

# 极大倾角光纤光栅悬臂梁振动传感器性能优化

罗彬彬\*, 谢浪, 王亚杰, 邹雪, 石胜辉\*\*, 叶露, 蒋上海, 赵明富, 汪治华

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** 提出一种利用极大倾角光纤光栅(Ex-TFG)谐振峰的 3 dB 点进行悬臂梁低频振动检测的优化方法。对 Ex-TFG 的轴向应变和弯曲应变特性进行理论分析和实验验证;对基于光强调制的 Ex-TFG 振动传感的光谱响应特性进行理论分析,采用 Ex-TFG 谐振峰的 3 dB 点对振动进行实验研究。实验结果表明:1)Ex-TFG 在轴向应变和弯曲应变条件下,其谐振波长均发生蓝移,横电(TE)模和横磁(TM)模的轴向应变灵敏度分别为  $-2.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$  和  $-1.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ,透射强度基本不变,在  $0\sim 0.4 \text{ m}^{-1}$  的曲率范围内基于光强变化的弯曲应变灵敏度分别为  $2.6 \text{ dB}/\text{m}^{-1}$  和  $1.2 \text{ dB}/\text{m}^{-1}$ ,基于波长漂移的弯曲应变灵敏度分别为  $-3.34 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$  和  $-2.53 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ ; 2)在低频振动的检测中,Ex-TFG 的 TE 模和 TM 模的谐振峰 3 dB 点的振动加速度灵敏度分别为  $113.54 \text{ mV}/g$  和  $100.93 \text{ mV}/g$ ,比谐振峰的峰值波长点(100%点)的振动加速度灵敏度高 2 倍多,且信噪比(SNR)高约 10 dB。此外,SNR 随悬臂梁厚度的增大而增大;3)在相同条件下,TE 模具有比 TM 模更高的振动响应灵敏度,但 TM 模比 TE 模具有更好的输出稳定性。

**关键词** 光纤光学; 光纤光栅; 轴向应变; 弯曲应变; 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/AOS201939.0806006

## Performance Optimization of Excessively Tilted Fiber Grating Cantilever Beam Vibration Sensor

Luo Binbin\*, Xie Lang, Wang Yajie, Zou Xue, Shi Shenghui\*\*,

Ye Lu, Jiang Shanghai, Zhao Mingfu, Wang Zhihua

Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photoelectric Detection,

Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

**Abstract** This study proposes an optimization method for detecting the low-frequency vibration of a cantilever beam using the 3 dB point of the resonant peak of an excessively tilted fiber grating (Ex-TFG). First, the axial and bending strain characteristics of Ex-TFG are theoretically analyzed and experimentally verified. The spectral response characteristics of the Ex-TFG vibration sensor modulated by light intensity are also theoretically analyzed. The 3 dB point of the Ex-TFG resonance peak is proposed to detect the vibration signal, and subsequently, a corresponding experimental research is conducted. The results are as follows. First, the resonance wavelength of Ex-TFG is blue shifted owing to both axial and bending strains. The axial strain sensitivities are  $-2.8$  and  $-1.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$  for the TE and TM modes, respectively, whereas the transmission intensity remains unchanged. Bending strain sensitivities based on the light intensity modulation in the curvature range of  $0\sim 0.4 \text{ m}^{-1}$  are  $2.6 \text{ dB}/\text{m}^{-1}$  and  $1.2 \text{ dB}/\text{m}^{-1}$ , respectively. Bending strain sensitivities based on wavelength shift are  $-3.34 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$  and  $-2.53 \text{ nm}/\text{m}^{-1}$ , respectively. Second, during vibration detection, the vibration acceleration sensitivities of the resonance peaks of Ex-TFG at the 3 dB points are  $113.54$  and  $100.93 \text{ mV}/g$  for the TE and TM modes, respectively, which are over two times higher than those (100% point) of the resonance peaks. The signal-to-noise ratios (SNRs) of the TE and TM modes at the 3 dB point are also higher (approximately 10 dB) than those (100% point) of the resonance peaks. In addition, the SNR increases with the increasing cantilever beam thickness. Third, under the same condition, the TE mode exhibits higher vibration response sensitivity than the TM mode; however, the output of the TM mode has better stability than the TE mode.

收稿日期: 2019-03-19; 修回日期: 2019-04-22; 录用日期: 2019-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(61875026,61505017)、重庆市科委前沿与基础项目(cstc2018jcyjAX0122, cstc2015jcyjA40035, cstc2015jcyjA40051)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201801121)、重庆理工大学创新基金(ycx2018231)

\* E-mail: luobinbin@cqut.edu.cn; \*\* E-mail: shshill@cqut.edu.cn

**Key words** fiber optics; fiber grating; axial strain; bending strain; vibration sensing; equal strength cantilever beam

**OCIS codes** 060.2370; 120.0280; 060.3735

## 1 引 言

随着光纤光栅在诸多传感领域的应用越来越广泛,进一步拓展其测量对象和提高其传感特性逐渐成为新型光纤光栅传感的发展方向。其中,倾斜光纤光栅(TFG)提供了区别于传统光纤布拉格光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPFG)的独特特性<sup>[1-4]</sup>。根据不同的模式耦合方式,可将 TFG 分为三种类型:纤芯基模耦合到后向传播包层模的小角度倾斜光纤光栅(TFBG,角度倾斜 $<45^\circ$ ),纤芯基模耦合到前向传播包层模的极大倾角光纤光栅(Ex-TFG,角度倾斜 $>45^\circ$ )。2006年 Zhou等<sup>[5]</sup>提出的 $81^\circ$  Ex-TFG结构对折射率(RI)及应变有良好的响应特性,且对温度的灵敏度极低。此后,Ex-TFG广泛应用于各种物理(扭矩<sup>[6]</sup>、液位<sup>[7]</sup>及振动信号<sup>[8]</sup>)、生物(生理葡萄糖浓度的酶化<sup>[9]</sup>、猪圆环病毒 II 型(PCV2)<sup>[10]</sup>和心力衰竭生物标志物<sup>[11]</sup>)和化学(化学量的检测)等领域。

近年来,国内外报道了一系列光纤光栅对各种工程结构的温度、应变以及振动等物理量的检测研究。例如,使用 FBG 对电机的机械振动、扭矩和温度<sup>[12]</sup>、金属结构的应变和裂纹等<sup>[13]</sup>进行多参数同时监测;利用 TFG 对多参数结构<sup>[14]</sup>、矢量振动<sup>[15]</sup>以及电场强度<sup>[16]</sup>进行检测等。其中,低频振动对结构具有很大的危害性,对其检测具有重要的意义<sup>[17]</sup>。根据光信号的解调原理可以将光纤振动传感分为波长<sup>[12-14]</sup>、相位<sup>[18-20]</sup>、偏振态<sup>[21-22]</sup>和强度这几种解调类型<sup>[15-16,23-25]</sup>。然而,基于波长、相位或偏振态调制的光纤振动传感器,其解调系统通常较为复杂,使其在实际工程应用中受到一定的限制,而基于强度解调的光纤振动传感系统具有解调相对简单的优势。

