

# 基于 SU-8 光刻胶光纤法布里-珀罗加速度 传感器

尤晶晶 王 鸣 戎 华 戴丽华

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要** 基于 SU-8 光刻胶的高深宽比加工技术, 设计了对加速度敏感的悬臂梁-质量块结构。理论推导了加速度与 SU-8 光刻胶悬臂梁-质量块结构的挠度、法布里-珀罗(F-P)腔的干涉光强之间的关系, 得到了简化的计算公式, 并讨论了传感器灵敏度和固有频率等主要影响因素。提出了一种新的“卍”形悬臂梁-质量块结构, 分析和确定了传感器结构的各项参数。研究表明, “卍”形 SU-8 光刻胶结构能够得到较高的灵敏度, 具有良好的检测模态, 仿真结果与理论分析吻合, 可以基于法布里-珀罗干涉原理实现对加速度的传感。

**关键词** 传感器; 加速度传感器; 悬臂梁-质量块结构; 法布里-珀罗干涉; SU-8 光刻胶

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0806002

## Fiber Fabry-Perot Accelerometer Based on SU-8 Photoresist

You Jingjing Wang Ming Rong Hua Dai Lihua

(*Jiangsu Key Laboratory of Opto-Electronic Technology, School of Physical Science and Technology,  
Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China*)

**Abstract** A beams-mass structure, which is sensitive to the acceleration, is designed based on the SU-8 photoresist's high aspect ratio imaging feature. Theoretical expressions are deduced for analyzing the relationships between acceleration and the deflection of the beams-mass structure, acceleration and the light intensity of Fabry-Perot interference. Simplified calculation formulas are obtained and major influences such as the sensitivity and the natural frequency are discussed. The new beams-mass structure with the “卍” form is presented, and its parameters are analyzed and determined. The results show that the new SU-8 photoresist Fabry-Perot acceleration sensor with “卍” structure improves the sensitivity vastly and has a good detection mode. The simulation results match to the theoretical analysis, which confirms that the designed structure can be applied in acceleration monitoring based on Fabry-Perot interference theory.

**Key words** sensors; accelerometer; beam-mass structure; Fabry-Perot interference; SU-8 photoresist

**OCIS codes** 060.2370; 220.4000; 120.2230; 160.5335

## 1 引 言

现代工业生产的各个领域都会涉及振动加速度, 加速度传感技术的发展也渐渐走向成熟, 在工程实际中得到广泛运用<sup>[1-3]</sup>。目前市场上传统的加速度传感器精度较高, 但是机械结构复杂, 对安装要求苛刻<sup>[4-5]</sup>。微机电系统(MEMS)加速度传感器体积

小、灵敏度高、成本低, 但作为电子设备, 无法应用于强电磁干扰的环境<sup>[6-7]</sup>。光纤布拉格光栅加速度传感器虽然能够抗电磁干扰、体积小、精度高, 但易受温度影响<sup>[8-10]</sup>。光纤传感技术和 MEMS 微细加工技术相结合制作新型光纤 MEMS 传感器已成为光纤传感领域的热点。相比于传统的传感器, 光纤

**收稿日期:** 2013-01-31; **收到修改稿日期:** 2013-04-11

**基金项目:** 国家自然科学基金(91123015, 61178044)、江苏省科技厅产学研前瞻性联合研究项目(BY2012005)、江苏省光电技术重点实验室开放基金(1640703061-2)

**作者简介:** 尤晶晶(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: shania\_you@163.com

**导师简介:** 王 鸣(1950—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子和激光应用方面的研究。

E-mail: wangming@njnu.edu.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

MEMS 传感器具有体积小、响应频带宽、灵敏度高和易复用等特点,使其在加速度传感方面显得极为实用<sup>[11-13]</sup>,而且光纤 MEMS 传感器对强电磁干扰和高温等恶劣环境的适应能力较强。

