

文章编号 1004-924X(2009)08-1915-07

高性能电磁式微机械振动环陀螺

陈 李, 陈德勇, 王军波, 毋正伟, 张 明

(中国科学院 电子学研究所 传感技术国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: 为改进振动环陀螺的模式匹配并提高其品质因数, 设计了一种采用全对称结构实现模式匹配的电磁式微机械振动环陀螺。通过理论推导, 建立了陀螺灵敏度和机械噪声的数学模型, 分析了陀螺参数对灵敏度及分辨力的影响。采用(100)晶向的单晶硅及工艺简单, 无需键合的 MEMS 体硅标准工艺加工了陀螺样片。器件频率响应实验结果表明, 所设计的振动环陀螺驱动模式和检测模式频率之差 <0.5 Hz, 大气压下品质因数约为 500, 在 1 Pa 的低真空下可达 14 000。锁相放大器测试结果表明, 在 $-200\sim 200$ $^{\circ}/s$, 陀螺分辨力为 0.05 $^{\circ}/s$, 灵敏度为 0.2 $\mu V/(^{\circ}/s)$ 。测试结果表明该陀螺能够实现模式匹配和较高的品质因数, 具有较高的性能指标。

关键词: 电磁式陀螺; 微机械陀螺; 振动环

中图分类号: V241.5; TP212.12 文献标识码: A

High performance electromagnetic micro-machined ring vibration gyroscope

CHEN Li, CHEN De-yong, WANG Jun-bo, WU Zheng-wei, ZHANG Ming

(*State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: To realize mode matching and high quality factors (Q) and to improve the performance of micro-machined ring vibration gyroscopes, a novel electromagnetic ring vibration gyroscope was designed and fabricated by using a centrosymmetric and enantiomorphous structure consisting of a ring and eight symmetric support springs to match the resonant frequencies of a drive mode and a sense mode. The theoretical models for the sensitivity and the mechanical noises of the gyroscope were deduced, and the effects of gyroscope parameters on the sensitivity and resolution were analyzed. Through the standard bulk MEMS processes, the gyroscope samples were fabricated with (100) silicon. Experiments show that all the processes are easy to realize, for they have no bonding operation. Moreover, a frequency response experiment indicates that the frequency split between the drive mode and the sense mode is less than 0.5 Hz, and the quality factor is about 500 in atmosphere and 14 000 in vacuum with 1 Pa. Phase Locked Amplifier(PLA) tests show that the resolution of the gyroscope is 0.05 $^{\circ}/s$ and the sensitivity is 0.2 $\mu V/(^{\circ}/s)$ over the ranges of $-200\sim 200$ $^{\circ}/s$.

Key words: electromagnetic gyroscope; micro-machined gyroscope; vibrating ring

收稿日期: 2008-06-14; 修订日期: 2008-09-27.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA04Z318); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60674112, 60772018)

1 引言

陀螺主要是用来测量运动物体转动的角度或角速度。采用微机电系统(Microelectromechanical System, MEMS)技术研制的陀螺由于体积小、重量轻、成本低等优势,得到了迅速发展。高性能的微机械陀螺在惯性导航、控制、国防、航天等诸多领域都有着重要应用,因此国内外都展开了积极的研究。目前,已经报道了多种类型的微机械陀螺,典型的有:1988年美国 Draper 实验室首次报道的双框架式微机械陀螺^[1];1993年 Draper 实验室研制的梳齿驱动音叉式微机械陀螺^[2];1994年 Putty M W 报道的第一只镍材料制作的振动环式陀螺^[3];1996年 Draper 实验室发布的振动轮式陀螺^[4]。当前微机械陀螺的整体性能处于较低端的水平,限制了其在更广范围内的应用。因此,提高微机械陀螺的测量精度以及整体性能成为当前的研究热点之一。