在之前的研究中,Luo等<sup>[8]</sup>提出并研究了基于 $81^\circ$  Ex-TFG的等强度悬臂梁的光强调制型低频振动传感器,但对传感器的原理和特性分析不够深入。由于所设计的传感器结构是将 Ex-TFG 封装在等强度悬臂梁表面,在振动过程中 Ex-TFG 会受到轴向拉力和弯曲切向应力共同作用,而两者单一的作用均使得 Ex-TFG 的参数(光栅周期和有效折射率

等)发生改变,从而导致 Ex-TFG 的光谱响应发生变化。因此,为更深入分析其原理和特性,本文首先设计 Ex-TFG 的两组静态实验,即轴向应变和弯曲应变实验,分别得到谐振峰的波长和光强变化趋势及响应特性;然后,结合静态实验的结果分析等强度悬臂梁加载振动信号(即动态实验)之后 Ex-TFG 的光谱变化特性;最后,研究提高传感器灵敏度和信噪比(SNR)的优化方法。

## 2 Ex-TFG 传感理论

所使用的 Ex-TFG 的光栅倾斜角度为 $81^\circ$ ,轴向上的光栅周期为 $28\ \mu\text{m}$ ,因此可将其视为周期很短的 LPFG。由于极大角度倾斜光栅条纹结构的引入导致光栅截面不对称,Ex-TFG 中符合谐振条件的每个包层模都具有横磁(TM)和横电(TE)两个模式的偏振相关简并模。相位匹配条件(PMC)是描述光纤光栅模式耦合特性的重要公式,Ex-TFG 的 PMC 可表示为<sup>[26]</sup>

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

式中: $\lambda_{\text{res}}$ 为谐振波长; $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 为波长 $\lambda_{\text{res}}$ 处的纤芯有效折射率; $n_{\text{cl},m}^{i,\text{eff}}$ 为波长 $\lambda_{\text{res}}$ 处的第 $m$ 阶 TM/TE 包层模式的有效折射率; $\Lambda_G$ 为光栅的正常周期; $\theta$ 为光纤光栅的倾斜角度。由弹性力学和弹光效应理论可知,光纤的基模与包层模的有效折射率以及光栅周期都是轴向应变的函数,对(1)式取微分可得

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

式中: $\lambda_{\text{res}}^m$ 为第 $m$ 阶 TM/TE 包层模式的谐振波长; $\epsilon$ 为光纤的微应变。当光纤发生轴向应变时,如图 1(a)所示,弹光效应将引起纤芯和包层的有效折射率发生变化,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,(2)式可以表示为<sup>[27]</sup>

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}^m}{d\epsilon} = \lambda_{\text{res}}^m \gamma^m (1 + \Gamma_{\text{strain}}^m), \quad (3)$$

式中: $\gamma^m$ 为光纤波导色散因子; $\Gamma_{\text{strain}}^m$ 为谐振波长的应变灵敏度因子,定义为

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

其中  $\eta_{\text{co}}$  和  $\eta_{\text{cl}}$  分别为纤芯和包层的弹光系数。由(3)式可知, Ex-TFG 的轴向应变灵敏度大小和符号主要由  $\gamma^m$  和  $\Gamma_{\text{strain}}^m$  决定。由于 Ex-TFG 本质上是一种 LPFG, 因此可采用 LPFG 的耦合模理论分析 Ex-TFG 的色散特性, 根据 Shu 等<sup>[27]</sup> 的理论结论, 对于具有特定纤芯弹光系数的 LPFG, 谐振波长的应变灵敏度  $d\lambda_{\text{res}}^m/d\epsilon$  在  $m=12$  处出现色散拐点, 色散拐点附近的模式对应的应变灵敏度较大, 而距离拐点较远模式的应变灵敏度较小。当对 Ex-TFG 施加轴向应变时, 低阶包层模 ( $m < 12$ ) 的  $d\lambda_{\text{res}}^m/d\epsilon > 0$ , 且  $|d\lambda_{\text{res}}^m/d\epsilon|$  随着模式阶次  $m$  的增大而增大; 而高阶包层模 ( $m > 12$ ) 的  $d\lambda_{\text{res}}^m/d\epsilon < 0$ , 且  $|d\lambda_{\text{res}}^m/d\epsilon|$  随着模式阶次  $m$  的增大而减小。本实验中所使用的单模光纤制作而成的 Ex-TFG 在 C+L 波段谐振峰的包层模阶次  $m=32$ , 因此其  $d\lambda_{\text{res}}^m/d\epsilon < 0$ <sup>[26]</sup>, 即在轴向应变的作用下, 光谱将发生蓝移。

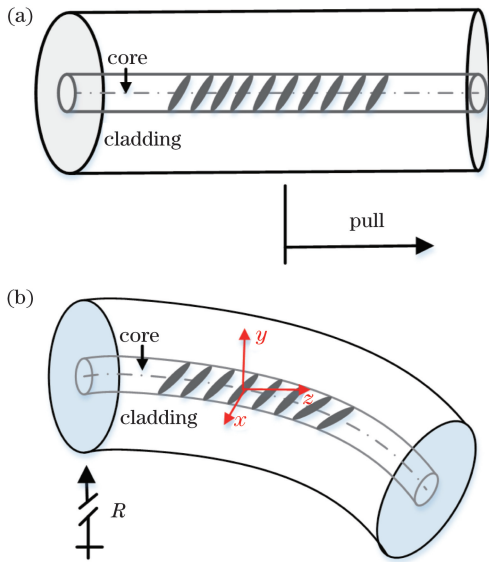


图 1 Ex-TFG 的静态应变示意图。(a) 轴向应变;  
(b) 弯曲应变

Fig. 1 Static strain schematics of Ex-TFG.

(a) Axial strain; (b) bending strain

图 1(a) 为 Ex-TFG 的轴向应变示意图。当 Ex-TFG 发生曲率半径为  $R'$  的弯曲时, 如图 1(b) 所示, 可利用 LPFG 的弯曲理论进行分析, 此时 Ex-TFG 可等效为一个倾斜角度更大 ( $> 81^\circ$ ) 的倾斜啁啾光纤光栅, 具有等效周期  $\Lambda_G^{\prime\varphi} = \Lambda_G \cos(\theta + \theta_\varphi)$ , 其中  $\theta_\varphi$  为第  $\varphi$  个周期光栅有效折射率横截面增大的倾斜角, 其中  $\Lambda_G^{\prime\varphi} < \Lambda_G$ 。由(1)式可知, 弯曲应变将使得 Ex-TFG 的谐振波长发生蓝移。等效光栅的纤芯有

效折射率分布  $n_{\text{co}}^{\text{eff}}(z)$  可表示为<sup>[28]</sup>

$$n_{\text{co}}^{\text{eff}}(z) = n_{\text{co}}^{\text{eff}} + \bar{n}_{\text{co}}^{\text{eff}}(z') \left\{ 1 + v \cos \left[ \frac{2\pi}{\Lambda_G^{\prime\varphi}} z' + \varphi(z') \right] \right\}, \quad (5)$$