SU-8 光刻胶是一种环氧树脂型负性光刻胶,能够通过光刻技术形成高深宽比结构,且基底粘附力强,不易脱落。这种材料由于其优越特性被广泛应用于 MEMS 加工和其他微机械器件制作中<sup>[14]</sup>。基于 SU-8 光刻胶(简称为 SU-8 胶)光刻工艺,本文提出一种新型的光纤法布里-珀罗(F-P)加速度传感器。该传感器采用 SU-8 胶光刻制作出悬臂梁-质量块结构,质量块下表面与光纤端面构成 F-P 干涉腔,受加速度作用而产生一个相位差随之变化的干涉信号,通过对干涉信号的解调来实现加速度的精确测定。理论分析和模拟计算发现,采用“卍”字型结构的 SU-8 胶光纤 F-P 加速度传感器,具有较高的灵敏度和良好的传感性能,可以实现对加速度的检测,不受电磁场干扰,在工业领域具有重要的潜在应用价值。

## 2 结构及原理

### 2.1 传感器的结构

设计的光纤 F-P 加速度传感器系统结构如图 1 所示。利用 SU-8 胶高深宽比特性,用光刻技术将旋涂在硅片基底上的 SU-8 胶层制成一个对加速度敏感的结构,该结构由 4 个悬臂梁和一个质量块构成;刻蚀部分硅片以使 SU-8 胶敏感结构悬空,形成典型的弹簧-质量系统。在 SU-8 胶质量块的下表面沉积一层铝膜作为反射膜,涂有反射膜的表面与带有单模光纤的陶瓷插针端面构成了 F-P 干涉腔。SU-8 胶敏感结构和部分陶瓷插针被完全密封于折射率为 1.39~1.4 的硅油中。

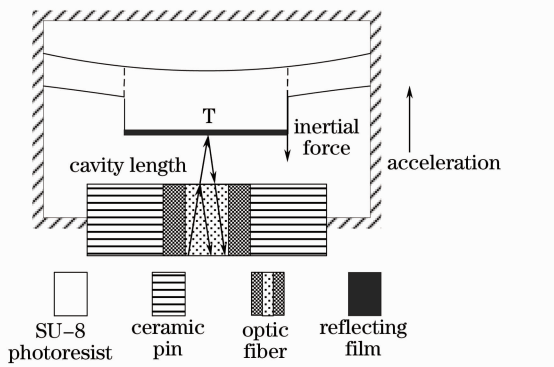


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system structure

根据加速度传感原理,当传感器受到外界加速度  $a$  冲击时,质量块 T 在惯性作用下产生相对移动,继而使腔长改变  $\Delta L$ 。光纤中有光线入射时,一部分光线被光纤的末端面反射,另一部分光线透射进 F-P 腔,被质量块的下表面反射,两部分光在光纤内发生干涉并由光纤传出。通过对光纤传出的干涉信号解调来测定 F-P 腔的腔长变化量  $\Delta L$  及其一一对应的加速度  $a$ 。

### 2.2 加速度传感原理

设计的加速度传感器系统原理示意图如图 2 所示。将 SU-8 胶结构中悬臂梁等效为弹性刚度为  $k$ 、阻尼为  $c$  的弹簧;质量块 T 的惯性质量为  $M$ 。设外界施加于系统的振动为  $y_s = A\sin(\theta t)$ ,其中  $\theta$  表示振动频率, $t$  表示时间,质量块 T 的绝对位移为  $y$ ,则惯性力作用使得质量块 T 产生相对底部支座间一个偏移  $x = y - y_s$ ,质量块 T 的稳态振动为

$$x = X\sin(\theta t - \varphi), \quad (1)$$

$$X = \frac{A\theta^2}{\omega^2 \sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}} = \frac{\dot{y}_{s,\max}}{\omega^2 \sqrt{(1 - \gamma^2)^2 + (2\xi\gamma)^2}}, \quad (2)$$

式中测振系统的固有频率  $\omega^2 = \frac{k}{M}$ ,  $\gamma = \frac{\theta}{\omega}$  为外界的振动频率  $\theta$  和系统的固有频率  $\omega$  之比,阻尼比  $\xi = \frac{c}{2M\omega}$ ,  $\dot{y}_{s,\max}$  为外界振动加速度的幅值。

