

基于微机电系统技术的光纤加速度传感器

张颖¹, 吴俊¹, 魏江南², 金祖武¹, 姚江淮¹

¹燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

²河北科技大学理学院, 河北 石家庄 050018

摘要 设计了一种基于光强调制原理和微机电系统(MEMS)技术的光纤加速度传感器。加速度传感单元为硅质矩形梁,给出了矩形梁弯曲导致的遮光板位移与接收光纤光功率差的关系以及硅质矩形梁中间位置挠度与系统加速度的关系,得到了加速度与光功率差的关系。研究表明,设计的光纤加速度传感器在矩形梁中间位置的挠度变化范围为 $0\sim 10\ \mu\text{m}$ 时,相应的加速度测量范围为 $0\sim 120\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,最大加速度检测值高达 $12g$ (g 为重力加速度)。

关键词 光纤光学; 加速度传感器; 光强调制; 光功率差

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0606003

Optic Fiber Acceleration Sensors Based on Micro-Electromechanical Systems Technology

Zhang Ying¹, Wu Jun¹, Wei Jiangnan², Jin Zuwu¹, Yao Jianghuai¹

¹College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²College of Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China

Abstract Based on the principle of light intensity modulation and micro-electromechanical system (MEMS) technology, we design a kind of optical fiber acceleration sensor. Two silicon rectangular beams are used as the acceleration sensing elements. According to the relation between the shade displacement and the light power difference of the receiving optical fiber, as well as the relation between the deflection of the silicon rectangular beam at center position and the system acceleration, an expression of acceleration with the light power difference is given. The research result shows that, while the deflection of the silicon rectangular beam at center position is $0\sim 10\ \mu\text{m}$, the corresponding acceleration value is $0\sim 120\ \text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, and the maximum acceleration detective value can be as much as $12g$ (g is the acceleration of gravity).

Key words fiber optics; acceleration sensor; light intensity modulation; light power difference

OCIS codes 060.2310; 060.2310; 220.4830

1 引 言

微传感系统的应用领域正在日益扩大^[1-4],其中,加速度传感器因在判别物体动态性能和智能化方面优势明显而具有广泛的应用^[5-7]。随着微机电系统(MEMS)技术的不断成熟,其涉及的领域也不断扩展^[8-10]。相比于传统加速度传感器,基于MEMS技术的光纤加速度传感器的体积大大缩小,其应用的灵活性得到大幅度提高^[11]。光纤本身具有体积小、质量轻、抗电磁干扰等优势^[12-13],与MEMS结合后在加速度测量领域的优势更加明显。

1997年,López-Higuera等采用两根光纤准直方案,设计出一种光纤加速度传感器,但测量精度较小^[14]。2010年,Alberto等^[15]设计了一种非接触式光纤加速度传感器,用来测量印刷电路板(PCB)中的扰动情况,但该传感器只针对微小频率起作用。2013年,Gunther等^[16]利用Sagnac干涉仪原理,将单色光源通过分光器使等分量的光同时进入反向光纤环,进而使输出光在探测器内发生干涉,以此来测定角加速度的变化,但是光纤环面积要在 $1\ \text{m}^2$ 以上角加速度才能达到 $1\ (\text{^\circ})/\text{s}^2$,实用价值有限。陈陶等^[17]设计了一种光纤加速度传感器,其利用发射光

收稿日期: 2017-11-09; 收到修改稿日期: 2017-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(61471312)、河北省自然科学基金(F2015203240)

作者简介: 张颖(1963—),男,博士,教授,主要从事光传感和光电检测技术方面的研究。E-mail: zhangy@ysu.edu.cn

纤反映加速度的变化,但设计时没有考虑光纤弯曲带来的损耗和光源波动的影响。

为了缩小传感器的尺寸,提高测量的灵敏度,本文基于光强调制原理和 MEMS 技术设计了一种光纤加速度传感器。传感器的硅质矩形梁弯曲会引起遮光板挡光面积的改变,进而导致两接收光纤接收到的光功率发生变化。给出了硅质矩形梁挠度与系统加速度的关系以及加速度与光功率差的关系,并进行加速度检测。本系统结构简单、干扰小、实用性强,在高精密振动系统的实时监测和光开关等领域具有重要的应用价值。

