

引用格式: LIU Kaijun, LUO Binbin, ZOU Xue, et al. Sensitivity-enhanced Vibration Sensor Based on Thin-cladding Excessively Tilted Fiber Gratings[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2):0206004

刘开俊, 罗彬彬, 邹雪, 等. 基于薄包层极大倾角光纤光栅的灵敏度增强型振动传感器[J]. 光子学报, 2021, 50(2):0206004

基于薄包层极大倾角光纤光栅的灵敏度增强型 振动传感器

刘开俊¹, 罗彬彬¹, 邹雪¹, 吴德操¹, 石胜辉¹, 蒋上海¹, 邓欧¹, 邹祥龙¹,
巫涛江², 赵明富¹

(1 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)

(2 重庆能源职业学院, 重庆 402247)

摘 要:提出了一种薄包层极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感器,采用基于标准单模光纤的极大倾角光纤光栅,从理论上分析包层半径的减小对波导色散因子、包层模的有效折射率、轴向应变灵敏度因子、轴向应变灵敏度及模式阶数的影响,并进行数值仿真,为其振动传感增敏方法提供理论依据。然后使用氢氟酸腐蚀光纤包层,构成不同直径的极大倾角光纤光栅并进行相关振动传感实验。实验结果表明:在 40~200 Hz 的频率范围内,随着包层直径的减小,极大倾角光纤光栅振动传感器在 C 波段的同阶和不同阶 TE/TM 模加速度灵敏度逐渐增大,且两者之间具有较好的线性关系;其中,同阶 TE 和 TM 模的最大加速度灵敏度分别可达到 100.46 mV/g 与 88.68 mV/g,相对于标准直径极大倾角光纤光栅振动传感器分别提高了 1.36 倍、1.53 倍;不同阶 TE 和 TM 模的最大加速度灵敏度可达到 159.35 mV/g 与 133.37 mV/g,分别提高了 2.15 倍、2.31 倍。

关键词:光纤光学;极大倾角光纤光栅;薄包层;振动传感;等强度悬臂梁

中图分类号:TN253

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215002.0206004

Sensitivity-enhanced Vibration Sensor Based on Thin-cladding Excessively Tilted Fiber Gratings

LIU Kaijun¹, LUO Binbin¹, ZOU Xue¹, WU Decao¹, SHI Shenghui¹, JIANG Shanghai¹,
DENG Ou¹, ZOU Xianglong¹, WU Taojiang², ZHAO Mingfu¹

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

(2 Chongqing Energy College, Chongqing 402247, China)

Abstract: A thin-cladding Excessively Tilted Fiber Gratings (ExTFG) cantilever beam vibration sensor is reported in this paper. Using the ExTFG written in the standard single-mode fiber, the effects of the decrease of the fiber cladding radius on the dispersion factor of the waveguide, the effective refractive index of the cladding mode, the axial strain sensitivity factor, the axial strain sensitivity and the mode order are theoretically analyzed, and the corresponding numerical simulations are performed, which provide the theoretical foundation for the enhancement method of vibration measuring sensitivity. And then,

基金项目:重庆市教育委员会科学技术研究项目(Nos.KJQN201901124, KJZD-K201905601),重庆市技术创新与应用发展重点项目(No. cstc2019jsex-mbxdX0002),重庆市研究生科研创新项目(No.CYS20349)

第一作者:刘开俊(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感技术。Email: 951671448@qq.com

导师(通讯作者):罗彬彬(1981—),男,教授,博士,主要研究方向为光纤传感及激光检测技术等。Email: luobinbin@cqut.edu.cn

收稿日期:2020-10-14; **录用日期:**2020-11-12

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

hydrofluoric acid is used to etch the fiber cladding to fabricate ExTFGs with different diameters and the related vibration sensing experiments are conducted. The results show that in the vibration frequency range of 40~200 Hz, with the decrease of cladding diameter, the acceleration sensitivity of ExTFG vibration sensor in C band of the same order and different order TE/TM mode increases gradually, and there is a good linear relationship between them. The maximum acceleration sensitivity of the TE and TM mode with the same-order cladding mode is 100.46 mV/g and 88.68 mV/g, respectively, which is increased by 1.36 times and 1.53 times, respectively, as compared with the standard diameter one. And the maximum acceleration sensitivity of those with different-order cladding modes can reach 159.35 mV/g and 133.37 mV/g, respectively, which is increased by 2.15 times and 2.31 times.

Key words: Fiber optics; Excessively tilted fiber gratings; Thin-cladding; Vibration sensor; Equal strength cantilever beam

OCIS Codes: 060.2370; 120.0280; 060.3735

0 引言

振动监测和探测对工程结构健康、地质勘探、空间飞行和航空等极为重要。与压电传感器相比,光纤传感器具有体积小、抗电磁干扰及耐腐蚀等特性,因此,光纤振动传感器得到了广泛的研究。人们提出了各类光纤干涉型^[1-2]、光纤强度调制型^[3-4]、光纤光栅型的振动传感器^[5-6],其中,光纤光栅型振动传感器由于其较高的精度以及优异的抗干扰能力已被应用于实际工程中。

