f)$ , 经过输出端的解调和低通滤波后, 输出噪声为  $S_{N_{out}}$ , 除以电路灵敏度后, 得到电路的等效输入电容为

$$C_{N_{in}}^2 \approx S_{N_0} \cdot \frac{A_{noise}^2}{A_{C-V}^2} \left( 1 + \frac{17f_k}{2\pi^2 f_{chop}} \right) \quad (1)$$

其中,  $S_{N_0}$  为等效输入热噪声功率谱密度,  $f_k$  为电荷积分器的等效输入  $1/f$  噪声拐角频率,  $f_{chop}$  为斩波频率,  $A_{C-V}$  为读出电路的电容-电压灵敏度,  $A_{noise}$  为噪声增益。为避免噪声折叠, 拐角频率  $f_k$  应小于  $f_{chop}$  的一半。从式(1)可见, 当斩波频率  $f_{chop} > f_k$  时, 斩波

技术可以有效抑制读出电路内部的低频噪声, 且斩波频率越大, 抑制效果越好, 但同时会对电荷积分器和增益级的带宽设计提出更高的要求<sup>[11]</sup>。

### 3.2 读出电路的实现

读出电路的具体实现如图 3 所示, 电荷转移前端电路和电荷积分器完成将微陀螺输出的电容变化量转换为电压的功能: 在  $\phi_1/\phi_{11}$  相, 电压 SVDD,  $V_{ref}$  对微陀螺输出电容  $C_s$  和  $C_r$  充电; 在  $\phi_2$  相,  $C_s$  和  $C_r$  上的电荷之和被转移到积分电容  $C_i$  上, 在  $V_{C2V}$  输出与  $(C_s - C_r)$  成正比的电压, 经过可变增益级的放大, 在  $V_m$  节点输出。电路灵敏度为

$$A_{C-V} = \frac{V_m - V_{ref}}{C_s - C_r} = \frac{V_B}{C_i} \cdot \frac{C_g}{C_f} \quad (2)$$

其中  $V_{ref}$  通常设置为 SVDD 的一半, 即  $V_B = V_{ref} = SVDD/2$ , 通过控制电容  $C_g$  的大小实现对电路灵敏度的调节作用。

输入斩波调制器由两对开关实现 ( $\phi_1, \phi_{11}$  控制), 输出端的斩波解调功能由对应的两个采样保持电路实现 ( $\phi_s, \phi_{ss}$ )<sup>[12,13]</sup>, 如图 3 所示。斩波方法不仅可以抑制中间电路的失调电压和低频  $1/f$  噪声, 也可以解决基准电压  $V_{ref}$  与 SVDD/2 的不匹配问题。当  $SVDD - 2V_{ref} = V_e \neq 0$  时, 如果不采用斩波技术, 则输出电压为

$$V_{out} = \left[ V_{ref} + \frac{(C_s - C_r) \cdot V_{ref}}{C_i} \cdot \frac{C_g}{C_f} \right] + \frac{C_s}{C_i} \cdot \frac{C_g}{C_f} \cdot V_e \quad (3)$$

其中, 式(3)第 1 项为  $\Delta C$  对应的输出电压, 后一项则为基准电压不匹配带来的误差项, 此时输出电压会出现与  $V_e$  有关的偏移, 影响读出电路的精度和动态范围。

而采用斩波技术后,  $\phi_1$  和  $\phi_{11}$  对应的输出  $V_{out1}$  和  $V_{out2}$  均含有与式(3)类似的误差项, 因此最终的差分输出仅与参考电压 SVDD 与 gnd 间的电压差有关, 而与两者的中间电压  $V_{ref}$  无关, 因此斩波技术消除了参考电压  $V_{ref}$  与 SVDD/2 间电压失配的影响, 如式(4)所示。

$$V_{out, chop} = V_{out1} - V_{out2} = SVDD \cdot \frac{C_s - C_r}{C_i} \cdot \frac{C_g}{C_f} \quad (4)$$

