

# 光学学报

## 基于色散拐点微纳光纤耦合器的通孔悬臂梁振动传感器

范俊豪, 杨祥文, 罗彬彬\*, 邹雪, 刘开俊, 吴德操\*\*, 郭裕丰, 石胜辉, 赵明富

重庆理工大学光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054

**摘要** 研究了一种基于色散拐点(DTP)微纳光纤耦合器(OMC)的通孔悬臂梁高灵敏度振动传感器。首先,从理论上分析 OMC 的轴向应变特性和振动特性,及其在轴向应变作用下的光谱特性。然后,采用熔融拉锥法制备多种不同直径的 OMC 并进行轴向应变实验。实验结果表明:当 OMC 的直径为  $1.6\ \mu\text{m}$  时,其 DTP 位于  $1500\ \text{nm}$  附近,轴向灵敏度高达  $-35\ \text{pm}/\mu\epsilon$ ,约为普通 OMC 的 3.5 倍。最后,将具有高轴向应变灵敏度的 OMC 固定在通孔悬臂梁上,制成一种高灵敏度振动传感器,用于检测振动信号。结果表明:传感器检测的频率范围为  $30\sim 2800\ \text{Hz}$ ,在一阶谐振频率( $52\ \text{Hz}$ )处响应最强;在一阶谐振频率之前的平坦区(约  $40\ \text{Hz}$ )中,传感器在微弱振动( $0\sim 0.6\ \text{g}$ )下的加速度灵敏度高达  $85\ \text{mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ ,并具有良好的线性度。

**关键词** 传感器; 光纤传感器; 微纳耦合器; 色散拐点; 轴向应变; 振动传感

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1528001

### Through-Hole Cantilever Beam Vibration Sensor Based on Dispersion-Turning-Point Optical Microfiber Coupler

Fan Junhao, Yang Xiangwen, Luo Binbin\*, Zou Xue, Liu Kaijun, Wu Decao\*\*, Guo Yufeng, Shi Shenghui, Zhao Mingfu

Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

**Abstract** A high-sensitivity through-hole cantilever beam vibration sensor based on dispersion-turning-point (DTP) optical microfiber coupler (OMC) is studied. First, the axial strain and vibration characteristics of OMCs, and the spectral characteristics of OMCs under the loading of axial strain are theoretically analyzed. Then, OMCs with different diameters are prepared by the melting taper method, and the axial strain experiments are carried out. Experimental results show that the axial sensitivity of the OMC is as high as  $-35\ \text{pm}/\mu\epsilon$  when the diameter of the OMC is  $1.6\ \mu\text{m}$  and DTP is near  $1500\ \text{nm}$ , which is about 3.5 times of that of the normal OMC. Finally, the OMC with high axial-strain sensitivity is fixed on a through-hole cantilever beam to construct a high-sensitivity vibration sensor, which is used to detect the vibration signal. Results show that the frequency detection range of the sensor is  $30\sim 2800\ \text{Hz}$ , the response reaches the highest value at the first-order vibration frequency ( $52\ \text{Hz}$ ), and the acceleration sensitivity of the sensor is as high as  $85\ \text{mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$  with good linearity under the micro-vibration ( $0\sim 0.6\ \text{g}$ ) at the flat response area ( $\sim 40\ \text{Hz}$ ).

**Key words** sensors; fiber optic sensor; optical microfiber coupler; dispersion turning point; axial strain; vibration sensing

## 1 引言

材料应变与振动是工程结构健康的重要指标,结

构的过度应变和振动会导致裂缝和损坏的出现。光纤振动传感器以其对外部环境敏感、体积小、质量轻、响应快、抗电磁干扰能力强、耐腐蚀和易于复用等独特优

收稿日期: 2021-12-29; 修回日期: 2022-01-25; 录用日期: 2022-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(61875026)、重庆英才青年拔尖人才计划(cstc2021ycjh-bgzxm0128)、重庆英才创新领军人才计划(cstc2021ycjh-bgzxm0287)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201901124, KJQN202001117)、重庆市研究生科研创新项目(CYS20349)

通信作者: \*luobinbin@cqu.edu.cn; \*\*wudecao@163.com

势,被广泛应用于航空航天、大型结构工程和各种工业工程等领域的安全状态监测中。经过几十年的发展,已经出现了各种不同类型的光纤振动传感器,例如基于光纤法布里-珀罗腔<sup>[1-3]</sup>、光子晶体光纤<sup>[4]</sup>、细芯光纤<sup>[5]</sup>、长周期光纤光栅<sup>[6]</sup>、光纤布拉格光栅<sup>[7-8]</sup>和微纳光纤<sup>[9-10]</sup>等的光纤振动传感器。2019年,Xie等<sup>[11]</sup>利用极大倾角光纤光栅制作了加速度灵敏度为 $7.57\text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ 、响应频率范围为 $10\sim 350\text{ Hz}$ 且具有矢量特性的振动传感器,该传感器可实现低频振动传感。2020年,Zhang等<sup>[12]</sup>利用马赫-曾德尔(MZI)干涉结构制作了加速度灵敏度为 $6.45\text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ 、响应频率范围为 $20\sim 4000\text{ Hz}$ 的振动传感器,其检测频率范围得到了较大的拓展。虽然以上某些类型的光纤振动传感器已经达到很高的灵敏度,但是尺寸更小、结构更紧凑、灵敏度更高和检测范围更大的光纤振动传感器仍然是下一步研究的方向。

