

基于MEMS的高分辨率法布里珀罗加速度传感器

赵明辉¹, 蒋康力¹, 柏洪武², 王海容¹, 韦学勇¹

(1.西安交通大学 机械学院, 陕西 西安 710049; 2.西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 光学MEMS由于其优越的性能及抗电磁干扰能力而受到广泛的追捧。本文研究了一种基于微机电系统 (MEMS) 的法布里珀罗光学加速度传感器, 该加速度传感器由G型弹簧质量结构、激光二极管、分束立方以及光电转换系统通过3D打印封装集成于一体, 使得传感器具有较高的稳定性和便携实用性。通过静态重力场及动态振动台实验表明, 本文设计的G型弹簧质量结构结合法布里珀罗干涉检测技术可以获得良好的性能, 其灵敏度和分辨率分别达到183.793v/g和300ng。

关键词: 加速度传感器;法布里珀罗干涉;微纳制造

A MEMS based Fabry-Pérot accelerometer with high resolution

Zhao Minghui¹, Jiang Kangli¹, Bai Hongwu², Wang Hairong¹, We Xueyong¹

(1. Xi'an Jiaotong University School of Mechanical Engineering, Xi'an, 710049 2. Xi'an Institute of Space Radio Technology, 504 West Weiqu Street, Xi'an 710100)

Abstract: Optical MEMS has become exceedingly popular because of its high performance and resistance to electromagnetic interference. A MEMS based Fabry-Pérot accelerometer consisting of a G-shaped mass-spring structure sensing chip, laser diode, cube beam splitter and photo translating system integrated by 3D printed sensor package is investigated. The sensitivity and resolution calibrated by intensity demodulation method are respectively, 183.793 V/g and 300 ng. The results show that the adopted G-shaped cantilever-mass structure sensing chip combined with the Fabry-Pérot interfere technology can obtain good performance, and the 3D printed sensor package makes the interference optical path and accelerometer more robust and portable.

Keywords: MEMS Accelerometer; Fabry-Pérot interferometer; Microfabrication.

MEMS加速度传感器具有体积小、成本低、性能高等优点，在惯性导航、振动监测等领域得到了广泛的应用^[1]。常用的MEMS加速度传感器包含电容式、电阻式、压电式和谐振式等，每种类型都有各自的优点和其局限性^[2-3]。采用光学检测原理的MEMS法布里珀罗加速度传感器（Fabry-Pérot accelerometer, FPA）具有灵敏度、分辨率高、耐高温和抗电磁干扰能力等优势^[4]。

图1梳理了法布里珀罗加速度传感器的技术发展历程。1897年，法国科学家Charles Fabry和Alfred Pérot发明了法布里珀罗干涉仪^[5]，进而开启了法布里珀罗光学器件研究的先河。1967年，文献^[6]报道了第一台基于法布里珀罗干涉仪的加速度传感器，其检测分辨率达到 $1\mu\text{g}$ 。近50年来，法布里珀罗加速度传感器的研究主要集中在如何采用不同的结构和信号解调方法来提高传感器的性能。法布里珀罗加速度传感器的结构经历了从宏观到微纳再到集成结构的发展^[7, 8, 10, 11]。其信号解调方法也从简单的强度解调发展到相位产生载波解调^[9]。近几年，研究者开始探索利用新材料和新传感原理来提高传感器性能^[12-13]。经过以上研究者的工作，法布里珀罗加速度传感器的性能得到了很大的提高，但在分辨率、灵敏度以及便携性等方面仍然可以继续优化。

本文提出了一种高分辨率、高灵敏度的MEMS法布里珀罗加速度传感器。文章首先对传感器的敏感原理、传感芯片设计和仿真进行了详细的分析，然后对传感芯片的微纳加工过程进行了详细的论述，并且提出了小型化的便携式加速度传感器封装方案，最后进行了静态、动态测试，对传感器的性能进行了表征。