由于电容两端的电压不能突变, 微陀螺输出电容 ( $C_s, C_r$ ) 充电和电荷转移时将产生毛刺信号, 出现在放大器的输出端, 影响电路的瞬态响应。本文通过为偏置电压  $V_{ref}$  加缓冲 ( $V_{refbuf}$ ) 的方法, 如图 3 所示, 隔离了节点 E 至 D 的正向通路, 避免了放大器正向输入端电压  $V_{ref}$  上的毛刺信号; 同时在电荷转移开关与电荷积分器之间添加延时开关 ( $\phi_{2d}$ ), 避免了  $\phi_2$  相电荷中和过程完成之前的毛刺信号出现在放大器输入端。加缓冲和延时开关的方法有效消除了关键节点  $V_{C2V}$  和  $V_m$  上高达几百毫伏特的尖峰信号, 抑制了电路非理想瞬态响应。为了抑制 MOS 开关的非理想特性, 电路中的主要开关采用了冗余结构, 以抵消电荷注入和时钟馈通对电路精度的影响。

传感器微弱信号的开关电容读出电路需要放大器具有低噪声、高电源抑制比 (PSRR), 并且能够驱动较大范围的电容负载。本文的放大器采用了如图 4 的折叠共源共栅单级结构, 以解决 SC 电路负载电容大幅度变化所引起的稳定性问题, 并提高电路的 PSRR, 同时进行了细致的低噪声设计和大输出范围设计, 以提高读出电路的噪声性能和动态范围。

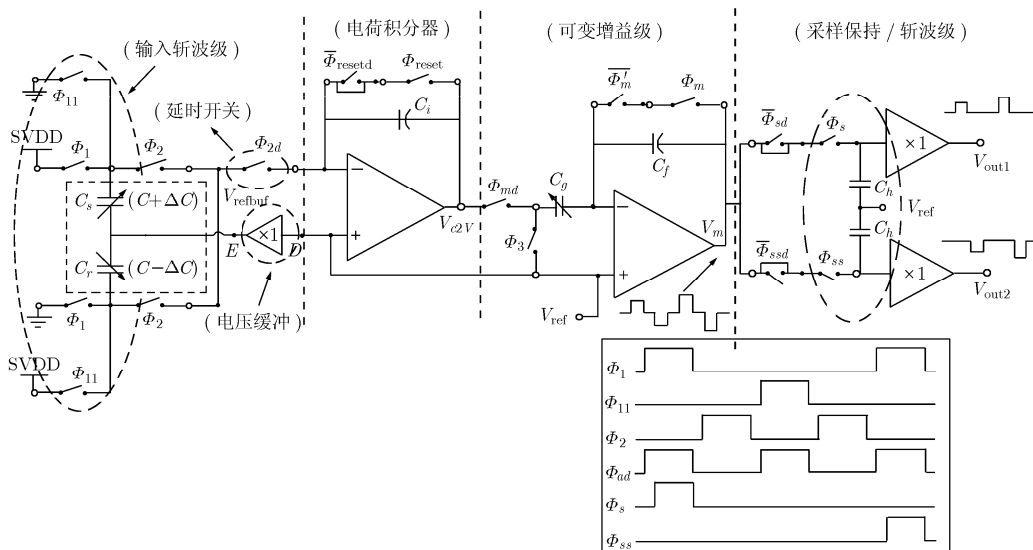


图 3 读出电路的具体实现

#### 4 噪声分析

微陀螺的输出电容变化非常微小,对读出电路的噪声特性提出了很高的要求,采用斩波结构消除低频  $1/f$  噪声后,读出电路的白噪声和开关电容的  $k_B T/C$  噪声成为限制读出电路分辨率的主要因素<sup>[11,13]</sup>。由于电路为开关电容结构,因此本文提出了不同时钟相间噪声电荷转移的分析方法。

由于电荷积分器是完成电容-电压转换的主要增益级,因此本文主要对此部分进行噪声分析,如图 5 所示。 $\phi_1$  时,放大器输入等效噪声  $V_{n,amp}$  使寄生电容  $C_p$  上出现对应的噪声电荷  $Q_{N,C_p}$ ,

$$Q_{N,C_p} \approx C_p \cdot V_{n,amp} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \text{GBW}_{amp}} \quad (5)$$

$\phi_1$  结束时,开关在对应的电容  $C_X$  ( $X$  为  $s$ 、 $r$  或  $i$ ) 上产生  $k_B T/C$  噪声电荷  $Q_{N,C_X}$ ,

$$Q_{N,C_X} = \sqrt{k_B T C_X} \quad (6)$$

$\phi_2$  时,上述噪声电荷转移到电容  $C_i$  成为输出噪声的一部分,同时放大器的输入等效噪声直接通过闭环放大成为输出噪声的另一部分,此时电荷积分器的总输出噪声为

$$V_{N,out} = \sqrt{\frac{k_B T(C_s + C_r + C_i)}{C_i^2} + V_{n,amp}^2 \frac{\pi}{2} \text{GBW}_{amp} \left( \frac{C_p^2}{C_i^2} + 1 + \frac{C_T}{C_i} \right)} \quad (7)$$