式中:  $z$  为光纤的轴向长度;  $z' = x \sin \theta_\varphi + z \cos \theta_\varphi \approx z \cos \theta_\varphi$ , 其中  $x$  为光纤径向且垂直于  $y$  方向上的长度;  $v$  为光栅的倾斜条纹可见度;  $\bar{n}_{\text{co}}^{\text{eff}}$  为每个光栅周期的纤芯平均有效折射率调制。用自耦合率  $t_{\text{=}}$  和交叉耦合率  $t_{\text{x}}$  分别表示 Ex-TFG 的纤芯基模中未耦合部分的能量和已耦合到包层中 TE 模或 TM 模的能量, 分别表示为<sup>[28]</sup>

$$t_{\text{=}} = \frac{|R(z)|^2}{|R(0)|^2} = \cos^2(\sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2} z) + \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\sigma}^2 + \kappa^2} \sin^2(\sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2} z), \quad (6)$$

$$t_{\text{x}} = \frac{|P(z)|^2}{|R(0)|^2} = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2} \sin^2(\sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2} z), \quad (7)$$

式中:  $R$  和  $P$  分别表示纤芯基模和同向包层模的幅度,  $R(0)=1$  表示 Ex-TFG 的入射端纤芯基模的能量;  $\hat{\sigma}$  和  $\kappa$  分别表示直流自耦合系数和模式间的交流交叉耦合系数。结合(6)式和(7)式可知, 当  $\hat{\sigma}=0$  时, 纤芯基模中的能量全部耦合到包层模,  $t_{\text{x}}$  取最大值为  $t_{\text{x,max}} = \sin^2(\kappa L_g)$ , 其中  $L_g$  为光栅的长度。由(5)式可知, 弯曲应变使得 Ex-TFG 的倾斜角度增大, 导致  $v$  和  $\bar{n}_{\text{co}}^{\text{eff}}$  减小, 从而使得交叉耦合系数  $\kappa$  ( $\kappa = \sigma v/2$ , 其中  $\sigma$  为自耦合系数) 降低, 最终导致 Ex-TFG 同向包层模的幅度  $P(z)$  减小。

Ex-TFG 在 C+L 波段的偏振相关光谱如图 2(a) 所示, 虚线和点划线分别为 TM 模和 TE 模的全激励条件(即 TM 模和 TE 模分别被完全激励)下的光谱, 实线为 TM 模和 TE 模等激励态( $E_q$ , 即 TM 模和 TE 模被等强度激励)下的光谱。当在 Ex-TFG 上加载振动信号时, Ex-TFG 处于动态的弯曲变化的状态, 因此会引起光栅的长度、周期和有效折射率的变化, 从而导致谐振峰的波长和强度发生变化。根据(7)式, 可将其中一个模式谐振峰在折射率调制下的透射率  $T_\lambda^i$  表示为

$$T_\lambda^i = 1 - \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2} \sin^2(\sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2} z). \quad (8)$$

当在 Ex-TFG 上加载振动信号,  $T_\lambda^i$  在透射光谱上表现为每一个确定波长  $\lambda$  的光强变化和漂移。对于某个特定 Ex-TFG 的 TE 模(或 TM 模)的透射光谱, 对传输谱  $T$  取微分得到随波长  $\lambda$  的透射光谱光强变化率  $T'$ , 如图 2(b) 的插图所示。在图 2(b)

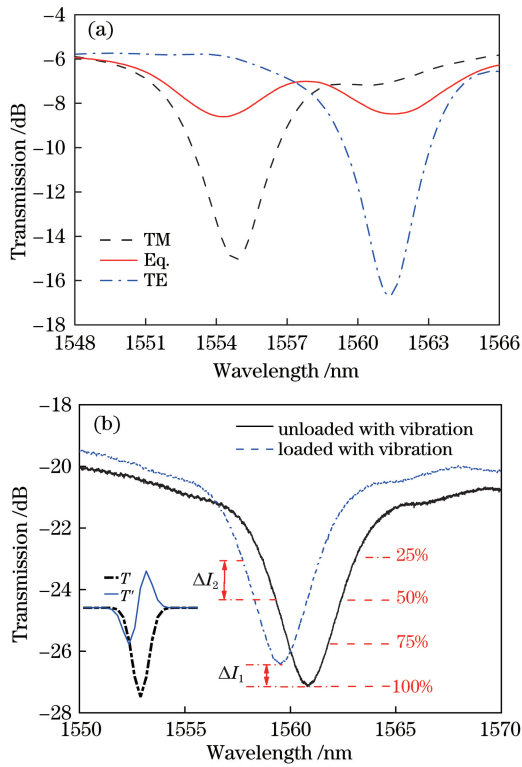


图 2 Ex-TFG 的透射光谱。(a) Ex-TFG 在 C+L 波段的偏振相关光谱;(b) Ex-TFG 上加载振动信号后 TE 模的光谱变化示意图

Fig. 2 Transmission spectra of Ex-TFG. (a) Polarization dependence spectrum of Ex-TFG in C+L bands; (b) schematic of spectral change of Ex-TFG loaded with vibration for TE mode

中定义谐振峰 25%、50%、75% 和 100% 这 4 个波长点的位置中,50% 的变化率  $|T'|$  的值是最大的,因此,理论上 Ex-TFG 的 TE 模(或 TM 模)谐振峰的 3 dB(谐振峰 50%)点的振动加速度灵敏度优于其

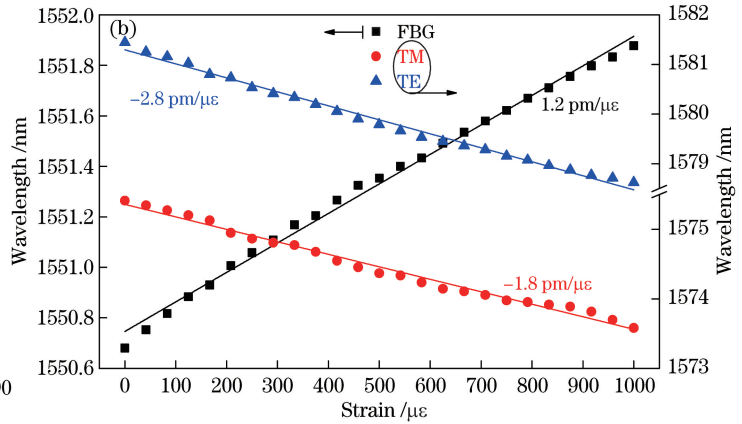
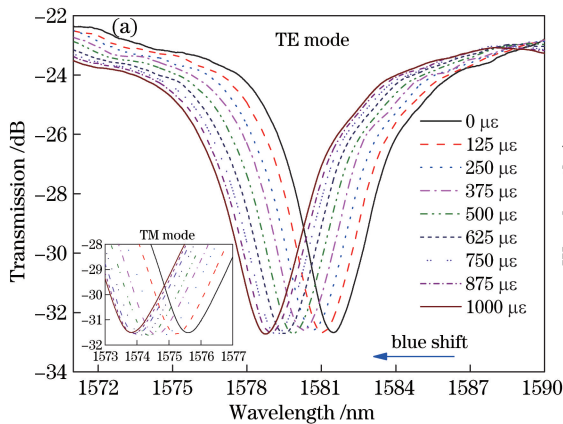


