

引用格式: ZOU Xue, DENG Ou, LUO Bin-bin, *et al.* Research on the Performance of Cantilever Low Frequency Vibration Sensor Based on Thin-diameter Excessively Tilted Fiber Grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1206002

邹雪, 邓欧, 罗彬彬, 等. 基于细直径极大倾角光纤光栅的悬臂梁低频振动传感器性能研究[J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1206002

# 基于细直径极大倾角光纤光栅的悬臂梁低频 振动传感器性能研究

邹雪, 邓欧, 罗彬彬, 吴德操, 赵明富, 钟年丙, 宋涛, 蒋上海,  
谢浪, 柳鹏, 刘恩华

(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:** 为了测量结构的低频振动参数, 提出一种细直径极大倾角光纤光栅的悬臂梁振动加速度传感器, 并研究了该传感器的特性及优化方法. 首先, 对细直径极大倾角光纤光栅的轴向应变、弯曲应变特性以及悬臂梁振动传感模型进行理论分析; 然后, 通过静态实验进行验证并分析轴向应变和弯曲应变对悬臂梁振动的影响; 最后, 完成悬臂梁动态振动实验性能测试, 并与标准直径极大倾角光纤光栅传感器进行对比. 实验结果表明: 在轴向拉力和弯曲应力作用下, 细直径极大倾角光纤光栅的 TE 模和 TM 模的轴向应变灵敏度分别为  $-4.68 \text{ pm}/\mu\epsilon$  和  $-3.55 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , 弯曲应变的波长灵敏度分别为  $-8.82 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$  和  $-7.71 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ , 弯曲应变的强度响应灵敏度分别为  $6.71 \text{ dB}/\text{m}^{-1}$  和  $0.95 \text{ dB}/\text{m}^{-1}$ , 细直径极大倾角光纤光栅具有比标准直径极大倾角光纤光栅更高的应变灵敏度; 悬臂梁振动检测实验中, 细直径极大倾角光纤光栅谐振波长 3 dB 点的最大加速度灵敏度达  $500 \text{ mV}/g$  以上, 为相同条件下标准直径极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感器的 5 倍左右; 与快速傅里叶变换后的频谱图对比结果表明, 细直径极大倾角光纤光栅传感器的谐波分量更少. 可见, 在低频振动检测时细直径极大倾角光纤光栅的抗噪声干扰能力更强, 检测准确度更高.

**关键词:** 光纤传感器; 细直径极大倾角光纤光栅; 振动传感; 悬臂梁; 轴向应变; 弯曲应变

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204912.1206002

## Research on the Performance of Cantilever Low Frequency Vibration Sensor Based on Thin-diameter Excessively Tilted Fiber Grating

ZOU Xue, DENG Ou, LUO Bin-bin, WU De-cao, ZHAO Ming-fu, ZHONG Nian-bing,  
SONG Tao, JIANG Shang-hai, XIE Lang, LIU Peng, LIU En-hua

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

**Abstract:** In order to measure the low-frequency vibration parameters of the structure, a thin-diameter Excessively Tilted Fiber Grating (ExTFG) cantilever vibration acceleration sensor is proposed, and the characteristics and optimization methods of the sensor are studied. Firstly, the characteristics of axial strain and bending strain of the thin-diameter ExTFG and the sensor model of vibration of cantilever beam are

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.61875026), 重庆市教委科学技术研究计划青年项目(No.KJQN201901124), 重庆市教委科学技术研究计划重点项目(No.KJZD-K201905601), 重庆理工大学创新基金(Nos.ycx20192050, ycx20192054)

**第一作者:** 邹雪(1988—), 女, 实验师, 硕士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: zouxue@cqut.edu.cn

**通讯作者:** 罗彬彬(1981—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: luobinbin@cqut.edu.cn

**收稿日期:** 2020-07-07; **录用日期:** 2020-08-29

<http://www.photon.ac.cn>

analyzed theoretically. Then, the influence of axial tension and bending strain on the vibration of the cantilever beam is analyzed by static experiments. Finally, the dynamic vibration test of cantilever beam is completed and compared with the standard-diameter ExTFG sensor. Experimental results indicate that under the effect of axial tension and bending stress, the axial strain sensitivity of TE and TM mode of the thin ExTFG is  $-4.68 \text{ pm}/\mu\epsilon$  and  $-3.55 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , respectively, the wavelength based sensitivity of bending strain is  $-8.82 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$  and  $-7.71 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ , respectively, the intensity based sensitivity of bending strain is  $6.71 \text{ dB}/\text{m}^{-1}$  and  $0.95 \text{ dB}/\text{m}^{-1}$ , respectively, and the thin ExTFG has a higher strain sensitivity than that of the standard ExTFG. In the cantilever vibration detection experiment, the maximum acceleration sensitivity at the 3 dB point is more than  $500 \text{ mV}/g$ , which is about 5 times of the standard-diameter ExTFG sensors under the same conditions. Compared with the spectral diagram after FFT transformation, the harmonic component of the thin-diameter ExTFG sensor is less than those of the standard one. Therefore, in the vibration sensing, the thin-diameter ExTFG has stronger anti-noise interference ability and higher detection accuracy.