其中  $C_T = C_s + C_r + C_p$ 。上述噪声经过采样/保持电路后,被采样并平均分散成为直流到奈奎斯特频率 ( $f_s/2$ ) 上的白噪声,再除以电路的灵敏度,即得到读出电路的输入等效电容噪声  $C_{N,in}$  为

$$C_{N,in} = \frac{\sqrt{2}}{V_B \sqrt{f_s}} \cdot \sqrt{k_B T(C_s + C_r + C_i) + V_{n,amp}^2 \frac{\pi}{2} \text{GBW}_{amp} (C_p^2 + C_i^2 + C_T C_i)} \quad (8)$$

可见,读出电路的噪声性能随放大器的噪声  $V_{n,amp}$ , 积分电容  $C_i$ , 单位增益带宽  $\text{GBW}_{amp}$  的增大而变差,而随参考电压  $V_B$ , 采样频率  $f_s$  的增大而

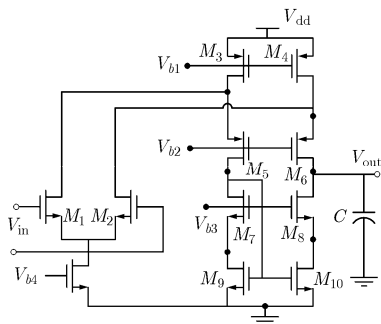


图 4 读出电路中的低噪声运算放大器

变好。式(8)中涉及的各种因素是相互制约,因此,设计时需要折衷考虑这些因素,进行优化设计。

#### 5 微陀螺仿真模型

为了实现读出电路与微陀螺的混合仿真,建立了一种简化的微陀螺仿真模型,如图 6(a)所示,由 4 个时变电容组成,其中左右两组电容分别代表陀螺的驱动电容和探测电容。由于传统 SPICE 类仿真工具中没有提供仿真用的时变电容模型,因此本文提出了一种压控电容结构,用时变电压控制,以实现时变电容功能。压控电容由一个固定电容  $C_0$ , 两个乘法器和一个压控电压源构成,如图 6(a)所示,从节点  $A$  至  $O$  的电流为

$$I_{AO}(t) = C_0 \cdot \frac{dV_{C_0}(t)}{dt} \approx [1 - G_{mult} \cdot V_\alpha(t)] \cdot C_0 \cdot \frac{dV_{AO}(t)}{dt} \quad (9)$$

则节点  $A$ 、 $O$  间的等效电容受电压  $V_\alpha(t)$  的控制,为<sup>[14]</sup>

$$C_{AO}(t) = [1 - G_{mult} \cdot V_\alpha(t)] \cdot C_0 \quad (10)$$

其中  $G_{mult}$  为乘法器的增益,一般设为  $1/V$ , 压控电压源增益设为单位 1。

基于上述仿真模型,构建了图 1(c)系统结构中的整个信号通路,结合本文读出电路进行仿真。用调制电压信号  $V_\alpha$  控制压控电容模型,模拟输入正弦变化的角速度时陀螺的输出电容变化,经过读出电路转换为电压信号,再经过解调、放大、滤波等处理后,最终得到与输入电容相对应的电压输出,结果如图 6(b)所示,验证了仿真模型的可行性和读出电路的功能。

#### 6 测试结果与分析

本文读出电路采用新加坡特许半导体的  $0.35 \mu\text{m}$  2p4M 标准 CMOS 工艺实现,芯片面积  $2 \times 2.5 \text{ mm}^2$ , 采样时钟  $\phi_1/\phi_{11}$  工作频率为  $100 \text{ kHz}$ 。为了对读出电路进行测试,芯片内置了两个电容阵列作为读出电路的输入电容。当一个电容阵列固定,另一个以  $256 \text{ fF}$  的步长改变,使输入电容差从 0 变化

