

基于光纤检测技术的扭转敏感微机电系统 加速度传感器

钟少龙¹ 龙亮^{1,2} 李明³ 吴亚明¹

(¹ 中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术联合国家重点实验室, 微系统技术重点实验室, 上海 200050)

² 中国科学院大学, 北京 100049; ³ 中船重工远舟(北京)科技有限公司, 北京 100861

摘要 为实现微型化、抗电磁干扰、可长时间工作和可远距离传输的加速度传感器, 提出了一种基于微机电系统 (MEMS) 非对称扭镜结构的光纤加速度计设计方案, 并利用对角度变化非常敏感的双光纤准直器对扭镜的扭转角度变化进行检测。MEMS 光纤加速度计由 MEMS 非对称扭镜结构、驱动电极和双光纤准直器等组成。分析了器件的加速度敏感原理和光纤检测原理, 介绍了器件综合设计考虑, 并给出了器件的结构参数。利用 MEMS 加工技术成功制作了 MEMS 光纤加速度计样品。对加速度计进行了实验测试, 加速度计的输出实验值与理论值吻合。测试结果表明, 该加速度计量程为 $\pm 2g$, 带宽为 600 Hz, 分辨率优于 $10^{-4} g$, 且具有良好的线性度和重复性。该 MEMS 光纤加速度计将 MEMS 敏感结构与光纤检测相结合, 兼备了两者的优点, 结构紧凑、制作工艺简单。

关键词 传感器; 微机电系统; 加速度计; 光纤传感器; 光纤检测; 微加工

中图分类号 TM930.12; O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0305002

Torsion-Sensitive Micro-Electro Mechanical Systems Accelerometer Sensor Based on Optical Fiber Detection Technology

Zhong Shaolong¹ Long Liang^{1,2} Li Ming³ Wu Yaming¹

¹ *Kay Laboratory Micro-System Technology, State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*
² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
³ *CSIC Yuanzhou (Beijing) Science & Technology Co., Ltd, Beijing 100861, China*

Abstract In order to realize an accelerometer sensor with high performance, miniaturization anti-electromagnetic interference, long-work hours and long-distance transmission, a novel micro-electro mechanical system (MEMS) fiber-optic accelerometer based on asymmetric torsional mirror is proposed. A dual fiber collimator is used to measure the change of tiny angle of torsional mirror. The MEMS fiber-optic accelerometer consists of asymmetric torsional mirror, drive electrode and dual fiber collimator. The operation principle of the accelerometer and optical detection of the device are analyzed. Basic design and analytical optimization of the device are discussed. The MEMS fiber-optic accelerometer is fabricated successfully by MEMS processes. Measured results of the accelerometer are consistent with the theoretical values. Experimental results indicate that the dynamic range of the accelerometer is $\pm 2g$, the bandwidth is 600 Hz and the resolution is smaller than $10^{-4} g$. Besides, the accelerometer has good linearity and repeatability. The MEMS fiber-optic accelerometer takes the advantages of fiber-optic measurement, including compact MEMS structure and simple fabrication processes.

Key words sensors; micro-electro mechanical systems; accelerometer; optical fiber sensor; optical fiber detection; microfabrication

OCIS codes 040.1880; 060.2310; 060.2370

收稿日期: 2013-08-20; **收到修改稿日期**: 2013-09-26

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ250002)

作者简介: 钟少龙(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事光纤微机电系统传感技术方面的研究。

E-mail: shaolongzhong@mail.sim.ac.cn

1 引 言

基于微机电系统(MEMS)技术的加速度计由于具有微型化、低功耗和低成本等优势,已经是一类被深入研究的传感器。MEMS 加速度计一般包括加速度敏感质量块和信号检测两大部分。信号检测方式对 MEMS 加速度计的结构、设计、检测电路和性能产生重要影响。MEMS 加速度计通常采用电信号检测方式,如压阻、压电、电容、隧道电流检测等^[1]。但电信号检测的 MEMS 加速度计在电源受限或存在强电磁干扰等场合的使用将受到限制。

利用光纤及光纤器件特性形成了一类重要传感器——光纤传感器,在存在强电磁干扰(如电力系统测量)、长距离传输(光纤遥测,如反潜告警)、测量现场电源严重受限等情况下具有很大的优势。随着光纤及光纤器件技术的成熟和体积、重量以及价格的大幅下降,近年来开展了较多的研究工作,已获得广泛的应用^[2-5]。目前光纤加速度计可分为光强调制型和相位调制型^[6-9]。Peng 等^[7]提出了 Michelson 干涉型加速度计,但是其双光路干涉结构庞大且复杂,不易准直。杨颖等^[8]提出的基于激光自混合效应的加速度计分辨率能够达到 $0.19 \times 10^{-4} g$,但其体积较大,不便于批量化生产。

