

文章编号 1004-924X(2003)05-0425-07

微机械惯性传感器的技术现状及展望

刘 危,解旭辉,李圣怡

(长沙国防科技大学,湖南长沙 410073)

摘要:对微机械惯性传感器—微加速度计和微陀螺的技术现状进行了评述。根据其不同的技术实现,诸如制造过程、工作原理、控制系统、接口技术等对其进行了分类描述。这些微传感器的用途很广,而且相对于其传统器件来说有低成本、小尺寸、低功耗等特点,正在全世界范围内被广泛研究。最后,对微机械传感器领域的一些新的进展进行了讨论,并提出了展望。

关键词:微机械;惯性传感器;加速度计;陀螺

中图分类号:TP212 **文献标识码:**A

Present state and perspectives of micromachined inertial sensors

LIU Wei, XIE Xu-hui, LI Sheng-yi

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A review is given to the present state of micromachined inertial sensor—micro-accelerometers and micro-gyro. These sensors have a number of significant advantages, such as lower cost, smaller form factor and lower power consumption. Their manufacturing process, transfer mechanism, control system and interface technique are described in detail.

Key words: micromachine; inertial sensor; accelerometer; gyro

1 引言

惯性传感器是一种非常重要的传感器,但到目前为止传统的惯性传感器还仅仅用于很狭小的范围内,如军事和航空领域,这主要是因为在这些领域中传感器的成本是几乎不需要考虑的;而对于许多其他领域来说,尽管都对惯性传感器有所需求,但由于各种原因(主要是成本的因素),应用很少。然而,微机械惯性传感器的出现使得这些领域的用户看见了一线曙光,在对成本敏感的领域中使用惯性传感器有了可能。这些领域包括:安全气囊的脱扣装置、照相(摄像)设备的防跳动

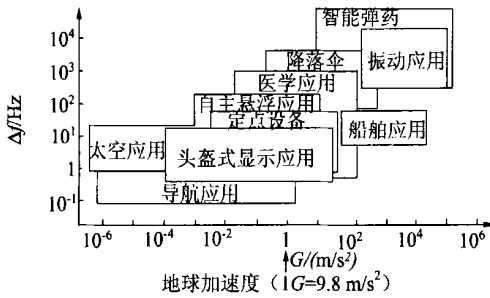
平台、GPS 系统的备份系统、电子玩具、三维仿真、运动设备、振动监控、机器人、VR 游戏等,而且,随着惯性传感器的应用及性能的提高,其应用范围会更进一步扩大。另外,微惯性传感器技术也是对机电控制系统实行小型化的核心关键技术。不同应用领域对微机械惯性传感器的性能要求见图 1(a),图 1(b)。

这些领域大多数都对传感器有如下的要求:低成本,能被安装在小的空间内,能靠电池供电工作;微机械传感器能轻易满足这些条件,易于被集成为嵌入式系统,方便使用;而且,相对于传统的惯性传感器来说,由于其采用硅微工艺,其可靠性及环境适应性获得了极大的提高,能承受大的冲

收稿日期:2003-05-28;修订日期:2003-07-10.

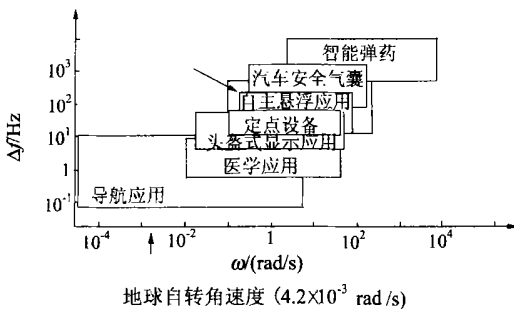
基金项目:国防预研项目(No. 18 YXGF KD118)

击和振动,适用于较恶劣的环境,所以应用前景非常广阔。



(a) 加速度计特性

(a) Accelerometer performance



(b) 陀螺特性

(b) Gyroscope performance

图 1 不同应用场合对加速度计和陀螺的性能要求

Fig. 1 Different applications and required performances for accelerometers and gyroscopes