2 传感器测量原理

设计的 MEMS 光纤加速度传感器包括硅质矩形梁、遮光板、发射光纤和接收光纤,发射光纤、接收光纤、遮光板固定于系统的硅质矩形梁上,其结构如图 1 所示。

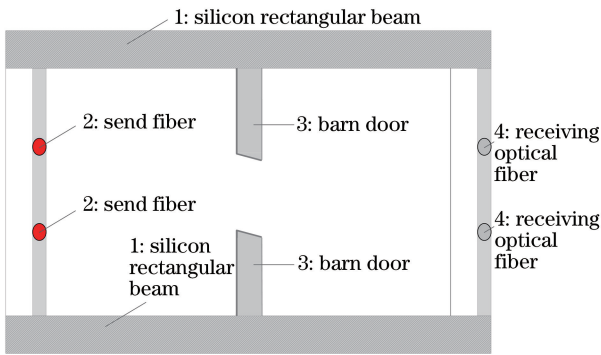


图 1 MEMS 光纤加速度传感器原理示意图

Fig. 1 Schematic of MEMS optical fiber acceleration sensor

系统产生加速度时,硅质矩形梁将发生微量弯曲,矩形梁中间位置的挠度最大。此时,遮光板随梁的弯曲而产生位移,从而导致遮光面积变化,接收光纤接收的光功率也随之发生改变。理想情况下,硅质矩形梁的弯曲程度主要取决于系统的加速度。下面将推导得出两接收光纤接收到的光功率差与系统加速度的关系。

初始条件下,两接收光纤被遮光面积 S_{comm} 皆为端面的一半,与发射光斑重叠面积相等,如图 2(a) 所示。产生加速度时,上下梁向同一方向微量弯曲,遮光板的位移量为 Δd ,两接收光纤与发射光斑重叠面积变为 $S_{\text{comm}1}$ 与 $S_{\text{comm}2}$,如图 2(b)和(c)所示。

设接收光纤纤芯半径为 r ,初始条件下 S_{comm} 为

$$S_{\text{comm}} = \frac{1}{2}\pi r^2. \quad (1)$$

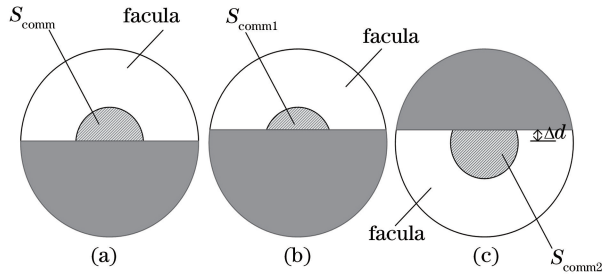


图 2 接收光纤与光斑重叠面示意图

Fig. 2 Schematic of the overlapped surface of receiving optical fiber

当位移量为 Δd 时, $S_{\text{comm}1}$ 与 $S_{\text{comm}2}$ 分别为

$$\begin{cases} S_{\text{comm}1} = \frac{\theta}{180}\pi r^2 - r \times \Delta d \times \sin \theta \\ S_{\text{comm}2} = \pi r^2 - \frac{\theta}{180}\pi r^2 + r \times \Delta d \times \sin \theta \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $\theta = \arccos \frac{\Delta d}{r}$ 。