驱动模态和检测模态的匹配以及品质因数对振动环陀螺的性能有着重要的影响,因此,改善陀螺的模态匹配,提高陀螺的品质因数是提高微机械陀螺的重要措施。当前对于模态匹配问题,通常的方法是施加调节电压来控制不同方向上的等效刚度,从而通过对陀螺谐振频率的调节来实现模态匹配,但这种方法需要一个比较复杂控制电路或控制算法。对于品质因数问题,则是通过改进结构,如音叉结构,来减小振动能量的损耗,以及改善材料的缺陷情况来提高品质因数。在上述陀螺结构中,振动环式陀螺有一系列固有的优点。首先,在原理上采用圆环的固有挠性模态,理论上模态频率完全一致;其次,圆环的对称性比较好,对温度、加速度敏感度低;第三,结构简单,健壮性好,环境适应能力强。但已有的振动环式陀螺多采用电容驱动与检测,需要制作成高深宽比结构,增加了工艺的复杂程度;而且电容检测容易受到寄生电容的影响。

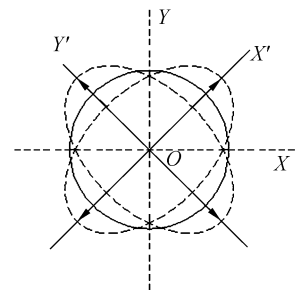
基于此,本文设计制作了一种结构新颖的振动环式微机械陀螺,该陀螺采用电磁驱动和磁感应检测。结构上采用了镜像对称和中心对称结构,通过建立灵敏度模型和机械噪声模型优化陀螺设计参数。工艺上采用简单的 MEMS 体硅标准工艺,从而减小了由加工引入的非对称性误差,

从设计和加工工艺两个方面确保模态匹配。材料方面选用缺陷较少的单晶硅,以提高陀螺的品质因数。最后通过修正工艺误差使模态频率差减小到陀螺-3 dB 带宽范围内,无需额外施加刚度调节电压。

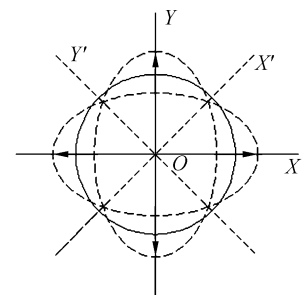
2 理论推导

2.1 振动环陀螺工作原理

几乎所有的微机械陀螺都是激励一个机械结构使之处于谐振状态,当有角速度输入时,所产生的科里奥利力(Coriolis Force)将使敏感质量振动,其振幅与待测角速度成正比^[5]。根据振动理论,振动环式陀螺有两个相同的椭圆形挠性模态,它们的固有频率相等且互相成 45° 夹角,即第二模态的波腹正好位于第一模态的波节处,如图 1 所示。主振动模态(驱动模态)沿 X 和 Y 方向振动,第二振动模态(检测模态)沿 X' 和 Y' 方向振动。



(a) 驱动模态
(a) Drive mode



(b) 检测模态
(b) Sense mode

图 1 振动环陀螺的两个弯曲振动模态

Fig. 1 Flexural modes of ring vibration gyroscope

振动环陀螺就是利用这两个挠性模态来检测角速度。由于这两个模态频率是完全一致的,在理论上振动环陀螺可以做到使驱动模态和敏感模态频率十分接近,陀螺的灵敏度将被结构的品质因数所放大,这将在后面详细叙述。工作时,首先施加驱动力使圆环谐振于驱动模态,当有垂直于圆环平面(XOY 平面)的角速度输入时,科里奥利力将使能量从驱动模态转移到检测模态,于是引起检测模态的振幅从零开始增加,最终达到一个与输入角速度成正比的稳定值^[6]:

$$q_s = 4A_g Q \frac{\Omega_z}{\omega_0} q_d. \quad (1)$$

式中, q_s 为检测模态的振幅值, q_d 为驱动模态的振幅值, Q 为陀螺的品质因数, Ω_z 为输入角速度, ω_0 为陀螺的本征圆频率, A_g 为与陀螺结构相关的角度增益。