2 微机械加速度计

加速度计通常由悬挂系统及一个质量块组成,并通过对质量块的位移进行测量来获取加速度。常见的微机械加速度计通常可视为 2 阶大阻尼弹性系统,所以可以通过增加质量块和弹性系数的方法来增大品质因子,并通过减小谐振频率的方法来改善器件的静态响应。器件的主要机械噪声来自质量块及其周围空气分子的布朗运动,而要减小它必须增大品质因子及增加质量块质量。表 1 所示为两种常见应用领域对加速度计性能的要求。

通常的微机械加速度计可通过其构型技术、机电转换方式、控制系统类型来分类。

构型技术主要有两种,体加工和表面加工,它们都是基于硅微晶片的技术。体加工技术对晶片整个的加以使用,是一个精减过程。通过干法或湿

表 1 两种常见应用领域对加速度计性能的要求法腐

Tab. 1 Required performances for accelerometers in two kinds of usual applications

参数	汽车	导航
测量范围	±50 g (安全气囊) ±2 g (运动稳定系统)	±1 g
频率范围	DC-400 Hz	DC-100 Hz
分辨率	< 100 mg (安全气囊) < 10 mg (运动稳定系统)	< 4 μg
离轴敏感度	< 5 %	< 0.1 %
非线性	< 2 %	< 0.1 %
温度敏感度	< 900 × 10 ⁻⁶ / °C	±50 × 10 ⁻⁶ / °C

蚀技术将多余的硅除去,以形成质量块及悬挂系统。图 2 是用该技术生产的一个典型器件^[1]。通常这种传感器由多层晶片键合而成,以提供电气联系并对质量块进行限定。体加工技术通常用于早期的器件,而且大多数大规模使用的加速度计都是采用该方法构造的。该技术不太适合单片集成,所以通常都在封装中带有独立的集成电路,甚至在封装外还要有电路。比较适合单片集成的技术是表面加工技术,该技术能将电路和机械结构集成在一个芯片上^[2]。不同于体加工技术的是逐次将多余的硅除去的方法,该技术是个添加过程,是让氧化硅膜和硅聚合物的膜生长在硅微晶片上,然后将作为牺牲层的氧化硅用湿法腐蚀的方法除去。采用该方法产生的敏感元件比用体加工技术产生的元件小一个数量级。该方法和标准 CMOS 工艺相兼容,而且能产生单片集成器件。一种典型的商业加速度计是 AD 公司的 ADXL05^[3],其动态范围达 ±5 g。

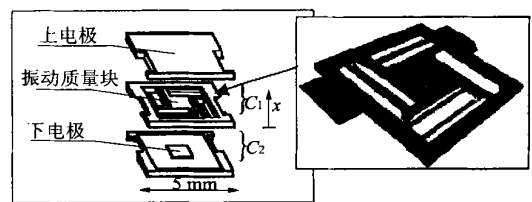


图 2 采用体加工技术加工的微加速度计

Fig. 2 Bulk-micromachined accelerometer

用来检验质量块位移并完成机电转换的方法很多,最常用的两种方法是压阻敏感法和电容敏感法,其他的方法还包括压电敏感法^[4](主要用于高频应用)、隧道电流敏感法^[5](非常精确但相对复杂)及光学方法等。这里主要讨论前两种方法。压阻敏感法是最早采用的方法,并且到现在仍在广泛使用。其主要

优点在于结构和制作简便,压阻非常容易被扩散到质量块中,从而产生相应的低阻抗电阻,并且电阻的变化能通过平衡电桥技术方便地检出;其主要缺点在于其输出电压不高(典型的情况是在10 V驱动的情形下输出仅100 mV);温度因子相对较大并且其热噪声的本质是由于其电阻产生的,不易补偿。这类器件的典型特性如下:灵敏度为1~3 mV/g,5~50 g的动态范围,未补偿的温度因子小于0.2%/。由于这些缺点,所以现在大多数的器件都采用电容敏感法^[16-18]。其常用的方法是采用质量块作为电容半桥的中间极板,当质量块发生变形时就会产生与其变形成比例的电容变化,然后通过放大电路及同步解调技术就能将其转换为相应电压。该技术是当前的主流,范围覆盖低成本、高电压的汽车用加速度计及高精度、惯性级的微重力器件,其灵敏度高,有好的直流响应特性及低噪声特性,功耗小,结构简单。由于其感测极点处的高阻抗,使其很易受电磁干扰,必须在封装和使用加以防护。