近年来,国内外学者提出了不同光纤结构和封装结构的光纤光栅振动传感器以提升传感器的灵敏度。例如:2007年,IVANOV A等^[7]利用振动时,倾斜光纤布拉格光栅(Tilted Fiber Bragg Grating, TFBG)的纤芯模只对温度敏感,而包层模对外界扰动(弯曲、应变、温度)敏感的特性,通过检测Ghost模和纤芯模的功率差变化实现振动信号的检测。2008年,GUO T等^[8]将一个弱倾斜布拉格光纤光栅以细微的错位拼接到另一根单模光纤上,将低阶包层模重新耦合回纤芯,通过检测反向传输的纤芯模和重新耦合回纤芯的包层模的总功率变化实现对振动的检测,错位结构的设计使该传感器对微弯曲十分敏感,以此增加了传感器的灵敏度。2019年,魏莉等^[9]设计了一种基于“土”字形梁增敏结构的光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)加速度传感器,通过梁上下表面分别粘贴FBG的方法消除温度对传感器的影响,其灵敏度为单个FBG的两倍。

随着越来越先进的光纤光栅制作技术发展,不同类型的光纤光栅被制造并应用于振动传感系统。2006年,ZHOU K等^[10]提出了在单模光纤中写入81°的过度倾斜光纤光栅(Excessively Tilted Fiber Gratings, ExTFG),并通过实验证明了其优异的折射率响应、应变响应以及低热交叉响应,使其应用于振动传感时,可以降低温度交叉敏感带来的影响。基于此,本课题组已经研究了基于标准单模光纤ExTFG悬臂梁传感器的振动传感原理、振动检测方法优化及其矢量振动响应的特性^[11-12],但在更高要求的应用中,传感器的灵敏度还有所欠缺。本文将通过蚀刻光纤包层的方法以增强ExTFG悬臂梁传感器的振动加速度灵敏度,并通过理论分析、数值仿真、实验验证对薄包层ExTFG悬臂梁传感器的响应特性进行研究。

1 理论分析

ExTFG的耦合为纤芯基模与前向传输的包层模之间的耦合,如图1(a)所示,ExTFG纤芯中的高度不对称光栅条纹结构引起双折射效应,产生了偏振相关的TM/TE模式谐振峰,如图1(b)所示。

根据模式耦合理论,得到ExTFG的相位匹配条件为^[13]

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

式中, λ_{res} 为谐振波长, $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 和 $n_{\text{cl},m}^{i,\text{eff}}$ 分别为纤芯基模和 m 阶包层模的有效折射率, Λ_G 为光栅的周期, θ 为光纤光栅的倾斜角度。由式(1)可知,ExTFG中有且仅有纤芯基模与包层模之间的耦合,其谐振波长的表达式与光纤纤芯基模、包层模式的有效折射率和光栅的周期以及光栅的倾斜角度密切相关,当光纤光栅产生应变时,在ExTFG的透射光谱中纤芯基模与包层模耦合模式所对应的谐振峰则会发生变化,波长漂移表示为

$$\Delta\lambda_{\text{res}} = \lambda_{\text{res}} (1 - \rho_a) \Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中, ρ_a 为光纤的弹光系数, $\Delta\varepsilon$ 为光纤的轴向形变。

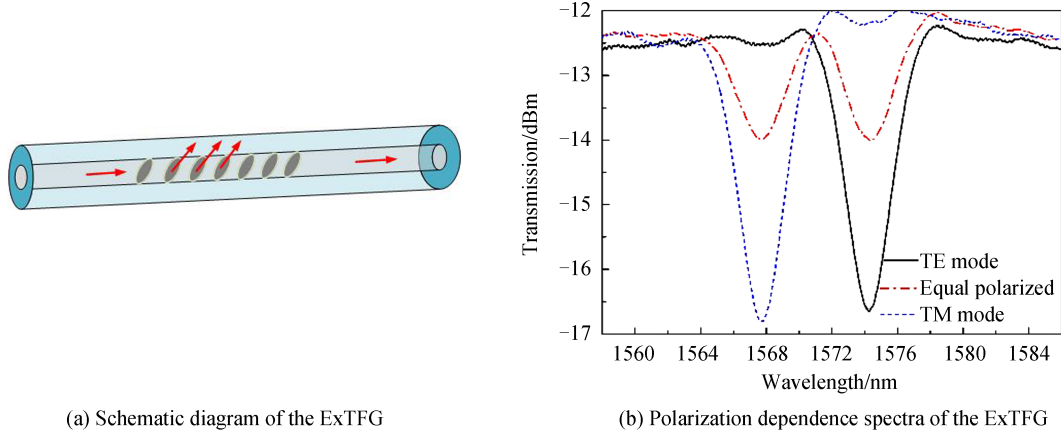


图1 ExTFG的光路原理图及偏振相关光谱

Fig. 1 Schematic diagram and polarization dependence spectra of ExTFG

当外界振动频率越接近传感器的固有频率时,光纤的轴向应变越大,本文采用的等强度悬臂梁的固有频率表示为^[14]

$$f = \sqrt{\frac{bh^3 E}{6L^2 m}} \quad (3)$$

式中, L 、 b 、 h 分别为等强度悬臂梁的长、宽、厚度, E 为等强度悬臂梁的弹性模量, m 为等强度悬臂梁的质量。

利用两层介质的波导模型计算各阶包层模的有效折射率,ExTFG的TM和TE模式的特征方程分别为^[13]

$$\frac{J_1(u_1)}{u_1 J_0(u_1)} + (1 - 2\Delta n) \frac{K_1(w_1)}{w_1 K_0(w_1)} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{J_1(u_1)}{u_1 J_0(u_1)} + \frac{K_1(w_1)}{w_1 K_0(w_1)} = 0 \quad (5)$$