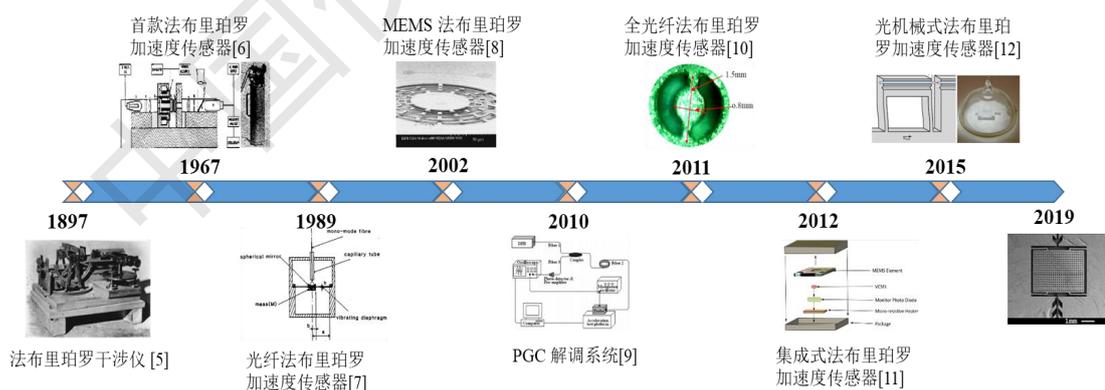


图1 法布里珀罗加速度传感器技术发展历程

Fig.1 Technical development of Fabry-Pérot accelerometer

1 传感原理

如图2(a)所示，本文提出的光学MEMS加速度传感器采用集成式光学传感芯片，该芯片由法布里珀罗腔、惯性质量块、G型弹簧梁和基座组成。法布里珀罗腔由两个具有部分反射率的平面镜1和平面镜2组成，其腔长，即两面平面镜之间的距离为 L ，如图2所示。平面镜1由 Si_3N_4 和 SiO_2 薄膜加工而成，反射率为 R_1 ，平面镜2由BF33玻璃晶圆加工而成，反射率为 R_2 。传感芯片通过检测由G型弹簧梁支撑的惯性质量块的运动来感知加速度。当沿敏感方向的加速度作用于弹簧质量结构时，惯性质量块受迫振动，从而改变法布里珀罗腔的长度 L 。

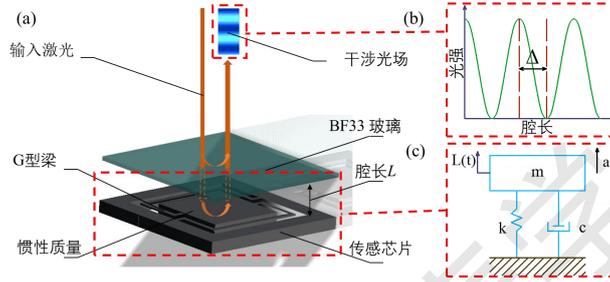


图2 (a) 法布里珀罗加速度传感器工作原理；(b) 传感器输出光强与腔长的关系；(c) 弹簧质量结构等效模型

Fig.2 (a) Schematic of the reported FPA ;(b) The relation between the light intensity and the cavity length ;(c)The equivalent mass-spring system model of the MEMS accelerometer

由激光二极管发出的激光垂直入射至法布里珀罗腔，然后在腔中经过多次部分反射，进而形成反射和透射干涉光场。激光在法布里珀罗腔中一个循环产生的干涉相位变化为^[14]：

$$\Phi = \frac{4\pi nL}{\lambda_0} \quad (1)$$

其中 λ_0 是入射激光的真空波长， n 是法布里珀罗腔之间介质的折射率， L 是腔的长度。当法布里珀罗腔的反射率 $R_1=R_2=R$ 时，反射光场的干涉光强可以表示为：

$$I = \frac{2R \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi n}{\lambda_0} L\right) \right]}{1 + R^2 - 2R \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} L\right)} I_0 \quad (2)$$

其中 I_0 是输入光强， R 是法布里珀罗腔的反射率。当反射率 R 的值较小时，反射光场的干涉光强度可以被简化为：

$$I = 2R \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi n}{\lambda_0} L\right) \right] I_0 \quad (3)$$

干涉光强 I 与腔长 L 之间的关系如图2(b)所示，可以看出，在图中标注的 Δ 区域内，干涉光强与腔长成正比。图2(c)为MEMS加速度传感器的弹簧质量系统的等效模型，传感器沿其敏

感方向的运动方程为：

$$m \frac{d^2 \Delta L(t)}{dt^2} + c \frac{d \Delta L(t)}{dt} + k \Delta L(t) = ma(t) \quad (4)$$

其中 m 是惯性质量块的质量， c 是阻尼系数， k 是弹簧常数。当沿加速度传感器敏感方向施加的加速度趋于稳定时，法布里珀罗腔的腔长可以表示为：

$$L(t) = L_0 + \Delta L(t) = L_0 + \frac{ma(t)}{k} \quad (5)$$

结合方程（3）和（5），传感器的输出光强与其所受加速度的关系可以表示为：

$$I = 2R \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi n}{\lambda_0} \left(L_0 + \frac{ma(t)}{k} \right) \right) \right] I_0 \quad (6)$$