图 3 Ex-TFG 的轴向应变响应。(a) 轴向应变下 TE 模的光谱响应曲线(插图: TM 模);

(b) TE 模和 TM 模的轴向应变响应灵敏度

Fig. 3 Axial strain response of Ex-TFG. (a) Spectrum of TE mode under axial strain (inset: TM mode); (b) axial strain response sensitivities of TE and TM modes

他波长点。插图中虚线为模拟谐振峰  $T$ , 实线为光强变化率  $T'$ 。

### 3 实验与讨论

#### 3.1 Ex-TFG 的轴向应变和弯曲应变特性

采用 SM28 光纤制作的 Ex-TFG 的周期为  $28 \mu\text{m}$ , 倾斜角度为  $81^\circ$ , 栅区长度约为  $10 \text{ mm}$ , 在 C+L 波段对其轴向应变和弯曲应变的响应特性进行实验。在 Ex-TFG 轴向应变响应实验中, 使用两个 3 轴挠性位移台 (MBT616D, Thorlabs, 美国) 固定 Ex-TFG, 然后固定一端尾纤, 转动另一端的差分调节器。通过拉伸光纤得到轴向应变下 TE 模的光谱响应曲线(插图: TM 模), 如图 3(a) 所示。由图可知, 在 TE 模和 TM 模全激励情况下, 随着拉力的增大光谱均发生蓝移, 且光强保持不变。如图 3(b) 所示, 在  $0 \sim 1000 \mu\epsilon$  范围内, Ex-TFG 的 TE 模和 TM 模的轴向应变灵敏度分别为  $-2.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$  和  $-1.8 \text{ pm}/\mu\epsilon$  (对比的 FBG 为  $+1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ), TE 模的轴向应变灵敏度的绝对值比 TM 模的高约 55%。

在 Ex-TFG 弯曲应变响应实验中, 首先将 Ex-TFG 粘贴固定在等强度悬臂梁上, 然后通过转动差分调节器使等强度悬臂梁的自由端发生弯曲, 分别记录 Ex-TFG 的 TE 模和 TM 模在不同曲率半径条件下的光谱。实验得到在  $0 \sim 0.4 \text{ m}^{-1}$  的曲率范围内, Ex-TFG 对弯曲应变的响应如图 4 所示, 随着曲率增大, TE 模和 TM 模的光谱不仅发生蓝移, 且谐振光强均呈单调衰减趋势, 该结果与理论分析的结论是一致的。对应的 TE 模和 TM 模的光强变化、波长漂移曲线分别如图 4(c) 和 (d) 所



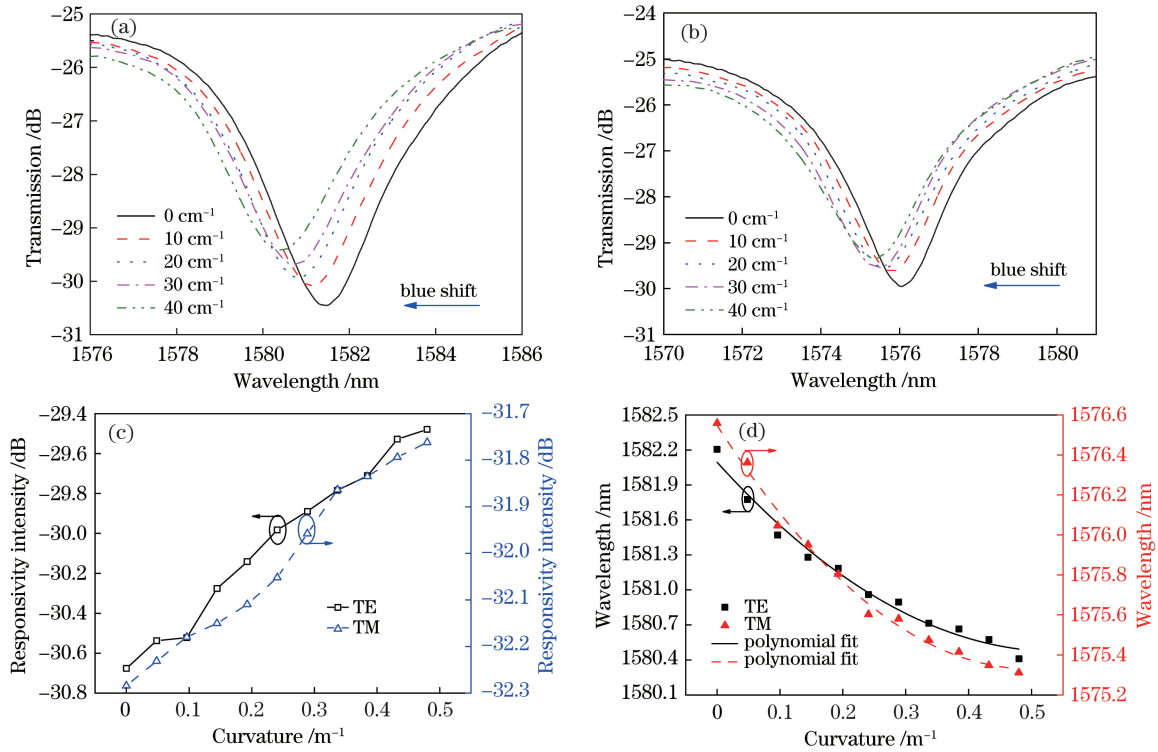


图 4 Ex-TFG 的弯曲应变响应。(a) TE 模和(b)TM 模的弯曲应变响应的光谱变化；  
对应的 TE 模和 TM 模的(c)光强变化和(d)波长漂移曲线

Fig. 4 Bending strain responses of Ex-TFG. Spectra of bending strain responses of (a) TE mode and (b) TM mode; corresponding (a) light intensity changes and (d) wavelength shifts of TE mode and TM mode

示,计算得到其基于光强变化的弯曲应变灵敏度分别为  $2.6 \text{ dB/m}^{-1}$  和  $1.2 \text{ dB/m}^{-1}$ ,其基于波长漂移的弯曲应变灵敏度分别为  $-3.34 \text{ nm/m}^{-1}$  和  $-2.53 \text{ nm/m}^{-1}$ 。该结果表明 TE 模的光强变化约为 TM 模的 2 倍,且波长漂移也优于 TM 模,这是 Ex-TFG 的光谱变化受切向应变和轴向应变综合作用的结果。此外,TE 模的轴向应变灵敏度比 TM 模的高约 55% [图 3(b)],因此 TE 模的弯曲灵敏度始终大于 TM 模的。