从(2)式知,加速度计的频率使用范围受  $\omega$ 、 $\gamma$ 、 $\xi$  的影响。当  $\omega$  确定时,仅在阻尼比  $\xi = 0.65 \sim 0.707$  时,才能使加速度计的测量范围达到最大,即  $\gamma = 0 \sim 0.4$  的范围。此时质量块 T 的偏移幅值与振动加速度的关系为

$$X \approx \frac{\dot{y}_{s,\max}}{\omega^2}. \quad (3)$$

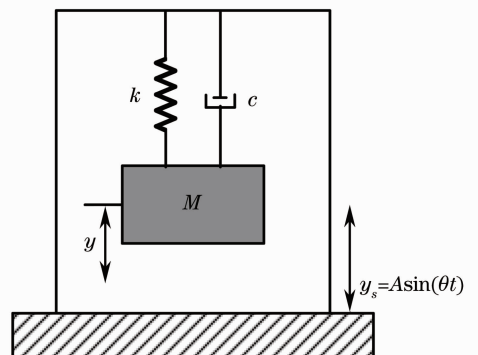


图 2 系统原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the system

### 2.3 结构动力学分析

在传感器尺寸相同的前提下,对常见的悬臂梁对称固支在质量块四周的结构(简称为“十”字型结构,如图 3 所示)提出优化,将悬臂梁以“卍”字型对称地固支在质量块四周,从而增加了悬臂梁的长度,提高了结构对加速度的响应灵敏度。图 4 给出了 SU-8 胶“卍”字型结构示意图,悬臂梁与质量块连接处是一段非常短的转折。结构的外围 SU-8 环状胶层的作用是为了与硅片紧密粘合,不做运动;悬臂梁-质量块结构悬空,质量块的厚度比悬臂梁厚很多。结构的传感性能由悬臂梁和质量块的参数决定。

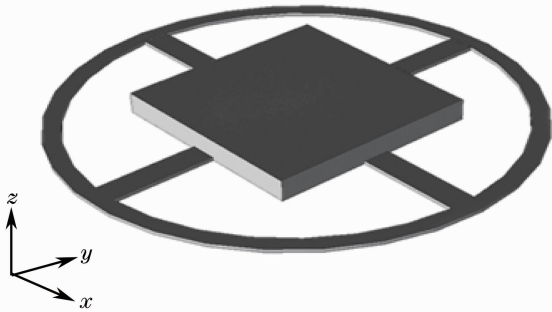


图 3 “十”字型结构及其外围胶层示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of the “十” structure and its outside line

根据材料力学相关理论<sup>[15]</sup>,当“十”字型结构受到加速度作用时,质量块会带动悬臂梁发生形变,结构的挠度和加速度之间的关系为

$$X = \frac{l^3}{4Ebh^3}(M + 4m)\ddot{y}_{s,\max}, \quad (4)$$

其固有频率为

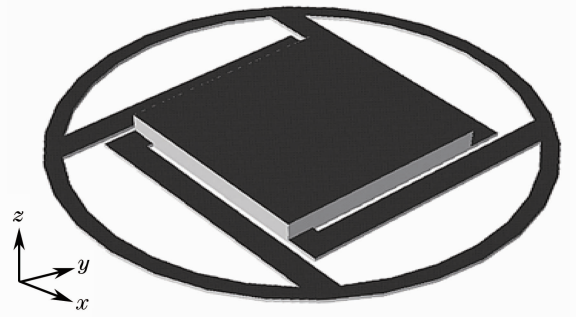


图 4 “卍”字型结构及其外围胶层示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of the “卍” structure and its outside line

$$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{Ebh^3}{(b + 2l)^3 \rho \left[ blh + \frac{3}{8}(b^2h + B^2H) \right]}}, \quad (5)$$

式中  $l$ 、 $b$  和  $h$  分别为单根悬臂梁的长度、宽度和厚度,  $m$  为单根悬臂梁的质量,  $B$  和  $H$  分别为质量块的边长和厚度,  $M$  为质量块的质量,  $\rho$  为 SU-8 胶的密度。