设发射光纤与接收光纤的轴向距离为 z ,发射光纤和接收光纤的数值孔径均为 NA ,则光纤最大出射角 $\alpha = \arcsin(NA)$,发射光斑到达接收光纤时的光斑半径为

$$R(z) = z \times \tan[\arcsin(NA)] + r. \quad (3)$$

研究表明,轴向间距在 $130 \mu\text{m}$ 以内时,光斑截面光强呈均匀分布^[18]。梁的长度较小时,遮光板的位移量变小,加速度测量范围和灵敏度也变小。当轴向距离大于 $130 \mu\text{m}$ 时,光斑截面光强分布基本呈高斯分布^[19]。高斯分布的特点为接收光纤沿轴向偏移时光损耗较小,沿纵向偏移时损耗较大。高斯分布时,光强分布与轴向间距 z 的关系为

$$u(x, y, z) = \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp\left\{-i\left[kz - \arctan\left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}\right)\right]\right\} \times \exp\left[-i\frac{x^2 + y^2}{2R(z)}\right], \quad (4)$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi\omega_0^2}\right)^2}, \quad (5)$$

$$R(z) = z \left(1 + \frac{\pi\omega_0^2}{z}\right), \quad (6)$$

式中: λ, ω_0 分别为光的波长与高斯光束的腰束半径, k 为真空中的波数。当 $z = C$ (C 为常数) 时,轴向距离 C 处截面上的光强分布为

$$u_c(x, y, C) = \frac{\omega_0}{\omega(C)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(C)}\right] \times \exp\left\{-i\left[kC - \arctan\left(\frac{\lambda C}{\pi\omega_0^2}\right)\right]\right\} \times \exp\left[-i\frac{x^2 + y^2}{2R(C)}\right]. \quad (7)$$

耦合进两根接收光纤中的光功率为

$$P_1 = \iint_S \frac{u_C(x, y)}{R^2(C)} \exp\left[-\frac{r_1^2}{R^2(C)}\right] dS_{\text{comm1}}, \quad (8)$$

$$P_2 = \iint_S \frac{u_C(x, y)}{R^2(C)} \exp\left[-\frac{r_1^2}{R^2(C)}\right] dS_{\text{comm2}}, \quad (9)$$

式中: r_1 为光斑截面中心到截面上点的距离, 如图 3(a) 所示, 其 x - z 截面模场分布如图 3(b) 所示。

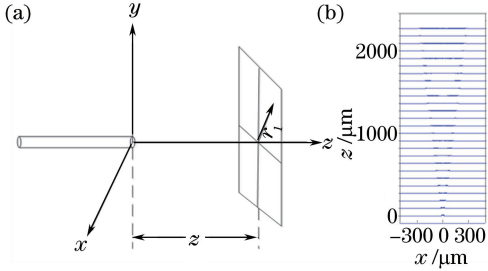


图 3 (a) 高斯光束传输图; (b) x - z 截面模场分布

Fig. 3 (a) Diagram of Gaussian beam transmission; (b) mode field distribution on x - z plane

3 微位移与光功率的关系

设定发射光纤与接收光纤的芯径 r 皆为 $20 \mu\text{m}$, 轴向间距 z 为 $130 \mu\text{m}$ 。光从发射光纤经遮光板到被接收光纤的接收过程中光功率的变化如图 4 所示。

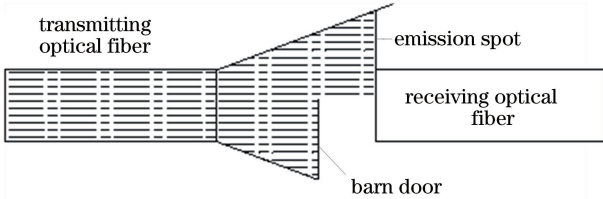


图 4 光传输示意图

Fig. 4 Schematic of optical transmission

利用 RSOFT 软件进行仿真, 结果如图 5 所示。初始条件下, 遮光板遮光面积为接收光纤端面的一半, 如图 5(a) 所示, 由监视器 1 和 3 监测到两根发射光纤的光功率为 0.5 mW ; 由监视器 2 和 4 监测到两根接收光纤的光功率为 0.1216 mW , 监视器 2 和 4 的光功率差为 0。系统处于加速度状态时, 两个矩形梁向同一方向形变, 遮光板位移量和接收光纤的光功率差皆随加速度的增加而增大, 如图 5(b)~(e) 所示。