式中, $u_1 = 2\pi r_{cl}^2 (n_{cl}^2 - n_{cl,eff}^2)^{1/2} / \lambda$, $w_1 = 2\pi r_{cl}^2 (n_{cl,eff}^2 - n_{air}^2)^{1/2} / \lambda$, r_{cl} 表示包层直径, n_{cl} 表示包层折射率, n_{air} 表示空气折射率, $n_{cl,eff}$ 表示包层模的有效折射率, $\Delta n = n_{cl} - n_{air}$ 表示空气和包层的折射率差。通过求解方程,可得TM_{0m}和TE_{0m}各阶包层模式的有效折射率随波长的变化关系。

由弹性力学和弹光效应理论可知,光纤纤芯基模和包层模式有效折射率、光栅周期都是轴向应变的函数,对式(1)取微分可得第 m 阶的轴向应变灵敏度表示为^[15]

$$\frac{d\lambda}{d\varepsilon} = \left(\frac{dn_{co}^{eff}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{cl,m}^{i,eff}}{d\varepsilon} \right) \frac{\Lambda_G}{\cos\theta} + (n_{co}^{eff} - n_{cl,m}^{i,eff}) \frac{d\Lambda_G}{\cos\theta d\varepsilon} \quad (6)$$

当光纤发生轴向应变时,弹光效应将引起纤芯和包层有效折射率的变化,变化的大小和各自的弹光系数相关。考虑到光纤的模式色散和波导色散,式(4)可以表示为^[15]

$$\frac{d\lambda}{d\varepsilon} = \lambda_{ns}^m \cdot \gamma^m \cdot (1 + \Gamma_{strain}^m) \quad (7)$$

式中, γ^m 为第 m 阶的光纤波导色散因子; Γ_{strain}^m 为第 m 阶谐振波长的应变灵敏度因子,分别定义为^[15]

$$\gamma^m = \frac{d\lambda/d\varepsilon}{n_{co}^{eff} - n_{cl,m}^{i,eff}} \quad (8)$$

$$\Gamma_{strain}^m = \frac{\eta_{co} n_{co}^{eff} - \eta_{cl} n_{cl,m}^{i,eff}}{n_{co}^{eff} - n_{cl,m}^{i,eff}} \quad (9)$$

式中, η_{co} 和 η_{cl} 分别为纤芯和包层的弹光系数。由式(7)可知,ExTFG的轴向应变灵敏度大小和符号主要由 γ^m 和 Γ_{strain}^m 决定。

根据式(5)、(7)、(8)以及(9)分别计算了不同包层半径(40 μm 、50 μm 和62.5 μm)的TE模的有效折射率、轴向应变灵敏度 $|d\lambda/d\varepsilon|$ 、波导色散因子 γ 以及轴向应变灵敏度因子 Γ_{strain} 与模式阶数 m 的关系如图2(a)~(d)所示,模拟计算中取 $\eta_{co} = -0.22$, $\eta_{cl} = -0.23$ 。由图2(a)可知,随着包层半径的减小, γ 因子的色散拐点移

向低阶包层模式。由于ExTFG周期很短($6.6\ \mu\text{m}$),其在C/L波段的包层模式阶数 $m > 20$ ^[13],图2(a)的插图为模式阶数 $m > 20$ 的 γ 因子的放大图,表明模式阶数 $m > 20$ 时 γ 因子随光纤包层半径的减小而增大。图2(b)给出了不同包层半径的ExTFG在波长为 $1550\ \text{nm}$ 处TE模式的模拟有效折射率,可见随着包层半径的减小,包层的模式数量减小,且同阶模式的有效折射率降低。根据模拟计算可知,包层半径为 $40\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 和 $62.5\ \mu\text{m}$ 的第30阶TE模的有效折射率分别为 1.3403 、 1.3856 和 1.4139 。进一步,对不同包层半径的第 m 阶谐振波长的轴向应变灵敏度因子 Γ_{strain} 和轴向应变灵敏度 $|d\lambda/d\epsilon|$ 进行分析,计算结果如图2(c)和(d)所示。可见 Γ_{strain} 随着包层半径的减小而增大,结合式(5)可知同一阶模式的轴向应变灵敏度 $|d\lambda/d\epsilon|$ 也是增大的(模式阶数 m 值远离色散拐点),如图2(d)插图所示。因此,随着光纤包层半径的减小,在相同应变的作用下谐振峰中心波长漂移增大,谐振峰带宽内固定波长处的光强变化也增大,从而使传感器的加速度灵敏度增大。