基于色散拐点(DTP)的微纳光纤<sup>[13-14]</sup>具有极高灵敏度,已经被用于温度、折射率、应变和振动传感领域中。Muhammad等<sup>[15]</sup>制作了直径为 $8\text{ }\mu\text{m}$ 、轴向应变灵敏度为 $-4.2\text{ pm}/\mu\epsilon$ 的微纳光纤应变传感器。Li等<sup>[16]</sup>使用直径更小( $2.5\text{ }\mu\text{m}$ )、锥形长度更短的微纳光纤,获得了 $-4.84\text{ pm}/\mu\epsilon$ 的应变灵敏度。本课题组在文献<sup>[17]</sup>中研究的 $2.2\text{ }\mu\text{m}$ 微纳光纤在DTP附近获得了 $-40\text{ pm}/\mu\epsilon$ 的超高应变灵敏度,并且将制备的具有DTP的微纳光纤固定在通孔悬臂梁上,获得了加速度灵敏度高达 $77.96\text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ 、检测范围为 $30\sim 2800\text{ Hz}$ 的振动传感器,与之前类似的振动传感器相比,其灵敏度提高了约10倍。此外,Qi等<sup>[18]</sup>介绍了一种采用火焰加热技术制作的基于微纳光纤耦合器(OMC)的应变传感器,其应变灵敏度达到 $-18.351\text{ pm}/\mu\epsilon$ 。Li等<sup>[19]</sup>则用超模理论解释OMC的传输特性并分析了OMC的色散拐点特征,当OMC的奇模和偶模的群组有效模式折射率差(GRD)趋近于0时,将其称为色散拐点。同时,制作直径为 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 的基于色散拐点的OMC气体传感器,其折射率灵敏度高达 $-45550\text{ nm}/\text{RIU}$ (RIU为折射率单位),远高于普通直径的OMC的灵敏度,这表明OMC的色散拐点特性在传感领域具有良好的应用价值。然而,到目前为止,鲜有针对OMC在其DTP附近处的轴向应变和振动传感特性的系统研究。

本文通过理论计算和模拟仿真分析了OMC的光谱特性,再采用熔融拉锥法制备不同直径的OMC。当直径为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ 时,OMC在空气中的轴向应变灵敏度高达 $-35\text{ pm}/\mu\epsilon$ ,比文献<sup>[16]</sup>中的微纳光纤的应变灵敏度提升约9倍。当直径在 $3\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 范围内时,OMC的轴向应变灵敏度约为 $-12\text{ pm}/\mu\epsilon$ ,较本课题组研究的同直径下微纳光纤<sup>[17]</sup>的轴向灵敏度提高约3.5倍。然后,将制备的OMC封装在所设计的矩形通孔悬臂梁上构成一个振动传感器,该传感器的灵敏度高、响应频率范围宽,在机械、工程结构等振动检测领域中具有广阔的应用场景。

## 2 原理与仿真

OMC的干涉原理如图1所示,OMC主要由两个输入端口、两个输出端口和均匀腰区组成,其中腰区部分的两根微纳光纤平行且紧密地堆积在一起。当总功率为 $P_1$ 的入射光注入端口1时,偶模和奇模同时被激发,根据超模理论,两个平行的微纤维可视为一个新的波导。然后,两种模式沿着OMC传播时发生功率交换,最终从端口3和端口4输出并形成光谱。端口3和端口4的输出功率<sup>[20]</sup>可表示为

$$P_3 = P_1 \cos^2\left(\frac{1}{2}\phi\right), \quad (1)$$

$$P_4 = P_1 \sin^2\left(\frac{1}{2}\phi\right), \quad (2)$$

式中: $P_1$ 为输入功率; $\phi$ 为两干涉模式沿耦合长度 $L$ 累积的相位差<sup>[20]</sup>, $\phi$ 可以表示为

$$\phi = \frac{2\pi L(n_{\text{eff}}^{\text{even}} - n_{\text{eff}}^{\text{odd}})}{\lambda_N}, \quad (3)$$

式中: $\lambda_N$ 为端口1处入射光的波长; $n_{\text{eff}}^{\text{even}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{odd}}$ 分别为偶模和奇模的有效模式折射率(ERI),可通过COMSOL仿真计算得到。图2为所建立的OMC仿真模型,图中两相切的圆表示紧密堆积在一起的腰区部分的横截面,OMC直径( $D$ )为这两个圆直径的和,将有效折射率设置为单模光纤(SMF)的包层折射率(1.4628)。外侧大圆表示空气层,折射率设置为1。图2(a)、(b)分别为 $\lambda_N = 1500\text{ nm}$ 、OMC直径为 $6\text{ }\mu\text{m}$ 时奇模和偶模的模场分布图。可见,OMC腰区部分被拉伸融合得很充分后,实际上形成一个多模光波导,奇模是奇对称的一阶模(LP<sub>11</sub>),偶模则是偶对称的基模(LP<sub>01</sub>)。