2 传感器设计、加工及封装

2.1 传感芯片的设计及仿真

本文设计的传感芯片如图3所示，该芯片由两个G型弹簧梁、惯性质量块及基座组成。该G型弹簧梁可以建模为双端固支的五根弹簧串联在一起，由其支撑的惯性质量块在加速度的作用时会上下振动。整个弹簧结构的刚度可以看作两根G型弹簧梁并联。

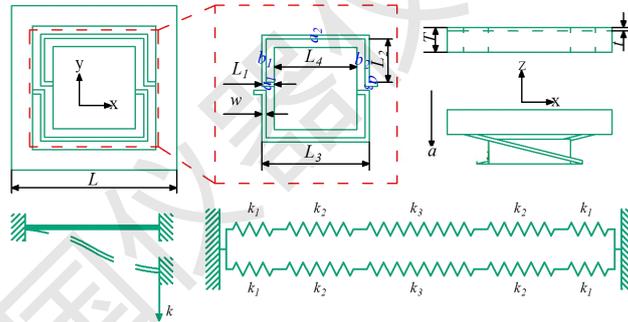


图3 加速度传感器弹簧质量结构

Fig.3 (a) Schematic of the reported G-shaped mass-spring structure

通常，弹簧刚度定义为：

$$k = F / \delta \quad (7)$$

因此，整个弹簧结构刚度计算的主要目标为计算其在Z方向F载荷下所产生的变形 δ 。对于本文设计的G型弹簧梁，可以采用能量法计算 δ ，更准确地说是利用卡氏第二定理，在推导过程中只考虑由弯曲和扭转引起的位移。由卡氏第二定理可知，对于线性结构，其应变能 U 对任一载荷 F_i 的偏导数等于与该载荷相应的位移 δ_i 。

$$\delta_i = \frac{\partial U}{\partial F_i} \quad (8)$$

通过对梁的应变能密度进行积分便可计算整段梁的应变能。

$$U = \int \frac{M^2}{2EI} d\xi \quad (9)$$

式中， M 为梁任意横截面处的弯矩， E 为杨氏模量， I 为惯性矩， ξ 为距梁导向端的距离。为了方便计算应变能，将G型梁分割为五段短梁，如图4所示，分别在每段梁上标记各自所受力及力矩。

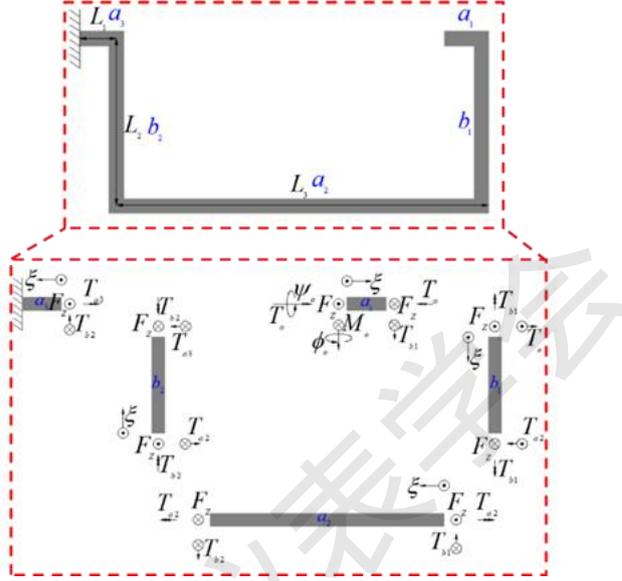


图4 G型弹簧梁在Z向力作用下的受力及力矩分解图

Fig.4 Free-body diagram of the proposed G-shaped beam with an applied force in the Z direction

然后根据图4列出各段梁的平衡方程：

$$\begin{aligned} M_{a1} &= M_o - F_z \xi \\ T_{a1} &= T_o \\ M_{b1} &= -T_o - F_z \xi \\ T_{b1} &= -F_z L_1 + M_o \\ M_{a2} &= -M_o + F_z (L_1 - \xi) \\ T_{a2} &= -T_o - F_z L_2 \\ M_{b2} &= T_o - F_z \xi + F_z L_2 \\ T_{b2} &= -F_z (L_3 - L_1) - M_o \\ M_{a3} &= M_o - F_z (\xi + L_3 - L_1) \\ T_{a3} &= -T_o \end{aligned} \quad (10)$$

式中 M_o 和 T_o 分别为弯矩和扭矩， l_1 为 a_1 、 a_3 段长度， l_2 为 b_1 、 b_2 段长度， l_3 为 a_2 段长度。

将式(10)代入式(9)可得到G型弹簧梁的总能量，边界条件设置为：

$$\begin{aligned} \phi_o &= \frac{\partial U}{\partial M_o} = 0 \\ \psi_o &= \frac{\partial U}{\partial T_o} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