2.2 电磁式振动环陀螺灵敏度分析

电磁式振动环陀螺结构如图 2 所示,它由一个圆环和对称分布的 8 根完全相同的支撑梁组成,整个结构保持镜像对称和中心对称。这 8 根支撑梁恰好位于圆环两个振动模态的波腹位置,因此结构的对称性保证了两个振动模态的频率完全一致。每根梁及其对应的八分之一圆环表面都分布一条导线用于传输激励信号或检测信号,且导线与硅结构采用 SiN 材料绝缘。其中位于 0° 、 90° 、 180° 、 270° 的 4 只电极为驱动电极,用于传输激励信号,余下的 4 只电极为检测电极。

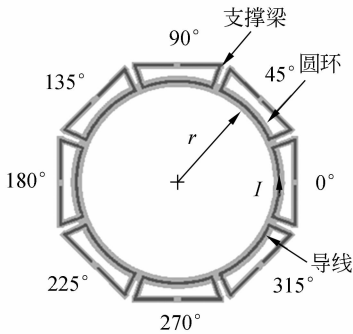


图 2 电磁式振动环陀螺示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electromagnetic ring vibration gyroscope

整个结构置于垂直于圆环平面的磁场中。首先,在驱动电极上施加频率等于陀螺驱动模态固有频率的驱动电流 I ,如图 2 所示。在磁场的

作用下产生洛仑兹力,从而使振动环工作于驱动模态。当有垂直于圆环平面的角速度输入时,科里奥利力将使振动能量转移到检测模态方向,引起振动环工作于检测模态。在磁场作用下,检测电极上产生感应电动势,可得检测电极微元产生的感应电动势为:

$$dU = B \cdot dL \cdot S. \quad (2)$$

式中, S 为微元 dL 处的位移, dU 为感应电动势, B 为磁感应强度。由于振动环陀螺主要涉及平面内的两个弯曲振动模态,由振动理论可得检测电极处的位移^[7]

$$S = q_s \cdot \sin(2\theta). \quad (3)$$

将式(3)及关系式 $dL = r \cdot d\theta$ 代入(2)式得到

$$dU = B \cdot r \cdot d\theta \cdot q_s \cdot \sin(2\theta). \quad (4)$$

每只检测电极约占据 $\frac{\pi}{4}$ 的角度,由此计算出每只检测电极产生的信号强度为

$$U = 2\sqrt{2}BrA_g \frac{Q}{\omega_0} q_d \Omega_z. \quad (5)$$

式中, r 为圆环半径。由此得到陀螺灵敏度为

$$S_{\text{gyro}} = \frac{U}{\Omega_z} = 2\sqrt{2}BrA_g \frac{Q}{\omega_0} q_d. \quad (6)$$

由式(6)可知,器件的灵敏度与品质因数成正比,与磁感应强度的平方成正比(q_d 也与 B 成正比),因此设计时要尽可能提高器件的品质因数和磁感应强度。式(6)适用于陀螺驱动模态和检测模态频率相一致的情况,因此在设计和加工过程中,都应严格保证结构的对称性,使驱动模态和检测模态的谐振频率差异尽可能小,才能提高陀螺灵敏度。通常频率差应小于陀螺 -3 dB 带宽即:

$$|\Delta\omega| \leq \frac{\omega_d}{2Q}. \quad (7)$$

式中 $\Delta\omega$ 为两个模态的频率差, ω_d 为驱动模态频率, Q 为陀螺的品质因数。

2.3 陀螺的机械噪声分析

陀螺的噪声水平决定了陀螺能检测到的最小角速度,也即决定了陀螺的分辨力。陀螺的噪声主要来源于机械噪声和电路噪声两个方面。其中机械噪声取决于陀螺的结构,为器件的基本噪声源,可以通过分析机械噪声的影响因素优化陀螺的设计。