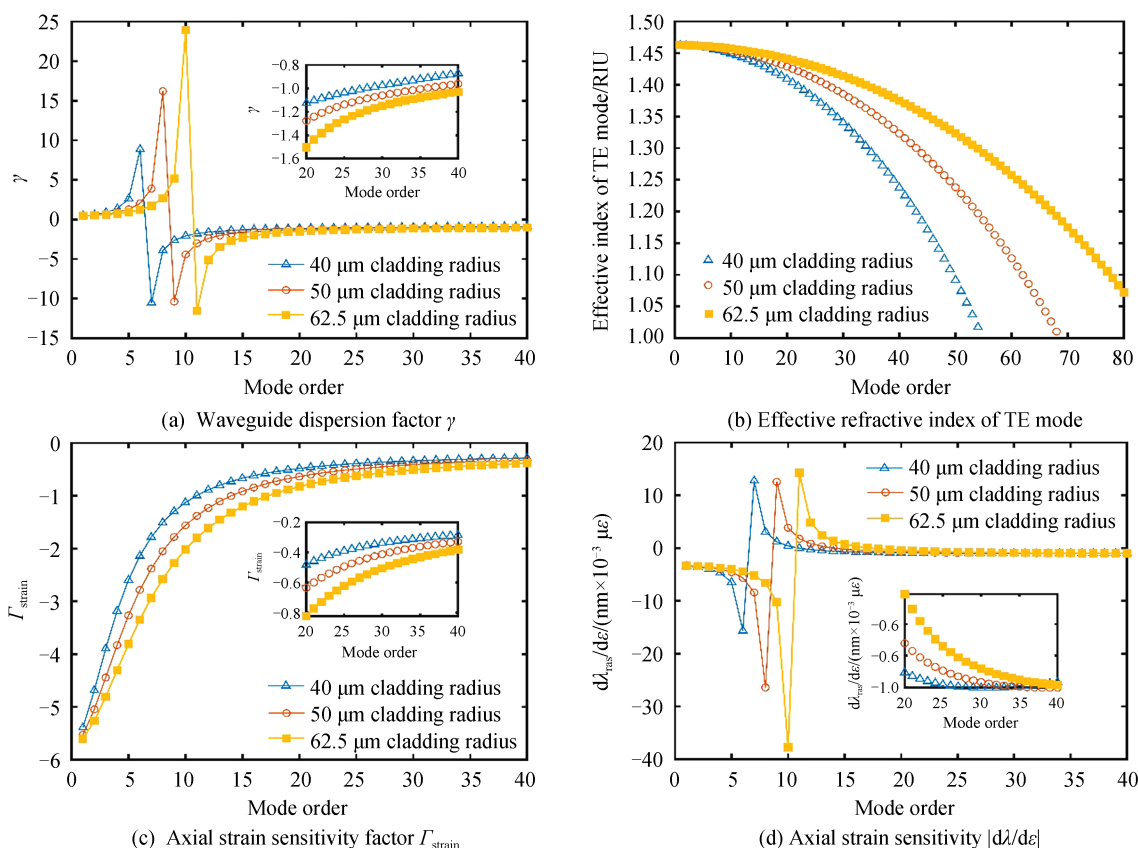


图2 模拟计算不同包层半径($40\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 和 $62.5\ \mu\text{m}$)前40阶包层模式的波导色散因子 γ 、TE模的有效折射率、轴向应变灵敏度因子 Γ_{strain} 以及轴向应变灵敏度 $|d\lambda/d\epsilon|$ 的仿真结果

Fig. 2 The simulation results of waveguide dispersion factory, effective refractive index of TE mode, axial strain sensitivity factor Γ_{strain} , axial strain sensitivity $|d\lambda/d\epsilon|$ of the first 40 order cladding modes for different cladding radius ($40\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$ and $62.5\ \mu\text{m}$)

使用氢氟酸(HF)腐蚀光纤包层构成不同直径的ExTFG,并在每次腐蚀后,通过电子显微镜测量光纤包层直径,各包层直径的实际数值如表1的第五列所示;然后,根据图2的仿真分析,计算不同包层直径的ExTFG在C波段的模式阶数、谐振波长,见表1的第2、3、4列。表1中,S0、S1、S2和S3对应的是同一模式阶数 $m=31$,这是减小ExTFG包层直径得到的结果;而S4、S5、S6以及S7则对应包层直径减小且模式阶数减小时的ExTFG,此时分别对应的不同模式的阶数 $m=30$ 、 29 、 27 与 23 。

在ExTFG的腐蚀过程中,为了方便记录光谱的变化,将ExTFG放置在特制的有机玻璃凹槽中。从宽带光源发出的光经起偏器调制为线偏光,再经过偏振控制器,调节光的偏振态使包层模式分别处于TE和TM偏振态,光谱分析仪记录ExTFG的光谱数据。图3为C波段TE/TM模经体积分数为20%的HF溶液腐蚀后的光谱,记录了包层直径分别为 $122.71\ \mu\text{m}$ 、 $117.87\ \mu\text{m}$ 、 $114.94\ \mu\text{m}$ 和 $110.72\ \mu\text{m}$ 时的光谱,可见TE/TM模在C波段谐振峰的中心波长与表1中仿真分析的模拟谐振波长相符,从而验证了仿真分析的可靠性。

表1 HF腐蚀得到不同直径的ExTFG振动传感器
Table 1 ExTFG with different diameters obtained by HF etching

Sensor	Mode order	λ_{TE}/nm	λ_{TM}/nm	Diameter/ μm
S0	31	1 574.32	1 567.74	122.71
S1	31	1 562.93	1 556.61	117.87
S2	31	1 553.62	1 547.12	114.94
S3	31	1 542.65	1 536.26	110.72
S4	30	1 565.07	1 558.41	107.94
S5	29	1 565.57	1 558.82	98.06
S6	27	1 565.61	1 558.58	89.49
S7	23	1 567.14	1 559.32	75.52