**Key words:** Fiber sensor; Thin-diameter excessively tilted fiber grating; Vibration sensing; Cantilever beam; Axial strain; Bending strain

**OCIS Codes:** 060.2370; 060.3735; 120.0280

## 0 引言

低频振动是大型工程建设、交通运输、航天航空等领域的重要检测对象之一,通过对结构振动位移、速度、加速度及频率等参数的实时监测,有助于预测结构失效的潜在威胁.光纤振动传感器具有尺寸微小、抗电磁干扰能力强、灵敏度高、传输距离远、插入损耗低、复用能力强等优点<sup>[1]</sup>.ZHAO Z等<sup>[2]</sup>利用空间集成迈克尔干涉结构,实现多芯光纤在弱频域的振动检测.成振龙等<sup>[3]</sup>将法布里-珀罗腔粘接在等强度悬臂梁上,腔长随振动周期性改变并引起反射光谱的改变,实现了对振动信号频率和幅值的测量.基于光纤 Bragg 光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 的振动检测方法采用波长解调的方式,具有稳定性好,不受光强波段影响的优点.TSUDA H等<sup>[4]</sup>提出一种环形腔镜式的光纤环形激光器 FBG 振动传感系统,该系统能够有效改善 FBG 波长对振动信号不敏感的特性.GUO T等<sup>[5]</sup>提出一种基于多模光纤的倾斜光纤布拉格光栅 (Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG) 振动传感器,将其与单模光纤耦合连接能够表现出良好的偏振极化和弯曲特性,从而实现二维矢量振动检测.RONG Q等<sup>[6]</sup>提出将 FBG 刻写于薄芯光纤的包层中,与标准单模光纤拼接后可实现基于光强的加速度测量.TANAKA S等<sup>[7]</sup>提出一种基于强度调制的长周期光纤光栅 (Long Period Fiber Grating, LPFG) 机械振动传感器,对检测石油液化气振动具有较高灵敏度且动态检测范围超过 90 dB.

极大角度倾斜光纤光栅 (Excessively Tilted Fiber Grating, ExTFG) 是近十几年来发展起来的一类特种倾斜光栅.2006年,ZHOU K等<sup>[8]</sup>首次提出在标准单模光纤中写入 ExTFG,并研究其对温度、应变和周围介质折射率的传感性能,与普通 FBG 和 LPFG 相比,ExTFG 具有更高的轴向应变灵敏度和比 FBG 更低的温度灵敏度<sup>[9]</sup>.CHEN X等<sup>[10]</sup>和 MOU C等<sup>[11]</sup>分别提出利用 ExTFG 的双折射模式之间发生光耦合原理,实现扭矩传感器和液位传感器.罗彬彬等<sup>[12]</sup>提出基于细直径 ExTFG 的 pH 值传感器,采用智能水凝胶涂敷于光栅表面以增强其应变的灵敏度.LU T等<sup>[13]</sup>实现基于 ExTFG 的折射率方向灵敏原理特性的磁场矢量传感器.在 ExTFG 的振动传感方面的研究,本课题组提出了标准单模光纤 ExTFG 悬臂梁低频振动传感原理、系统及特性,采用简单的光强解调方式<sup>[14-15]</sup>,并进一步提出采用其谐振峰 3 dB 波长点进行优化设计,TE 模和 TM 模对应的振动加速度灵敏度分别达到  $113.54 \text{ mV}/g$  和  $100.93 \text{ mV}/g$ <sup>[16]</sup>.

但是,在特定的低频振动环境中,仍然需要进一步提高 ExTFG 的振动检测灵敏度和准确度.因此,在课题组之前的研究基础上<sup>[14,16]</sup>,本文提出基于细直径光纤 (SM1500) 中写入 ExTFG 的悬臂梁低频振动传感器,并对其性能参数进行理论分析和实验验证,最后与标准直径 ExTFG 的悬臂梁低频振动传感器的性能进行对比.

## 1 理论研究

### 1.1 细直径 ExTFG 的耦合模特性

在细直径光纤 (SM1500,  $4.2 \mu\text{m}/80 \mu\text{m}$ ) 写入 ExTFG,可将满足相位匹配条件的纤芯基模耦合到前向

包层模,其光路耦合原理如图1所示,因此ExTFG的模式耦合与长周期光纤光栅(LPFG)类似,可看作是周期很短的LPFG,可用LPFG的模式耦合理论来分析ExTFG的耦合模特性<sup>[8]</sup>.但是,由于光栅调制截面在轴向法线上的不对称性,使得ExTFG的每个耦合包层模都具有快、慢轴对应的两个简并模式<sup>[9]</sup>,即TE/TM模.通过偏振控制器(Polarized Controller, PC)调节入射光的偏振态,可得到完全激发TE模、TM模和等激励三个模式.图2为所制作的细直径为81°ExTFG在C-L波段的透射光谱,光栅在轴向的周期为28 μm,长度为12 mm,由图可见,其偏振相关谐振峰间距约10 nm,3 dB带宽为2 nm;而标准直径为81°ExTFG的偏振相关谐振峰间距约5 nm,3 dB带宽为3 nm<sup>[9]</sup>,这是因为对于包层及纤芯直径更小的ExTFG,其纤芯基模到前向包层模的耦合更容易变成辐射模而泄露,能够形成谐振的包层模的阶数会降低,从而在C-L波段的偏振相关谐振峰的间距及3 dB带宽都会发生明显变化.根据YAN Z等<sup>[17]</sup>对细直径(SM1500)ExTFG的耦合模分析,其在C-L波段的包层模阶数为24阶,而标准直径(SMF-28)ExTFG在C-L波段的谐振耦合模为35阶.本研究制作的细直径(SM1500)ExTFG的结构参数及模式耦合特性与文献<sup>[17]</sup>中的一致.