微机械陀螺由于质量小,其机械噪声主要来自于周围环境的空气分子及尘埃碰撞所导致的布朗运动。在驱动端由于振动幅度比较大,布朗运

动的幅度远小于驱动幅度,因此可以忽略不计。而检测端的振幅相对较小,因此不能忽略。对于阻尼为 C 的二阶系统,布朗力谱密度为^[8]

$$F_B = \sqrt{4kTC} (N/\sqrt{\text{Hz}}), \quad (8)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数, $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, T 是绝对温度, C 是阻尼系数。设二阶系统质量为 m , 刚度为 k , 由此建立二阶振动系统方程

$$m\ddot{x}_B + C\dot{x}_B + kx_B = F_B. \quad (9)$$

对带宽为 $\Delta\omega$ 的系统, 可以求得在谐振时的布朗运动幅度为

$$x_B = \frac{Q\sqrt{4kTC}}{m\omega_0^2} \sqrt{\Delta\omega} (m). \quad (10)$$

综合式(1)和式(10)以及关系式 $C = \frac{m\omega_0}{Q}$, 可得到该陀螺布朗运动等效输入角速度大小为

$$\Omega_{\text{eq}} = \frac{1}{4A_g q_d} \sqrt{\frac{4kT\Delta\omega}{m\omega_0 Q}}. \quad (11)$$

公式(11)表明, 增加陀螺质量, 提高陀螺的工作频率, 提高品质因数以及增大驱动幅度, 同时降低温度, 减小系统带宽可以降低陀螺的机械噪声, 从而提高陀螺分辨率。

由公式(10)中可以看出, 阻尼是系统噪声的重要来源。微机械陀螺设计中, 空气阻尼是影响其动态特性的重要因素, 品质因数、工作带宽、器件噪声等都与阻尼有关。微结构的阻尼包括来源于材料内部的阻尼和各运动部件之间的空气流动阻尼。在通常的工作情况下, 材料内部阻尼远小于空气阻尼, 因此可以忽略不计。根据运动部件的运动方式不同, 空气阻尼又可以分为压膜阻尼与滑膜阻尼。压膜阻尼在两个平板相对挤压时产生, 而滑膜阻尼则在两个平板相对滑动时产生。在本设计中, 振动环振动时与支撑梁发生挤压运动, 从而产生压膜阻尼。文献[9]运用可压缩空气膜的雷诺方程建立了压膜阻尼模型。由于通常情况下压膜阻尼比滑膜阻尼要大, 因此会导致品质因数降低、陀螺噪声增大。为了提高陀螺性能, 需要对陀螺进行真空封装。

3 器件制作

MEMS 表面工艺的优势在于能与 CMOS 工艺兼容^[10-12], 使得 MEMS 器件与电路易于集成, 但表面工艺一般只能加工出厚度为几微米的器

件; 而体加工工艺能加工出厚度为几十微米甚至上百微米的器件, 可以增加陀螺质量, 降低陀螺布朗噪声; 同时提高器件 Z 方向的强度, 提升抗环境冲击的能力。本文采用 MEMS 体加工工艺完成陀螺制作。

由于单晶硅具有良好的机械性能和热稳定性, 有利于加工出高品质因数的器件, 因此, 陀螺采用(100)晶向的单晶硅材料。主要工艺步骤如图 3 所示: (1)首先在双面抛光的单晶硅上高温热氧化 SiO_2 作为绝缘层(图 3(a)); (2)磁控溅射 Au 导线(图 3(b)); (3)背面用 KOH 腐蚀液减薄至所需厚度(图 3(c)); (4)正面深刻蚀释放结构(图 3(d)); (5)划片、封装。图 4 为释放后陀螺显微照片及局部放大图, 陀螺圆环宽 $40 \mu\text{m}$, 支撑梁宽 $15 \mu\text{m}$, 整个结构厚 $100 \mu\text{m}$ 。