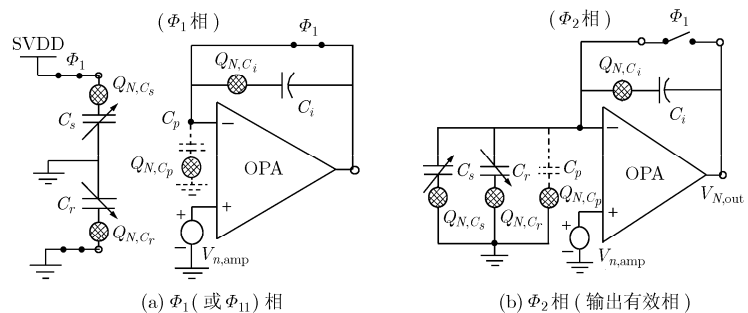
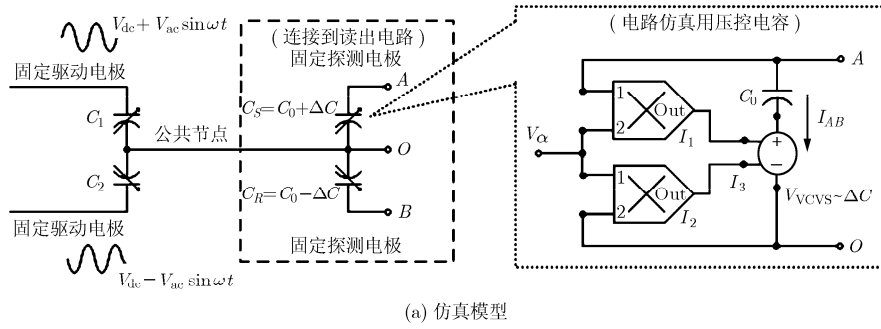
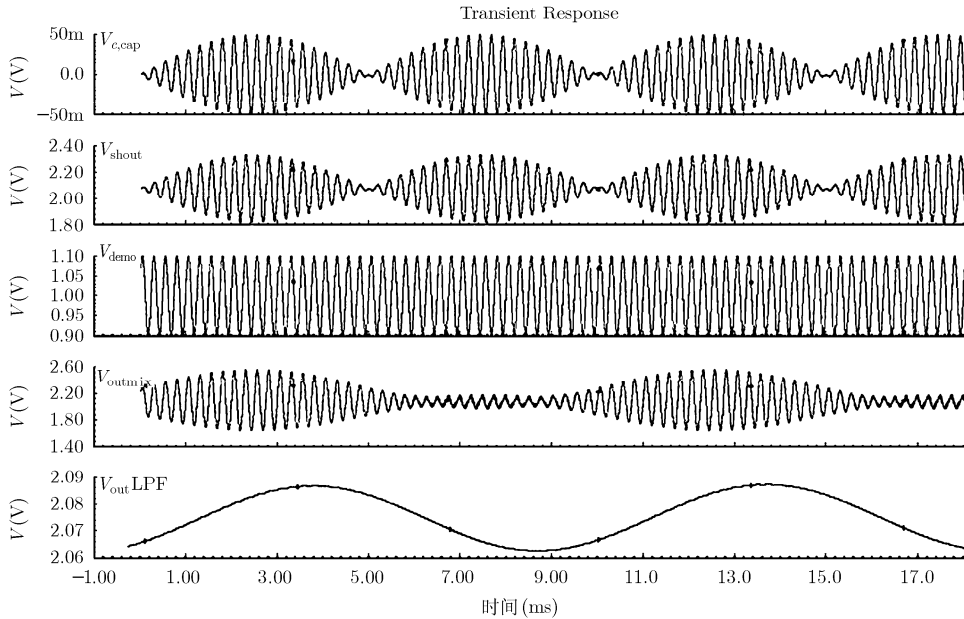


图 5 噪声分析等效电路



(a) 仿真模型



(b) 整个系统的时域仿真 (由上至下分别为：可变电容控制电压，读出电路的输出，解调信号，解调后的输出信号，最终输出信号)

图 6

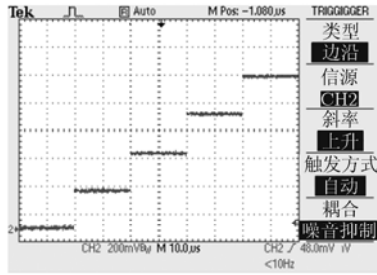
到 968 fF 时，输出信号的变化如图 7(a)所示。读出电路的电容-电压转移曲线测试结果如图 7(b)所示，分别对应 1, 2, 10 mV/fF 的灵敏度，在 1 mV/fF 灵敏度下，电路可处理的输入电容线性范围可达  $-2\text{pF} \sim +2\text{pF}$ 。