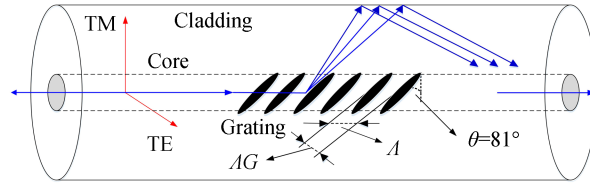


图1 细直径81°ExTFG的光路耦合原理

Fig.1 Schematic diagram of optical path coupling of a thin-diameter 81°ExTFG

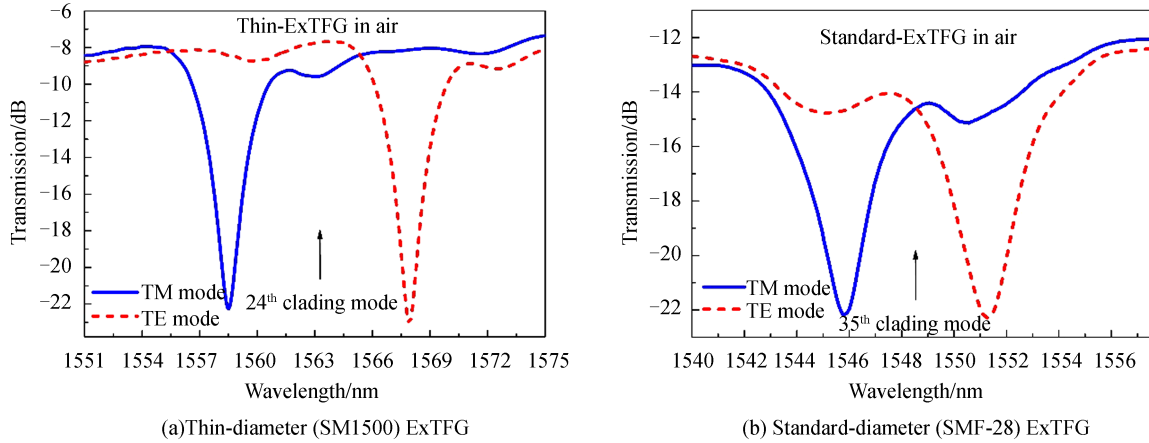


图2 ExTFG在C-L波段中TM模和TE模在完全激励作用下的光谱

Fig. 2 Spectra of TM and TE modes of ExTFG under full excitation in C-L band

## 1.2 细直径ExTFG的轴向应变和弯曲应变

根据ExTFG的相位匹配条件,谐振波长 $\lambda_{res}$ 可表示为<sup>[9]</sup>

$$\lambda_{res} = (n_{co}^{eff} - n_{cl,m}^{i,eff}) \frac{\Lambda_G}{\cos\theta} \quad i = \text{TM or TE} \quad (1)$$

式中, $n_{co}^{eff}$ 与 $n_{cl,m}^{i,eff}$ 分别为纤芯基模与第 $m$ 阶包层模的有效折射率,满足 $n_{cl,m}^{i,eff} < n_{co}^{eff}$ ;  $\Lambda_G$ 为光栅的正常周期; $\theta$ 为光纤光栅的倾斜角度.当在轴向方向上对ExTFG施加一拉力时,式(1)等号两边对轴向应变 $\epsilon$ 取微分可表示为

$$\frac{d\lambda_{res}^m}{d\epsilon} = \left( \frac{dn_{co}^{eff}}{d\epsilon} - \frac{dn_{cl,m}^{i,eff}}{d\epsilon} \right) \frac{\Lambda_G}{\cos\theta} + (n_{co}^{eff} - n_{cl,m}^{i,eff}) \frac{d}{d\epsilon} \frac{\Lambda_G}{\cos\theta} \quad (2)$$

根据文献<sup>[18]</sup>,式(2)可表示为

$$\frac{d\lambda_{res}}{d\epsilon} = \lambda_{res} \cdot \gamma \cdot (1 + \Gamma_{strain}) \quad (3)$$

式中,  $\gamma$  为光纤的波导色散因子,  $\Gamma_{\text{strain}}$  表示谐振波长的应变灵敏度因子, 定义为

$$\Gamma_{\text{strain}} = \frac{\eta_{\text{co}} n_{\text{co}}^{\text{eff}} - \eta_{\text{cl}} n_{\text{cl},m}^{i,\text{eff}}}{n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{i,\text{eff}}} = \eta_{\text{co}} \frac{1 - (\eta_{\text{cl}}/\eta_{\text{co}})(n_{\text{cl},m}^{i,\text{eff}}/n_{\text{co}}^{\text{eff}})}{1 - n_{\text{cl},m}^{i,\text{eff}}/n_{\text{co}}^{\text{eff}}} \quad (4)$$

式中,  $\eta_{\text{co}}$  和  $\eta_{\text{cl}}$  分别表示纤芯和包层的弹光系数. 据文献[11]的理论仿真结果, 当模式阶数  $m$  大于 12 阶时,  $\gamma < 0, 0 < \Gamma_{\text{strain}} < -1$ ; 当模式阶数  $m$  大于 20 阶时, 24 阶和 35 阶包层模的  $\gamma$  因子差异很小 ( $\gamma \approx -1$ ). 因此, ExTFG 在轴向应力下会发生蓝移, 且 ExTFG 的轴向应变灵敏度主要取决于  $\Gamma_{\text{strain}}$ . 本研究中用于制作 ExTFG 的石英光纤的纤芯和包层弹光系数分别为  $\eta_{\text{co}} = -0.233$ ,  $\eta_{\text{cl}} = -0.22$ , 根据文献[17]可知, 当包层直径减小, ExTFG 高阶谐振包层模逐步变成辐射模泄露, 能够产生谐振包层模的阶数降低, 其包层模的有效折射率  $n_{\text{cl},m}^{i,\text{eff}}$  会明显降低, 结合式(3)、(4)分析可知, 当光纤直径缩小,  $\Gamma_{\text{strain}}$  会增大,  $d\lambda_{\text{res}}/d\epsilon$  随之增大. 因此, 细直径 ExTFG 相比于标准直径 ExTFG 具有更高的轴向应变灵敏度.