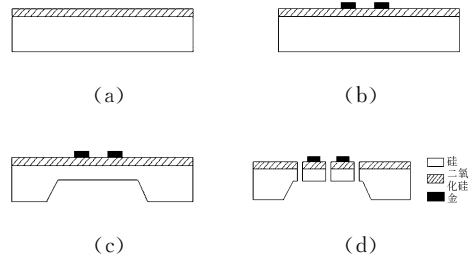


图 3 器件制作工艺流程

Fig. 3 Fabrication processes

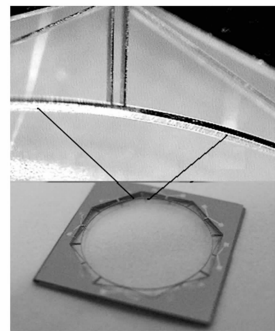


图 4 陀螺显微照片及局部放大

Fig. 4 Micrograph of vibrating ring gyroscope

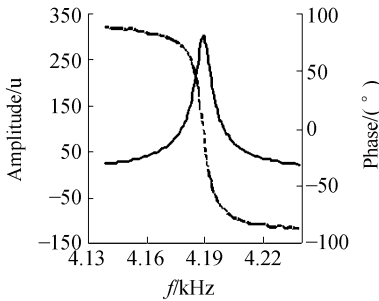
该工艺直接采用硅衬底作为支撑结构, 无需硅-玻璃或硅-硅键合, 工艺流程简单, 同时消除了键合工艺引入的热应力^[13]。全部采用 MEMS 标准工艺, 易于实现批量加工。

由于(100)晶向的单晶硅材料的不对称性以及加工过程产生的误差, 会使陀螺两个模态频率

产生一定的差异。通过优化设计和工艺的改进,可以减小频率差,最后通过修正加工过程中产生的不对称,使频率差减小甚至消除。

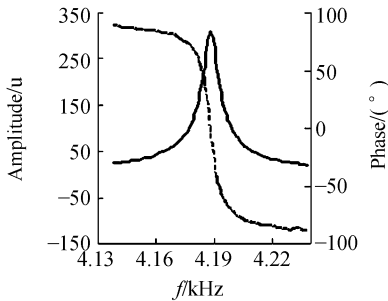
4 测试结果

使用 HP3562 动态信号分析仪对陀螺的频率响应特性进行分析。大气压下的频率响应特性曲线(实线为幅频响应,虚线为相频响应,下同)如图 5 所示,驱动模式的谐振频率为 4.189 kHz,检测模式谐振频率为 4.188 5 kHz,驱动模式和检测模式频率相差 0.5 Hz,-3 dB 带宽约 8 Hz,计算得到品质因数约为 500。1 Pa 的低真空环境下的频率响应特性曲线如图 6 所示,驱动模式的谐振频率为 4.193 87 kHz,检测模式谐振频率为 4.193 6 kHz,驱动模式和检测模式频率相差 0.27 Hz,-3 dB 带宽约 0.3 Hz,品质因数约为 14 000。



(a)驱动模式频响特性曲线

(a)Frequency responses of drive mode



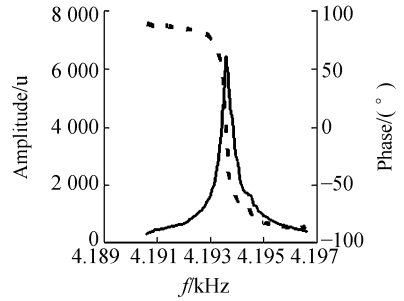
(b)检测模式频响特性曲线

(b)Frequency responses of sense mode

图 5 大气压下陀螺频响特性曲线

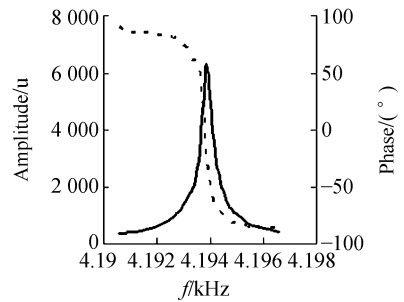
Fig. 5 Frequency responses of drive mode and sense mode in atmosphere