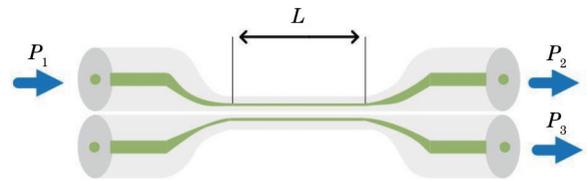


图1 OMC结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of OMC structure

图3(a)所示为 $\lambda_N = 1300\text{ nm}$ 时,偶模和奇模的ERI与OMC直径的关系,可见随着OMC直径的减小,两模式的ERI迅速减小,当OMC直径减小到 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 附近时,奇模和偶模分别发射截止,此时ERI为1。在得到偶模和奇模的ERI后,可以进一步计算两模式的群组有效折射率 $n_g$ 和群组有效折射率差 $G$ <sup>[21]</sup>,二者的表达式为

$$n_g = n_{\text{eff}} - \lambda_N \partial n_{\text{eff}} / \partial \lambda, \quad (4)$$

$$G = n_{\text{eff}}^{\text{even}} - n_{\text{eff}}^{\text{odd}}. \quad (5)$$

当偶模与奇模的群组有效折射率相等时,即 $G = 0$ 时,称之为OMC的DTP。仿真OMC在不同直径下的 $G$ 与 $\lambda_N$ 的关系,如图3(b)所示。可以看出,随着OMC直径的减小,DTP会蓝移,并且当直径为 $1.6\text{ }\mu\text{m}$

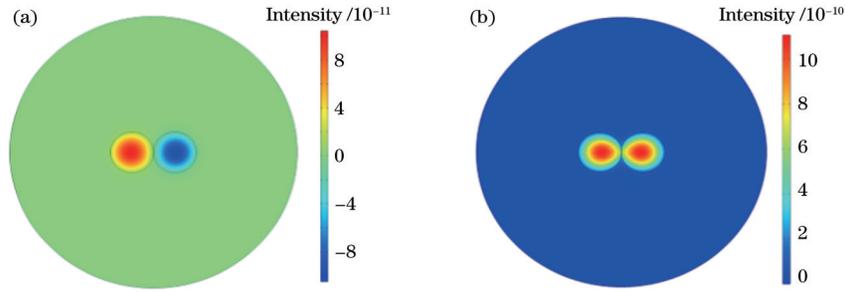


图 2 模场分布图。(a)奇模;(b)偶模

Fig. 2 Mode field distributions. (a) Odd mode; (b) even mode

时,DTP位于 $\lambda_N = 1500$  nm附近。由图3(b)中规律可知,想要得到DTP位于 $\lambda_N = 1500$  nm附近的OMC,则需要将OMC直径控制在1.6~1.7  $\mu\text{m}$ 范围内。最后,

利用式(1)和式(2)数值仿真出直径为1.4  $\mu\text{m}$ 的OMC的透射光谱,如图3(c)所示,此时DTP位于 $\lambda_N = 1330$  nm附近,与图3(b)所对应的DTP波长位置吻合。

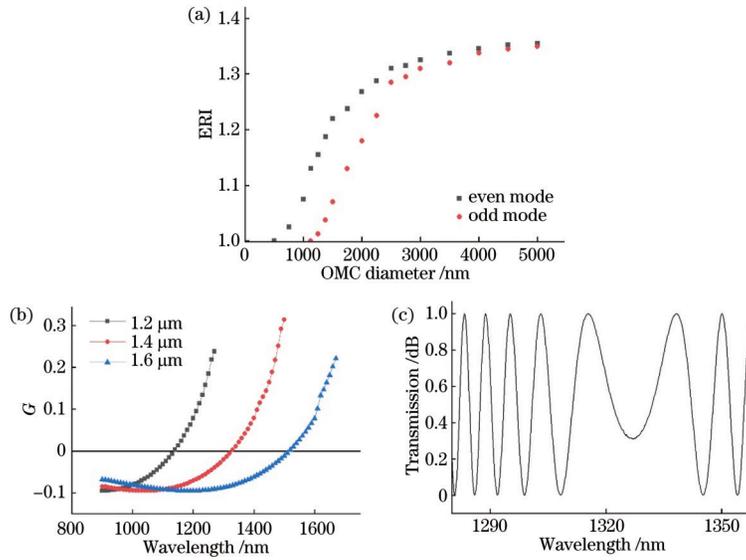


图 3 OMC 色散拐点仿真结果。(a)两模式的 ERI 与 OMC 直径的关系;(b)  $G$  与波长的关系;(c) 直径为 1.4  $\mu\text{m}$  的 OMC 透射光谱图  
Fig. 3 Simulation results of DTP of OMC. (a) Relationship between ERI of two modes and OMC diameter; (b) relationship between  $G$  and wavelength; (c) transmission spectrum of OMC with diameter of 1.4  $\mu\text{m}$

此外,仿真分析不同直径 OMC 的透射光谱,并分析在 $\lambda_N = 1550$  nm 附近干涉峰的自由光谱范围(FSR)与 OMC 直径的关系,结果分别如图4(a)、(b)所示。可见,随着 OMC 直径的减小,FSR 也随之减小,但当直径从 2.2  $\mu\text{m}$  减小到 1.8  $\mu\text{m}$  时,FSR 反而会增大。因此,在制

备 OMC 的过程中,可利用此规律来初步估算 OMC 的直径和探寻 DTP 的波长位置,即当 FSR 从减小变为增加趋势时,表明 DTP 即将出现在 1550 nm 附近。