其中 ϕ_o 是 M_o 产生的旋转角度， ψ_o 是 T_o 产生的旋转角度。通过上述分析和推导^[15]，G型弹簧结构的z方向刚度 k_z 可表示为：

$$k_z = 2 \frac{F_z}{\delta_z} \approx \frac{24Ewt^3}{2L_1^3 + L_3^3 + 8L_2^3 + 15L_1L_3^2 - 21L_1^2L_3} \quad (12)$$

其中 w 是梁的宽度， t 是梁的厚度。芯片的几何参数见表1。

表1 传感器芯片几何参数

Table 1 Geometrical parameters of the sensing chip

参数	符号	值
基座长度	L	10 mm
梁 a_1 和 a_3 段长度	L_1	0.75 mm
梁 b_1 和 b_3 段长度	L_2	2.63 mm
梁 a_2 段长度	L_3	6.5 mm
惯性质量块长度	L_4	5 mm
梁宽度	w	0.25 mm
基座和质量块厚度	T	0.5 mm
梁厚度	t	0.045 mm

为了更好地研究传感芯片振动模态对加速度传感器工作带宽的影响，利用COMSOL有限元仿真软件对传感芯片的谐振频率进行了仿真。仿真时，将结构的基座设置为固定约束，弹簧质量结构设置为自由。传感芯片的前三阶振动模态如图5所示，其谐振频率分别为87.64 Hz, 149.13 Hz, 200.68 Hz。其中一阶模态为沿Z轴方向的振动，得益于所设计的G型弹簧梁结构，其谐振频率低至87.64Hz，使得传感器更加灵敏。二、三阶模态分别为惯性质量块绕X轴和Y轴转动，其不能作为传感器的工作模态。

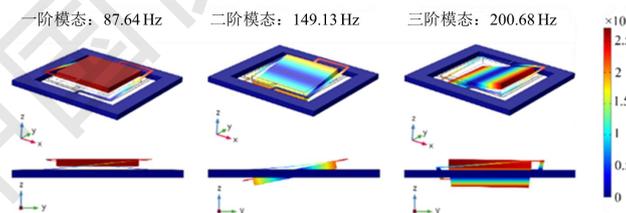


图5 加速度传感器芯片前三阶模态仿真图

Fig.5 Simulated first three modes of the sensing chip

2.2 传感芯片加工

本文提出的加速度传感器的法布里-珀罗腔结构是由BF33键合玻璃和双抛单晶硅片制成，其工艺主要包括双面对准光刻和深反应离子刻蚀（DRIE）。其中深反应离子刻蚀采用分步式刻蚀方法，可以提高刻蚀均匀性和形貌质量。下面将对芯片加工过程进行具体描述。

本文采用的500 μm 厚单晶硅晶圆，购买时直接在其正反两面沉积有285 nm二氧化硅和

200 nm氮化硅层，如图6 (a)所示。首先，对双抛单晶硅晶圆进行标准化清洗；然后通过电子束蒸发工艺在硅片的两面沉积400 nm铝(图6 (b))；接下来在硅片背面以10 μm光刻胶(AZ4620)为掩蔽图形化的惯性质量结构，并用湿法刻蚀工艺对铝进行刻蚀，如图6 (c)、(d)；随后，用以10 μm光刻胶(AZ4620)为掩蔽对硅片正面的G型梁进行图形，并用湿法刻蚀工艺对铝进行刻蚀，如图6 (e)、(f)；然后，采用深反应离子刻蚀工艺对惯性质量块和G型梁进行刻蚀，刻蚀结束后，将硅晶圆缓慢浸入H₂SO₄和H₂O₂ (3:1) 中清洗，以去除残留光刻胶和铝(图6 (g-i))。最后，利用光刻胶(PermitNextM1000)将BF33玻璃和硅片键合在一起，形成法布里珀罗加速度传感芯片(图6(m))。

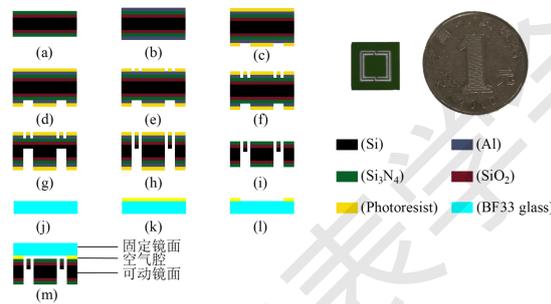


图6 传感器芯片微纳加工工艺流程

Fig.6 Fabrication sequence of the sensing chip illustrated by cross-section

2.3 传感器封装

本文提出的MEMS法布里珀罗光学加速度传感器由光源、干涉光路、弹簧质量结构和光转换系统组成，其概念图如图7(a)所示。其工作原理为，由安装在封装底座上的激光二极管产生直径为1.5mm的光斑，之后光束被分束立方分成两束，其中一束用来实时监测光源的稳定性，另一束入射至法布里-珀罗腔，并发生干涉。最后，由光电二极管将光信号转换成电流，再通过解调电路转换成电压。