与质量块相比,悬臂梁的质量非常小,可忽略不计。从(4)式和(5)式可知,质量块的质量越大,结构的固有频率越低,结构的挠度却越大,即对加速度传感的灵敏度越高;而悬臂梁的参数对结构的灵敏度和固有频率的影响是矛盾的。图 5(a)为 SU-8 胶结构的固有频率与悬臂梁长度和厚度的关系图,图 5(b)为 SU-8 胶结构的挠度与悬臂梁长度和厚度的关系图,随着悬臂梁长度的增加,固有频率随之降低,而结构的挠度随之增大,灵敏度变高;随着悬臂梁厚度的增加,固有频率也随之增加,而结构的挠度随之减小,灵敏度变低。

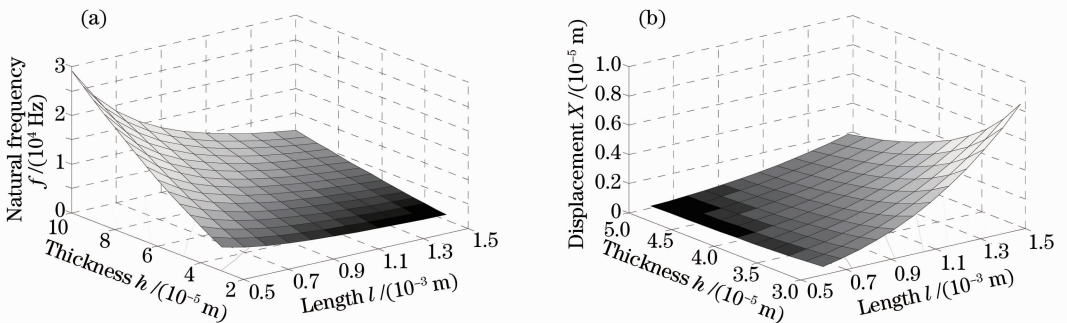


图 5 悬臂梁参数对结构性能的影响。(a)长度、厚度与固有频率的关系;(b)长度、厚度与挠度的关系  
Fig. 5 Influence of the beam on the structure. (a) Relationship between length, thickness and natural frequency;  
(b) relationship between length, thickness and displacement

### 2.4 阻尼分析

对于微机械结构,阻尼的存在显著影响着系统

的动态性能。在 SU-8 胶悬臂梁-质量块结构中,质量块的上下方向同时存在变化的压膜阻尼,两侧存在

滑膜阻尼。由于质量块两侧的表面面积较小,可忽略滑膜阻尼的影响,着重考虑质量块的下表面与陶瓷插针间的压膜阻尼。将质量块与陶瓷插针简化为两块平行放置的平板,通过不同的边界条件,可以推算出具有特定形状平板的压膜阻尼系数。矩形板(长为 $A$ ,宽为 $B$ )的压膜阻尼系数为

$$c = \frac{\mu AB^4}{L_0^3} \beta \left[ \frac{B}{A} \right], \quad (6)$$

式中 $\mu$ 为流体介质的粘滞系数; $L_0$ 为平板间距,即质量块与陶瓷插针形成的F-P腔腔长;修正因子 $\beta$ 仅与宽长比 $B/A$ 有关<sup>[16]</sup>。质量块的长和宽为 $A = B$ ,则 $\beta[1] = 0.42$ 。整个系统的阻尼比为

$$\xi = \frac{c}{2M\omega} = 0.42 \frac{\mu B^4}{2M\omega L_0^3}, \quad (7)$$

式中 $M$ 为质量块的质量, $\omega$ 为结构的固有频率。

若SU-8胶结构的参数 $B$ 、 $M$ 、 $\omega$ 确定,且阻尼比 $\xi = 0.65 \sim 0.7$ 时,将(7)式可以改写为

$$L_0 = \eta \mu^{1/3}, \quad \eta = \sqrt[3]{\frac{0.42B^4}{2M\omega\xi}}, \quad (8)$$