测模态的频率都比大气压上升高了约 5 Hz,这是由于空气阻尼减小的缘故。此外,低真空下驱动模态和检测模态的频率差有所减小,这主要缘于空气阻尼导致的不对称性减小。



(a)驱动模式频响特性曲线

(a)Frequency responses of drive mode



(b)检测模式频响特性曲线

(b)Frequency responses of sense mode

图 6 真空下陀螺频响特性曲线

Fig. 6 Frequency responses of drive mode and sense mode under vacuum

在大气压下,用锁相放大器(Signal Recovery 7265)对陀螺进行静态性能测试(单轴角速率转台,GDW1-ZKY),在-200~+200 °/s 范围内,分辨力为 0.05 °/s,灵敏度为 0.2 μV/(°/s),线性相关系数为 1,如图 7 所示。

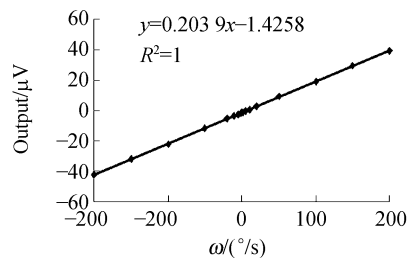


图 7 陀螺输入输出特性曲线

Fig. 7 Angular rates vs outputs

上述测试结果表明,低真空下驱动模态和检

5 结 论

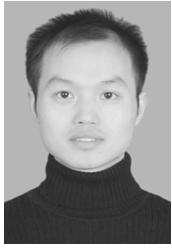
设计制作了一种电磁式微机械振动环陀螺,建立了陀螺灵敏度和机械噪声的数学模型;得出在驱动模态与检测模态频率一致的情况下,陀螺灵敏度与品质因数成正比,与外加磁感应强度的平方成正比;陀螺机械噪声所等效的输入角速度与品质因数平方根成反比的结论。因此,提高品质因数以及减小驱动模态与检测模态频率差,是

提高振动环陀螺灵敏度和分辨力的关键途径。采用 MEMS 体硅标准工艺加工出陀螺样片,工艺流程简单,易于实现批量加工。所研制的电磁式振动环陀螺结构对称,驱动模态和检测模态频率匹配良好,频率差 $< 0.5 \text{ Hz}$, 1 Pa 的真空条件下品质因数可达 14 000。锁相放大器测试表明,陀螺具有较高的综合性能,为实用化研究提供了基础。此外,采用真空封装以进一步提高陀螺性能,将是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] BOXENHOM B, GREIFF P. A vibratory micromechanical gyroscope [C]. *AIAA Guidance and Controls Conference. Minneapolis, Minnesota: AIAA*, 1988:1033-1040.
- [2] BEMSTEIN J, CHO S, KING A T, *et al.*. A micro-machined comb-drive tuning fork rate gyroscope [C]. *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Workshop. Fort Lauderdale: IEEE*, 1993:143-148.
- [3] PUTTY M W, NAJAFI K. A micro-machined vibrating ring gyroscope [C]. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop. Hilton Head: IEEE*, 1994: 213-220.
- [4] GREIFF P, ANTKOWIAK B, CAMPBELL J, *et al.*. Vibrating wheel micromechanical gyro [C]. *Position Location and Navigation symposium. Minnesota, USA: IEEE*, 1996(4):31-37.
- [5] BEEY S, ENSELL G, KRAFT M, *et al.*. *MEMS Mechanical Sensors* [M]. Boston: Artech House, Inc., 2004:195-196.
- [6] PUTTY M W. *A micro-machined vibrating ring gyroscope* [D]. Univ. Michigan: M. W. Putty, 1995.
- [7] TIMOSHENKO S, YOUNG D H. *Vibration Problems in Engineering* [M]. 3rd ed. New York: D. Van Nostrand Company, Inc., 1955:427-430.
- [8] GABRIELSON T B. Mechanical-thermal noise in micro-machined acoustic and vibration sensors [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1993,40(5):903-909.
- [9] BAO M H. *Micro Mechanical Transducers-pressure sensors, Accelerometers and Gyroscopes* [M]. Volume 2. Amsterdam: Elsevier Press, 2000:191-210.
- [10] QU H W, FANG D Y, XIE H K. A single-crystal silicon 3-axis CMOS-MEMS accelerometer [C]. *The Third IEEE International Conference on Sensors. Vienna, Austria: IEEE*, 2004:661-664.
- [11] ALPER S E, AKIN T. A symmetric surface micro-machined gyroscope with decouple oscillation modes [J]. *Sensors and Actuators A*, 2002,97: 347-358.
- [12] XIE H K, FEDDER G K. Vertical comb-finger capacitive actuation and sensing for CMOS-MEMS [J]. *Sensors and Actuation A*, 2002,95:212-221.
- [13] YAZDI N, NAJAFI K. An all-silicon single-wafer fabrication technology for precision microaccelerometers [C]. *The 9th International Conference Solid-State Sensors and Actuators. Chicago, USA: IEEE*, 1997:1181-1184.