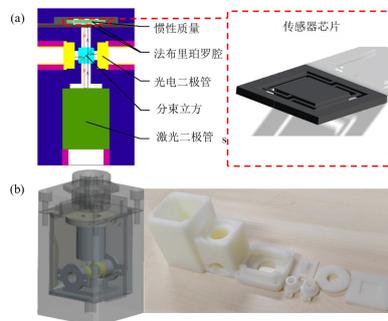


图7 (a) 加速度传感器概念图；(b) 传感器3D打印封装

Fig.7 (a) The conceptual drawing of the designed accelerometer; (b) 3D printed sensor package of the proposed optical accelerometer

对于之前关于法布里珀罗加速度传感器的研究，其干涉光路和光电转换系统大多由激光器、光电探测器、光谱仪、准直镜等光学元件和测试设备在光学平台搭建的，整个系统复杂庞大，同时，不可避免的光路误差会影响传感器的性能。因此，它们大多停留在实验室中原理样机验证阶段^[16-18]。而本文设计的法布里珀罗加速度传感器结合微纳制造和3D打印技术将传感器芯片、激光二极管、微型分束立方和光转换系统集成于如图7(b)所示的体积约为150cm³的封装中，极大地提高了传感器的便携实用性。同时，由于所有的组件集成在3D打印封装中，避免了每次调整光路所带来的误差。

3 性能表征及分析

3.1 频率响应

传感器的带宽可以根据其工作模态的谐振频率进行计算。因此，本文对敏感芯片的频率响应进行了测试。测试时，利用信号发生器对振动台进行恒压扫频激励，并用激光测振仪（型号：attocube FPS3010）测量芯片的振动幅值。其频率响应曲线如图8所示，测试结果可以看出传感芯片的一阶谐振频率为89 Hz，该值接近于模拟结果87.64 Hz。

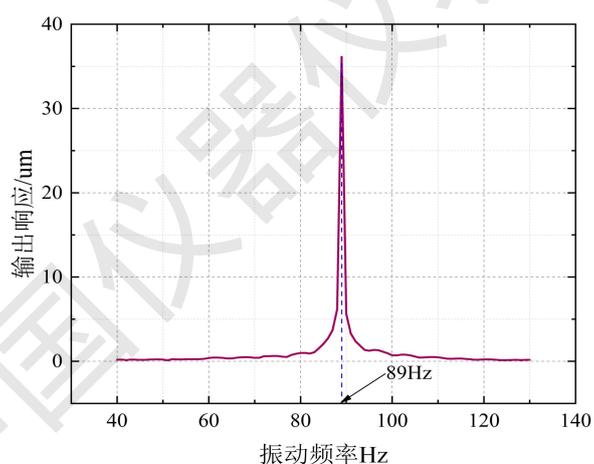


图8 加速度传感器芯片频率响应

Fig.8 (a) The frequency response of the fabricated sensing chip

加速度传感器的工作带宽通常低于其谐振频率，在加速度的实际测量中，工作带宽一般受制于频率响应曲线。根据参考文献^[9]可以将带宽设置为谐振频率的三分之一，以使得传感器输出结果的线性度将小于1db。因此根据测试结果，工作带宽为29.3 Hz。

3.2 静态标定

首先对加速度传感器采用如图9(b)所示的重力场试验进行静态标定。试验开始时，将加速度传感器水平安装在高精度转台上。随着转台的转动，加速度传感器敏感轴方向的受力为

$g\sin\theta$ ，如图9(a)所示。实验过程中，转台以 0.05° 为步长进行转动，并记录每次传感器输出。测试结果如图10(a)，图中旋转角度已经转换为加速度值。结果表明，传感器的输出电压随加速度的变化与公式（6）吻合，呈余弦变化，周期 T 大约是 0.015 g 。

为了得出加速度传感器的灵敏度，取图10(a)中红色虚线框中的一段数据（范围从 0.0175 到 0.0225g ）进行线性拟合，结果如图10（b），结果显示加速度传感器的灵敏度达到 183.793 V/g 。可以看到，在图10（a）中的每个周期的振幅之间存在差异，这主要是由传感器敏感轴和非敏感轴方向的交叉干扰引。即垂直于敏感轴方向的重力分量 $g\cos\theta$ 会造成惯性质量块的旋转并改变加速度传感器的输出^[20]。