同理, 当发生弯曲应变时, 由于弯曲的作用力导致 ExTFG 在轴向方向和切向方向上都受到力的作用, 其中切向方向上的应力作用会使得 ExTFG 的等效周期减小<sup>[16]</sup>, 根据式(1)此时谐振波长也会发生蓝移. 但由于细直径 ExTFG 比标准直径 ExTFG 具有更小的横截面积, 因此在相同的弯曲曲率下, 前者受到的切向应力会大于后者, 其谐振波长较后者的蓝移量要大. 综上所述, 对于基于 ExTFG 的悬臂梁式振动传感应用, 理论上细直径 ExTFG 较标准直径 ExTFG 具有更高的振动加速度灵敏度.

## 2 实验与讨论

### 2.1 轴向应变和弯曲应变

在轴向应变测试实验中, 采用 3 轴挠性位移台 (MBT616D, Thorlabs) 将细直径 ExTFG 的一端尾纤固定, 另一端调节差分调节器可产生在轴向方向上不同大小的拉力. 通过拉伸光纤得到轴向应变下 TM 模和 TE 模光谱的变化如图 3 所示, 可以看出与标准直径 ExTFG 变化趋势一致均发生蓝移, 且呈良好的线性响应关系.

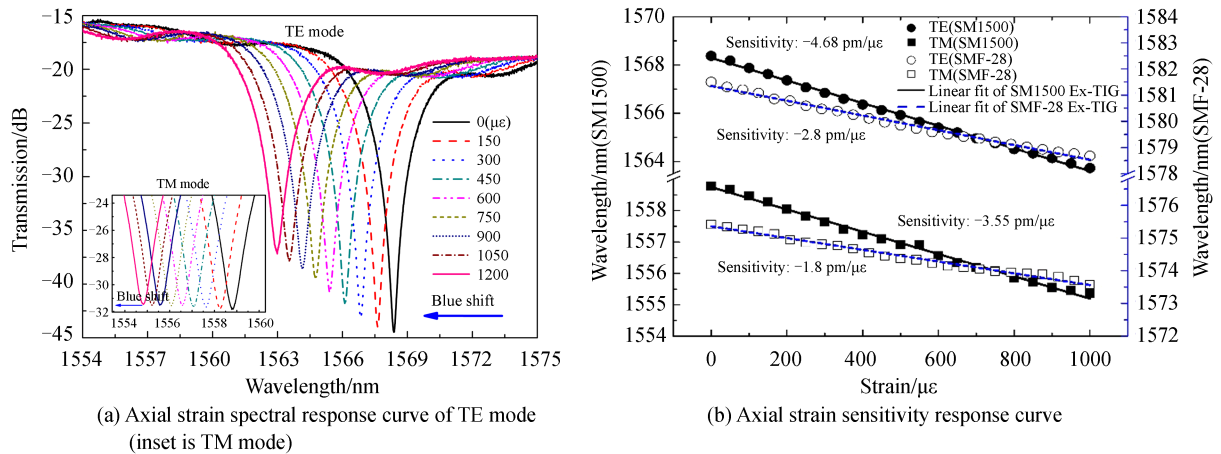


图 3 细直径 ExTFG 和标准直径 ExTFG 轴向应变响应对比

Fig. 3 Comparison of axial strain response between thin-diameter ExTFG and standard-diameter ExTFG

由表 1 可见, 虽然不同直径的 ExTFG 波长响应变化趋势一致, 但在其他参数相同情况下, 直径越小的 ExTFG 轴向应变的波长灵敏度越大, 本文采用的细直径 ExTFG 灵敏度达到  $-4.68 \text{ pm}/\mu\epsilon$  (TE 模) 和  $-3.55 \text{ pm}/\mu\epsilon$  (TM 模), 且 TE 模的灵敏度大于 TM 模.

在弯曲应变实验中对结合动态振动的传感特性进行分析, 实验采用悬臂梁结构搭建传感实验平台, 模拟振动过程中的静态弯曲测试, 将 ExTFG 紧贴封装在悬臂梁的沿轴向方向表面, 通过位移调节器下压悬臂梁的自由端从而带动 ExTFG 形成弯曲状态, 根据 1.2 节的理论分析, ExTFG 会受到轴向的拉力和边缘切向力共同作用, 从而使 ExTFG 的光谱曲线发生响应变化.

表 1 细直径与标准直径 ExTFG 的轴向应变波长灵敏度  
Table 1 Wavelength based axial strain sensitivity of the thin- and standard-diameter ExTFGs

Response mode	Wavelength based axial strain sensitivity of the thin-diameter ExTFG/ $(\text{pm}\cdot\mu\epsilon^{-1})$	Wavelength based axial strain sensitivity of the standard-diameter ExTFG/ $(\text{pm}\cdot\mu\epsilon^{-1})$
TE	-4.68	-2.8
TM	-3.55	-1.8

由图 4(a)可见,对于弯曲应变的波长响应,直径越小 ExTFG 的灵敏度越高,细直径 ExTFG 的 TE 模和 TM 模分别为  $-8.82 \text{ nm/m}^{-1}$  和  $-7.71 \text{ nm/m}^{-1}$ ,是标准直径 ExTFG 的 2.5~3 倍;由图 4(b)可见,细直径 ExTFG 弯曲应变的强度响应灵敏度分别为  $6.71 \text{ dB/m}^{-1}$  (TE 模)和  $0.95 \text{ dB/m}^{-1}$  (TM 模),相较于标准直径 ExTFG 分别提高 1 倍和降低 0.8 倍;但 TE 模的强度变化是 TM 模的 7 倍,且波长变化也要优于 TM 模.对于弯曲的情况,ExTFG 光谱变化的过程是光纤受到切向应力和轴向应变的综合作用的结果,由于 TE 模的轴向应变灵敏度较 TM 模的大 32% (见图 4(a)),因此,TE 模的弯曲灵敏度始终要大于 TM 模的,这与 1.2 节的理论分析结论一致.