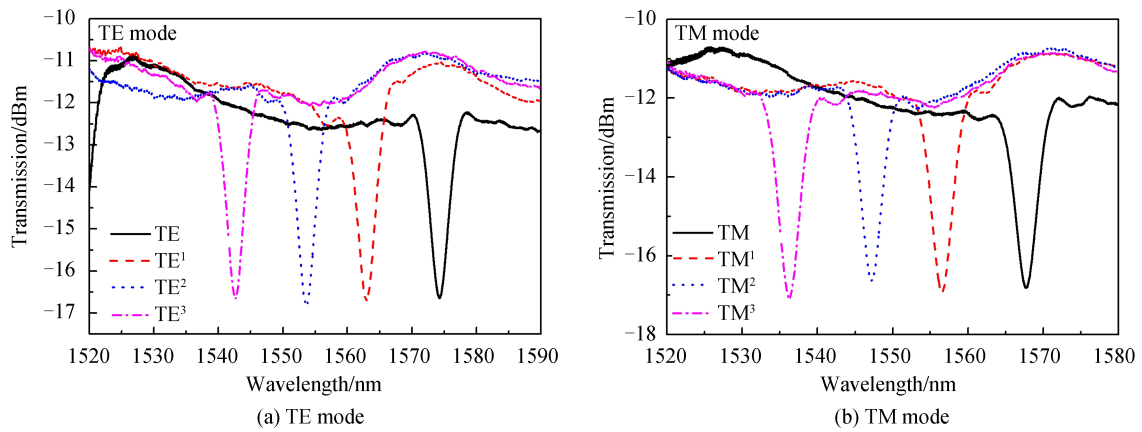


图3 体积分数为20%的HF溶液腐蚀后的光谱变化
Fig. 3 Spectral changes after etching in HF solution with volume fraction of 20%

2 结果及讨论

2.1 同阶包层模式的ExTFG振动传感器性能

为了验证不同包层直径ExTFG低频振动传感性能的影响,采用本课题组的研究文献[12]中基于悬臂梁的低频振动传感系统及方法,实验原理如图4所示。可调谐激光光源(Tunable Laser Source, TLS)发出窄线宽光,经过光隔离器(Optical Isolator, ISO),起偏器和偏振控制器(Polarization Controller, PC)使ExTFG处于TE(TM)的完全偏振状态,用PET胶带将ExTFG粘贴在悬臂梁的轴线上,信号发生器(Function)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,最后被振动信号调制的光

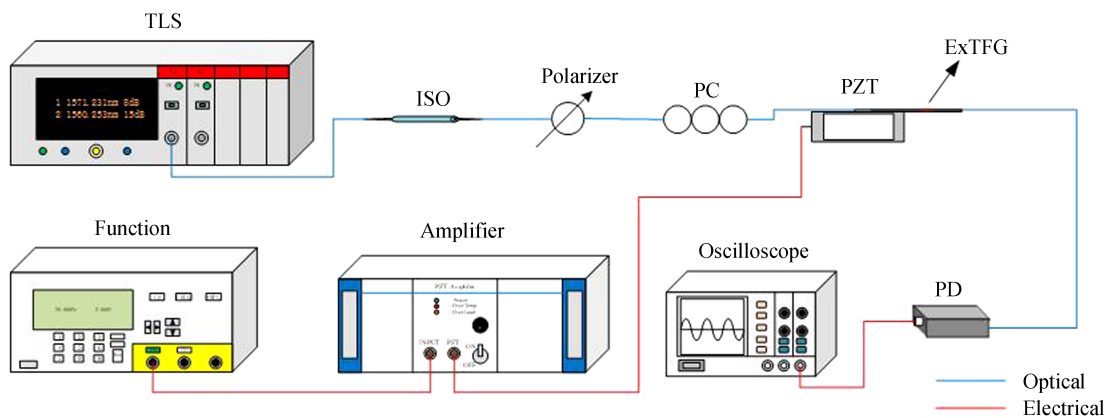


图4 基于悬臂梁的低频振动传感实验系统图
Fig. 4 Low-frequency vibration sensing experimental system diagram based on cantilever beam

经过光电转换由示波器输出。由于在文献[12]中已经证明,在ExTFG谐振峰3dB点处进行振动检测较其他波长点具有更高的振动加速度灵敏度。因此,在实验过程中,调节TLS的输出波长对准不同直径ExTFG谐振峰的3 dB点波长,以此获得最优的加速度灵敏度。

图5(a)和(b)分别为40~200 Hz频率范围内TE/TM模不同直径下的振动响应幅度,其中S0、S1、S2和S3分别表示包层直径为122.71 μm 、117.87 μm 、114.94 μm 和110.72 μm 的ExTFG振动传感器,插图为振动频率接近72 Hz的局域放大图。可见TE模的S0、S1、S2和S3(分别对应图3(a)中的TE、TE¹、TE²和TE³)的输出电压幅值分别为0.856 V、0.984 V、1.048 V和1.16 V,经过计算公式 $S = V/a$ 可以得到S0、S1、S2和S3的振动加速度灵敏度分别为74.14 mV/g、85.22 mV/g、90.76 mV/g和100.46 mV/g;TM模的S0、S1、S2和S3(分别对应图3(b)中的TM、TM¹、TM²和TM³)的输出电压幅值分别为0.856 V、0.984 V、1.048 V和1.16 V,振动加速度灵敏度分别为57.85 mV/g、70.67 mV/g、76.21 mV/g和88.68 mV/g。因此,同阶TE模在经过HF溶液腐蚀后的振动加速度灵敏度较未经腐蚀的提高1.36倍,同阶TM模提高1.53倍,这一结论与理论分析是吻合的。图5(c)和(d)分别为同阶ExTFG振动传感器TE/TM模在共振频率(72 Hz)下的输出波形。