当给 OMC 施加轴向应变  $\epsilon$  时,OMC 的腰区长度  $L$  和半径  $r$  会因泊松效应分别增大和减小,从而使

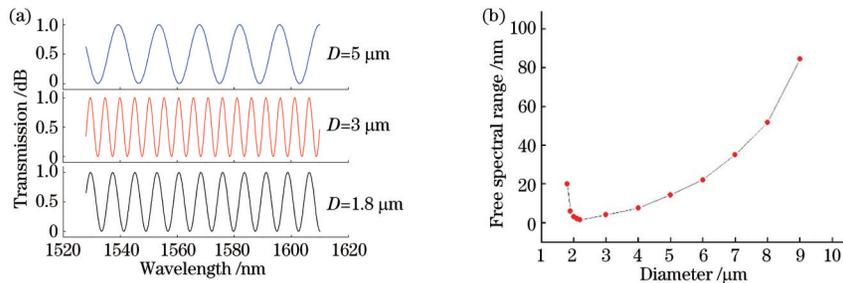


图 4 OMC 的 FSR 仿真结果。(a)不同直径 OMC 的透射光谱图;(b) FSR 与 OMC 直径的关系

Fig. 4 FSR simulation results of OMC. (a) Transmission spectra of OMC with different diameters; (b) relationship between FSR and diameter of OMC

OMC 的折射率受到调制, 两干涉模式(奇模和偶模)的有效折射率差改变, 这将引起 OMC 透射光谱的漂移, 实现 OMC 的轴向应变传感。由文献[18]可知, 泊松效应和弹光效应公式可分别表示为

$$r_2 = r - \nu \epsilon r, \quad (6)$$

$$n_{\text{eff}2} = \left[ 1 - \frac{n_{\text{eff}1}^2}{2} (k_{12} - \nu k_{11} - \nu k_{12}) \epsilon \right] n_{\text{eff}1}, \quad (7)$$

式中:  $\epsilon$  为轴向应变系数,  $\epsilon = \Delta L / L$ ,  $\Delta L$  为 OMC 轴向拉伸长度;  $r$  为 OMC 的腰区半径;  $\nu$  为泊松比,  $\nu = 0.17$ ;  $k_{11}$ 、 $k_{12}$  为应变系数,  $k_{11} = 0.12 \text{ RIU}/\mu\epsilon$ ,  $k_{12} = 0.24 \text{ RIU}/\mu\epsilon$ ;  $n_{\text{eff}1}$  为光纤的初始有效折射率, 其值为 1.4628。

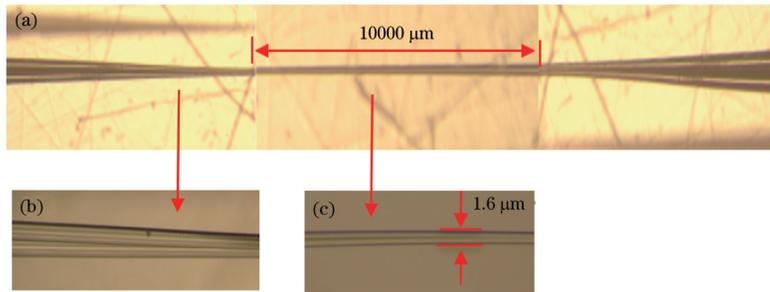


图 5 OMC 显微镜图像。(a) 完整显微镜图像; (b) 锥区部分; (c) 腰区部分;

Fig. 5 Microscope images of OMC. (a) Complete microscope image; (b) cone area; (c) waist area

将制备的 OMC 封装在由不锈钢制成的矩形通孔悬臂梁上, 如图 6 所示。悬臂梁的长度为 65 mm, 宽度为 14 mm, 厚度为 0.3 mm。矩形通孔的长度为  $L_1 = 15 \text{ mm}$ , 宽度为 2 mm。OMC 两端用紫外光(UV)胶水固定。矩形悬臂梁的左端固定, 右端自由振动, 当振动信号加载于矩形通孔悬臂梁时, 通孔的长度变长, OMC 产生轴向应变, 其腰区部分的长度和直径变化, 从而使 OMC 的折射率受到调制, 两干涉模式(奇模和偶模)的有效折射率差改变, 干涉光谱漂移。通过边缘滤波法对振动信号进行解调, 从而实现双模干涉式 OMC 的振动传感。通孔悬臂梁的共振频率  $f_i^{[17,23-24]}$  可表示为

$$f_i = \beta_i^2 \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (8)$$

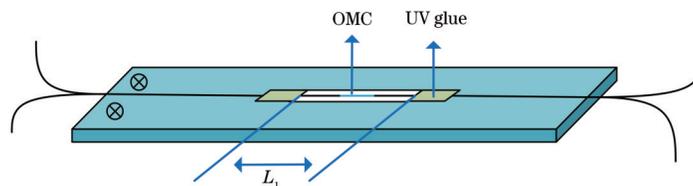


图 6 基于 OMC 的通孔悬臂梁传感器结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of through-hole cantilever beam based on OMC