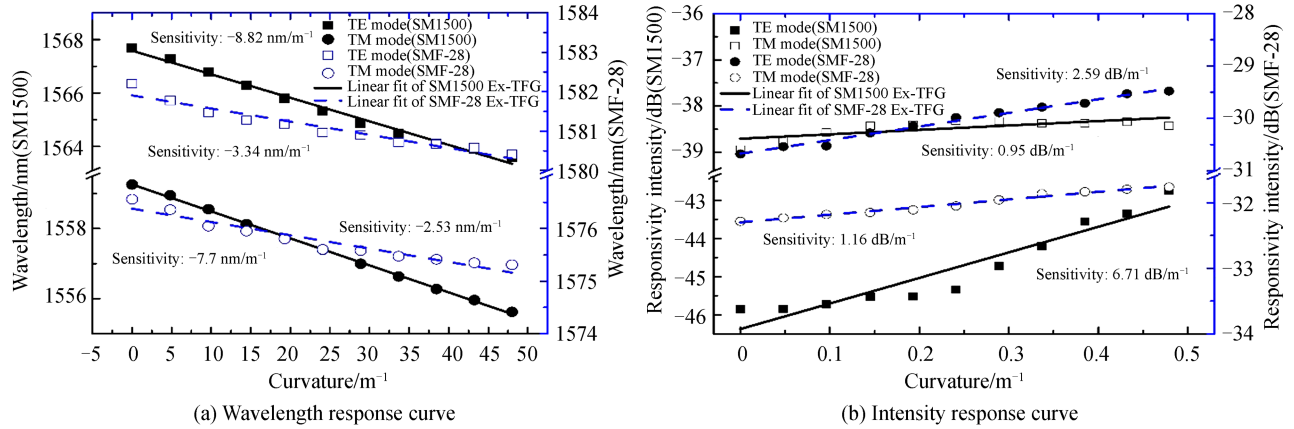


图 4 细直径 ExTFG 和标准直径 ExTFG 弯曲应变响应对比

Fig. 4 Comparison of bending strain response between thin- and standard-diameter ExTFGs

## 2.2 细直径 ExTFG 的悬臂梁振动传感系统

基于 ExTFG 的悬臂梁振动传感系统如图 5 所示,检测系统由信号发生器、驱动电源、可调谐激光光源、光隔离器、起偏器、偏振控制器、压电陶瓷 (PZT)、光电探测模块、等强度悬臂梁、数字示波器、细直径 ExTFG 组成.

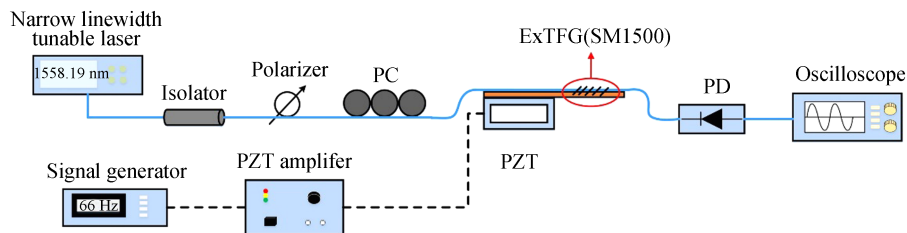


图 5 基于细直径 ExTFG 的悬臂梁振动检测系统

Fig. 5 Cantilever vibration detection system based on the thin-diameter ExTFG

系统检测原理为:1)光源发射的窄线宽激光(可调谐带宽:196.25~186.35 THz,  $\pm 0.5 \text{ GHz}$ )经过起偏器和偏振控制器产生线偏光,调节偏振控制器使得经过细直径 ExTFG 的线偏光分别工作在 TE 模或 TM 模的完全激励状态;2)信号发生器输出的正弦信号经电源 (Amplifier)放大驱动 PZT 将振动信号加载到等强度悬臂梁上,从而使紧贴封装在悬臂梁上表面中轴线的细直径 ExTFG 传感器随悬臂梁做等频率的受迫振动,因此细直径 ExTFG 传感器会受到轴向应力和弯曲应变的共同作用,使 TE 模或 TM 模的谐振光谱发生漂移,

最终导致透射光强在给定的窄线宽光的波长点上发生变化.考虑到传感器谐振光谱的不同位置波长点的斜率不同,所以单位波长漂移范围内其光强的变化率不同,即反映的振动灵敏度不同.为探究谐振峰的不同波长点处的振动灵敏度,分别采用谐振峰峰值点强度的25%、50%(3 dB点)、75%、100%处对应的波长点作为测试点进行检测;3)通过光电探测模块将经过振动加载后的光信号的变化量转化为电信号的变化量,并输出到示波器上进行实时监测.