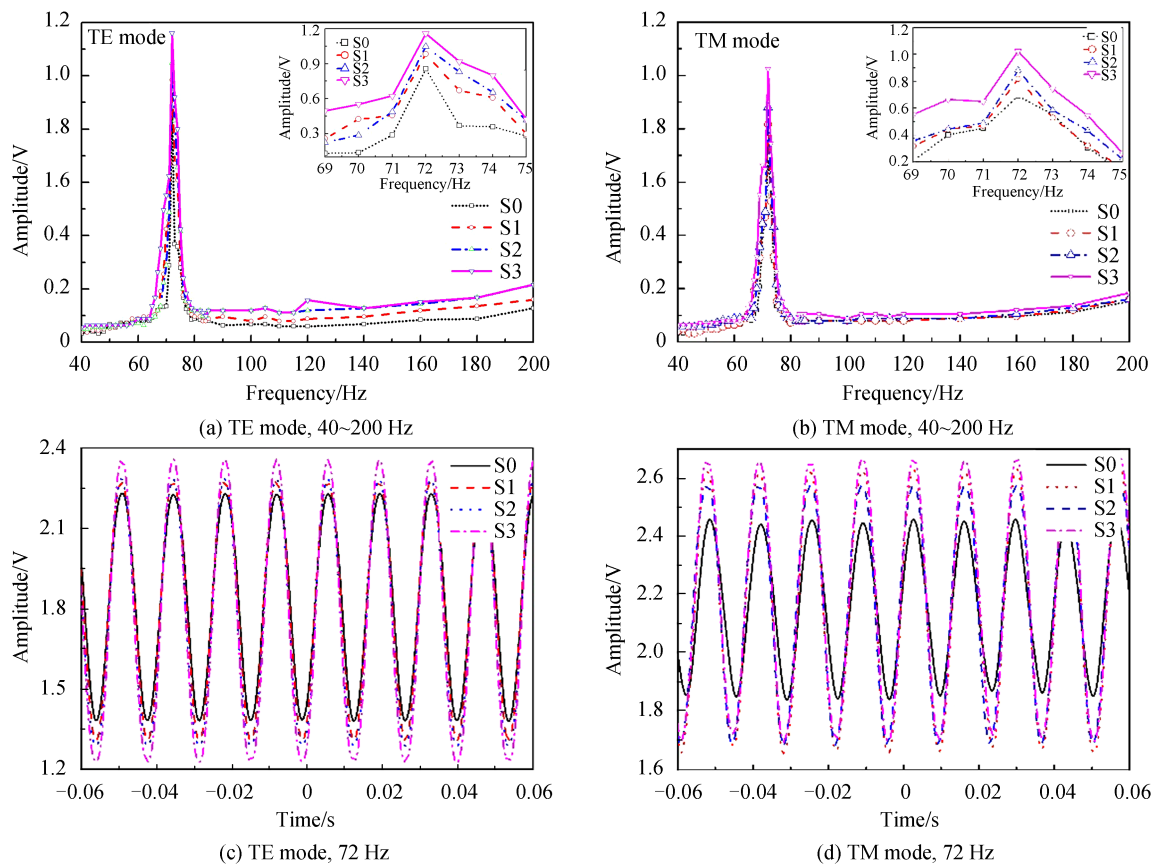


图5 同阶模式在40~200 Hz振动频率范围内的幅频响应特性(其中插图为振动频率接近72 Hz的局部放大图)及72 Hz处的时域响应

Fig.5 Amplitude-frequency response characteristics in the vibration frequency range of 40~200 Hz (the inset is a partial enlargement of the vibration frequency close to 72 Hz) and time domain response at 72 Hz for the same order mode

2.2 不同阶包层模式的ExTFG振动传感器性能

进一步利用HF溶液对ExTFG包层进行腐蚀,然后对不同模式阶数下的TE/TM模式进行ExTFG振动传感器的性能探究。重复2.1小节的ExTFG振动传感器性能实验,得到不同阶TE/TM模式的振动响应结果。图6(a)和(b)分别为40~200 Hz频率范围内TE/TM模不同直径下的振动响应幅度,其中S0、S4、S5、S6和S7分别表示表1中5种不同直径(122.71 μm 、107.94 μm 、98.06 μm 、89.49 μm 、75.52 μm)的ExTFG振动传感器的不同阶数($m=31, 30, 29, 27, 23$)的TE和TM模的响应。可见TE模的S0、S4、S5、S6和S7的输出幅度分别为0.856 V、1.208 V、1.44 V、1.68 V和1.84 V,振动加速度灵敏度分别为74.14 mV/g、104.62 mV/g、124.71 mV/g、145.48 mV/g和159.35 mV/g;TM模的S0、S4、S5、S6和S7的输出幅度分别为0.688 V、1.072 V、