此时 $\eta$ 为常数,板间间距 $L_0$ 由流体介质的粘度 $\mu$ 决定。

### 3 性能的仿真及讨论

若将传感器的SU-8胶“卍”字型结构封装在半

径为 $1570 \mu\text{m}$ 的尺寸范围内(如光纤法兰盘),为保证质量块反射的光信号能够大量的耦合回光纤光路,设质量块的底面大小为 $785 \mu\text{m} \times 785 \mu\text{m}$ 。结合悬臂梁参数对结构传感性能的影响,选取悬臂梁的宽度和厚度分别为 $200 \mu\text{m}$ 和 $30 \mu\text{m}$ ,质量块的厚度为 $200 \mu\text{m}$ 。SU-8胶的杨氏模量 $E = 4.4 \text{ GPa}$ ,泊松比 $\nu = 0.22$ ,密度为 $1.236 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,拉伸强度为 $60 \text{ MPa}$ 。用商业化软件CoventorWare对“卍”字型结构的传感性能进行仿真,并与“十”字型结构作对比分析。

#### 3.1 灵敏度响应分析

图6(a)为SU-8胶“卍”字型结构受加速度作用时的稳态响应形变图,红色区域的形变为最大。图6(b)为SU-8胶“卍”字型结构所受应力分布图,红色区域受到的应力为最大,中心对称地分布在各个悬臂梁上,由于悬臂梁以“卍”字型中心对称地固支在质量块四周,所以结构中存在同样中心对称分布的微小扭矩,可忽略不计,不影响F-P腔的两个表面的平行度。加速度的幅值为 $400 \text{ m/s}^2$ 时,悬臂梁上分布的最大等效应力为 $2 \text{ MPa}$ ,远小于SU-8胶的拉伸强度,说明SU-8胶可以应用到加速度检测应用中。

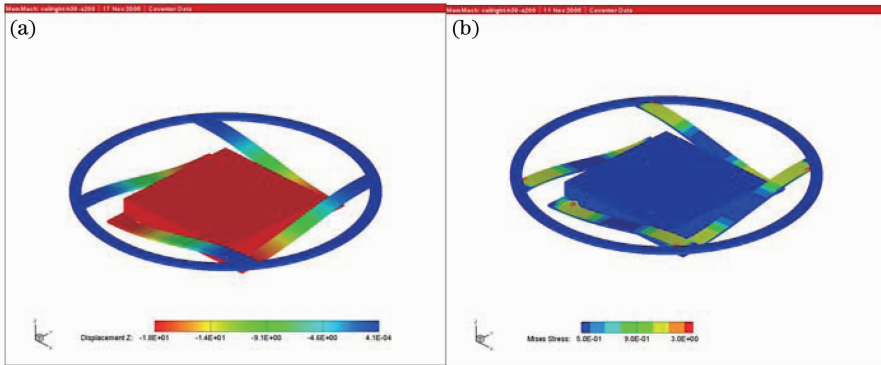


图6 “卍”字型结构的模拟结果。(a)稳态响应形变图;(b)所受应力分布图

Fig. 6 Simulation results of the “卍” structure. (a) Steady response result; (b) stress distribution pattern

图7是“十”字型结构和“卍”字型结构的CoventorWare仿真结果对比,“卍”字型结构的灵敏度明显高于“十”字型结构。通过计算,“十”字型结构的响应灵敏度为 $0.032 \mu\text{m/g}$ ,”卍”字型结构的灵敏度为 $0.44 \mu\text{m/g}$ ,”卍”字型结构的灵敏度比“十”字型结构提高了一个数量级。

在SU-8胶“卍”字型结构的设计中,悬臂梁对质量块的固支位置决定了悬臂梁的长度。悬臂梁的

长度与结构的挠度间存在着如图8所示的关系,悬臂梁越长,传感器的响应灵敏度越高。

#### 3.2 模态分析

图9给出了SU-8胶“卍”字型结构的前六阶模态振型,各阶模态振型对应的固有频率如表1所示。由图9和表1可知,一阶模态为其检测模态,沿加速度敏感方向做往复运动,后五阶模态的固有频率远大于一阶检测模态,避免了检测时发生交叉耦合(即