当遮光板沿 x 轴负方向移动 $2.5 \mu\text{m}$ 时, 接收光纤 1 和 2 的光功率由 0.1216 mW 分别变为 0.2028 mW 和 0.0585 mW , 两接收光纤光功率差值为 0.1443 mW , 如图 5(b) 所示。当遮光板沿 x 轴负方向分别移动 $5 \mu\text{m}$ 和 $7 \mu\text{m}$ 时, 两接收光纤功率差分别为 0.2748 mW 和 0.3829 mW , 如图 5(c) 和 (d)

所示。当遮光板沿 x 轴负方向移动 $10 \mu\text{m}$ 时, 其中一根接收光纤光功率几乎为 0, 两根接收光纤的光功率差达到了最大值 0.4458 mW , 如图 5(e) 所示。因此, 遮光板的位移量 (即矩形梁中间位置的挠度) 最大为 $10 \mu\text{m}$, 当位移超过 $10 \mu\text{m}$ 时, 利用此原理进行检测就会产生严重的测量误差。

结果显示, 矩形梁微弯曲量在 $0 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围变化时, 两接收光纤光功率差由 0 变化到 0.4458 mW 。接收光纤接收的光功率与遮光板位移的关系曲线如图 6 所示, fit 1 和 fit 2 分别为接收光纤 1 和 2 接收的光功率曲线, fit 3 为两接收光纤接收的光功率差与遮光板位移的关系曲线。两接收光纤接收的光功率差 P 与遮光板位移 x 关系曲线的拟合关系式为

$$P = -0.0001696x^3 + 0.000424x^2 + 0.05728x. \quad (10)$$

4 硅质矩形梁弯曲特性分析

处于载荷或加速状态时, 硅质矩形梁将发生弯曲。矩形梁的长 L 为 $140 \mu\text{m}$, 宽 B 为 $40 \mu\text{m}$, 高 H 为 $40 \mu\text{m}$, 弹性模量为 $1.9 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比为 0.27, 密度为 $2.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。当加速度 a 分别为 $40, 80, 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时, 利用 ANSYS 对硅质矩形梁形变进行分析, 得到矩形梁中间位置的挠度 (即遮光板的位移量) 的仿真分析结果, 如图 7 所示。图 8 为硅质梁挠度随系统加速度变化的关系曲线。

结果显示, 遮光板位移 (硅质梁的挠度) x 与系统加速度 a 具有良好的线性关系:

$$x = k_1 a, \quad (11)$$

式中: $k_1 = 8.394 \times 10^{-5}$ 。联立 (10) 式和 (11) 式, 得到光功率差 P 与系统加速度 a 的关系式为

$$P = -1.00307 \times 10^{-7} a^3 + 2.98747 \times 10^{-8} a^2 + 4.808 \times 10^{-2} a. \quad (12)$$

光功率差 P 与系统加速度 a 的关系曲线如图 9 所示, 具有良好的线性。

5 实验与数据

将封装后的加速度传感器用螺丝刚性连接固定于东菱 ES-20 振动台上, 如图 10 所示。以正弦波形式驱动实验平台垂直振动。从 5 Hz 开始, 用扫频法在 500 Hz 以内探寻加速度传感系统的响应度, 得到系统加速度与频率响应的关系如图 11 所示。由图 11 可见, 所设计的加速度传感器的谐振频率为 425 Hz , 此时的输出响应度较好。