1.26 V、1.36 V 和 1.54 V, 振动加速度灵敏度分别为 57.85 mV/g、92.84 mV/g、109.12 mV/g、117.78 mV/g 和 133.37 mV/g。因此, ExTFG 的不同阶 TE 模在经过 HF 溶液腐蚀后的振动加速度灵敏度是有所提升的, 且 S7 的振动加速度灵敏度是 S0 的 2.15 倍; TM 模 S7 的振动加速度灵敏度是 S0 的 2.31 倍。图 6(c) 和 (d) 分别为 ExTFG 振动传感器不同阶包层模的 TE/TM 模在共振频率(72 Hz) 下的时域输出波形。

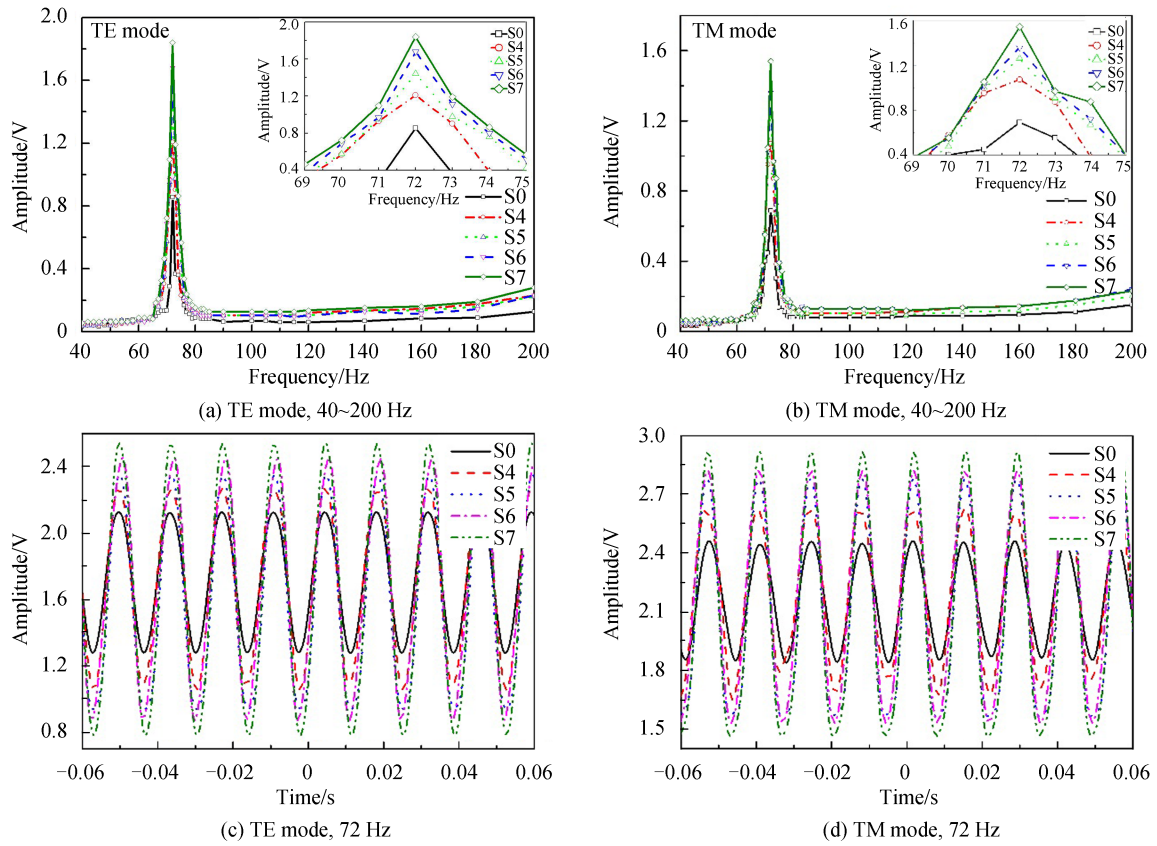


图 6 不同阶模式在 40~200 Hz 振动频率范围内的幅频响应特性(其中插图 of 振动频率接近 72 Hz 的局部放大图)及 72 Hz 处的时域响应
 Fig.6 Amplitude-frequency response characteristics in the vibration frequency range of 40~200 Hz (the inset is a partial enlargement of the vibration frequency close to 72 Hz) and time domain response at 72 Hz for different order modes

根据图 5 及图 6 的实验结果, 分析同阶模式 ($m=31$ 阶) 和不同阶模式 ($m=31, 30, 29, 27, 23$ 阶) ExTFG 振动传感器的输出电压幅值与包层直径的关系, 如图 7 所示, 可见 ExTFG 的振动传感器在 C 波段的同阶和