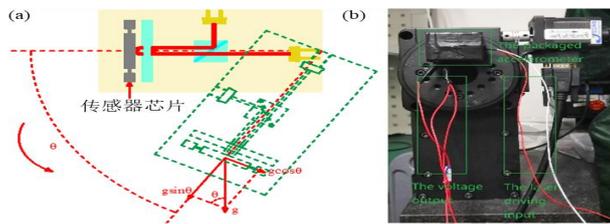


图9 (a) 重力场测试原理；(b) 测试装置搭建

Fig.9 (a) Schematic diagram of test principle ;(b) Experimental setup of the static test

为了获取加速度传感器的分辨率，我们以 100Hz 的采样频率连续记录了 10000 个点的电压输出数据，并绘制了如图10(c)所示的Allan偏差图，结果显示加速度传感器的分辨率为 300ng 。

表2列出了本文提出的加速度传感器与之前报道的法布里珀罗加速度传感器的性能对比。显然，本文同时具有较高的分辨率和灵敏度。

表2 本文提出的加速度传感器与之前报道的法布里珀罗加速度传感器的性能对比

	文献[9]	文献 [16]	文献 [17]	文献[21]	本研究
分辨率 (μg)	0.048	30	53.74	20	0.3
灵敏度 (V/g)	--	1	63.45	14.16	183.793
带宽 (Hz)	140	2000	100	856	29.3
动态范围	$2\text{e}7$	$3.3\text{e}4$	--	--	$1.6\text{e}4$

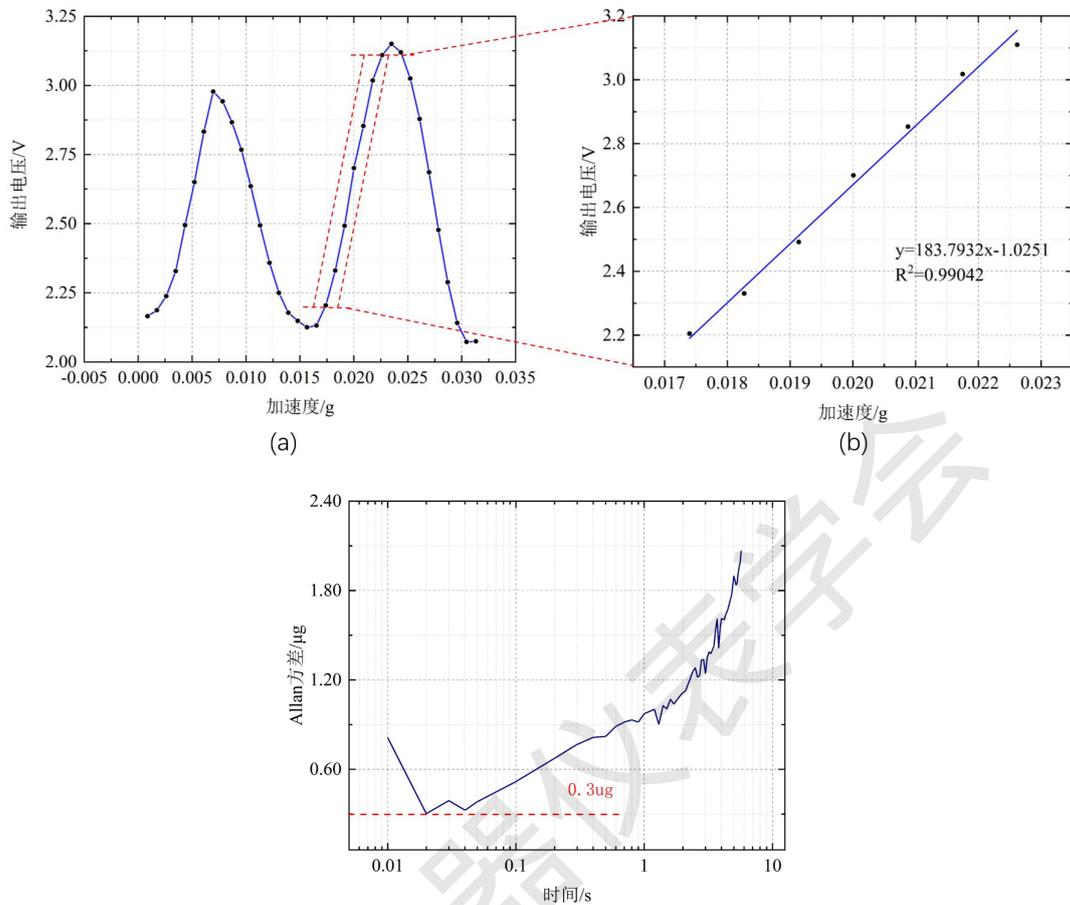


图 10 (a) 传感器输出随所受加速度的变化曲线；(b) 传感器线性输出区域内数据拟合；(c) 输出信号的阿兰方差
 Fig.10 (a) Experimental curve for the output voltage versus the acceleration along the sensitive axis ;(b) Linear fit for the output curve in the linear region; (c)Allan deviation of the measured signal of the accelerometer