另外,还有一种新的方案是采用谐振器的方法,谐振频率根据加速度的变化而改变。其优点在于其输出是准数字信号,非常方便用频率计测量。器件的灵敏度能达到700 Hz/g^[6],稳定性也很好,几天内都可维持在2 μ g以下,但其带宽很窄,一般只有几赫兹。

按控制系统的类型的不同一般来说可分为开环和闭环方式两种。在闭环方式下,系统会产生一个反馈力来和质量块上受到的惯性力平衡,该方式相对于开环方式来说有一定的优势,它可提高器件的响应带宽、线性度、动态范围,但是也带来了相应的缺点,增加了系统的复杂度及器件的成本。尽管如此,为了获取较好的运行性能采用力反馈方案还是必要的。典型的运行特性是:分辨率1 μ g,带宽大于100 Hz,温度的敏感性低于 $200 \times 10^{-6}/$ 。电容敏感法的另一个好处在于电容既可以用于感测又可以用于反馈。静电力反馈方案需要面对的一个问题是静电力根据电极间的电压及距离不同会发生非线性变化,所以,通常采用差分布置来使得反馈力和位置呈线性关系。具体到反馈方案上来说既可以采用模拟方式又可以采用数字方式^[12-14]。当采用模拟方式时,需要有一个偏置电压,并且超前于引入的静电势,从而在线性段提高其灵敏度。而数字方式是

采用机电一体的 π 调制环路^[7],其优势在于能改善系统稳定性,而且能在对信号进行脉冲调制的基础上直接产生数字信号输出,该方法正逐步被广泛使用。

近年来,多轴加速度计已得到应用。图3所示为AD公司的ADXL202双轴加速度计,能测量两个方向的加速度。另外,还提出了三轴加速度计的设计方案,尽管其仍在模型阶段^[8]。

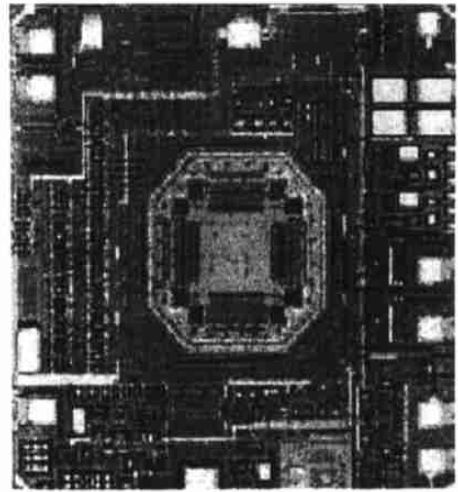


图3 ADXL202双轴加速度计

Fig. 3 ADXL202 dual axis accelerometer

3 微机械陀螺

典型的微机械陀螺(振动速率陀螺)是根据受激振动在有哥式加速度时存在模态耦合效应的原理来工作的,实质上是由于哥式加速度的存在引起了两种模态间的能量传递。由于哥式加速度是由旋转产生的,且和旋转速率成比例,所以通过测量感测模态的振幅大小就能测量输入角速度的变化。这些器件不需要有支架的旋转部件,所以便于小型化。根据陀螺性能的不同,一般可分为:惯性级、战术级和速率级。表2为其分类标准。当前,大多数振动陀螺都属于速率级的器件,而在战术级和惯性级领域都是光学陀螺占统治地位,当然还有静电悬浮陀螺等。就目前的情况来看,对于微机械陀螺来说,要想达到战术级甚至惯性级的要求是非常困难的,必须采用新技术及新方法。