在内部时钟  $\phi$  频率为 100 kHz，灵敏度为 1 mV/fF 时，读出电路的输出噪声 PSD 如图 8 所示，约  $4 \mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，即电路的等效输入电容噪声约为  $4 \text{aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，在没有采用斩波技术时，相同灵敏度和时钟频率下读出电路的输入噪声约为  $12 \text{aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[4]</sup>，可见本文采用的斩波技术的确起到了抑制低频  $1/f$  噪声的作用，使读出电路的噪声性能得到了优化。由于微陀螺角速度频率范围小于 100 Hz<sup>[10]</sup>，即电路的最小可分辨电容约为 40 aF，而输入线性范围约为 2 pF，因此，电路的动态范围可达 94 dB。同时，进一步的测试表明随着时钟频率或电路灵敏度的增大，读出电路的输入等效电容噪声呈下降趋势，此现象与前文式(8)的噪声分析相吻合。

本文的读出电路与图 1 的微陀螺进行了联合测试，输入角速度在  $\pm 100^\circ/\text{s}$  内变化时的输出电压如图 9 所示，此时读出电路的灵敏度设置为 1 mV/fF，整个微陀螺系统的增益为 19.9 mV/(°/s)。与其他 ASIC 读出电路的性能对比如表 1 所示，可见本文采用斩波技术的读出电路具有更高的分辨率、动态范围。与采用相同工艺、相同模块电路所设计的传统开关电容读出电路相比<sup>[4]</sup>，斩波技术使电路的噪声性能得到了很大的提高，而为此仅增加了一套前端电荷转移开关、采样/保持电路以及相应的若干相时钟控制信号，并未过多增加电路复杂程度和设计难度。图 10 为读出电路的版图照片。

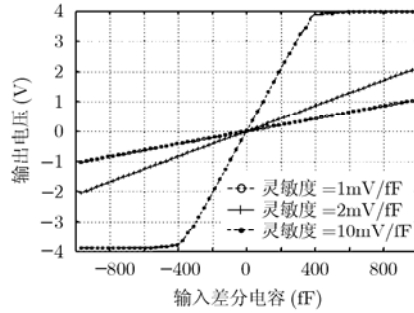
### 7 结论

微传感器的快速发展对后续读出电路的性能提出了越来越高的要求。本文针对微陀螺传感器的弱小电容检测需求，提出并实现了一种 CMOS 低噪声电容读出电路，采用斩波技术、时序控制等方法克



$C_i=0fF$  256fF 512fF 768fF 968fF

(a) 输入电容以 257fF 变化时对应的输出电压



(b) 输出电压与输入电容的转移曲线

图 7

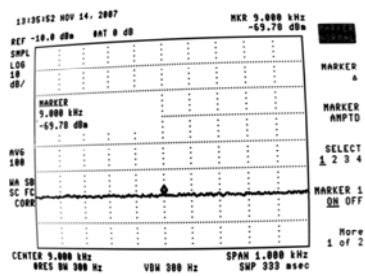


图 8 读出电路的输出噪声谱密度

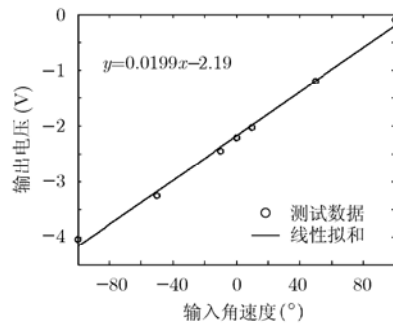


图 9 不同输入角速度下微陀螺系统的输出电压

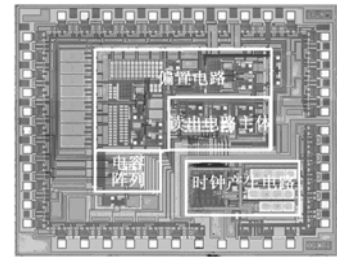


图 10 读出电路的版图照片

表 1 本文读出电路与文献中电路的性能对比

文献	灵敏度 (mV/fF)	分辨率 (aF/√Hz)	动态范围 (dB)	时钟频率 (kHz)	工艺-电源 (CMOS)	芯片面积 (mm <sup>2</sup> )
[7]	0.23-22.3	18	75	50	3μm-5V	3.2×3.2
[8]	—	50	—	50	3μm-—	—
[9]	1.0-4.0	<300	—	50	0.5μm-3V	2.2×2.2
[14]	1/10	9.5	83.4	200	0.35μm-5V	2×2.5
本文	1/2/10	4	94	100	0.35μm-5V	2×2.5