3.3 动态标定

为了标定加速度传感器的动态性能，在光学气浮隔震台上进行了实验。实验平台如图11所示，加速度传感器通过特制夹具安装在振动台上，该振动台可提供0~3 kHz频率的振动。为了形成对比，在我们传感器的上方安装了参考激光测振探头（型号：attocube FPS3010）。实验时，利用信号发生器控制振动台（型号：JZQ-2B）产生正弦振动。在本实验中，用信号发生器产生频率为1Hz，幅值分别为100mv和500mv正弦振动，本文设计的加速度传感器和参考激光测振仪的输出数据如图12。

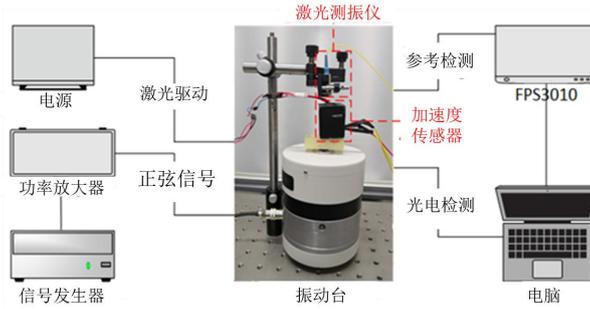


图 11 动态标定系统

Fig.11 The dynamic test system for the designed accelerometer

图中蓝色和红色结果分别表示幅值为100mv和500mv的测试结果，圆点表示加速度传感器实测数据，实线表示本装置的拟合结果，虚线表示激光测振仪的实测结果。结果表明，本文设计的加速度传感器与激光测振仪的测量结果较吻合，均呈正弦振动。

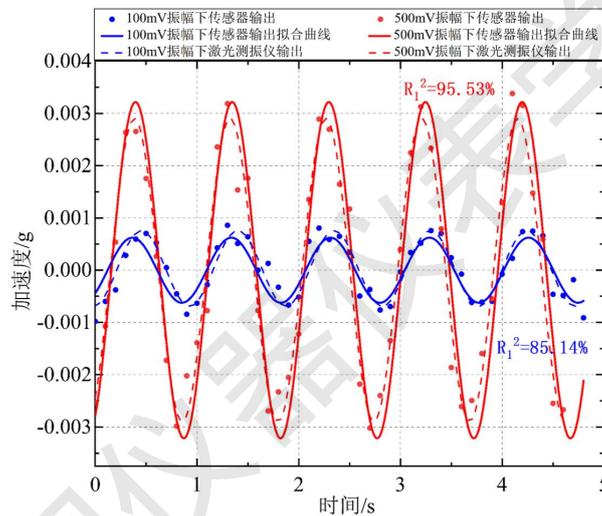


图 12 加速度传感器动态测试结果

Fig.12 (a) Schematic of the dynamic test

4 总结

本文报道了一种MEMS高分辨率、高灵敏度的法布里珀罗加速度传感器。

(1) 利用法布里珀罗光学干涉检测法和设计的G型弹簧梁结构，使得加速度传感器具有高灵敏度和抗电磁干扰的特点。

(2) 采用的分步式制备工艺提高了传感芯片的形貌质量和刻蚀均匀性。3D打印集成封装增加了传感器便携及稳定性。

(3) 实验结果表明，本文的加速度传感器的灵敏度和分辨率分别为183.793 V/g和300 ng，其在地震监测中具有广阔的应用前景。

本文提出的加速度传感器仍有两个方面需要优化。一是温度效应，另一个是交叉灵敏度

。在后续的研究中，将采用多方案协同的温度补偿方法，该方法由微型温控装置、差分结构和补偿算法组成，以降低温度效应。同时，拟通过结构设计及工艺优化，降低传感器的交叉灵敏度。

参考文献:

- [1] Metcalfe, Michael, "Applications of cavity optomechanics," *Applied Physics Reviews* 1(3), 5880-5885 (2014).
- [2] Uğur Sönmez, Haluk Külah, and Tayfun Akin, "A $\Sigma\Delta$ micro accelerometer with $6 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ resolution and 130 dB dynamic range," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing* 81 (2), 471-485 (2014).
- [3] Y.G. Wang, J. Zhang, Z.C. Yao, C. Lin, T. Zhou, Y. Su, and J. Zhao, "A MEMS resonant accelerometer with high performance of temperature based on electrostatic spring softening and continuous ring-down technique," *IEEE Sensors Journal*, 18 (17), 7023-7031 (2018).
- [4] K. Zandi, B. Wong, J. Zou, R. V. Kruzelecky, W. Jamroz, and Y. A. Peter, "In-plane silicon-on-insulator optical MEMS accelerometer using waveguide Fabry-Pérot microcavity with silicon/air bragg mirrors," *IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems IEEE*, 839-842 (2010).
- [5] Ch. Fabry, A. Perot, Sur les franges des lames minces argentées et leur application à la mesure de petites épaisseurs d'air *Ann. Chim. Phys.* 12, 459-501(1897).
- [6] C. F. Bruce, "Interference Accelerometer," *THE Review of Scientific Instruments* 38 (8), 1090-1093 (1967).
- [7] A. S. Gerges, T. P. Newson, J. D. Jones, and D. A. Jackson, "High-sensitivity fiber-optic accelerometer," *Opt. Lett.* 14(4), 251-253 (1989).
- [8] R. L. Waters, M. E. Aklufi, "Micromachined Fabry-Pérot interferometer for motion detection," *Applied Physics Letters* 81(18), 3320-3322 (2002).
- [9] Q. Lin, L. Chen, S. Li, and X. Wu, "A high-resolution fiber optic accelerometer based on intracavity phase-generated carrier (PGC) modulation," *Measurement Science & Technology* 22(1), 15303 (2011).
- [10] Z. L. Ran, E. Lu, Y. J. Rao, M. Ni, F. Peng, and D. H. Zeng, "Fiber-optic Fabry-Pérot interferometer tip accelerometer fabricated by laser-micromachining," *21st international conference on optical fiber sensors* 7753, 775318-775318-4 (2011).
- [11] M. S. Fralick, "Noise compensation and bias stability improvement methods for a micro-optical-electrical-mechanical accelerometer," *San Diego State University* (2012).
- [12] O. Gerberding, F. G. Cervantes, J. Melcher, J. R. Pratt, and J. M. Taylor, "Optomechanical reference accelerometer," *Metrologia* 52 (5), 654-665 (2015).
- [13] M. Taghavi, H. Latifi, G. M. Parsanasab, A. Abedi, H. Nikbakht and M. J. Sharifi, "Simulation, Fabrication and Characterization of a Sensitive SU-8-based Fabry-Perot

- MOEMS Accelerometer,” *Journal of Lightwave Technology* (2019).
- [14] S. Bhattacharya, N. Basumallick, S. Sengupta, P. Biswas, and S. Bandyopadhyay, “Sensitivity enhancement of an in-line fiber optic fabry–perot interferometric vibration sensor,” *International Conference on Fiber Optics & Photonics* (2016).
- [15] G. K. Fedder, “Simulation of microelectromechanical systems,” University of California, Berkeley, 1994.
- [16] M. A. Perez, M. Shkel, “Design and Demonstration of a Bulk Micromachined Fabry–Perot μ g-Resolution Accelerometer,” *IEEE Sensors Journal* 7(12), 1653-1662 (2008).
- [17] Z. Wang, W. Zhang, J. Han, W. Huang, and F. Li, “Diaphragm-based fiber optic fabry–perot accelerometer with high consistency,” *Journal of Lightwave Technology* 32(24), 4810-4815 (2014).
- [18] K. Zandi, Belanger, Joseph André, and Y. A. Peter, “Design and demonstration of an in-plane silicon-on-insulator optical mems Fabry-Pérot-based accelerometer integrated with channel waveguides,” *Journal of Microelectromechanical Systems* 21(6), 1464-1470 (2012).
- [19] H. Eren, “Acceleration, Vibration, and Shock Measurement,” in *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. New York: CRC Press, 2000, ch. 17.
- [20] Q. B. Lu, C. Wang, J. Bai, K. W. Wang, S. Q. Lou, X. F. Jiao, D. D. Han, G. G. Yang, D. Liu, and Y.Y. Yang, “Minimizing cross-axis sensitivity in grating- based optomechanical accelerometers,” *Opt. Express* 26 (12), 9094–9111 (2016).
- [21] J. M. Cheng, X. Q. Wu, S. L. Li, Q. Ge, D. Guang, and B. L. Yu, “A novel and miniaturized FPI accelerometer based on a spherical air cavity at fiber end,” *International Conference on Optical Instruments and Technology 2017: Advanced Optical Sensors and Applications* (2018).
- [22] K. Thurner, F. P. Quacquarelli, P. F. Braun, C. D. Savio, and K. Karrai, “Fiber-based distance sensing interferometry,” *Applied Optics* 54(10), 3051-3063 (2015).