表 2 陀螺分类

Tab. 2 Different kinds of gyroscopes

参数	速率级	战术级	惯性级
角随机游走 ($^{\circ}$ h)	>0.5	0.5 ~ 0.05	<0.001
零漂 ($^{\circ}$ h)	10 ~ 1 000	0.1 ~ 10	<0.01
尺度因子 (%)	0.1 ~ 1	0.01 ~ 0.1	<0.001
测量范围 ($^{\circ}$ s)	50 ~ 1000	> 500	> 400
带宽 (Hz)	> 70	~ 100	~ 100
抗震性 (1 ms)	1 000 g	1 000 ~ 10 000 g	1 000 g

从总体上说,陀螺也可以采用和加速度计一样的分类方法进行分类。陀螺是一种较新的器件,现在还在发展中,还无法确定在将来的大规模使用中哪一种方案会成为主导。其困难在于敏感元件必须能动,且能在两个自由度上得到控制,一个是驱动模态,另一个是感测模态。由于哥式加速度和驱动模态的速度成比例,所以人们希望受激振动的频率及幅值越大越好,而同时也希望频率和幅值保持稳定,因为即便是很小的波动,也可能淹没哥式加速度。所以通常的方案是对频率采用锁相环,对幅度控制采用自动增益控制。

由于哥式力产生的耦合效果很弱,所以经常需要采用机械放大。而驱动和感测模态均可看作是二阶系统,主要的阻尼来自于质量块在空气中的运动。假如质量块运动在真空环境下,其 Q 值甚至可以达到几万。如果驱动和感测模态的谐振频率一致,其耦合能通过 Q 有效放大。但难度在于如何保证在整个运行温度范围内及其他环境因素的影响下,驱动和感测模态的谐振频率尽可能一致(差异最好低于 1 Hz)。由于机械加工的裕度不大,所以人们常采用调整方案。该方案是采用对质量块加静电力的方法,相当于引入一个负的阻尼因子,从而改变驱动和感测模态的谐振频率。尽管如此,在整个运行范围内保持两者频率一致仍是一个需要进一步研究和解决的问题。

另一个问题就是正交误差问题。该误差是由于驱动模态不可避免地理想方向有差异,由此在感测模态中产生的信号比哥式力产生的信号高几个数量级。不过,由于这两种信号通常有 90° 的相位差,所以能通过进一步的信号处理将它们区分开。尽管我们通常假设所有的部件运行于线性区,但一点点的失对准引起的正交误差都会使感测电路进入饱和状态。因此,人们也考虑通过对质量块施加静电力的方法来抑制正交误差。

目前的微机械陀螺大都采用开环方式,在该方式下,对不同的旋转速率,响应时间是不同的,因为要使感测模态幅值达到稳态需要时间。所以在驱动模态和感测模态的谐振频率一致的情况下,带宽通常仅有几 Hz。而在闭环方式下,其带宽可能接近谐振频率。最近报道^[9]的一种方法是和加速度计一样采用 $1/\omega$ 谐振调制,并取得了和在加速度计上一样的效果。一种较小改进的方法是采用了两个机械结构,一个构件谐振并耦合能量到第二个构件,并对第二个构件的运动进行测量。该方法正日益受到关注,例如,Draper 实验室就采用该方法生产出了一种具有很高性能的器件,其噪声为 $(0.002^{\circ}\text{s})/\sqrt{\text{Hz}}$,零漂移的稳定性为 $10 \sim 100^{\circ}\text{h}$ 。尽管该特性已能满足很多场合的要求,但要达到导航级的要求还须进一步提高其性能。

另一种方案是采用环形结构,由于其采用高度对称的设计,所以能方便地考虑轴间耦合。其优点在于:由于其采用高度对称的设计,所以对干扰振动不敏感,传感器的敏感度提高;由于两种模态受到温度影响的效果相同,所以该结构对温度的变化不敏感;可以用添加平衡电极的方法实现用电子平衡来补偿结构上的不对称。该结构由 4 个点的静电力激发,这 4 个点彼此相差 90° ,相对点的激发相位相反。通常在 45° 对角线上的点保持静止(节点),当有角度信号输入时,可通过电容检测节点的移动,从而确定输入信号的大小。但由于其通常采用磁性驱动,所以不易进一步小型化。其通常能达到的性能指标为:分辨率 0.005°s ,带宽 70 Hz,在 65 Hz 带宽的情况下噪声小于 0.5°s 。