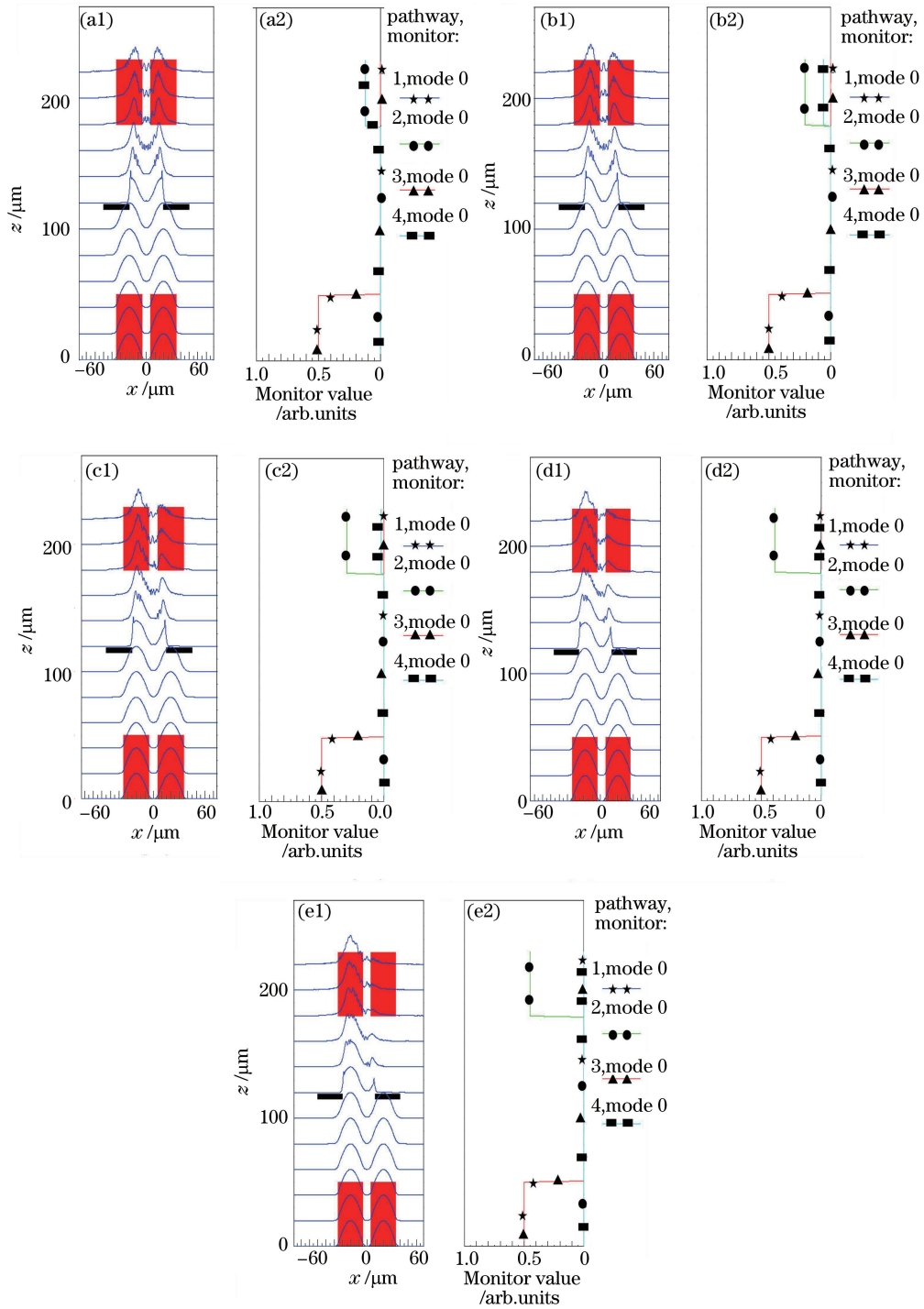


图 5 接收光纤模场分布 x - z 截面图。(a1) (a2) $\Delta d=0 \mu\text{m}$; (b1) (b2) $\Delta d=2.5 \mu\text{m}$; (c1) (c2) $\Delta d=5 \mu\text{m}$;
(d1) (d2) $\Delta d=7.5 \mu\text{m}$; (e1) (e2) $\Delta d=10 \mu\text{m}$

Fig. 5 Cross section of receiving optical fiber mode field on x - z plane. (a1) (a2) $\Delta d=0 \mu\text{m}$; (b1) (b2) $\Delta d=2.5 \mu\text{m}$;
(c1) (c2) $\Delta d=5 \mu\text{m}$; (d1) (d2) $\Delta d=7.5 \mu\text{m}$; (e1) (e2) $\Delta d=10 \mu\text{m}$