### 2.3 细直径 ExTFG 的低频振动传感特性

根据2.2节所述系统原理,搭建细直径 ExTFG 振动传感平台.综合考虑振动系统的自然频率和灵敏度因素,实验选用的悬臂梁结构的梁长度为70 mm,底部宽度为30 mm,厚度为0.3 mm,悬臂梁材料选用黄铜制作,其杨氏模量  $E$  为110 Gpa,泊松比为0.34,密度为  $8.6 \text{ g/cm}^3$ .所选 PZT 的输出特性与文献[16]一致,当输入频率小于 PZT 的固有频率(500 Hz)时,PZT 的输出位移变化不大,能够为等强度悬臂梁提供稳定的振动信号;考虑到细直径 ExTFG 的特殊结构和承载能力,且在静态实验中对轴向应变、弯曲应变表现出良好的响应特性,实验选择1 V作为信号发生器的最大输出电压值,选择20~220 Hz范围内的振动频率进行 ExTFG 的低频振动传感特性实验.

在细直径 ExTFG 谐振光谱(图2(a))选取 TE 模的1569.11 nm(25%)、1568.64 nm(3 dB点)、1568.27 nm(75%)、1567.62 nm(100%)波长点和 TM 模的1557.7 nm(25%)、1558.19 nm(3 dB)、1558.53 nm(75%)、1558.97 nm(100%)波长点进行检测.采集振动信号的示波器数据经过分析后得到振动传感输出响应如图6

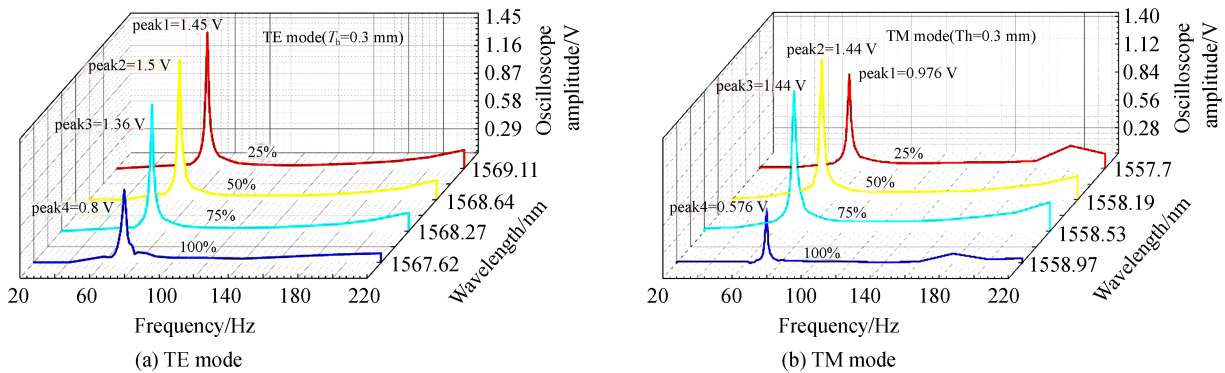


图6 细直径 ExTFG 的不同波长点的振动传感输出响应

Fig. 6 Vibration sensing output response of different wavelength points of thin-diameter ExTFG.

所示,从图中可以看出悬臂梁的固有频率为72 Hz,TE模在3 dB点处其输出幅值达到最大1.5 V, TM模的3 dB点和75%点处的最大输出幅值为1.44 V.振动加速度灵敏度  $S$  的计算公式为

$$S = V/a \quad (5)$$

式中,  $V$  是示波器的输出幅值,  $a$  是加速度.根据文献[16]对 PZT 的输出标定结果,该结构尺寸的悬臂梁在谐振频率(72 Hz)的振动加速度  $a$  为  $2.82 \text{ g}$ ,  $g$  表示重力加速度值( $g=9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),由此计算得到 TE 模和 TM 模在3 dB点处的最大加速度灵敏度分别为  $S_{\text{TE}}=531.92 \text{ mV/g}$ 、 $S_{\text{TM}}=510.64 \text{ mV/g}$ ,为 TE、TM 模谐振峰的100%波长点( $S_{\text{TE}}=283.69 \text{ mV/g}$ 、 $S_{\text{TM}}=204.26 \text{ mV/g}$ )的2倍多,详见表2,且为标准直径(SMF-28)

表2 谐振频率为72 Hz时细直径 ExTFG TM模和TE模的谐振峰不同波长点的振动灵敏度

Table 2 Vibration sensitivity of TM and TE modes of thin diameter ExTFG at different wavelengths of resonance peak with resonance frequency of 72 Hz

Wavelength point (TM/ TE)	25%	50% (3 dB point)	75%	100%
Property parameter				
Output amplitude V/V	0.976/1.46	1.44/1.5	1.44/1.36	0.576/0.8
Natural frequency $f$ /Hz	72	72	72	72
Acceleration $a/g$	2.82	2.82	2.82	2.82
Maximum acceleration sensitivity $S/(\text{mV}\cdot\text{g}^{-1})$	346.10/517.73	510.64/531.92	510.634/482.27	204.26/283.69

ExTFG<sup>[16]</sup>的5倍左右.由此可见,当加速度灵敏度 $S$ 在振动频率接近固有频率时可达到最大值,即当被测信号的频率等于悬臂梁的谐振频率时,传感器响应最为灵敏,当示波器输出幅值异常高的时候,悬臂梁结构正处于其固有频率的振动范围,通过实时监测,可以判断悬臂梁结构是否处于共振状态.而当被测信号的频率在 $0\sim 68\text{ Hz}$ 和 $82\sim 220\text{ Hz}$ 范围内,示波器输出幅值基本不变,即加速度灵敏度 $S$ 近似为一固定常数,该区域为该频率范围的响应平坦区.综上,说明采用细直径ExTFG制作的悬臂梁低频传感器是有效的,相比标准直径的ExTFG,细直径ExTFG在低频振动检测中具有更高的检测灵敏度.