4 应用和展望

目前,在技术比较先进的国家中,基于微陀螺、微加速度计的微惯性测量系统正被大力发展。由于受到全球性的关注,所以和它相关的设计、制造、封装技术也得到了飞速发展,从而加快实用化的步伐。但由于基础研究的薄弱,技术人员的缺乏,技术和资金投入的不足,使得我国在各个技术方面落后于美国、日本和欧盟,而当前的研究工作主要是为今后的研究打基础。当前,全球 MEMS (微机电系统) 技术的发展趋势是希望能将微型计

算机、信号处理电路、微传感器集成为微平台,从而满足各种实际应用。而对我国来说,发展基于微陀螺、微加速度计的微惯性测量系统具有重要的意义,它不仅使得我国有可能在未来的世界芯片市场占有有利地位,而且可能在新兴的应用市场上占有一席之地,其应用成果还能对国防起到一定作用。由于,微机械传感器采用的是 MEMS 技术,该技术是个新的领域,所以我国和技术发达国家间的差距相对较小,如果给予足够的重视和投入,还是有可能赶上技术发达国家的。

当前,尽管已经有一些高精度的微机械加速度计被开发出来,但其价格太贵,而从整体上来说其精度水平仍不高,所以如何克服长期稳定性问题及温度敏感性问题仍是值得关注的。在封装上追求在不影响器件性能的前提下实现低应力、低漂移,而在接口电路方面研究的重点在于如何实现具有低漂移、高敏感度、低噪声、大动态范围的读出/控制电路。对于微机械陀螺来说,由于采用表面加工技术加工

的器件的性能较差,所以如何采用体加工技术加工器件会是一个研究方向;采用复合(表面/体)加工构型技术及有大的高宽比的深度干法腐蚀技术,也有望产生新的高性能陀螺;采用动态电路补偿温度和长期漂移效果的传感器的开发也是一个研究方向,其性能可能达到战术级甚至惯性级。当前,多轴陀螺的研究也是一个重点,但轴间耦合问题却是不容忽视和必须解决的。另外,新的惯性感测方法的提出也能促进其发展。图 4 所示^[10]是南安普敦大学的微电子中心制造的一个器件模型,采用的是静电悬浮法。尽管该方法具有很多自身固有的优点^[15],但对于微机械器件来说,却是非常难以制造和开发的。其盘面由于静电力产生悬浮和衬底间没有机械联接,并且通过控制静电力使其悬浮在和衬底平行的中间位置,通过其盘面和极点间电容的测量可以知道盘面的位置。采用该方法相对于振动陀螺可以预见的优势在于该设计方案根除了正交误差。