将所设计的光纤加速度传感器和标准加速度计同时固定于振动平台,进行对比实验。振动平台频率变化范围为 $375 \sim 425 \text{ Hz}$,得到光纤加速度传感器检测值为 $12 \sim 116 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,将检测值与标准加速度值进行对比,得到的拟合曲线如图 12 所示,线性

拟合度达 0.99。结果表明,所设计的光纤加速度传感器与标准加速度计检测值基本一致,具有可靠的实用性。

通常情况下,光纤的特性受温度影响不大,但是在温度低于 $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右时,损耗会急剧增加,因此,

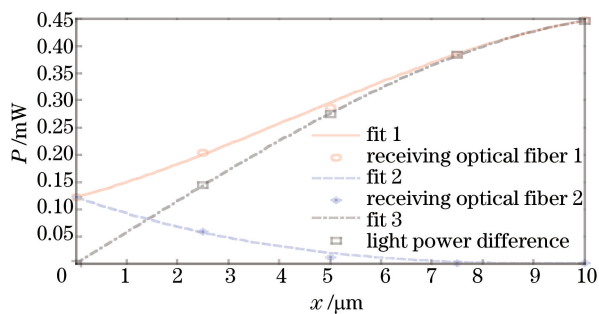


图 6 接收光纤光功率与遮光板位移关系
Fig. 6 Relationship between light power of receiving optical fiber and shade displacement

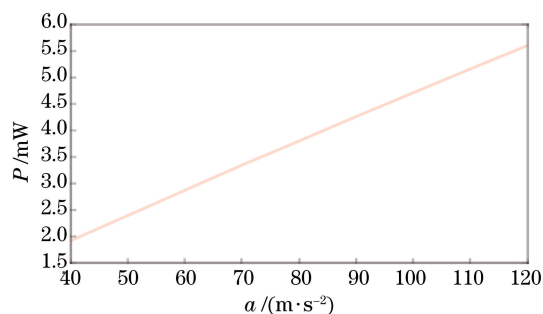


图 9 系统光功率差与加速度的拟合曲线
Fig. 9 Fitting curve of light power difference and acceleration of the system

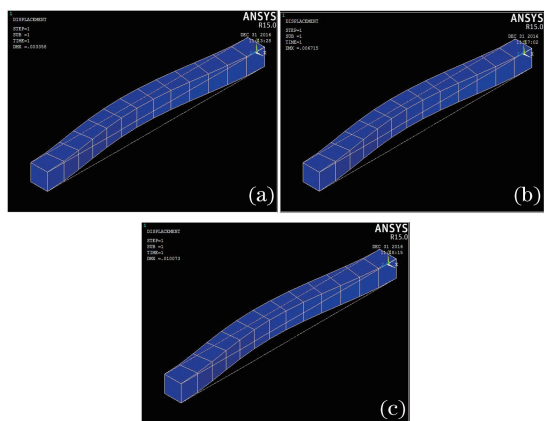


图 7 不同加速度下硅质矩形梁形变的仿真图。
(a) $a = 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; (b) $a = 80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; (c) $a = 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Fig. 7 Simulation diagrams of deformations of silicon rectangular beam under different accelerations.
(a) $a = 40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; (b) $a = 80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; (c) $a = 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

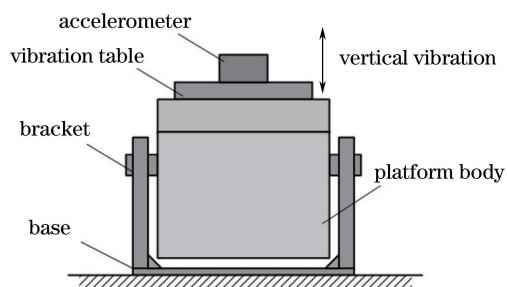


图 10 振动平台结构示意图
Fig. 10 Structural schematic of platform vibrator

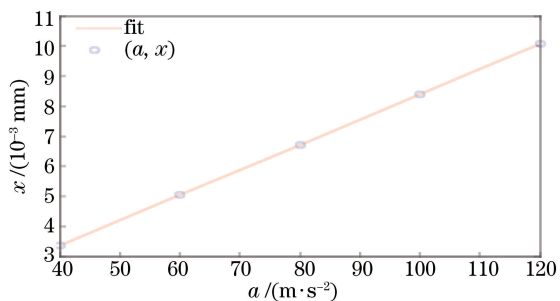


图 8 硅质梁挠度随系统加速度变化的关系曲线
Fig. 8 Fitting curve of the deflection of silicon rectangular beam as a function of acceleration