横向灵敏度过大),减小了加速度传感器的测试误差,提高了传感器在敏感轴方向上输出的精度。

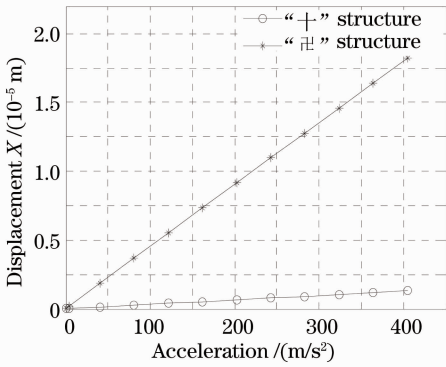


图 7 “十”字型结构和“卍”字型结构的灵敏度对比

Fig. 7 Sensitivity comparison between the “卍” structure and the “十” structure

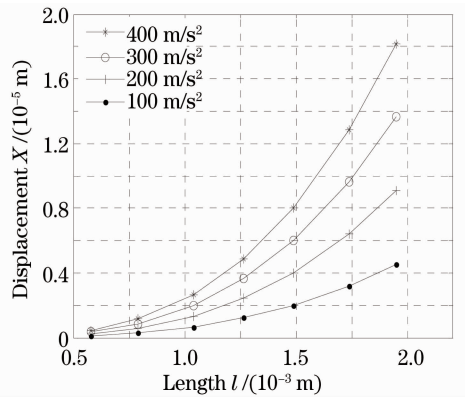


图 8 “卍”字型结构的悬臂梁长度与挠度的关系

Fig. 8 Relationship between the beam's length and the displacement of the “卍” structure

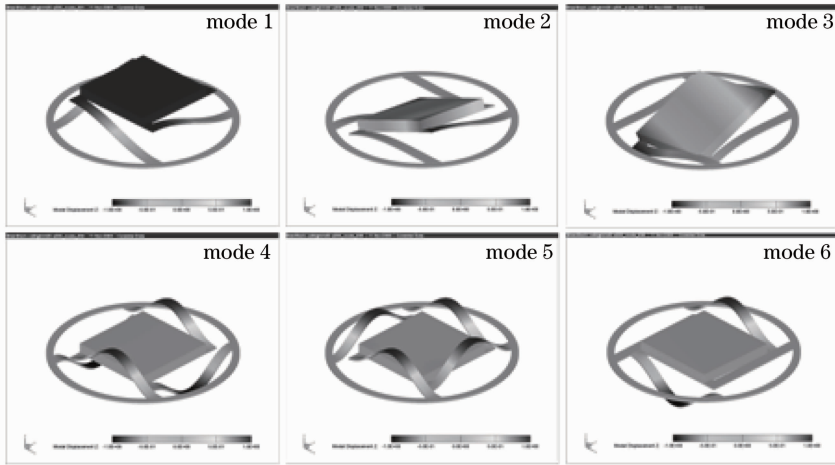


图 9 SU-8 胶“卍”字型结构的前六阶振型

Fig. 9 First six modes of the SU-8 structure in the form of “卍”

表 1 前六阶振型的固有频率

Table 1 Natural frequency of the first six modes

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Mode 5	Mode 6
Natural frequency /Hz	736.86	1401.90	1401.90	1582.17	1596.44	1609.14

### 3.3 谐振响应分析

图 10 是系统阻尼比  $\xi=0.7$  时 CoventorWare 软件得到的 SU-8 胶“卍”形结构的谐振响应曲线。在  $0\sim 400$  Hz 范围内, SU-8 胶“卍”字型结构的一阶检测模式的谐振响应幅值几乎稳定不变, 表面结构的低频响应较好;  $400$  Hz 以后的谐振响应幅值开始渐渐变小。同时, 其他五阶检测模式的谐振响应幅值几乎为零, 对一阶检测模式没有干扰, 从而减小传感器的测量误差。

### 4 光学分析

由于(3)式中偏移幅值  $X$  的大小即为质量块  $T$  的下表面与陶瓷插针端面构成的 F-P 腔的腔长变化量  $\Delta L$ , 则在  $\xi=0.65\sim 0.7$  时, F-P 腔干涉得到的反射光强与外界加速度  $\ddot{y}_{s,\max}$  之间的关系为

$$I_R = 2R \left[ 1 - \cos \frac{4\pi(L_0 + \Delta L)}{\lambda} \right] I_0 = 2R \left[ 1 - \cos \left( \frac{4\pi L_0}{\lambda} - \frac{4\pi \ddot{y}_{s,\max}}{\lambda \omega^2} \right) \right] I_0, \quad (9)$$