服了传统 CMOS 读出电路中限制电路性能的主要因素, 提高了读出电路的分辨率和动态范围等性能。针对读出电路的低噪声设计, 提出了一种噪声电荷转移分析方法; 针对读出电路和传感器联合仿真问题, 提出了一种简化的微陀螺传感器仿真模型, 这些分析方法和仿真方法对其它类型的开关电容读出电路噪声分析和联合仿真均有着借鉴意义。芯片测试和与微陀螺的联合应用验证了读出电路的性能, 以及本文分析和设计方法的可行性。

参考文献

[1] Bryzek J, Roundy S, and Bircumshaw B, *et al.* Marvelous MEMS-Advanced IC sensors and microstructures for high volume applications[J]. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 2006, 22(2): 8-28.

[2] Falconi C, Martinelli E, and Natale C D, *et al.* Electronic interfaces[J]. *Sensors and Actuators*, 2007, B(121): 295-329.

[3] Wu Jiang-feng, Fedder G K, and Carley L R. A low-noise low-offset capacitive sensing amplifier for a 50μg/√Hz monolithic CMOS MEMS accelerometer[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2004, 39(5): 722-730.

[4] Saukoskia M, Aaltonena L, and Salob T, *et al.* Interface and control electronics for a bulk micromachined capacitive gyroscope[J]. *Sensors and Actuators*, 2008, A(147): 183-193.

[5] Zhang Xiao-ling and Chan P K, A low-power switched-capacitor capacitive transducer with high resolution. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(7): 1492-1499.

[6] Huang Xiao-gang, Chen Wen-yuan, and Liu Wu, *et al.* High resolution differential capacitance detection scheme for micro levitated rotor gyroscope[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(6): 546-551.

[7] Yazdi N, Mason A, and Najafi K, *et al.* A generic interface chip for capacitive sensors in low-power multi-parameter microsystems[J]. *Sensors and Actuators*, 2000, A(84): 351-361.

[8] Li X and Meijer G C M. Measurement techniques for smart sensor interfaces implemented in cmos technology[C]. *Proceedings of the IEEE 6th International Conference on ASIC (ASICON)*, Shanghai, China, Oct. 24-27, 2005, 2: 681-684.

- [9] Zhang J and Mason A. Characterization of a configurable sensor signal conditioning circuit for multi-sensor microsystems[C]. 3rd IEEE Conference on Sensors Proceedings, Vienna, Austria, Oct. 24-27, 2004, 1: 198-201.
- [10] Chen Yong, Jiao Ji-wei, and Dong Lin-xi, *et al.* Micromachined bar-structure gyroscope with high q-factors for both driving and sensing mode at atmospheric pressure[C]. 2nd IEEE Conference on Sensors Proceedings, Toronto, Canada, Oct, 2003, 1: 461-465.
- [11] ENZ C C and Temes G C. Circuit techniques for reducing the effects of op-amp imperfections: Autozero, Chopper, Correlated double sampling[J]. *Proc. IEEE*, 1996, 84(11): 1584-1614.
- [12] Bilotti A and Monreal G. Chopper-stabilized amplifiers with a track-and-hold signal demodulator[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications*, 1999, 46(4): 490-495.
- [13] Rodjergard H and Loof A. A differential charge-transfer readout circuit for multiple output capacitive sensors[J]. *Sensors and Actuators*, 2005, A(119): 309-315.
- [14] Yin Tao, Yang Hai-gang, and Zhang Chong, *et al.* A low-noise readout circuit for MEMS vibratory capacitive gyroscope[C]. Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf. on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Sanya, China, Jan. 6-9, 2008, 1: 124-127.
- 尹 韬: 男, 1980年生, 助理研究员, 从事高性能模拟集成电路、微传感器接口电路研究工作。
- 杨海钢: 男, 1960年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为高性能可编程逻辑芯片设计技术、数模混合信号SOC设计技术。
- 张 翀: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为高性能模拟集成电路设计。
- 吴其松: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为高性能模拟集成电路设计。
- 焦继伟: 男, 1968年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为高性能MEMS微系统技术。
- 宓斌玮: 男, 1981年生, 研究实习员, 研究方向为MEMS微系统的电路设计。