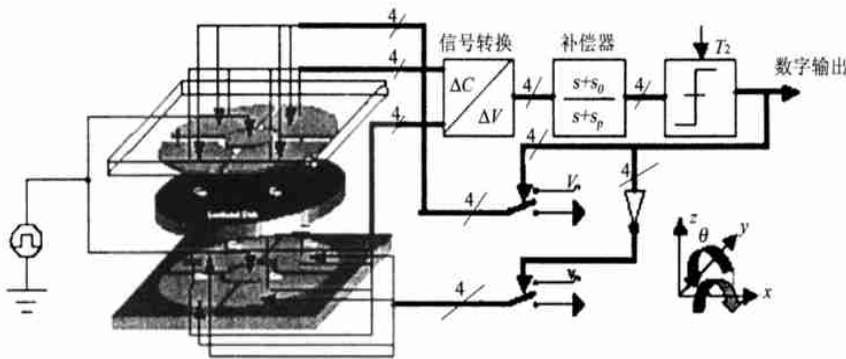


图 4 静电悬浮陀螺模型

Fig. 4 Model of electrostatics levitated gyroscope

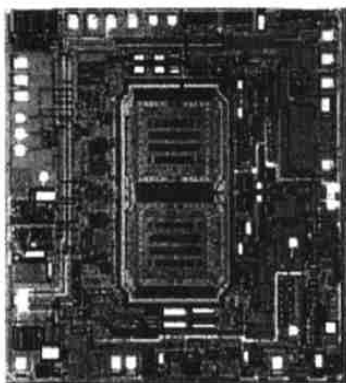


图 5 ADXRS 微陀螺芯片

Fig. 5 ADXRS micro-gyroscope chip

当然,对于微机械传感器来说,如何进一步小型化、低成本、低功耗会是持久的研究方向。前不久,AD 公司推出的 ADXRS 就是一种将微机械陀螺和其信号处理/调制集成在一个芯片上的产品(如图 5),进一步实现了小型化和高可靠性,甚至在高达 2 000 g 振动的环境下仍能有稳定输出,是一种真正意义上的微机械惯性传感器芯片。

5 结 论

自从 1979 年 Roylance 等^[11]报告了第一个微机械加速度计以来,微机械惯性传感器已经发展

了 20 年,这期间人们提出了多种类型的加速度计和陀螺^[19-22]。由于在器件结构、加工技术、读出及接口电路、集成及封装技术等方面的发展,其性能指标有了长足进展,相信在不久的将来会出现小型化、低成本、低功耗、高性能的(惯性级)产品。

在未来的 10 年中,人们将尽力提高微机械传感器的精度,发展低噪声、低漂移的接口电路,研究高可靠性的、低成本的封装,以提高微机械传感器的性能,以便其能用于更宽、更广的已知和未知的领域中。

参考文献:

- [1] KRAFT M. *Closed loop accelerometer employing oversampling conversion* [D]. Coventry University, Ph. D. dissertation, 1997.
- [2] BOSER B E, HOWE R T. Surface micromachined accelerometers[J]. *IEEE J Solid State Circuits*, 1996, 31(3): 336-375.
- [3] Analog Devices. ADXL05 - monolithic accelerometer with signal conditioning[Z]. 1995.
- [4] SEIDEL H, FRITSCH U, GOTTINGER R, et al. A piezoresistive silicon accelerometer with monolithically integrated CMOS-circuitry[A]. *Tech Dig 8th Int Conf Solid State Sensors and Actuators (Transducers '95)* [C]. Stockholm, Sweden, 1995, 597-600.
- [5] ROCKSTAD H K, TANG T K, REYNOLD S. A miniature, high-sensitivity, electron tunneling accelerometer[J]. *Sensors and Actuators*, 1996, 53: 227-231.
- [6] BURNS D W, HORNING R D, HERB W R, et al. Sealed-cavity resonant microbeam accelerometer[J]. *Sensors and Actuators*, 1996, A53: 249-255.
- [7] SPINEANU A, BENABES P, KIELBASA R. A piezoelectric accelerometer with sigma-delta servo technique[J]. *Sensors and Actuators*, 1997, A60, 127-133.
- [8] LEMKIN M A, BOSER B. A three-axis micromachined accelerometer with a CMOS position-sense interface and digital offset-trim electronics[J]. *IEEE J Solid State Circuits*, 1999, 34(4), 456-468.
- [9] XUESONG J, SEEGER J I, KRAFT M, et al. A monolithic surface micromachined Z-axis gyroscope with digital output [A]. *To be Published at the Symposium on VLSI Circuits* [C]. Hawaii, USA, 2000.
- [10] KRAFT M. Micromachined inertial sensors state of the art and a look into the future[EB/OL]. <http://www.sensor.com/>
- [11] ROYLANCE L M, ANGELL J B. A batch-fabricated silicon accelerometer[J]. *IEEE Trans Electron Devices*, 1979, ED-26: 1911-1917.
- [12] KRAFT M, LEWIS C P, HESKETH T G. Closed loop silicon accelerometers[J]. *IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems*, 1998, 145(5): 325-331.
- [13] LEMKIN M A. *Micro accelerometer design with digital feedback control* [D]. University of California, Berkeley, Ph. D. dissertation, 1997.
- [14] de COULON Y, SMITH T, HERMANN J. Design and test of a precision servo accelerometer with digital output[A]. *7th Int Conf Solid State Sensors and Actuators (Transducer '93)* [C]. Yokohama, 1993.
- [15] FU KATSU K, MURAKOSHI T, ESASHI M. Electrostatically levitated micro motor for inertia measurement system [A]. *Transducer '99* [C]. 1999.
- [16] RUDOLF F, JORNOD A, BENCZE P. Silicon microaccelerometers[A]. *4th Int Conf Solid State Sensors and Actuators (Transducers '87)* [C]. Tokyo, Japan, 1987, 376-379.
- [17] RUDOLF F, JORNOD A, BERQOVIST J. Precision accelerometers with g resolution[J]. *Sensors Actuators*, 1990, A21-A23, 297-302.
- [18] HENRION W, DISANZA L, TERRY M Ip S, et al. Wide-dynamic range direct digital accelerometer[A]. *Solid State Sensors and Actuators Workshop*[C], Hilton Head Island, SC, 1990, 153-156.
- [19] SHERMAN S J, TSANG W K, CORE T A. A low-cost monolithic accelerometer: Product/technology update [A]. *IEEE Electron Devices Meeting (IEDM '92)* [C]. Dec. 1992, 160-161.
- [20] RISTIC L, GUTTERIDGE R, KUNG J. A capacitive type accelerometer with self-test feature based on a double-pinned