### 3.2 Ex-TFG 的低频振动传感特性

图 5 是基于悬臂梁的低频振动传感实验系统原理图。在该实验中,首先由可调谐激光光源(TLS)提供窄线宽激光信号(可调谐带宽为  $196.25 \sim$

$186.35 \text{ THz}$ ,误差为  $\pm 0.5 \text{ GHz}$ ,线宽小于  $100 \text{ kHz}$ ),信号经光隔离器(ISO)、起偏器(polarizer)和偏振控制器(PC)到达传感测试光纤光栅。如图 5 中插图所示,用聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)胶带将 Ex-TFG 沿着光纤轴向封装于悬臂梁上,以抑制悬臂梁振动过程中 Ex-TFG 内部谐振导致的高频噪声;然后信号发生器(function)输出的正弦信号经压电陶瓷(PZT)驱动电源放大后加载到等强度悬臂梁上;最后经过光电转换在示波器(DSO)上输出被振动信号调制的光。其中机械可调衰减器(VOA)的作用是对输出信号的光功率进行衰减以保证光电探测器工作在线性区域。插图为等强度悬臂梁上 Ex-TFG 的固定示意图。

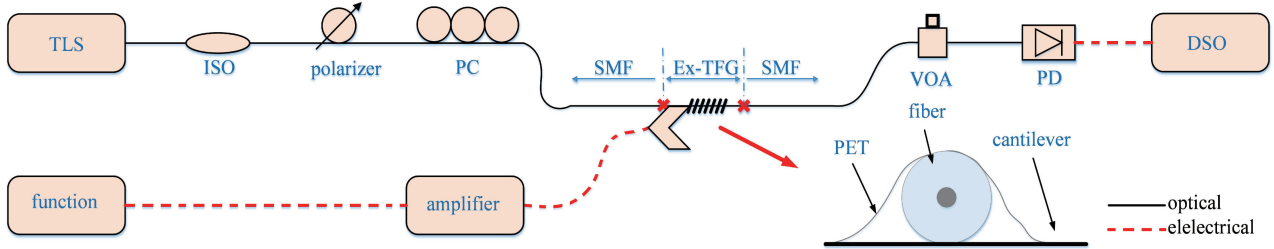


图 5 基于悬臂梁的低频振动传感实验系统原理图

Fig. 5 Experimental system diagram of low frequency vibration sensing based on cantilever beam

所使用的 PZT 的输出特性如图 6 所示。由图 6(a)可知,在输入频率小于 PZT 的固有频率(约为 500 Hz)时,PZT 的输出位移是比较稳定的,能够给等强度悬臂梁提供稳定的振动信号。图 6(b)为 PZT 振动加速度与频率的响应曲线,结合图 6(a)、(b)的 PZT 的标定结果,在以下振动实

验中,选择 5 V 作为信号发生器的最大输出电压值,这也是由所使用的 PZT 信号放大机构的限制确定的,振动频率范围选择为 20~220 Hz。在此采用文献[8]中厚度  $T_h$  分别为 0.3,0.4,0.5 mm 的铜质等强度悬臂梁进行 Ex-TFG 的低频振动传感特性实验。

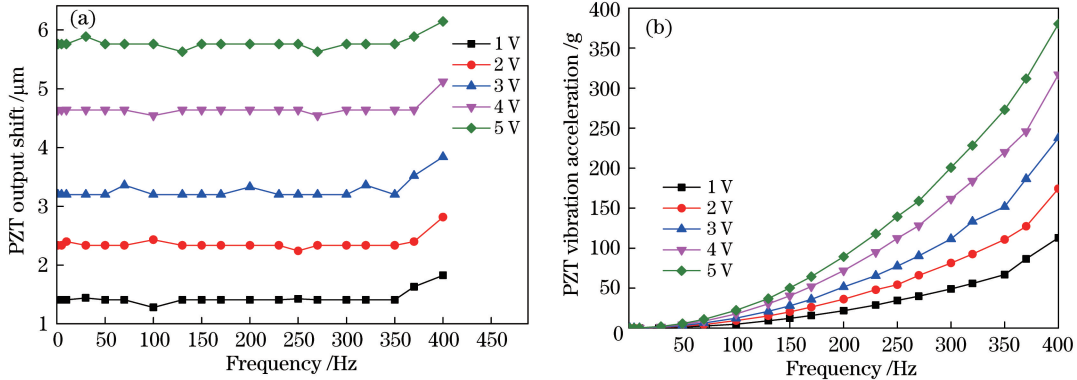


图 6 PZT 的频响特性。(a) PZT 的输出位移与频率响应曲线;  
(b) PZT 振动加速度与频率的响应曲线

Fig. 6 Frequency response characteristics of PZT. (a) Response curve of PZT output shift versus frequency;  
(b) response curve of PZT vibration acceleration versus frequency

首先,采用厚度  $T_h = 0.3\text{mm}$  的等强度悬臂梁进行实验。图 7(a)和(b)分别为 Ex-TFG 的 TE 模和 TM 模在不同波长点的振动传感输出响应结果。由图可知,Ex-TFG 的 TE 模和 TM 模的 50% 波长点(3 dB 点)的输出幅值大于 100% 的谐振峰点,同时也是 25%、50%、75% 和 100% 谐振峰点这 4 组数据中输出幅值最大的谐振峰点,该实验结果和理论

预期是吻合的。利用振动加速度灵敏度  $S$  的计算公式  $S = V/a$  [其中  $V$  是示波器的输出幅值,  $a$  是加速度,  $g$  是重力加速度值 ( $g = 9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )], 计算得到 TE 模和 TM 模在  $T_h = 0.3 \text{ mm}$  的最大加速度灵敏度分别为  $S_{TE} = 113.54 \text{ mV/g}$  和  $S_{TM} = 100.93 \text{ mV/g}$ , 且分别为 100% 波长点的最大加速度灵敏度  $S'_{TE} = 56.58 \text{ mV/g}$  和  $S'_{TM} = 39.21 \text{ mV/g}$  的 2 倍多。