本文提出了一种新型的 MEMS 光纤加速度计,采用非对称 MEMS 扭转微镜作为敏感质量块。在外界加速度作用下,扭转微镜将转动一个与加速度强弱对应的角度。MEMS 扭转微镜对力矩非常敏感,因此基于此结构制作的加速度计对产生力矩的外界加速度非常敏感。利用双光纤准直器对角度变化非常敏感的特性对扭转角度进行检测,即可得到被测加速度的大小。对 MEMS 光纤加速度计设计时无需考虑信号检测电路(如压阻器件、电容、电信号引线等)的设计,这将简化工艺。

2 MEMS 光纤加速度计工作原理

本文提出的扭转敏感 MEMS 光纤加速度计由扭转梁支撑的 MEMS 非对称扭镜、光学反射膜和双光纤准直器构成。其中 MEMS 非对称扭镜作为对外界加速度敏感的质量块,其结构如图 1 所示。该结构可将外界加速度转换为扭转角度输出,从而实现高灵敏度的加速度检测。在图 1 中,扭转梁的长为 l ,宽为 W ,厚度为 t ,扭镜宽度为 b ,平衡部分长度为 l_1 ,扭转部分长度为 l_2 ,厚度也为 t 。

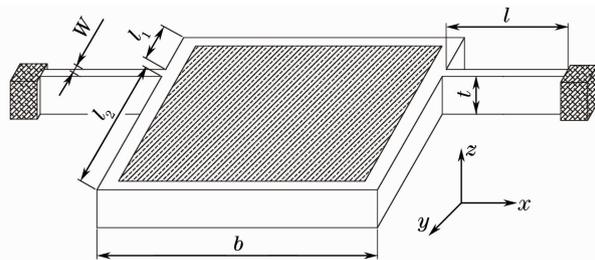


图 1 MEMS 光纤加速度计中非对称扭镜结构示意图
Fig. 1 Diagram of asymmetric torsional mirror of MEMS fiber-optic accelerometer

2.1 外界加速度引起非对称扭镜扭转

非对称扭镜的重心与扭转梁轴线偏离,此时扭镜作为加速度计的质量块对外界加速度敏感,能够敏感地检测到垂直于扭镜镜面方向(z 轴)的加速度信号。加速度 a 对扭镜产生扭矩 T_{ex} , T_{ex} 引起扭镜扭转角度 θ ,而扭转角度 θ 又会引起扭转梁产生恢复扭矩 T_r ,最终两个扭矩平衡。根据力学原理可得^[10]

$$T_{ex} = a\rho(l_2 - l_1)bt(l_2 + l_1)/2, \quad (1)$$

$$T_r = K_\varphi\theta, \quad (2)$$

式中 a 为待测加速度, ρ 为硅片密度, θ 为扭镜的扭转角, K_φ 为梁的扭转刚度,对双扭转梁来说,

$$K_\varphi = 2GW^3tk_1/l, \quad (3)$$

式中 $G = E/[2(1 + \mu)]$ 为剪切弹性模量,其中 E 为硅的杨氏弹性模量, μ 为硅的泊松比, k_1 为关于梁宽 W 和梁厚 t 的参数,即

$$k_1 = \left\{ 1 - \frac{192W}{\pi^5 t} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\tanh[n\pi t/(2W)]}{n^5} \right\} / 3, \quad t > W. \quad (4)$$

由(1)、(2)式可得

$$\theta = \frac{a\rho(l_2 - l_1)bt(l_1 + l_2)}{2K_\varphi}. \quad (5)$$

2.2 光纤检测技术检测扭转角度

2.2.1 双光纤准直器检测扭转角度原理

基于双光纤准直器与微反射镜面耦合光路的微角度检测原理如图 2 所示。

选用具有一定交叉长度的双光纤准直器,当将微反射镜竖直置于其交叉点(准直透镜后方焦点附近)位置时,由双光纤准直器其中一根光纤输出的光经镜面反射后,几乎可以全部由另外一根光纤耦合吸收。当镜面倾斜角度 α 时,反射光相对偏转角度为 2α ,使得经过焦距为 f 的准直微透镜后光束中心相对接收光纤中心产生轴向偏移 $\Delta x = 2f\alpha$,因此产生耦合损耗^[11]:

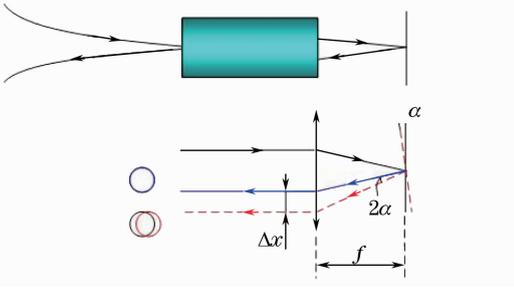


图 2 基于双光纤准直器与微反射镜面耦合光路的微角度检测原理

Fig. 2 Principle of micro-angular detection based on dual fiber collimator and micro reflection mirror

$$I_L = -4.343 \left(\frac{\Delta x}{\omega_0} \right)^2 = -4.343 \left(\frac{2f\alpha}{\omega_0} \right)^2, \quad (6)$$