式中  $I_0$  为入射光强,  $R$  为端面反射率,  $L_0$  为初始腔长,  $\Delta L$  与  $\dot{y}_{s,\max}$  的方向相反。当传感器的固有频率  $\omega$  确定时, 光谱分析仪探测到的反射光谱仅跟随外界加速度  $\dot{y}_{s,\max}$  的变化而改变。结合单双峰测量方式, 对输出的反射光谱解调就能够得到加速度的大小和方向。

若整个“卍”字型结构处于低粘度硅油中, 25 °C 时硅油的粘度  $\mu$  为 10 mPa·s。由 (8) 式得到 F-P 腔的腔长应为 183.7  $\mu\text{m}$ 。加速度分别为 0、100、200、300、400  $\text{m/s}^2$  时, 传感器的归一化反射光谱如图 11 所示。

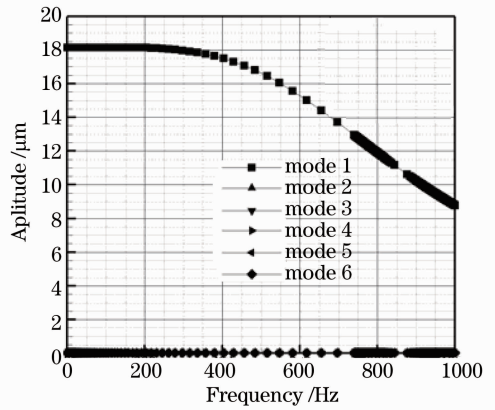


图 10 SU-8 胶“卍”字型结构的谐振响应曲线  
Fig. 10 Harmonic response curves of the SU-8 structure in the form of “卍”

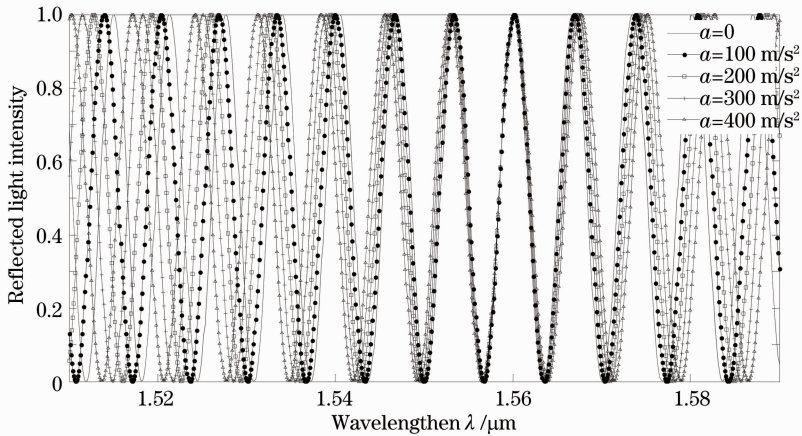


图 11 不同加速度下传感器的反射光谱图

Fig. 11 Reflection spectra of the sensor responded to accelerations

## 5 结 论

提出了一种新颖的加速度传感器的结构设计, 基于 SU-8 胶材料良好的力学性能, 结合光学传感原理实现对加速度的传感。通过性能仿真验证了 SU-8 胶“卍”字型结构的可行性, 证实该结构能够得到较高的传感灵敏度, 具有良好的检测模态, 低频响应能力较好。SU-8 胶“卍”字型结构能够与 F-P 干涉原理结合, 通过测量干涉光强的变化解调出加速度的大小。结果表明, 采用 SU-8 胶“卍”字型结构是有可能实现在加速度检测中的应用。

## 参 考 文 献

- 1 Jesus M Corres, Javier Bravo, Francisco J Arregui, *et al.*. Vibration monitoring in electrical engines using an in-line fiber etalon [J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 132(12): 506–515.
- 2 Wang Daihua, Liu Shuxin, Yuan Gang, *et al.*. Study on parallel multiplexed fabry-perot 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.

- 3 Ke Tao, Zhu Tao, Rao Yunjiang, *et al.*. Accelerometer based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(1): 171–175.