polysilicon structure[A]. *7th Int Conf Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '93)* [C]. Yokohama, Japan, June 1993, 810-812.

[21] LEMKIN M, BOSER B, SMITH J. A 3-axis surface micromachined accelerometer[A]. *Solid State Circuits Conf (ISSCC '97)* [C]. San Francisco, CA, Feb. 1997, 202-203.

[22] BERNSTEIN J, CHO S, KING A T. A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope[A]. *IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '93)* [C]. Fort Lauderdale, FL, 1993, 143-148.

作者简介:刘 危(1974-) ,男,武汉人,现在国防科技大学攻读博士,研究方向为微机械传感器的建模、仿真和应用。

欢迎订阅 2004 年《人工晶体学报》

刊号:ISSN 1000-985X CN 11-2637/07 广告经营许可证:京朝工商广字 0016 号
 主办单位:中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会 刊期:双月刊 开本:大十六开
 中非人工晶体研究院

检索系统:EI、CA、英国《科学文摘》、日本《科技文献速报》、俄罗斯《文摘杂志》《中国学术期刊(光盘版)》全文收录、中国学术期刊综合评价数据库来源期刊、中国科学引文数据库来源期刊、中国学术期刊文摘收录源期刊、万方数字化期刊群全文上网。《人工晶体学报》是由中国硅酸盐学会晶体生长与材料分会和中非人工晶体研究院联合主办、国内唯一专门刊登人工晶体材料这一高新技术领域研究成果的学术性刊物,为中文核心期刊。它以论文和简报等形式报道我国在晶体材料:半导体材料、光电子材料、纳米材料、薄膜材料、超硬材料和高技术陶瓷等在理论研究、生长技术、性能、品质鉴定、原料制备以及应用技术和加工等方面的最新科研成果,同时介绍国内外晶体材料的发展动态与学术交流活动及会议信息。刊户覆盖以上各行业的大专院校、科研院所、生产经营单位和省(市)图书馆、政府相关部门,本刊已在美、日、英、俄、德等国家和地区发行。

2004 年《人工晶体学报》全年定价 220 元,可直接与编辑部联系订阅。

银行汇款方式:

邮局汇款地址:

收款单位:中非人工晶体研究院

开户银行:北京工商行管庄分理处

北京 733 信箱《人工晶体学报》编辑部

邮 编:100018

帐 号:144330-01

电 话:010-65492968

网 址:www.jtxb.cn

传 真:010-65493320

E-mail:bjb@jtxb.cn jtxb@risc.com.cn