式中 ω_0 为单模光纤的模场半径。由(6)式可见双光纤准直器的输出光强损耗随微反射镜的倾斜角度增加而增大,因此通过测量输出光损耗值就可以测量微反射镜的倾斜角度。

2.2.2 光学检测灵敏度理论分析

根据(6)式得到的不同焦距条件下的耦合损耗 I_L 与微镜面倾斜角度 α 的关系曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看出,当 $2\omega_0 = 570 \mu\text{m}$ 时,对应 0.1° 的倾斜角度, I_L 可达到 20 dB 以上的变化,即光强变化达 100 倍以上,输出光强对角度变化非常敏感。

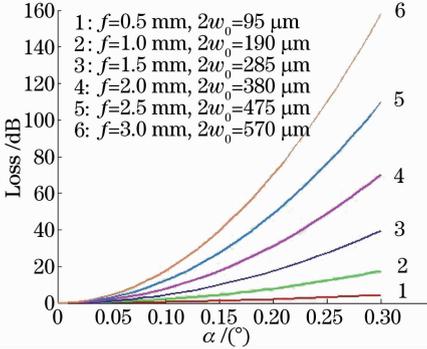


图 3 不同焦距条件下的耦合损耗与镜面角度的关系

Fig. 3 Relationship between coupling loss with different focal lengths and angle of mirror

光纤检测的灵敏度 S 可以定义为 I_L 对倾斜角 α 的导数,由(6)式可得到光纤检测灵敏度为

$$S = \frac{d(I_L)}{d\alpha} = 37.744 \left(\frac{f}{\omega_0} \right)^2 \cdot \alpha = 34.744 \left(\frac{f}{\omega_0} \right)^2 \cdot \alpha \cdot \frac{\pi}{180 \times 3600}, \quad (7)$$

其单位为 $\text{dB}/(^\circ)$ 。图 4 为根据(7)式得到的不同焦距条件下的光纤检测灵敏度与微镜面倾斜角度的关系曲线。由图 3 和图 4 可见,双光纤准直器的耦合损

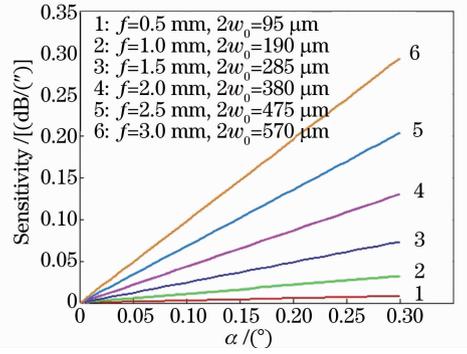


图 4 不同焦距条件下的光纤检测灵敏度与微镜面角度的关系

Fig. 4 Relationship between optical sensitivity with different focal lengths and angle of micro mirror

耗及检测灵敏度均随着焦距增大而增加,同时也随着微镜面倾斜角度的增大而增加。对于焦距的选取,尽管光纤检测灵敏度与双光纤准直器焦距的平方成正比,但是,由于双光纤准直器的准直光斑束腰半径与准直透镜的焦距关系为 $\omega = \lambda f / (\pi \omega_0)$, 焦距越长,双光纤准直器的准直光斑束腰半径越大,则要求与其耦合的微镜面尺寸(通常至少 4ω) 越大,这会增加扭镜的面积从而增加整个加速度计的体积。因此,应该综合考虑光学灵敏度和芯片尺寸,选取合适的焦距。对于可检测的微镜面倾斜角度范围,也就是检测量程,则是由光电探测的量程及分辨率决定的。

3 MEMS 光纤加速度计的设计

3.1 MEMS 光纤加速度计的结构参数

由(5)式可见, MEMS 扭镜扭转角度 θ 与加速度 a 呈线性关系。令

$$\frac{d\theta}{da} = \frac{\rho(l_2 - l_1)bt(l_2 + l_1)}{2K_\phi}, \quad (8)$$

根据(3)式与(8)式得到 MEMS 光纤加速度计的加速度灵敏度为

$$S_z = \frac{\rho(l_1 - l_2)b(l_1 + l_2)l}{4Gk_1W^3}. \quad (9)$$

由(9)式可以看出, MEMS 光纤加速度计的灵敏度由如下几个因素决定: 扭转梁长 l , 梁宽 W , 扭镜的平衡部分长度 l_1 , 扭转部分长度 l_2 以及扭镜的宽度 b 。取 W, l_1, l_2, l, b 初始值分别为 $4, 50, 600, 350, 600 \mu\text{m}$, 每次取其中一个参数作为变量, 做出加速度灵敏度与各个参数的关系如图 5 和图 6 所示。图 5 为加速度灵敏度与扭转梁宽 W 之间的关系, 图 6 为加速度灵敏度与扭镜参数 l_1, l_2, l, b 之间的关系。