柯 涛, 朱 涛, 饶云江, 等. 基于空芯光子晶体光纤的全光纤法布里-珀罗干涉式加速度传感器[J]. *中国激光*, 2010, 37(1): 171–175.

- 4 Xu Yuxian, Zhao Changde, Sun Xudong, *et al.*. Accelerometer and its application in vehicles comfort evaluation [J]. *J Tsinghua University (Sci & Tech)*, 1998, 38(11): 9–11.

徐毓娴, 赵长德, 孙旭东, 等. 集成加速度传感器及其在汽车舒适性评价中的应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1998, 38(11): 9–11.

- 5 Xiong Xingguo, Zou Qiang, Lu Deren, *et al.*. Silicon bulk-micromachined interdigitated differential capacitive accelerometer [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 1998, 4(2): 114–120.

熊幸果, 邹 强, 陆德仁, 等. 硅体微机械叉指电容式加速度传感器设计研究[J]. *功能材料与器件学报*, 1998, 4(2): 114–120.

- 6 Du Linqun, Jia Shengfang, Nie Weirong, *et al.*. Fabrication of

- fuze micro-electro-mechanical system safety device [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(5): 836-841.
- 7 He Gaofa, Tang Yike, Zhou chuande, *et al.*. Novel resonant accelerometer with micro leverage fabricated by MEMS technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(3): 495-500.
- 8 Jinghua Zhang, Xueguang Qiao, Manli Hu, *et al.*. Proposal of metal bellows-based fiber bragg grating accelerometer [J]. Chin Opt Lett, 2011, 9(9): 090606.
- 9 Lou Jun, Fu Shaojun, Xu Xiangdong, *et al.*. Design and fabrication of holographic variable line-spacing grating for position sensor [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6405-6409.  
楼俊, 付绍军, 徐向东, 等. 用于位移传感器的全息平面变间距光栅设计与制作研究[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6405-6409.
- 10 Zhang Le, Wu Bo, Ye Wen, *et al.*. Highly sensitive fiber-optic vibration sensor based on frequency-locking of a FBG Fabry-perot cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0406006.  
张乐, 吴波, 叶雯, 等. 基于光纤光栅法布里-珀罗腔锁频原理的高灵敏度光纤振动传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0406006.
- 11 Yang Chundi, Wang Ming, Ge Yixian, *et al.*. A miniature extrinsic fiber fabry-perot pressure sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1358-1361.  
杨春弟, 王鸣, 葛益娴, 等. 微型非本征光纤法布里-珀罗压力传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1358-1361.
- 12 Wang Tingting, Wang Ming, Li Ming, *et al.*. Dual-wavelength demodulation and wavelength optimization for optical fiber-perot sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(10): 1297-1301.  
王婷婷, 王鸣, 李明, 等. 光纤法布里-珀罗腔传感器双波长解调法及波长优化设计[J]. 光学学报, 2005, 25(10): 1297-1301.
- 13 Ni Xiaoqi, Wang Ming, Chen Xuxing, *et al.*. Wavelength multiplexing of optical fiber microelectromechanical system Fabry-Perot pressure sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(5): 0776-0780.  
倪小琦, 王鸣, 陈绪兴, 等. 光纤微机电系统法布里-珀罗压力传感器的波分复用[J]. 光学学报, 2007, 27(5): 0776-0780.
- 14 Chun-Jun Lin, Fan-Gang Tseng. A micro Fabry-Perot sensor for nano-lateral displacement sensing with enhanced sensitivity and pressure resistance [J]. Sensor and Actuator A, 2004, 114(2-3): 163-170.
- 15 Gou Wenxuan. Mechanics of Materials(I) (2nd edition) [M]. Beijing: Science Press, 2010. 315-320.  
苟文选. 材料力学(I)(第2版) [M]. 北京: 科学出版社, 2010. 315-320.
- 16 Chen Hong, Bao Minhang. Air damping of micromechanical silicon accelerometers [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 1995, 16(12): 921-927.  
陈宏, 鲍敏杭. 硅微结构加速度传感器空气阻尼的研究[J]. 半导体学报, 1995, 16(12): 921-927.

栏目编辑: 张腾