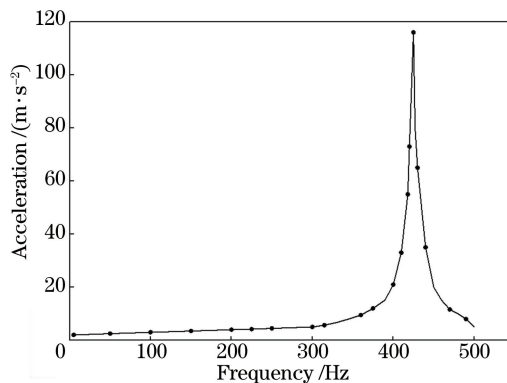


图 11 光纤加速度传感器频率响应特性曲线
Fig. 11 Frequency response characteristic curve of fiber acceleration sensor

加速度传感器可在 $-50 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内稳定可靠地工作。

6 结 论

设计了一种基于光强调制原理和 MEMS 技术的光纤加速度传感器,给出了系统处于加速度状态下的硅质矩形梁弯曲所导致的遮光板位移与接收光

纤光功率差的关系,并且给出了加速度与光功率差的关系。在硅质矩形梁中间位置挠度为 $0 \sim 10 \text{ } \mu\text{m}$ 的变化范围内时,加速度测量范围为 $0 \sim 120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,最大加速度检测值达到 $12g$ (g 为重力加速度)。当系统加速度超过 $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 时,硅质矩形梁的最大形变量超过 $10 \text{ } \mu\text{m}$,过大的加速度使传感器超过测量范围而失效。设计的光纤加速度传感器与传统加速度传感器相比具有极高的灵敏度,即使硅质梁中间位置处的挠度只有微米量级,光纤加速度传感器也能有效地进行响应。研究结果在高精密振动系统的实时监测和光开关等领域具有重要的应用价值。

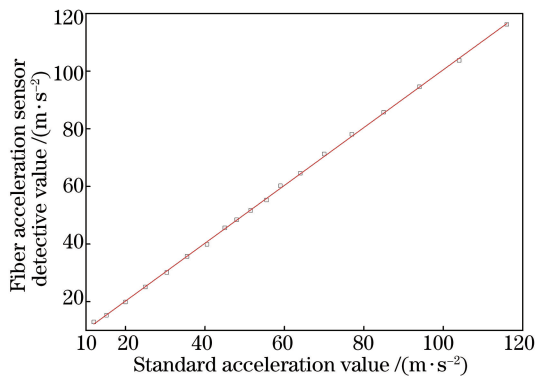


图 12 光纤加速度传感器测量值与标准加速度值的拟合曲线

Fig. 12 Fitting curve of fiber acceleration sensor detectable value and standard acceleration value