综合考虑以上 MEMS 光纤加速度计各参数之

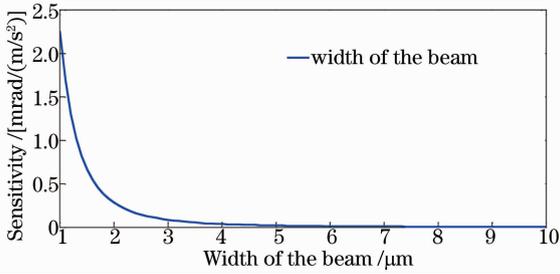


图 5 灵敏度与扭转梁宽 W 关系

Fig. 5 Relationship between sensitivity and torsion beam breadth W

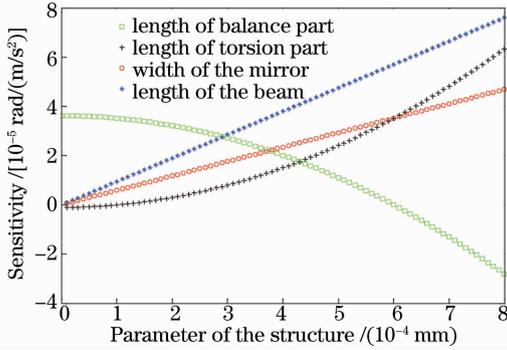


图 6 灵敏度与扭镜参数 l_1, l_2, l, b 之间的关系

Fig. 6 Relationship between sensitivity and parameters of torsional mirror l_1, l_2, l, b

间的制衡关系,且充分考虑器件的安全及工艺易实现性,可以得到如表 1 所示的器件结构参数。若对器件参数进行灵敏度优化设计,如减小梁宽 W ,其灵敏度还将大幅提高。

表 1 MEMS 光纤加速度计结构参数

Table 1 Structure parameters of MEMS fiber-optic accelerometer

$l_1/\mu\text{m}$	$l_2/\mu\text{m}$	$l/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$W/\mu\text{m}$	$t/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$
100	600	370	600	4	35	20

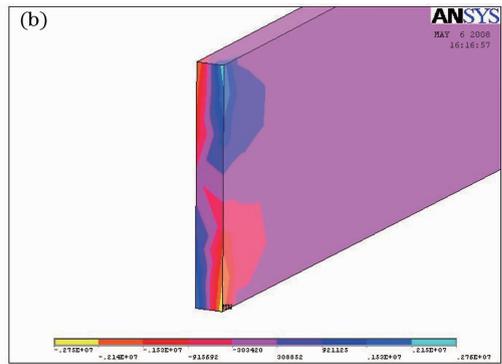
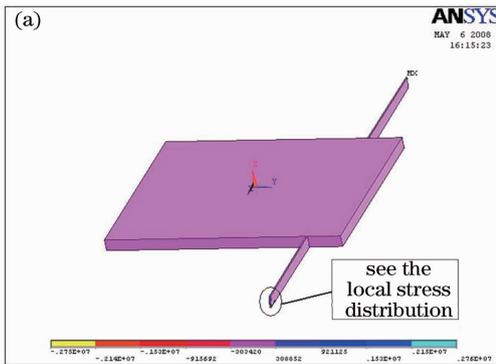


图 7 MEMS 光纤加速度计的 ANSYS 分析。(a) MEMS 扭转微镜结构的整体应力分布图;

(b) MEMS 扭转微镜结构端点局部应力分布示意图

Fig. 7 ANSYS analyses of MEMS fiber-optic accelerometer. (a) Stress distribution on the whole MEMS torsional micro mirror structure; (b) local stress distribution on the endpoint of MEMS torsional micro mirror structure

根据表 1 中的参数,可得到 MEMS 光纤加速度计的其他性能指标如表 2 所示。

表 2 MEMS 光纤加速度计性能参数

Table 2 Performance parameters of MEMS fiber-optic accelerometer

$S_z/[\text{rad}/(\text{m}/\text{s}^2)]$	f'/Hz	ζ	Q
0.0436	1303	0.772	0.65

表 2 中, S_z 为 MEMS 光纤加速度计的加速度灵敏度, f' 为一阶谐振频率, ζ 为阻尼比, Q 为品质因素。

根据表 2 中的性能参数, MEMS 光纤加速度计的响应时间可根据其时间常数进行估算:

$$t_s \approx \frac{1}{\zeta \omega_n} = \frac{1}{0.772 \cdot 2\pi \cdot 1303} = 0.16, \quad (10)$$

式中 ω_n 为扭转结构的谐振圆频率, $\omega_n = 2\pi f'$, f' 为谐振频率。(10)式即 MEMS 光纤加速度计的响应时间,该时间在亚毫秒量级。