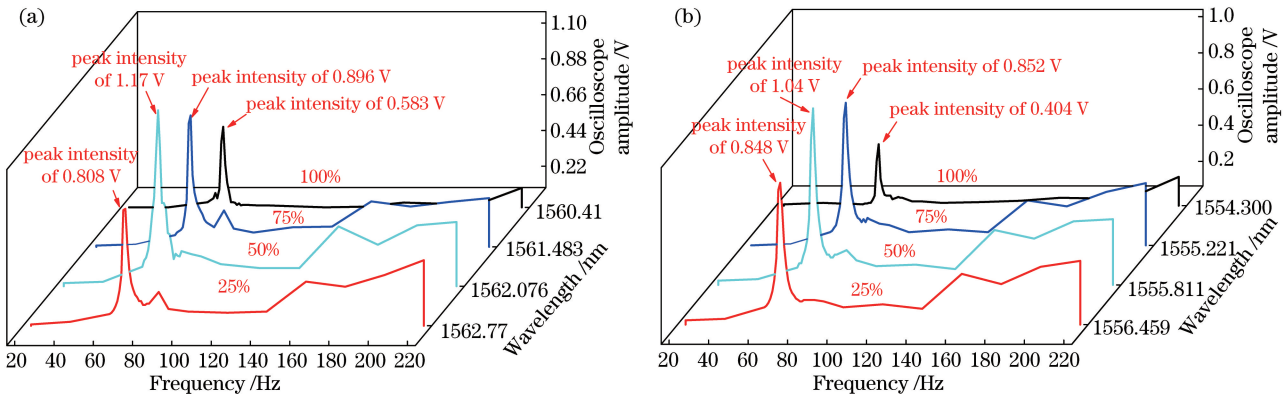


图 7 Ex-TFG 的谐振峰不同波长点的振动传感输出响应结果。(a) TE 模;(b) TM 模

Fig. 7 Frequency response diagrams of Ex-TFG resonance peaks at different percentages points.

(a) TE mode; (b) TM mode

图 8 是 TE 模和 TM 模在不同输入电压下(振动频率分别为 65,68,75,160 Hz)的幅值响应特性,其中 68 Hz 为厚度  $T_h = 0.3 \text{ mm}$  的悬臂梁的固有频率点,65,75,160 Hz 均为一般频率的检测点。可

见,在 1~5 V 的输入电压范围内,传感器具有很好的线性输出特性,且被测信号的输出幅值在振动频率为 68 Hz 时最大,这是因为当振动频率接近固有频率时,悬臂梁输出的振动幅度最大<sup>[8]</sup>。

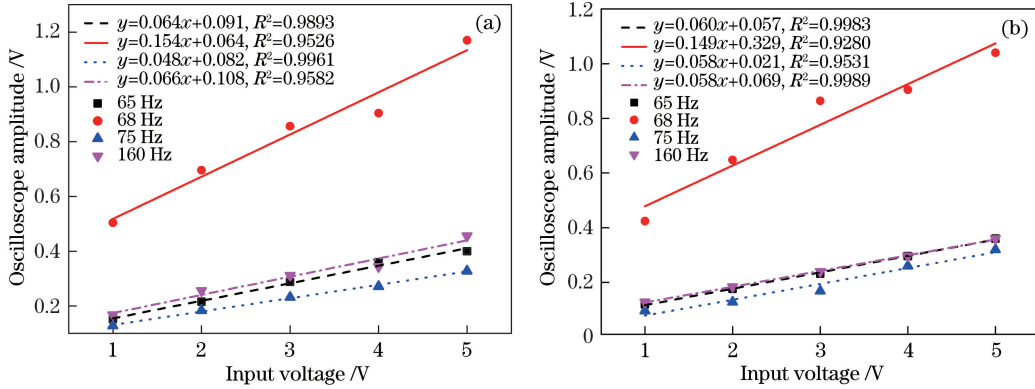


图 8 不同输入电压下(振动频率分别为 65,68,75,160 Hz)的幅值响应特性。(a) TE 模;(b) TM 模

Fig. 8 Amplitude response versus input voltage at different vibration frequencies of 65, 68, 75, and 160 Hz. (a) TE mode; (b) TM mode

测量 TE 模和 TM 模频率响应的稳定性,如图 9 所示,得到 TE 模和 TM 模的峰-峰值标准差分别为  $\sigma_{TE}=0.00912$  V 和  $\sigma_{TM}=0.00795$  V。图 9 表明 TM 模相对于 TE 模有更好的输出稳定性,这是因为 TE 模对振动信号更加灵敏、其噪声相对 TM 模更大所造成的。

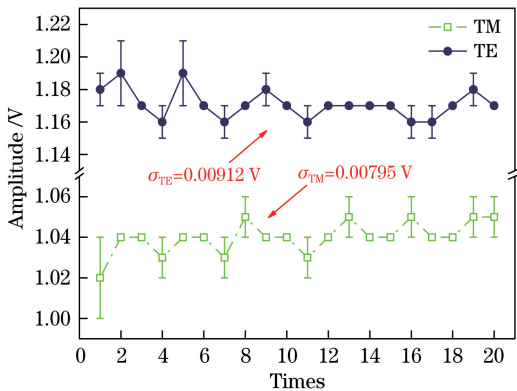


图 9 TE 模和 TM 模频率响应的稳定性  
Fig. 9 Frequency response stabilities for TE mode and TM mode

图 10(a)为悬臂梁厚度为  $T_h=0.3$  mm 时,输入电压为 5 V、频率为 68 Hz 的正弦信号下 Ex-TFG 的 TE 模谐振光谱 3 dB 点的时域响应;图 10(b)为 TE 模谐振峰的 25%、50%、75% 和 100% 波长点的频谱图;图 10(c)为悬臂梁厚度为  $T_h=0.3$  mm 时,输入电压为 5 V、频率为 68 Hz 的正弦信号下 Ex-TFG 的 TM 模谐振光谱 3 dB 点的时域响应;图 10(d)为 TM 模谐振峰的 25%、50%、75% 和 100% 波长点的频谱图。由图 10(a)、(c)可见,TE 模和 TM 模的 3 dB 点都有比较完整的正弦振动信号。由图 10(b)、(d)可知,Ex-TFG 谐振峰的 TE 模和 TM 模的 50%、25%、75% 和 100% 波长

点的谐振主频都位于固有频率 68 Hz 处,但是 3 dB 点(实线)相对于其他谐振峰百分点对 2 倍和 3 倍固有频率具有更好的抑制效果,且 3 dB 点信噪比(SNR)也是最高的(较 100% 波长点的要高约 10 dB)。如图 10(b)、(d)的插图所示,TE 模的 3 dB 点和 100% 波长点的 SNR 分别约为 50 dB 和 40 dB;TM 模的 3 dB 点和 100% 波长点的 SNR 约为 57 dB 和 34 dB。图 10(d)中插图为对应的谐振峰的 25%、50%、75% 和 100% 波长点的 SNR。

实验进一步对比研究了不同厚度( $T_h=0.3, 0.4, 0.5$  mm)等强度悬臂梁条件下 TE 模和 TM 模的谐振峰 3 dB 点的振动传感特性,即对应不同的固有频率(68,82,90 Hz)等强度悬臂梁的振动传感研究,得到 TE 模和 TM 模的时频域响应特性如图 11 所示,对应的主要特性参数如表 1 所示。由图 11(a)、(c)可以看出,TE 模和 TM 模的最大加速度灵敏度均随着等强度悬臂梁厚度的增加而减小,这与理论分析是一致的。由图 11(b)、(d)可知,被测信号的 SNR 随悬臂梁共振频率的增大(对应厚度增加)而增大。由表 1 可以看出 TE 模和 TM 模,在同一厚度条件下 TE 模的振动加速度灵敏度总大于 TM 模。这是因为在相同条件下,悬臂梁厚度的增加导致 PZT 与悬臂梁的共振幅度减小,使得悬臂梁上的 Ex-TFG 受噪声的影响降低,从而得到更高 SNR 和具有更小半峰全宽的频谱带宽。图 11 中实心点为对应的 SNR。