参 考 文 献

- [1] Lai F, Wang S X, He J H. Investigation on the innovation development strategy of microsystem technologies[J]. *Microelectronics*, 2015, 45(1): 81-87.
赖凡, 王守祥, 何晋沪. 微系统技术创新发展策略研究[J]. *微电子学*, 2015, 45(1): 81-87.
- [2] Sato T, Takaaki L, Jalabert H, *et al.* Development of MEMS integrated into TEM setup to monitor shear deformation, force and stress for nanotribology [J]. *Microelectronic Engineering*, 2013, 112(3): 269-272.
- [3] Duan C, Jiang Y, Chen L, *et al.* Design and development of MEMS capacitive large-scale strain sensors[J]. *Integrated Ferroelectrics*, 2013, 147(1): 123-130.
- [4] Lin J G, Cong Q, Xu C, *et al.* Design of MEMS laser scanning retinal projection display system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1222001.
林俊国, 丛强, 许晨, 等. MEMS激光扫描视网膜投影显示系统设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1222001.
- [5] Lu A J, Bai Z C, Xiao W, *et al.* Design and research of biosensor characteristics based on grating waveguide angle modulation with MEMS micro-mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0414001.
陆安江, 白忠臣, 肖伟, 等. 基于 MEMS 微镜的光栅波导角度调制生物传感器设计与研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0414001.
- [6] Hong L F, Zhang C X, Feng L S, *et al.* Frequency tracking and locking methods in resonator micro-optic gyro[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(9): 0905003.
洪灵菲, 张春熹, 冯丽爽, 等. 谐振式微光陀螺频率跟踪与锁定技术研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0905003.
- [7] Rivas J, Wunderlich R, Heinen S J. A MEMS acceleration sensor for traffic condition detection [C]//8th Conference on Ph. D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), 12-15 June 2012, Aachen, Germany, Berlin: VDE, 2012: 321-324.
- [8] Choi W C, Choi H J. Development of a 3-D process technology for wafer-level packaging of MEMS devices [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2012, 2(9): 1442-1448.
- [9] Zhong S L, Long L, Li M, *et al.* Torsion-sensitive micro-electro mechanical systems accelerometer sensor based on optical fiber detection technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(3): 0305002.
钟少龙, 龙亮, 李明, 等. 基于光纤检测技术的扭转敏感微机电系统加速度传感器[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305002.
- [10] Feng X Z, Chen L J, Cheng J W. Application and prospects of packaging technology of MEMS[J]. *Key Engineering Materials*, 2011, 460/461: 274-279.
- [11] Fukuda Y, Tanaka T. MEMS and fiber optics sensor-based wearable interface for medical applications[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 12-12 Oct. 2005, Waikoloa, HI, USA. [S. l.]: IEEE, 2005: 1675-1679.
- [12] Saperstein R E, Alic N, Zamek S, *et al.* Processing advantages of linear chirped fiber Bragg gratings in the time domain realization of optical frequency-domain reflectometry[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15464-15479.
- [13] Wang H R, Gao R X, Yin Y X, *et al.* Vibration sensor based on single mode-multimode optic-fiber cantilever structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 060601.
王红日, 高仁喜, 殷焱焯, 等. 基于单模-多模光纤悬臂梁型振动传感器的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 060601.
- [14] Huo D H. The research and application of fiber optic accelerometer system[D]. Jinan: Shandong University, 2009: 4-8.
霍佃恒. 光纤加速度传感器系统的研究和应用[D]. 济南: 山东大学, 2009: 4-8.
- [15] Alberto V, Casalicchio M L, Perrone G. Displacement and acceleration measurement in vibration test using a fiber optic sensor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(5): 1389-1396.

- [16] Gunther S, Seiler F. Unidirectional fiber optic sensor for angular acceleration measurement[J]. Optics Letters, 2013, 38(9): 1500-1502.
- [17] Li J L, Chen T. A novel fiber optic intensity modulated acceleration sensor[J]. Computer Measurement and Control, 2013, 21(10): 2882-2884.
李建林, 陈陶. 一种新颖的光纤强度调制加速度传感器研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(10): 2882-2884.
- [18] Qi X L, Wang F J, Cai Z G, *et al.* Study on the intensity distribution of the output beam of multimode optical fiber[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2003, 24(2): 117-121.
齐晓玲, 王福娟, 蔡志岗, 等. 多模光纤出射光束光强分布的研究[J]. 半导体光电, 2003, 24(2): 117-121.
- [19] Li A Y, Wang X Y. Studying on optical field properties of fiber coupled LD[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(9): 1664-1667.
李爱云, 王晓颖. 光纤耦合 LD 输出光场特性研究[J]. 光子学报, 2007, 36(9): 1664-1667.