3.2 MEMS 光纤加速度计的应力仿真分析

根据表 1 中 MEMS 光纤加速度计的结构参数,通过有限元分析工具 ANSYS 对 MEMS 光纤加速度计进行应力仿真分析。通过 ANSYS 进行稳态分析,采用笛卡尔坐标系, MEMS 扭镜在加速度为 $10g$ 情况下 z 方向的应力分布图如图 7 所示。从图中看出,扭转梁的根部,应力最大,其最大拉应力(SMX)为 2.76 MPa ,最大压应力(SMN)为 2.75 MPa , MEMS 扭镜远离扭转梁的端部位移最大,其最大位移(DMX)为 $1.93 \mu\text{m}$ 。所以,该结构不易因梁的断裂而失效。而且由于衬底的存在,对 MEMS 扭镜的扭转角有限位作用,使得最大扭转角度不超过 1.9° ,在该最大扭转角度下,梁的剪切力为 23 MPa ,仍然远低于硅的断裂应力,在扭转角

度为 1.9° 时等效重力加速度为 $93g$ 。同时,计算梁应力在 3 GPa 时的等效重力加速度为 $11960g$ 。理论计算表明,该 MEMS 扭镜结构能抗 $10000g$ 以上重力加速度的冲击。

3.3 工作点的选择

由于光纤检测灵敏度与 MEMS 扭镜的扭转角度成正比,如果 MEMS 扭镜的初始角度选取为 0° ,将会导致两个问题:1) 光纤检测灵敏度在 0° 位置时非常小;2) 无法辨别扭转角度的方向,即扭转角度的正负。因此,为了在整个扭转角度检测范围内均能满足灵敏度要求,并且能辨别扭转方向,则需要设置合适的工作点,即选取 MEMS 扭镜的初始角度。

如图 8 所示,将扭镜的初始角度 α_0 设置在非零的角度位置上,则在一定角度范围内,光强损耗与扭镜的扭转角度呈单调函数关系。在这个角度范围内,根据光强损耗的变化可以判断扭镜扭转的方向。在不考虑测量线性度的情况下,该角度范围就是最大的扭转角度检测范围,初始角度 α_0 的设置还将影响光纤检测灵敏度。因此,综合考虑光纤灵敏度检测要求和所采用光源光强、光电探测器的分辨率和光电放大器的放大倍数,设置初始角度 α_0 作为工作点,由此也可以确定扭转角度的检测范围。为使 MEMS 光纤加速度计的输具有良好的线性度,工作点一般选择在双光纤准直器耦合损耗 I_L 随 MEMS 扭镜扭转角度近似线性变化的地方,同时避免工作点处耦合损耗 I_L 因太大而导致光强过低的情况。本文中, MEMS 扭镜的初始扭转角度选择在 0.2° 的位置。

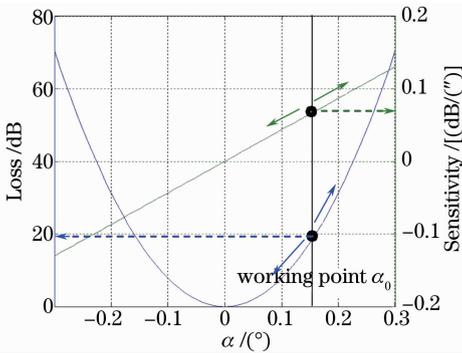


图 8 工作点设置示意图

Fig. 8 Diagram of working point setting

4 MEMS 光纤加速度计的制作工艺及实现

MEMS 光纤加速度计的敏感芯片由 SOI 硅片和 Pyrex 7740 玻璃片键合而成。SOI 硅片用于实

现 MEMS 扭镜结构,玻璃片支撑微机械结构,并在其上制作激励电极。MEMS 光纤加速度计敏感芯片的工艺流程图如图 9 所示,具体工艺步骤如下:

1) 通过热氧化,在(100)取向的 n 型 SOI 硅片上生长厚度为 2000 nm 的 SiO_2 。选用的 SOI 硅片顶层硅厚度为 $40\text{ }\mu\text{m}$,埋层 SiO_2 厚度为 $2\text{ }\mu\text{m}$,衬底硅厚度为 $380\text{ }\mu\text{m}$ 。

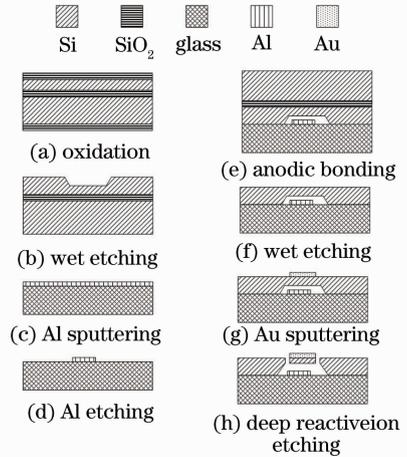


图 9 MEMS 光纤加速度计制作工艺

Fig. 9 Fabrication process steps of MEMS fiber-optic accelerometer

2) 腐蚀形成 MEMS 扭镜的运动空间。通过光刻,选择性地去除上一步中在顶层硅上生长的 SiO_2 。将硅片去除光刻胶后放入 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 、质量分数为 40% 的 KOH 溶液中腐蚀约 2 h 后形成扭镜的运动空间,腐蚀深度约为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。