作者简介:



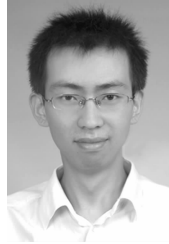
陈 李(1981—),男,2004 年于北京邮电大学获得学士学位,现为中科院电子学研究所博士研究生,主要从事微机械陀螺、微弱信号检测、微系统封装等方面的研究。E-mail: xuefeng1025@163.com



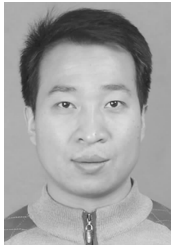
毋正伟(1980—),男,2003 年于清华大学获学士学位,2006 年于中科院电子学研究所获得硕士学位,主要从事 MEMS 器件设计、MEMS 加工技术和 MEMS 封装等方面的研究。E-mail: wzwi@163.com



陈德勇(1967—),男,博士,研究员,1989 年于清华大学获得学士学位,1992 年于中科院半导体研究所获得硕士学位,2002 年于中科院电子学研究所获得博士学位,主要从事 MEMS 加工技术,基于 MEMS 技术的微结构物理量传感器的设计、制作、封装及测试和微执行器及智能微系统等方面的研究。E-mail: dychen@mail.ie.ac.cn



张 明(1980—),男,2003 年于太原理工大学获学士学位,现在中科院电子学研究所攻读博士学位,主要从事微机械陀螺、MEMS 加工技术和微弱信号检测等方面的研究。E-mail: walterzhang1980@hotmail.com



王军波(1973—),男,博士、副研究员,1995 年、1998 年于吉林大学分别获得学士和硕士学位,2002 年于清华大学获得博士学位,主要从事 MEMS 物理量传感器、生化传感器的设计、加工、封装及微弱信号检测等方面的研究。E-mail: jbwang@mail.ie.ac.cn

● 下期预告

基于 $Zn_2SiO_4 : Mn$ 的成像器件 紫外增强薄膜制备及表征

倪争技,刘 猛,张大伟,黄元申,庄松林

(上海理工大学 上海市现代光学系统重点实验室,上海 200093)

为了增强 CCD、CMOS 等硅基光电成像器件的紫外响应,可在其光敏面镀变频薄膜将紫外波段的光变为可见波段的光,以实现 CCD、CMOS 等硅基光电成像器件的紫外响应。 $Zn_2SiO_4 : Mn$ 由于粒子直径小,稳定性好,荧光量子效率高等优点,在增强光电器件紫外响应领域有着很广泛的应用前景。本文用“旋涂法”在石英基底上生成 $Zn_2SiO_4 : Mn$ 紫外增强薄膜,并对其透射光谱、吸收光谱、激发光谱与发射光谱等光学性质进行分析。实验测得薄膜在 300 nm 以下透过率极低并具有很强的吸收,在 300 nm 以上透过率很高且吸收很弱;激发峰在 260 nm,发射峰在 525 nm,可以实现将紫外光转化为可见光的目的。同时分析了 $Zn_2SiO_4 : Mn$ 薄膜的均匀性、厚度、稳定性等物理性质对其变频性能的影响。实验结果表明,利用 $Zn_2SiO_4 : Mn$ 薄膜可以有效增强 CCD 等光电器件的紫外响应,实现光电器件的紫外探测。