## 4 实验与讨论

### 4.1 轴向应变实验

将制备的 OMC 固定在精度为  $1 \mu\text{m}$  的精密位移台

## 3 传感器的制备

采用熔融拉锥法制备直径为  $1.6 \mu\text{m}$  的 OMC。首先剥掉两根单模光纤的涂覆层, 并用乙醇擦拭干净后互相缠绕 2~3 次, 将其固定在拉锥机的真空泵上, 然后用光纤拉锥机(OB-612)对其进行拉锥。因为要精确控制所制备的 OMC 的直径, 所以在锥形结构两端接上宽带光源(CONOUER, 波长范围为 1250~1650 nm)和光谱仪(OSA, ANRITSU, MS9740A), 在拉锥过程中通过观察 OMC 干涉峰的 FSR 来估计所制备的 OMC 的直径<sup>[22]</sup>。图 5 所示为直径为  $1.6 \mu\text{m}$  且在 1550 nm 附近具有 DTP 的 OMC 显微图, 其腰区区域长为 10000  $\mu\text{m}$ 。

$$J = \sum_i m_i r_i^2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (9)$$

式中:  $E$ 、 $J$ 、 $\rho$  和  $A$  分别是矩形通孔悬臂梁的杨氏模量、转动惯量、密度和横截面积, 其中  $E = 193 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 7.93 \text{ g/cm}^3$ ,  $A = 5.2 \text{ mm}^2$ ,  $J$  通过式(9)进行计算;  $m_i$  表示悬臂梁某个质元的质量;  $r_i$  表示该质元到转轴的垂直距离。通过计算可得悬臂梁的 1~5 阶共振频率分别为 55.5, 347.8, 974.1, 1908.8, 3155.1 Hz。矩形通孔悬臂梁的优势在于其基于轴向应变原理, 而普通悬臂梁是轴向应变和弯曲的共同作用。此外, 由于 OMC 对折射率和温度都较为敏感, 故 OMC 与其他结构接触可能会影响其干涉光谱, 而通孔结构可保证传感单元位于中央通孔部位, 并不接触梁的结构, 这保证了振动检测的稳定性。

(THORLABS, MBT616D/M)上, 两端分别连接宽带光源和光谱仪, 然后其中一个位移平台固定不动, 另一个位移平台进行轴向位移。在轴向应变下, 图 7(a) 是直径为  $1.6 \mu\text{m}$  的 OMC 在 DTP 附近处的光谱漂移图,

此时 DTP 对应的波长位置在 1500 nm 附近,这与前面的仿真结果吻合。随着施加的轴向应变变大, DTP 处的干涉峰逐渐分裂成两个干涉峰, DTP 左侧的干涉峰蓝移, 右侧的干涉峰红移, 在 DTP 位置的单峰逐渐分裂成为一对双峰。然后, 在 DTP 附近选取了 5 个不同的干涉峰/谷, 这 5 个峰/谷对应的波长与应变的关系如图

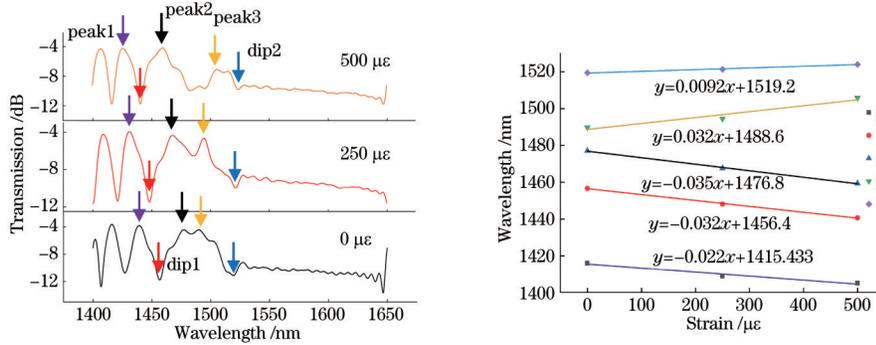


图 7 OMC 轴向应变实验结果。(a) 直径为 1.6 μm 的 OMC 在不同轴向应变下的光谱; (b) 不同波峰/谷的轴向应变灵敏度  
Fig. 7 Experimental results of axial strain of OMC. (a) Spectra of OMC with diameter of 1.6 μm under different axial strains; (b) axial strain sensitivities of different interference peaks or valleys

进一步研究不同直径下的 OMC 在  $\lambda_N = 1550$  nm 附近处的轴向应变灵敏度, 结果如图 8 所示: 当直径在 3~10 μm 范围内时, 灵敏度比较稳定, 约为  $-12$  pm/με; 当直径小于 3 μm 时, 其轴向应变灵敏度迅速增大, 在 1.6 μm 处可达  $-35$  pm/με。这是因为当 OMC 直径小于 3 μm 时, DTP 开始出现在可观测的波段内, 故可以通过控制 OMC 的直径来获得具有超高应变灵敏度的 OMC。本课题组制备的以双锥形微纳光纤为基础的马赫-曾德尔干涉传感器在 3~10 μm 直径范围内的轴向灵敏度约为  $-4$  pm/με<sup>[13]</sup>, OMC 在相同直径条件范围内的灵敏度与之相比提高了约 3 倍。

#### 4.2 振动传感实验

基于 OMC 的振动传感系统如图 9 所示。将矩形通孔悬臂梁固定在振动校准器 (ECS-1028) 上, 悬臂梁上已封装 OMC, 实物图见图 9 插图。可调激光器 (YENISTA, T100/1575) 输出 C~L 波段内的窄线宽激光, 另一端则通过光电探测器 (PD, NOUER) 将光信号转换为电信号并在示波器上显示。先将振动台的

7(b) 所示, 都呈现良好的线性关系。分别计算 5 个峰/谷对应的轴向应变灵敏度, 结果分别为  $-22, -32, -35, 32, 9$  pm/με。可见, 越靠近色散拐点的干涉峰的轴向应变灵敏度越大, 同时也观察到在 DTP 右侧的干涉条纹随着波长的增加迅速减弱消失, 这可能是因为 OMC 的奇模在这个波长范围内已经截止。