3) 在玻璃片上通过磁控溅射沉积厚度为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的金属铝。光刻后,在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的磷酸中腐蚀去掉多余的铝得到激励电极。

4) 将 SOI 硅片上的图形与玻璃片上的图形进行对准,采用阳极键合工艺进行硅-玻璃键合,键合面为 SOI 硅片顶层硅与玻璃片沉积铝电极的一面。

5) 将键合片在 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 、质量分数为 40% 的 KOH 溶液中腐蚀约 38 h ,去除 SOI 硅片的衬底硅,随后用 HF 腐蚀去除埋层 SiO_2 。

6) 光刻显影后,在硅薄膜上通过磁控溅射沉积厚度为 $50/400\text{ nm}$ 的 TiW/Au 薄膜,并腐蚀掉多余的 TiW/Au 薄膜形成光学反射镜面。

7) 用光刻胶作掩模,深反应离子刻蚀 (ICP-DRIE) 刻蚀键合片上的硅薄膜,进行 MEMS 扭镜的结构释放,再去光刻胶,完成 MEMS 光纤加速度计的敏感芯片制作。

最终得到的 MEMS 光纤加速度计敏感芯片如

图 10 所示。

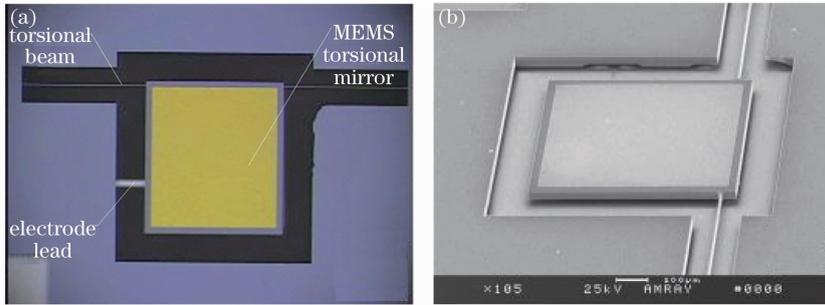


图 10 MEMS 光纤加速度计结构照片。(a) 敏感芯片的显微镜照片；(b) 敏感芯片的 SEM 全貌

Fig. 10 Photo of MEMS fiber-optic accelerometer. (a) Microscope picture of the MEMS torsion-sensitive structure; (b) SEM micrograph of the MEMS torsion-sensitive structure

5 MEMS 光纤加速度计的测试与分析

5.1 静态测试

将封装于管壳内的 MEMS 光纤加速度计敏感芯片安装在 6 维调节台的左侧并固定；双光纤准直器装夹在 6 维调节台的右侧，与 MEMS 扭镜处于相对位置。然后，由电脑控制 6 维调节台右侧的双光纤准直器以 0.0015° 的最小角度调节步进相对于 MEMS 扭镜进行转动，如图 11 所示。

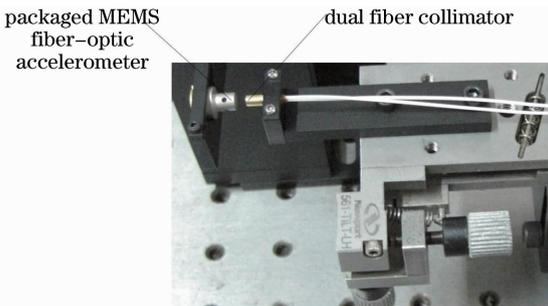


图 11 静态测试系统图

Fig. 11 System diagram of static testing

由图 12 的实际测试结果可知，双光纤准直器所检测的 MEMS 扭镜的最大扭转角度为 0.3° ，对应的光插入损耗变化接近 70 dB。

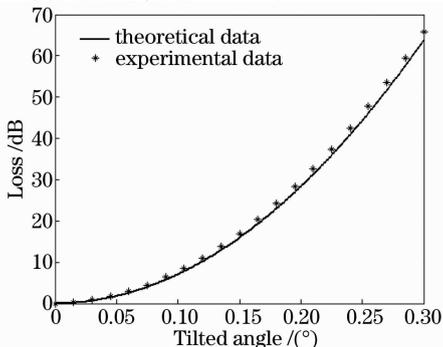


图 12 静态测试结果

Fig. 12 Static testing results

为实现双光纤准直器对 MEMS 扭镜扭转角方向的区分并提高对扭转角检测的线性度，可将双光纤准直器与 MEMS 扭镜的初始相对扭转角度设置在 0.2° 位置，然后使 MEMS 扭镜相对于这一初始位置在 $\pm 0.1^\circ$ 范围内转动（也即是 MEMS 扭镜相对于双光纤准直器在 $0.1^\circ \sim 0.3^\circ$ 之间变化）。