为研究传感器的输入-输出特性,加载正弦信号输入电压为 $1\sim 5\text{ V}$ ,振动频率分别为 $67\text{ Hz}$ 、 $69\text{ Hz}$ 、 $72\text{ Hz}$ 、 $77\text{ Hz}$ 和 $160\text{ Hz}$ 时,实验得到输出幅值响应曲线如图7所示.可见细直径ExTFG传感器同样具有良好的线性输出特性,且越接近固有频率,悬臂梁输出的振动幅度越大.

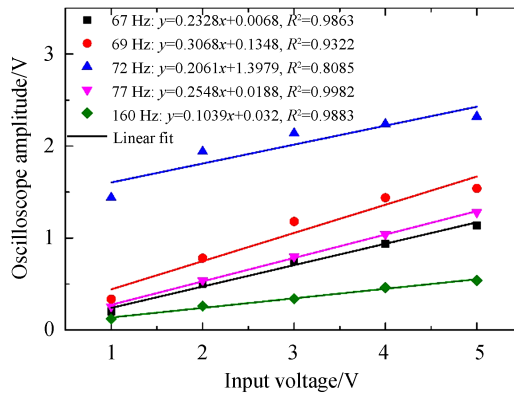
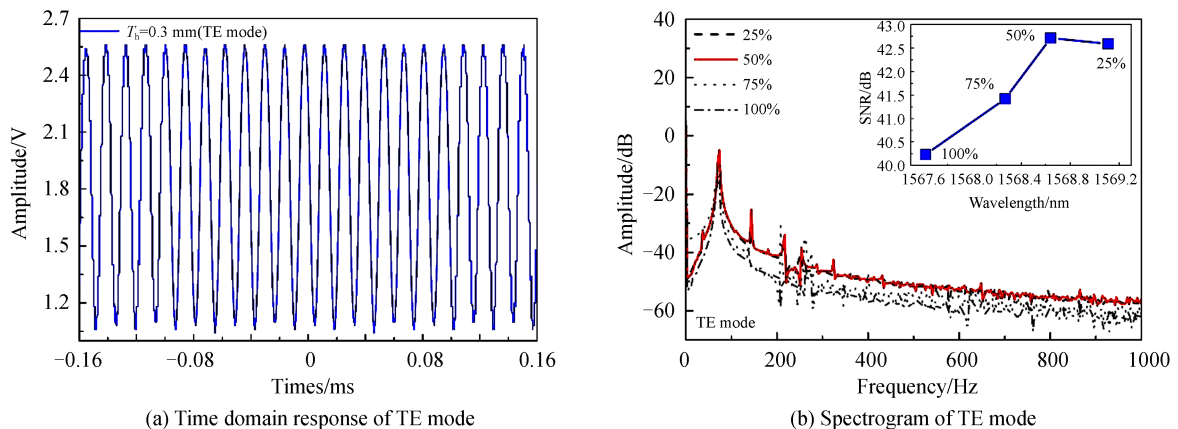


图7 细直径ExTFG在不同振动频率下的输入-输出幅值响应  
Fig. 7 Input-output amplitude response of the thin-diameter ExTFG at different vibration frequencies

图8(a)与(c)为厚度 $T_0=0.3\text{ mm}$ 的等强度悬臂梁在输入频率为 $72\text{ Hz}$ 、输入电压为 $1\text{ V}$ 时TE和TM模的3 dB点时域信号,可见TE、TM模的3 dB点均有比较完整的正弦振动信号.图8(b)与(d)分别为经过快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)后TE和TM模谐振峰的25%、50%、75%和100%波长点的频谱,可知细直径ExTFG谐振峰的25%、50%、75%和100%波长点的谐振主频都在固有频率 $72\text{ Hz}$ ,但是3 dB点(红色实线)相对于其它谐振峰百分点对2倍频、3倍频具有更好的抑制效果,并且3 dB点信噪比(Signal-to-noise Ratio, SNR)也是最高的;如图8(b)与(d)插图所示,TE模的3 dB点和100%波长点的SNR分别为 $42.7\text{ dB}$ 和 $40.2\text{ dB}$ ,TM模的3 dB点和100%波长点的SNR为 $52.9\text{ dB}$ 和 $47.9\text{ dB}$ ,即3 dB点的SNR最优,这是因为3 dB点处于谐振峰边缘斜率最大位置,在谐振波长变化值相等的情况下,该点处的幅值变化量最大.因此,可以通过选取谐振峰的3 dB波长点来提高振动检测的灵敏度和信噪比.

另外,选取细直径ExTFG的3 dB点作为波长检测点与文献[16]中标准直径ExTFG进行对比,两者SNR相近,但细直径ExTFG传感器的谐波分量更少,说明在振动检测时细直径ExTFG的抗噪声干扰能力