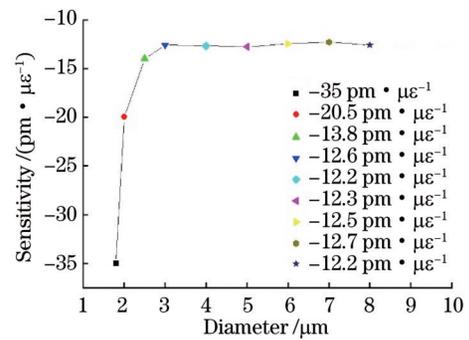


图 8 不同直径的 OMC 在 1550 nm 附近处的轴向应变灵敏度  
Fig. 8 Axial strain sensitivity of OMC with different diameters around 1550 nm

加速度设置为 0.1g, 振动台对悬臂梁施加标准的正弦信号, 然后调节激光器的输出波长, 观察传感器在示波器上的响应, 当  $\lambda_N = 1530$  nm 时, 示波器上波形振幅最大, 表明该波长位于 OMC 光谱的正交工作点, 如图 10

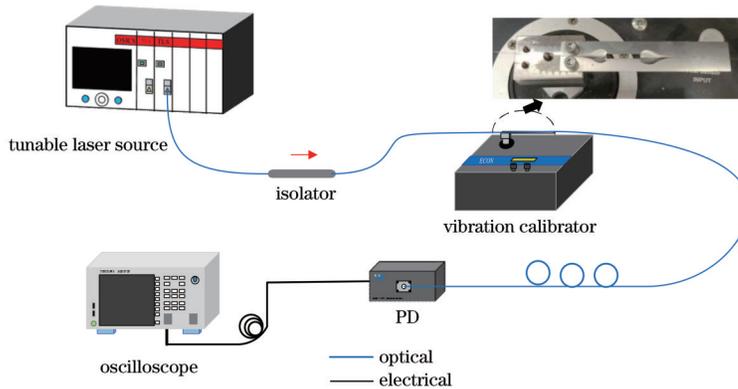


图 9 OMC 振动传感实验系统  
Fig. 9 OMC vibration sensing experimental system

所示。因此,选取  $\lambda_N = 1530 \text{ nm}$  为后续实验的工作波长点,然后在加速度为  $0.1g$ 、 $\lambda_N = 1530 \text{ nm}$  的条件下调节振动台的输出频率,得到在  $30 \sim 3500 \text{ Hz}$  频域范围内传感器的幅频响应,如图 9 所示。实验中选择  $30 \text{ Hz}$  和  $3500 \text{ Hz}$  作为检测的起点和终点是因为当振动台输出频率小于  $30 \text{ Hz}$  和大于  $3500 \text{ Hz}$  时,传感器检测信号的信噪比很低。

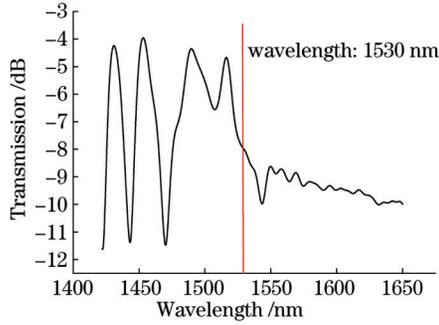


图 10 OMC 振动传感器光谱的正交工作点

Fig. 10 Orthogonal working point of spectrum of OMC vibration sensor

由图 11 可得,所制备的振动传感器在频率为  $52, 340, 920, 1900, 2800 \text{ Hz}$  处的响应出现峰值,这与前面计算的矩形悬臂梁谐振频率结果基本吻合,表明所设计的振动传感器能正常测量施加在矩形悬臂梁上的振

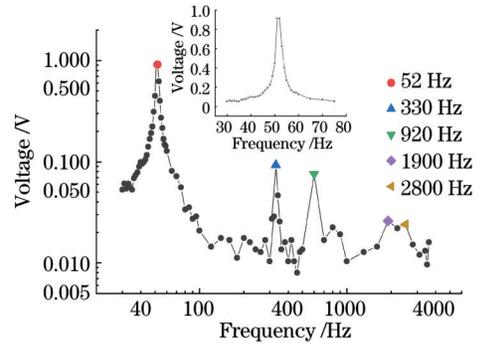


图 11 具有 DTP 的 OMC 振动传感器在  $30 \sim 3500 \text{ Hz}$  频域内的幅频响应(插图为一阶谐振频率前的响应)

Fig. 11 Amplitude-frequency response of OMC vibration sensor with DTP in frequency range of  $30 \sim 3500 \text{ Hz}$  (inset shows response before the first-order resonant frequency)

动信号。对频率为  $40, 300, 2000 \text{ Hz}$  的时域信号进行快速傅里叶变换(FFT)得到频域响应特性,如图 12 所示。频率为  $40, 300, 2000 \text{ Hz}$  的时域信号分别输出振幅为  $0.15, 0.03, 0.02 \text{ V}$  的正弦波。主频信号的频域响应远大于谐波信号,能被清晰地辨认出来,三个频率的信噪比分别为  $50 \text{ dB}, 38 \text{ dB}$  和  $25 \text{ dB}$ 。该传感器在  $40 \text{ Hz}$  时的波形最好且信噪比最大,这是因为振动传感器通常在一阶谐振频率之前具有比较高且稳定的响应。传感器在高频下的时域信号中有较多的谐波信