由此，实际测试出的 MEMS 光纤加速度计的光纤检测性能如下：光源输出光功率为 1 mW，角度扭转变化范围为 $0.1^\circ \sim 0.3^\circ$ ，光纤检测灵敏度为 $0.008''$ ，光电放大板最小探测灵敏度为 10 nW，双光纤准直器检测出的最大光插入损耗为 50 dB，光电放大板可分辨的角位移导致的光功率变化为 12 nW。

5.2 动态测试

动态测试主要测试 MEMS 光纤加速度计在一定振动频率和振动加速度下的动态响应。图 13 为 MEMS 光纤加速度计的动态测试系统图。LED 发出的光经振动台上的 MEMS 光纤加速度计的扭镜调制后，进行光电转换放大并用示波器检测光电转换放大电路输出的电压变化。动态测试中将 MEMS 光纤加速度计的敏感芯片与双光纤准直器共同封装。

改变振动加速度的大小和振动频率，并将测试

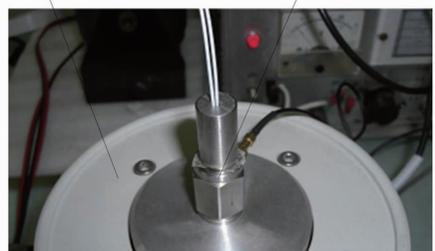


图 13 动态测试系统框图

Fig. 13 System diagram of dynamic testing

结果进行整理,整体测试结果见图 14 所示。

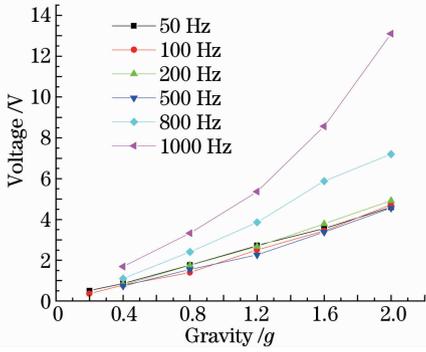


图 14 不同振动加速度下电压变化

Fig. 14 Voltage change under different vibration accelerations

从图 14 看出,在振动加速度小于 2g,振动频率小于 800 Hz 情况下,振动加速度与电压的变化呈近似的线性关系。虽然理论分析为指数关系,但由于工作点设置在指数曲线较陡峭部分,所以可近似认为线性关系。在振动频率大于 800 Hz 时候,其线性关系变坏,而且随着频率的增加,其程度加剧。究其原因,MEMS 扭镜结构的一阶谐振频率为 1 kHz 左右,由于 MEMS 制作工艺误差,MEMS 扭镜与衬底的空气间隙偏离理论设计值,造成带宽减小,振动台频率达到 800 Hz 时,引起芯片共振,线性关系变坏。所以,实际制作得到的 MEMS 光纤加速度计的工作带宽为 600 Hz。

在动态测试时,由于振动台输出最小加速度为 0.2g,同时振动台的输出最小振动频率为 50 Hz,所以动态分辨率实验只进行到 0.2g,低频测试进行到 50 Hz。当振动台输出频率为 50 Hz,加速度大小为 0.2g 时光电转换放大电路输出波形如图 15 所知。从图中可看出输出波形完整,输出电压变化为 916 mV。光电转换放大电路噪声值为 0.01478 mV,按线性关系进行推算,当加速度为

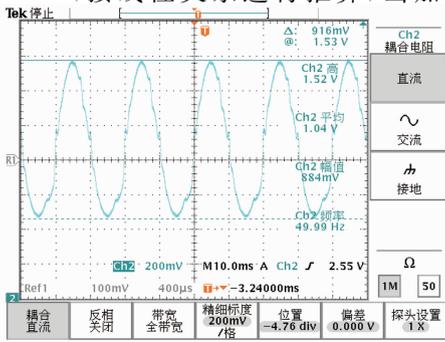


图 15 振动频率 50 Hz,振动加速度 0.2g 时的输出波形
Fig. 15 Output waveform when the vibration frequency is 50 Hz and the vibration acceleration is 0.2g

$10^{-4} g$ 时,信噪比达到 30。可见,本文研制的 MEMS 光纤加速度计的分辨率优于 $10^{-4} g$ 。

在频率为 100 Hz 时对加速度计进行了三次测量,得到 MEMS 光纤加速度计的测量曲线的重复性如图 16 所示。图 16 中,在加速度为 2g 时,测量曲线的偏差最大, $\Delta_{\max} = 0.11 V$ 。MEMS 光纤加速度计的重复性为最大偏差 Δ_{\max} 与满量程 y_{FS} 的比值^[12],即

$$\delta_R = \pm \frac{\Delta_{\max}}{y_{FS}} \times 100\% = \pm 2.3\% \quad (11)$$