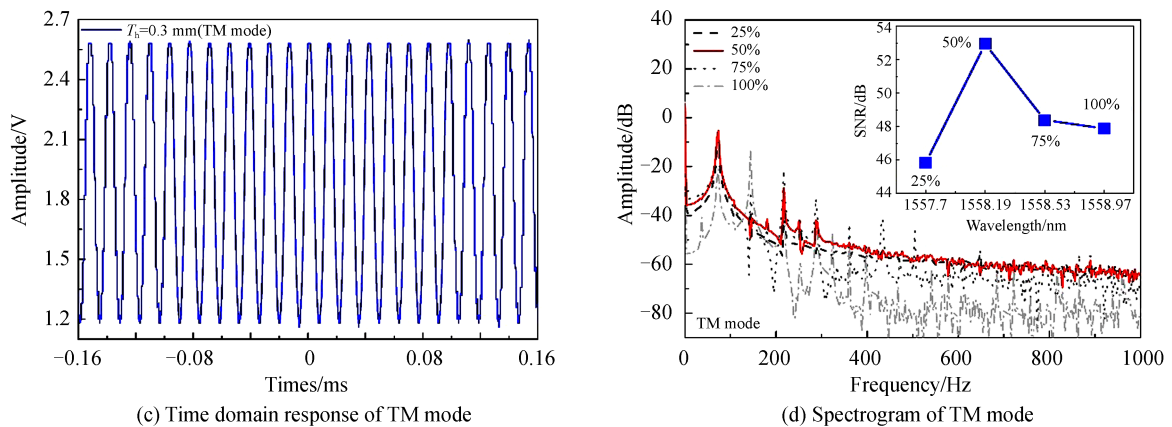


图8 谐振光谱3 dB点的时域响应和谐振峰的25%、50%、75%和100%波长点的频谱(插图为对应的SNR)  
 Fig. 8 The time domain response of the 3 dB point of resonance peak of the fine diameter ExTFG and the frequency spectrum of the 25%, 50%, 75% and 100% wavelength points of the resonance peak (the inset is the SNR)

更强,检测准确度更高.

### 3 结论

本文提出一种细直径(SM1500) ExTFG的振动加速度传感器,并与标准直径(SMF-28) ExTFG传感特性进行对比.实验结果表明不同直径的ExTFG对于轴向拉力和弯曲应变的响应灵敏度不同,在相同条件下,直径越小灵敏度越大.在低频振动检测中,细直径ExTFG的加速度能够达到500 mV/g以上,为标准直径ExTFG的5倍,并且其抗噪声干扰能力更强,检测准确度更高.综上所述,细直径ExTFG作为振动加速度传感器是有效的,且具有良好的传感性能.

#### 参考文献

- [1] VOHRA S T, JOHNSON G A, TODD M D, *et al.* Distributed strain monitoring with arrays of fiber Bragg grating sensors on an in-Construction steel box-girder bridge [C]. IEICE transactions on electronics, 2000, **83**(3): 454-461.
- [2] ZHAO Z, LIU Z, TANG M, *et al.* Robust in-fiber spatial interferometer using multicore fiber for vibration detection[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(23): 29629-29637.
- [3] CHENG Zhen-long, ZHAO Jian-lin, ZHOU Wang-min, *et al.* A vibration sensor based on fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 47-52.  
成振龙,赵建林,周王民,等.一种基于光纤光栅法布里-珀罗腔的低频振动传感器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 47-52.
- [4] TSUDA H. Fiber Bragg grating vibration-sensing system, insensitive to Bragg wavelength and employing fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(14): 2349-2351.
- [5] GUO T, SHANG L, RAN Y, *et al.* Fiber-optic vector vibroscope[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(13): 2703-2705.
- [6] RONG Q, QIAO X, GUO T, *et al.* Orientation-dependent fiber-optic accelerometer based on grating inscription over fiber cladding[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(23): 6616-6619.
- [7] TANAKA S, SOMATOMO H, WADA A, *et al.* Fiber-optic mechanical vibration sensor using long-period fiber grating [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, **48**(7S): 07GE05.
- [8] ZHOU K, ZHANG L, CHEN X, *et al.* Optic sensors of high refractive-index responsivity and low thermal cross sensitivity that use fiber Bragg gratings of >80 tilted structures[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(9): 1193-1195.
- [9] YAN Z, SUN Q, WANG C, *et al.* Refractive index and temperature sensitivity characterization of excessively tilted fiber grating[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(4): 3336-3346.
- [10] CHEN X, ZHOU K, ZHANG L, *et al.* In-fiber twist sensor based on a fiber Bragg grating with 81° tilted structure[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(24): 2596-2598.
- [11] MOU C, ZHOU K, YAN Z, *et al.* Liquid level sensor based on an excessively tilted fibre grating [J]. *Optics Communications*, 2013, **305**: 271-275.
- [12] LUO Bin-bin, ZOU Wen-gen, ZHAO Ming-fu, *et al.* pH sensor based on fiber grating with extremely large tilt angle and its sensitivity enhancement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(1): 113-120.  
罗彬彬,邹文根,赵明富,等.极大倾斜角度光纤光栅pH值传感器及其增敏研究[J]. *光学学报*, 2017, **37**(1): 113-120.
- [13] LU T, SUN Y, MORENO Y, *et al.* Excessively tilted fiber grating-based vector magnetometer[J]. *Optics Letters*,



- 2019, **44**(10): 2494-2497.
- [14] LUO B, YANG W, HU X, *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.
- [15] 姚国珍. 光纤振动传感理论与实验研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- [16] LUO Bin-bin, XIE Lang, WANG Ya-jie, *et al.* Performance optimization of excessively tilted fiber grating cantilever beam vibration sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(8): 0806006  
罗彬彬,谢浪,王亚杰,等. 极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感器性能优化[J]. 光学学报, 2019, **39**(8): 0806006
- [17] YAN Z, SUN Z, ZHOU K, *et al.* Numerical and experimental analysis of sensitivity-enhanced RI sensor based on ExTFG in thin cladding fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(14): 3023-3027.
- [18] SHU X W, ZHANG L, BENNION I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, **20**(2): 255-266.

---

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 61875026), Youth Project of Science and Technology Research Program of Chongqing Education Commission (No. KJQN201901124), Key Project of Science and Technology Research Program of Chongqing Education Commission (No. KJZD-K201905601), Innovation Fund of Chongqing University of Technology (Nos. ycx20192050, ycx20192054)