## 4 结 论

提出并研究基于 Ex-TFG 的等强度悬臂梁低频振动传感器的优化设计方法。对 Ex-TFG 的轴向应变响应、弯曲应变响应和谐振峰不同波长点的

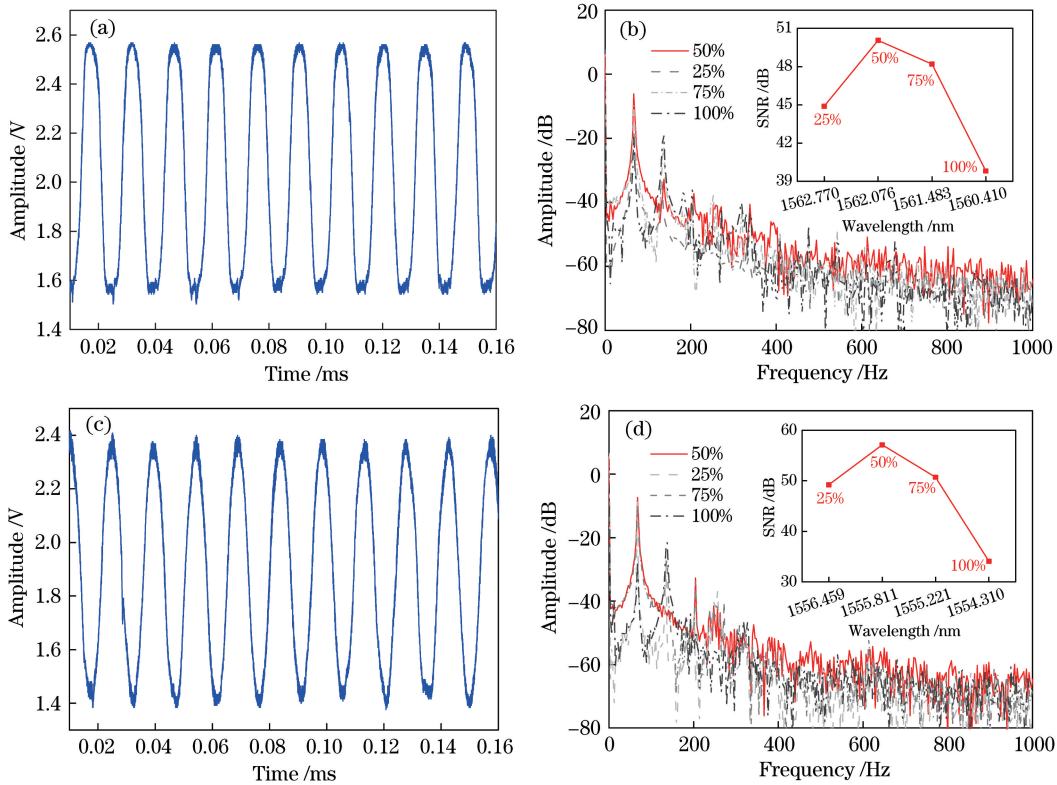


图 10 (a)悬臂梁厚度为  $T_h=0.3$  mm 时,输入电压为 5 V、频率为 68 Hz 的正弦信号下 Ex-TFG 的 TE 模谐振光谱 3 dB 点的时域响应;(b) TE 模谐振峰的 25%、50%、75%和 100%波长点的频谱图;(c)悬臂梁厚度为  $T_h=0.3$  mm 时,输入电压为 5 V、频率为 68 Hz 的正弦信号下 Ex-TFG 的 TM 模谐振光谱 3 dB 点的时域响应;(d) TM 模谐振峰的 25%、50%、75%和 100%波长点的频谱图

Fig. 10 (a) Time domain signal at 3 dB point of TE resonance peak of Ex-TFG when cantilever beam with  $T_h=0.3$  mm is driven by sinusoidal signal with input voltage of 5 V and frequency of 68 Hz; (b) frequency spectra at 25%, 50%, 75%, and 100% wavelength points of TE resonance peak; (c) time domain signal at 3 dB point of TM resonance peak of Ex-TFG when cantilever beam with  $T_h=0.3$  mm is driven by sinusoidal signal with input voltage of 5 V and frequency of 68 Hz; (d) frequency spectra at 25%, 50%, 75%, and 100% wavelength points of TM resonance peak

表 1 悬臂梁厚度  $T_h$  分别为 0.3,0.4,0.5 mm 时, TE 模和 TM 模 3 dB 点的最大振动加速度灵敏度

Table 1 Max vibration acceleration sensitivities of TE and TM modes at 3 dB points for different cantilever beam  $T_h$  of 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively

Thickness $T_h$ /mm	Amplitude /V		Vibration acceleration sensitivity /( $mV \cdot g^{-1}$ )	
	TE	TM	TE	TM
0.3	1.170	1.040	113.54	100.93
0.4	0.856	0.736	58.55	50.34
0.5	0.822	0.728	45.54	40.33

振动特性进行理论和实验研究。结果表明, Ex-TFG 的谐振波长对轴向应变呈良好的线性响应, 谐振强度对轴向应变不敏感;而在弯曲应变的作用下, Ex-TFG 的谐振波长和 谐振强度均有良好的响应;且 TE 模较 TM 模的轴向应变和弯曲应变均具有更高灵敏度。在此基础上,进一步研究 Ex-TFG 等强度悬臂梁传感器的 TE 模和 TM 模的谐振峰不同波长点的振动特性,结果表明:利用谐振峰的 3 dB 点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和更好的 SNR;且相同条件下,TE 模比 TM 模具有更高的振动响应灵敏度,但 TM 模的输出响应比 TE 模相对稳定。以上研究结论对基于 Ex-TFG 的等强度悬臂梁低频振动检测传感器的优化设计具有重要的指导意义。