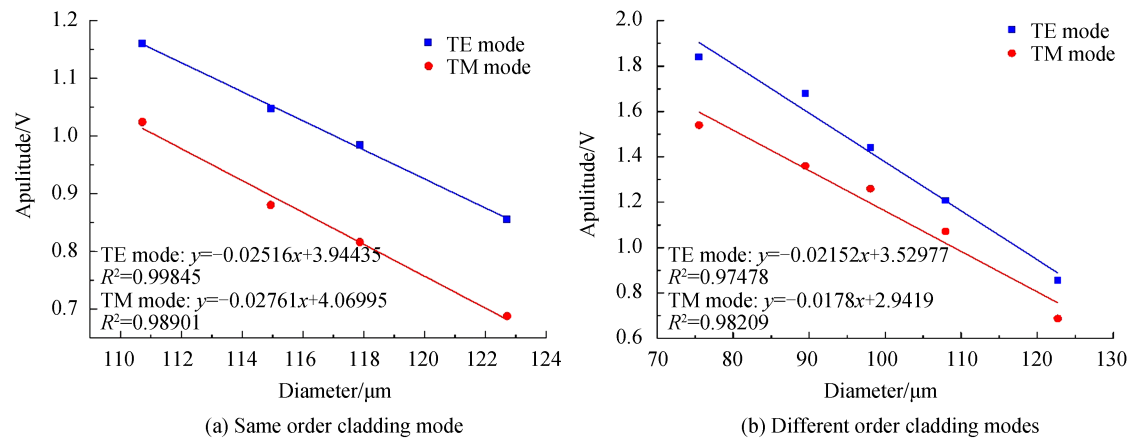


图 7 不同包层直径 ExTFG 振动传感器在共振频率为 72 Hz 时的输出幅值响应
 Fig.7 The output amplitude response of ExTFG vibration sensor for different cladding diameter at vibration frequency at 72 Hz

不同阶 TE/TM 模输出电压幅值随包层直径的减小而增大,且呈较好的线性关系。

3 结论

本文提出了一种薄包层 ExTFG 的振动传感器,对不同半径的 ExTFG 进行数值仿真分析,结果表明: γ 因子的色散拐点随着包层半径的减小移动到更低阶的模式,同一模式阶数 m 的 γ 因子随着包层半径的减小而增大;对于同阶包层模,包层半径越小,其模式的有效折射率越小;随着包层半径的减小, Γ_{strain} 逐渐增大,且同一模式阶数的轴向应变灵敏度 $|d\lambda/de|$ 也增大(模式阶数 m 值远离色散拐点)。在此基础上进行不同包层直径的 ExTFG 振动传感特性的实验研究,结果表明:随着包层直径的减小,ExTFG 振动传感器在 C 波段的同阶和不同阶 TE/TM 模加速度灵敏度逐渐增大,且两者之间具有较好的线性关系。因此,通过减小包层直径来增加 ExTFG 振动传感器灵敏度的方法是可行的。

参考文献

- [1] LI Y, WANG X, BAO X. Sensitive acoustic vibration sensor using single-mode fiber tapers[J]. Applied Optics, 2011, 50(13): 1873-1878.
- [2] XU B, LI Y, SUN M, et al. Acoustic vibration sensor based on nonadiabatic tapered fibers[J]. Optics Letters, 2012, 37(22): 4768-4770.
- [3] HUANG Y, GUO T, LU C, et al. VCSEL-based tilted fiber grating vibration sensing system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(16):1235-1237.
- [4] NI K, CHAN C, DONG X, et al. Temperature-independent accelerometer using a fiber Bragg grating incorporating a biconical taper[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5):410-413.
- [5] CAI S, NAN Y, XIE W, et al. Fiber-optic accelerometer using tilted grating inscribed in depressed cladding fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(24): 2171-2174.
- [6] BAO W, RONG Q, CHEN F, et al. All-fiber 3D vector displacement (bending) sensor based on an eccentric FBG[J]. Optics Express, 2018, 26(7):8619.
- [7] IVANOV A, ALBERT J. Bent tilted fiber Bragg gratings for temperature-independent vibration sensing in vehicles[C]. SPIE, 2007, 6758: 675803.
- [8] GUO T, IVANOV A, CHEN C, et al. Temperature-independent tilted fiber grating vibration sensor based on cladding-core recoupling[J]. Optics Letters, 2008, 33(9): 1004-1006.
- [9] WEI Li, LIU Zhuang, LI Hengchun, et al. Fiber Bragg grating vibration sensor based on "土" shaped beam sensitization structure [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11):90-98.
魏莉,刘壮,李恒春,等.基于“土”字形梁增敏结构的光纤光栅振动传感器[J].光学学报, 2019, 39(11):90-98.
- [10] 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 $>80^\circ$ tilted structures[J]. Optics Letters, 2006, 31(9): 1193-1195.
- [11] XIE L, LUO B, ZHAO M, et al. Orientation-dependent optic-fiber accelerometer based on excessively tilted fiber grating [J]. Optics Letters, 2020, 45(1): 125-128.
- [12] LUO Binbin, XIE Lang, WANG Yajie, 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.
- [13] 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]. Lightwave Technol, 2015, 33(14): 3023-3027.
- [14] LUO Xiaodong, QIAO Xueguang, JIA Zhenan, et al. Study on fiber Bragg grating vibration acceleration sensor of low frequency[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013, (12):7-8.
罗小东,乔学光,贾振安,等.低频光纤布拉格光栅振动加速度传感器研究[J].仪表技术与传感器, 2013, (12):7-8.
- [15] SHU X, ZHANG L, BENNION I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings [J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255-266.

Foundation item: Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (Nos. KJQN201901124, KJZD-K201905601), Key Projects of Technology Innovation and Application Development in Chongqing (No. cstc2019jcsx-mbdxX0002), Innovation Fund of Postgraduate of Chongqing (No. CYS20349)