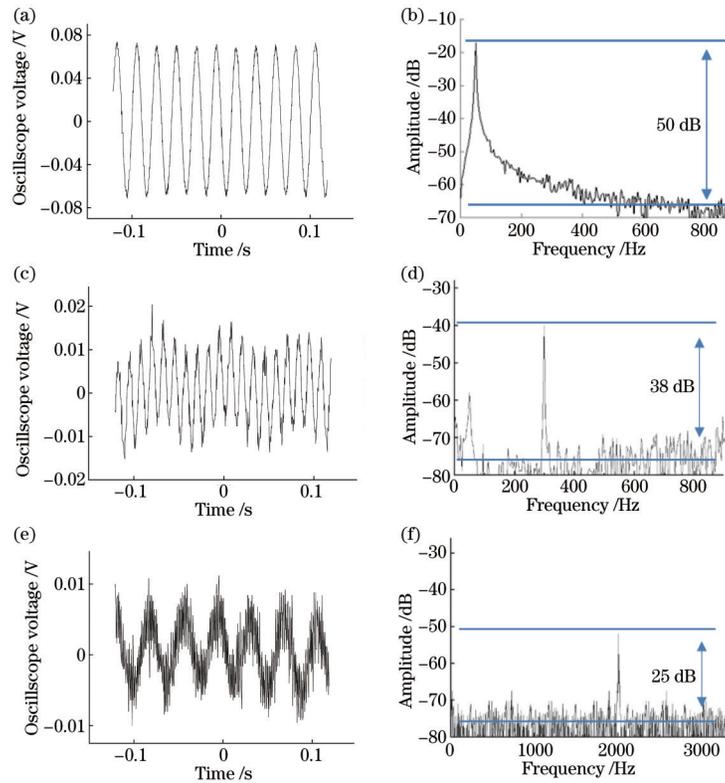


图 12 传感器在不同频率的时域信号和频域信号。频率分别为(a)  $40, (c) 300, (e) 2000 \text{ Hz}$  的时域信号;频率分别为(b)  $40, (d) 300, (f) 2000 \text{ Hz}$  时的频域信号

Fig. 12 Time domain signals and frequency domain signals of sensor at different frequencies. Time domain signals with frequencies of (a)  $40, (c) 300, \text{ and } (e) 2000 \text{ Hz}$ ; frequency domain signals with frequencies of (b)  $40, (d) 300, \text{ and } (f) 2000 \text{ Hz}$

号产生,且信噪比会降低很多,这与通孔悬臂梁的设计尺寸和形状有关,在较高频率下通孔悬臂梁会产生波浪形的动态形变,并通过振动传导到 OMC 处使其产生相应的动态形变,从而导致测量的振动信号会受到影响。

为了对传感器的加速度灵敏度进行探讨,首先将振动台的输出频率设置为 35 Hz,再将振动台输出加速度从 0.1g 调整到 0.6g,得到传感器的时域波形如图 13(a)所示。随着振动台输出加速度的增加,传感器响应信号的幅值也在增加。然后,将振动台的输出频率设置为 30 Hz 和 40 Hz,上述三个频率处于传感器

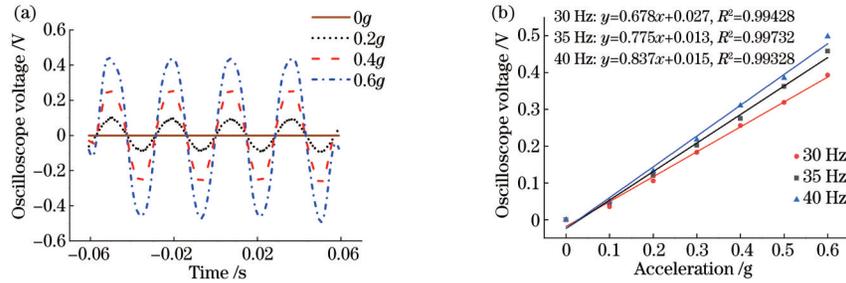


图 13 传感器加速度实验结果。(a)传感器在 35 Hz 处不同加速度下的时域波形;(b)传感器在 30,35,40 Hz 的加速度灵敏度  
Fig. 13 Results of sensor acceleration test. (a) Time-domain waveforms of sensor under different accelerations at 35 Hz; (b) sensor acceleration sensitivities at 30, 35, and 40 Hz

传感器对振动加速度的分辨率  $R$  可表示为

$$R = \frac{A}{10^{\frac{R_{\text{SNR}}}{20}}}, \quad (10)$$

式中: $A$  表示施加在振动传感器上的加速度大小; $R_{\text{SNR}}$  表示振动传感器在加速度  $A$  的作用下输出信号的信噪比。振动加速度分辨率是针对单个振动频率而言的,在不同的振动频率下都不一样。由图 12 的结果可知,所制备的 OMC 振动传感器在  $A=0.1g$  的条件下,在 40,300,2000 Hz 三个频率处的信噪比分别为 50 dB, 38 dB, 25 dB, 根据式 (10) 可计算得到在这三个频率下的分辨率分别为 0.0031, 0.0125, 0.0551 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )/ $\text{Hz}^{1/2}$ 。可见,所设计的振动传感器在微振动检测领域也有一定的应用前景和价值。