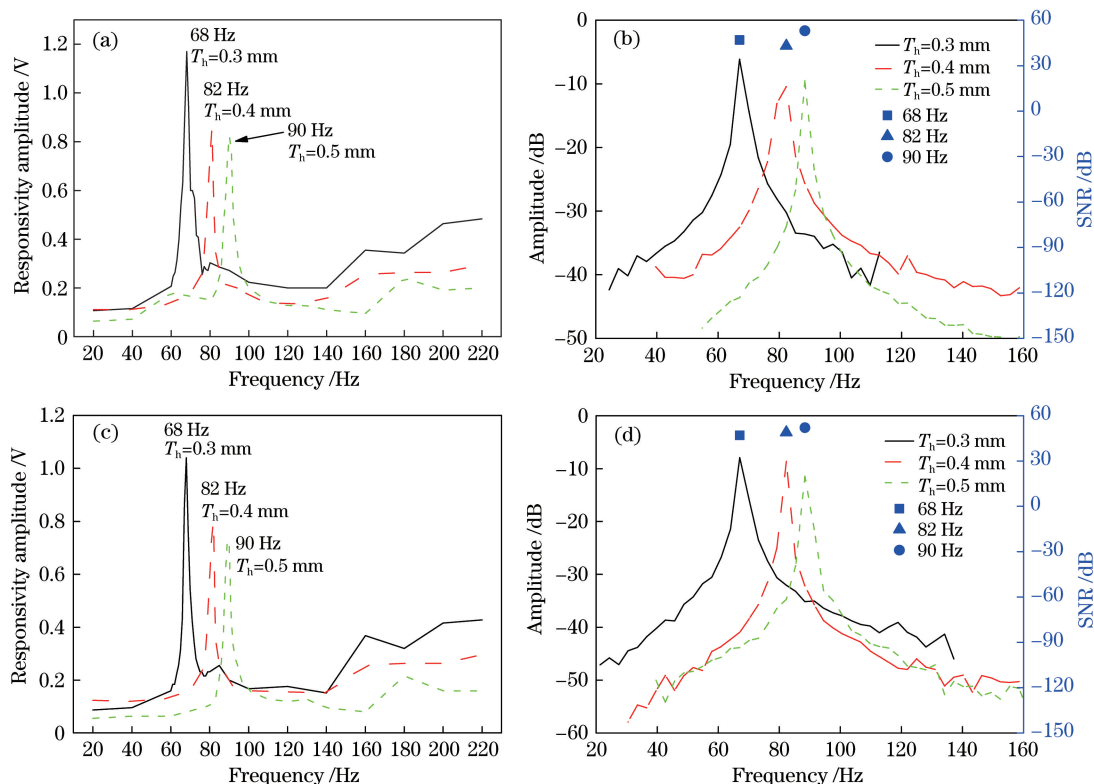


图 11 悬臂梁厚度  $T_h$  分别为 0.3, 0.4, 0.5 mm 时的响应曲线。(a) TE 模的谐振峰 3 dB 点响应曲线; (b) TE 模的频谱; (c) TM 模的谐振峰 3 dB 点输出响应曲线; (d) TM 模的频谱

Fig. 11 Response curves when cantilever beam thickness  $T_h$  is 0.3, 0.4, and 0.5 mm, respectively. (a) Response curves at 3 dB point of TE resonance peak; (b) frequency spectra of TE mode; (c) response curves at 3 dB point of TM resonance peak; (d) frequency spectra of TM mode

参 考 文 献

[1] Dong X Y, Zhang H, Liu B, *et al.* Tilted fiber Bragg gratings: principle and sensing applications[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(1): 6-30.

[2] Yan Z J, Wang H S, Zhou K M, *et al.* Broadband tunable all-fiber polarization interference filter based on 45° tilted fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1): 94-98.

[3] Yan Z J, Sun Z Y, Zhou K M, *et al.* Numerical and experimental analysis of sensitivity-enhanced RI sensor based on Ex-TFG in thin cladding fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(14): 3023-3027.

[4] Caucheteur C, Guo T, Albert J. Polarization-assisted fiber Bragg grating sensors: tutorial and review[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(16): 3311-3322.

[5] Zhou K M, Zhang L, Chen X F, *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.

[6] 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.

[7] Mou C B, Zhou K M, Yan Z J, *et al.* Liquid level sensor based on an excessively tilted fibre grating[J]. Optics Communications, 2013, 305: 271-275.

[8] 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.

[9] Luo B B, Yan Z J, Sun Z Y, *et al.* Novel glucose sensor based on enzyme-immobilized 81° tilted fiber grating[J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30571-30578.

[10] Luo B B, Wu S X, Zou W G, *et al.* Label-free immunoassay for porcine circovirus type 2 based on excessively tilted fiber grating modified with staphylococcal protein A[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2016, 86: 1054-1060.

[11] Luo B B, Wu S X, Zhang Z H, *et al.* Human heart failure biomarker immunosensor based on excessively tilted fiber gratings[J]. Biomedical Optics Express, 2017, 8(1): 57-67.

- [12] Fabian M, Hind D M, Gerada C, *et al.* Comprehensive monitoring of electrical machine parameters using an integrated fiber Bragg grating-based sensor system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(4): 1046-1051.
- [13] Hu C N, Yu Z H, Wang A B. An all fiber-optic multi-parameter structure health monitoring system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20287-20296.
- [14] Kisała P, Harasim D, Mroccka J. Temperature-insensitive simultaneous rotation and displacement (bending) sensor based on tilted fiber Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29922-29929.
- [15] Guo T, Shang L B, Ran Y, *et al.* Fiber-optic vector vibroscope[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2703-2705.
- [16] Chen X Y, Du F, Guo T, *et al.* Liquid crystal-embedded tilted fiber grating electric field intensity sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3347-3353.
- [17] Majumder M, Gangopadhyay T K, Chakraborty A K, *et al.* Fibre Bragg gratings in structural health monitoring: present status and applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 147(1): 150-164.
- [18] Wang J Y, Ai F, Sun Q Z, *et al.* Diaphragm-based optical fiber sensor array for multipoint acoustic detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25293-25304.
- [19] Song M P, Yin C, Lu Y, *et al.* Four-channel detecting phase demodulation  $\varphi$ -OTDR based on  $3 \times 3$  Michelson interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0806001.  
宋牟平, 尹聪, 陆燕, 等. 基于  $3 \times 3$  迈克耳孙干涉仪的四路检测相位解调  $\varphi$ -OTDR[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0806001.
- [20] Zhou Y, Liu C, Wang K B, *et al.* Double-beam thin-film interferometric fiber microphone based on phase demodulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0106001.  
周瑜, 刘超, 王坤博, 等. 基于相位解调的双光束薄膜干涉型光纤传声器[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0106001.
- [21] Wu H J, Liu J, Lu L D, *et al.* Multi-point disturbance detection and high-precision positioning of polarization-sensitive optical time-domain reflectometry [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5371-5377.
- [22] Wang F, Zhang Y C, Wang W, *et al.* Development of a multiperimeter sensing system based on POTDR [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 7102907.
- [23] Wu S N, Wang L, Chen X L, *et al.* Flexible optical fiber Fabry-Perot interferometer based acoustic and mechanical vibration sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(11): 2216-2221.
- [24] Ni W J, Lu P, Fu X, *et al.* Ultrathin graphene diaphragm-based extrinsic Fabry-Perot interferometer for ultra-wideband fiber optic acoustic sensing[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20758-20767.
- [25] Xiao S X, Zhang L D, Wei D, *et al.* Orbital angular momentum-enhanced measurement of rotation vibration using a Sagnac interferometer [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1997-2005.
- [26] Yan Z J, Wang H S, Wang C L, *et al.* Theoretical and experimental analysis of excessively tilted fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12107-12115.
- [27] Shu X W, Zhang L, Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(2): 255-266.
- [28] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1277-1294.