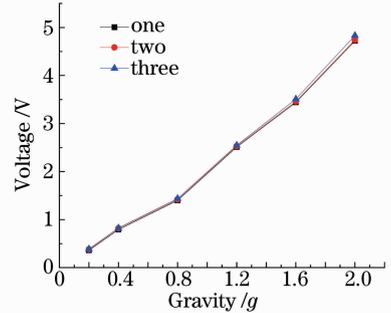


图 16 MEMS 光纤加速度计在频率为 100 Hz 时的测量曲线重复性

Fig. 16 Repeatability characteristic of MEMS fiber-optic accelerometer when the vibration frequency is 100 Hz

6 结 论

设计和制作了一种基于 MEMS 非对称扭镜和光纤检测技术的加速度计。由于光纤检测具有长距离传输的特点,可以远程控制 MEMS 加速度计,在检测现场电源受限情况下具有应用前景。同时扭转敏感结构与光纤检测技术都具有灵敏度高的特点,所以将光纤检测技术与 MEMS 技术结合研制的 MEMS 光纤加速度计,具有噪声小、尺寸小、灵敏度高、传输距离长的优点,而且能在强电、强磁等恶劣环境下工作。

从理论上分析了 MEMS 光纤加速度计的加速度计敏感原理、光纤检测原理。综合考虑了加速度计工作点、灵敏度、分辨率、加速度计的力学特性和制作工艺难度等因素,对 MEMS 光纤加速度计进行了设计。采用 MEMS 体硅加工工艺制作得到了 MEMS 光纤加速度计的敏感芯片。测试结果表明 MEMS 光纤加速度计具有良好的线性度和重复性,带宽为 600 Hz,量程为 $\pm 2g$,分辨率优于 $10^{-4} g$,并存在优化的空间。该 MEMS 光纤加速度计结构紧凑、工艺简单、检测方便,并可以以此结构为基础研制加速度计、磁传感器、压力传感器等多种高灵敏度

的 MEMS 传感器。

参 考 文 献

- 1 Dong Jingxin. Micro Inertial Instrument-Micromechanical Accelerometer[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 22—31.
董景新. 微惯性仪表-微机械加速度计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 22—31.
- 2 Wei Zhonghan, Sheng Xiaoxia, Liu Binghong, *et al.*. Spectroscopic sensing system for colored solution concentration based on metallic hollow fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706001.
- 魏中晗, 盛小夏, 刘炳红, 等. 基于金属膜空芯光纤的有色溶液浓度传感系统[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706001.
- 3 O S Wolfbeis. Fiber-optic chemical sensors and biosensors[J]. Anal Chem, 2008, 80(12): 4269—4283.
- 4 An Yang, Feng Hao, Zhang Jingchuan, *et al.*. Phase sensitive optical time domain reflectometer based on two-beam interference [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706005.
安 阳, 封 皓, 张景川, 等. 基于双光纤干涉的相位敏感光时域反射计[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706005.
- 5 Zheng Nina, Xie Pinhua, Ling Liuyi, *et al.*. Detection of atmospheric SO₂ and O₃ using optical fiber coupling long-path differential optical absorption spectroscopy system with UV light emitting diodes[J]. Acta Optica Sinica, 33(3): 0301007.
郑尼娜, 谢品华, 凌六一, 等. 紫外 LED 光纤耦合长程 DOAS 系统检测大气 SO₂ 和 O₃ 的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301007.
- 6 R A Soref, D H McMahon. Tilting-mirror fiber-optic accelerometer[J]. Appl Opt, 1984, 23(3): 486—491.
- 7 Feng Peng, Jun Yang, Bing Wu, *et al.*. Compact fiber optic accelerometer[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(1): 011201.
- 8 Yang Ying, Li Xingfei, Li Hongyu, *et al.*. Acceleration sensor based on laser self-mixing interference[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228003.
杨 颖, 李醒飞, 李洪宇, 等. 基于激光自混合效应的加速度传感器[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228003.
- 9 Wang Daihua, Liu Shuxin, Yuan Gang, *et al.*. Study on parallel multiplexed Fabry-Pérot fiber optic accelerometers and the signal demodulation method [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1776—1782.
王代华, 刘书信, 袁 刚, 等. 并联复用光纤法珀加速度传感器及解调方法的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1776—1782.
- 10 Bao Minhang. Analysis and Design Principles of MEMS Devices [M]. Amsterdam: Elsevier, 2005.
- 11 Lin Xuehuang. Optical Passive Devices (1st Edition) [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2000. 105—109.
林学煌. 光无源器件(第一版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2000. 105—109.
- 12 Huang Xianwu, Zheng Xiaoxia. Principle and Application of Transducer (2nd Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004. 11.
黄贤武, 郑筱霞. 传感器原理与应用(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社. 2004. 11.

栏目编辑: 王晓琰