## 5 结 论

提出一种高灵敏度 OMC 振动传感器,该传感器可用于检测微振动和加速度。通过仿真计算得到不同直径下的 OMC 透射光谱图,然后通过火焰熔融拉锥法制备直径为 1.6  $\mu\text{m}$ 、DTP 在 1500 nm 附近的 OMC,其轴向应变灵敏度高达  $-35 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,是直径为 3~10  $\mu\text{m}$  的普通微纳光纤的 10 倍,是直径为 3~10  $\mu\text{m}$  的 OMC 的 3.5 倍。将 OMC 封装在中空矩形悬臂梁上构成具有高灵敏度的振动传感器,在 0~0.6g 微振动作用下,在一阶谐振频率之前的平坦区(约 40 Hz)内,传感器的加速度灵敏度高达  $85 \text{ mV}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$ ,且具有良好的线性度。当加速度低至 0.1g 时,传感器在 40 Hz 的信噪比可达 50 dB。所提出的振动传感器具有成本低、灵敏度高和结构紧凑等优点,在微振动和加速度检测领

域中具有良好的应用前景。

域中具有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] 黄炳森,高社成,黄新成,等.高敏光纤法布里-珀罗干涉应变传感器[J].光学学报,2020,40(6):0606002. Huang B S, Gao S C, Huang X C, et al. High-sensitivity fiber Fabry-Pérot interferometer strain sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0606002.
- [2] Gao S C, Zhang W G, Bai Z Y, et al. Microfiber-enabled in-line Fabry-Pérot interferometer for high-sensitive force and refractive index sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(9): 1682-1688.
- [3] Bai Z Y, Gao S C, Deng M, et al. Bidirectional bend sensor employing a microfiber-assisted U-shaped Fabry-Perot cavity[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 16871045.
- [4] Yang F, Wang Z K, Wang D N. A highly sensitive optical fiber strain sensor based on cascaded multimode fiber and photonic crystal fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2019, 47: 102-106.
- [5] 徐施施,冯文林.基于薄芯-三芯细锥-薄芯光纤结构的应变传感器[J].光学学报,2020,40(18):1806002. Xu S S, Feng W L. Strain sensor based on the thin-core tapered-three-core thin-core fiber structure[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1806002.
- [6] Liu W L, Sun C T, Geng T, et al. A new spring-shaped long-period fiber grating with high strain sensitivity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(14): 1163-1166.
- [7] Bao W J, Rong Q Z, Chen F Y, et al. All-fiber 3D vector displacement (bending) sensor based on an eccentric FBG[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8619-

- 8627.
- [8] Tian Q, Xin G G, Lim K S, et al. Cascaded Fabry-Perot interferometer-regenerated fiber Bragg grating structure for temperature-strain measurement under extreme temperature conditions[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30478-30488.
- [9] Li J H, Chen J H, Xu F. Sensitive and wearable optical microfiber sensor for human health monitoring[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(12): 1800296.
- [10] Fan H B, Chen L, Bao X Y. Chalcogenide microfiber-assisted silica microfiber for ultrasound detection[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1128-1131.
- [11] Xie L, Luo B B, Zhao M F, et al. Orientation-dependent optic-fiber accelerometer based on excessively tilted fiber grating[J]. *Optics Letters*, 2019, 45(1): 125-128.
- [12] Zhang G, Wu X Q, Ge Q, et al. Axial strain applied in-fiber Mach-Zehnder interferometer for acceleration measurement[J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 18596-18606.
- [13] Xia F, Zhao Y, Zheng H K, et al. Ultra-sensitive seawater temperature sensor using an FBG-cascaded microfiber MZI operating at dispersion turning point[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 132: 106458.
- [14] Xia F, Zhao Y, Peng Y. In-line microfiber MZI operating at two sides of the dispersion turning point for ultrasensitive RI and temperature measurement[J]. *Sensors and Actuators A*, 2020, 301: 111754.
- [15] Muhammad M Z, Jasim A A, Ahmad H, et al. Non-adiabatic silica microfiber for strain and temperature sensors[J]. *Sensors and Actuators A*, 2013, 192: 130-132.
- [16] Li W, Hu Z F, Li X Y, et al. High-sensitivity microfiber strain and force sensors[J]. *Optics Communications*, 2014, 314: 28-30.
- [17] Liu K J, Fan J H, Luo B B, et al. Highly sensitive vibration sensor based on the dispersion turning point microfiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Express*, 2021, 29(21): 32983-32995.
- [18] Qi K Y, Zhang Y D, Sun J F, et al. Highly sensitive strain sensor based on a sealed optical microfiber coupler[J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 59: 102313.
- [19] Li K W, Zhang N, Zhang N M Y, et al. Ultrasensitive measurement of gas refractive index using an optical nanofiber coupler[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 679-682.
- [20] Li K W, Zhang N M Y, Zhang N, et al. Spectral characteristics and ultrahigh sensitivities near the dispersion turning point of optical microfiber couplers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2409-2415.
- [21] Li K W, Zhang T, Liu G G, et al. Ultrasensitive optical microfiber coupler based sensors operating near the turning point of effective group index difference[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(10): 101101.
- [22] Fan H B, Ma W W, Chen L, et al. Ultracompact twisted silica taper for 20 kHz to 94 MHz ultrasound sensing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(14): 3889-3892.
- [23] Luo B B, Yang W M, Hu X Y, et al. Study on vibration sensing performance of an equal strength cantilever beam based on an excessively tilted fiber grating[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2128-2134.
- [24] 邓欧, 罗彬彬, 吴德操, 等. 反射型极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感特性[J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 2006001.
- Deng O, Luo B B, Wu D C, et al. Vibration sensing characteristics of reflection-type excessively tilted fiber grating cantilever[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2006001.