

基于少模长周期光纤光栅的高灵敏度扭矩传感器

邓靖¹, 冯元华^{2*}, 高社成², 李朝晖¹

¹暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632;

²暨南大学信息科学与技术学院, 广东 广州 510632

摘要 利用高频二氧化碳(CO₂)激光脉冲写入法制备了一种基于少模长周期光纤光栅(LPG)的高灵敏度扭矩传感器。两个纤芯线偏振(LP₀₁和LP₁₁)模式耦合形成谐振峰。扭转灵敏度可达 0.528 nm·rad⁻¹·m⁻¹, 所提扭矩传感器的扭转灵敏度比普通单模 LPG 提高一个数量级。引入扭转的 LPG 可以看作是对原光栅进行周期性螺旋调制, 其有效光栅周期与扭转率成比例, 从而使谐振峰波长发生漂移, 这是形成高扭转灵敏度的主要原因。这种新型 LPG 对环境折射率和温度的交叉敏感性较弱, 可以用作高精度的接触性扭矩传感器, 在涉及扭转测量的很多领域有广阔的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 扭矩传感器; 光栅

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100602

High Sensitivity Torsion Sensors Based on Few-Mode Long-Period Fiber Gratings

Deng Jing¹, Feng Yuanhua², Gao Shecheng², Li zhaohui¹

¹*Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China;*

²*College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China*

Abstract A torsion sensor based on few-mode long-period fiber grating (LPG) with high sensitivity is proposed. The LPG is written by CO₂-laser pulse with high frequency. Harmonic peaks are generated by the coupling between linear polarization (LP₀₁ and LP₁₁) modes of two cores. Torsion sensitivity can reach up to 0.528 nm·rad⁻¹·m⁻¹, and the torsion sensitivity of the torsion sensor is one order higher than that of the common single-mode LPG. The torsion-induced LPG can be treated as a periodic helical modulation superimposed on the original grating. As a result, the effective grating period changes in proportion to the torsion rate to make the wavelength of resonant peak drift, which is the main reason for the generation of high torsion sensitivity. Due to the weak cross sensitivity of the new LPG to ambient refractive index and temperature, the new LPG can be used as a contact torsion sensor with high accuracy and has a wide range of application prospects in the fields relation to torsional measurement.

Key words fiber optics; fiber optic sensors; torsion sensors; grating

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 050.2770

1 引言

光纤扭矩传感器具有尺寸小、灵敏度高、电绝缘性好、抗电磁干扰和易于实现分布式及多路复用测量等特性,且对使用环境的要求较低,近些年引起了研究者的广泛关注^[1-6]。光纤扭矩传感器可以将扭转引入的应变转换为波长、偏振相关损耗、分布布拉格反射仪拍频频率、干涉幅度、光功率以及偏振态等各种可测量的参数,通过对这些参数的测量来量化光纤扭转的程度。其中,波长调制法比较简单,是光纤扭矩传感中使

收稿日期: 2017-04-17; **收到修改稿日期:** 2017-05-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 邓靖(1990—),女,硕士研究生,主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: yxzmdj@163.com

导师简介: 李朝晖(1975—),男,博士,教授,主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: li_zhaohui@hotmail.com

* **通信联系人.** E-mail: favinfeng@163.com

用最多的方法,该方法可以将扭矩转换为透射光谱的峰值波长漂移或干涉条纹的波长漂移。长周期光纤光栅(LPG)法为波长调制法的一种实现手段^[7-8],该方法使传感器结构紧凑,可对波长进行编码,也可区分扭转的方向。LPG通过促使基模与高阶模之间发生谐振耦合,可在光纤中形成周期性折射率/结构调制。

典型的单模光纤长周期光纤光栅(SMF-LPG)^[9]的扭转灵敏度只有约 $0.0645 \text{ nm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,扭转响应归因于两种耦合模式的圆偏振双折射变化。为提高扭转灵敏度,研究者提出了超长周期光栅的特殊结构^[9]。根据光栅的周期性放大原理,可将扭转灵敏度提高到 $0.25 \text{ nm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。增强灵敏度的一般方法是选择合适的包层模式数来达到更高的色散因子,此方法适用于扭矩传感器,但会造成更严重的温度交叉敏感问题^[10-13]。

本文提出了利用二氧化碳(CO₂)激光器在少模光纤(FMF)中刻写LPG的方案,该方案可显著提高LPG扭矩传感器的灵敏度。侧面曝光引起非对称折射率调制,导致FMF中线偏振(LP₀₁和LP₁₁)模式之间发生谐振耦合^[14]。对光纤施加的扭转可以认为是对现有非对称折射率调制结构所叠加的周期性调制,因此扭转率的变化可由有效光栅周期的变化直接测量得到。实验证明,少模光纤长周期光纤光栅(FMF-LPG)具有明显增强的扭转灵敏度($0.528 \text{ nm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$),比常见的SMF-LPG高约一个数量级。FMF-LPG的扭转工作范围为 $\pm 100 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$,线性度良好。此外,FMF-LPG基本不受周围环境的影响,这将有利于接触性的扭转测量。FMF-LPG具有相对较小的温度交叉敏感度且光谱相对简单,在高灵敏度接触性扭矩传感方面有很大的应用潜力。

2 基本原理

FMF是仅能支持少量几个模式传输的光纤,相比SMF只能支持基模LP₀₁,FMF可以支持最少两个模式即LP₀₁和LP₁₁^[15],但其支持的模式数量远少于普通多模光纤,这使得FMF既能支持少量稳定的模式,又不至于引起大的模式色散。不同于SMF-LPG,基于FMF的LPG可将基模LP₀₁的能量耦合到高阶纤芯模,且较容易出现LP₀₁和LP₁₁模式的能量耦合^[16-17]。FMF-LPG的基本原理是:通过在纤芯中引入非对称的折射率微扰,破坏了模式间的正交性,使模式发生耦合,在一定的相位匹配条件下实现模式间的能量转换。在CO₂激光制备的LPG上引入的周期性介电常数可以表示为

$$\Delta\epsilon(r, \theta, z) = \Delta\epsilon(r, \theta) \exp\left(i \frac{2\pi}{\Lambda} z\right), \quad (1)$$

式中 r, θ 为光纤截面内极坐标下的半径和极角, z 为光纤轴向, Λ 为光栅周期。此处只考虑一阶LPG,因为一般高阶的光栅耦合都很弱。对任意 z 位置的光纤横截面的介电常数进行傅里叶展开可得

$$\Delta\epsilon(r, \theta) = \sum_l \Delta\epsilon_l(r) \exp(il\theta), \quad (2)$$

式中 l 为方位角指数, $l=0, 1, 2, \dots$ 。 l 阶方位角的微扰对应LPG耦合的各个LP _{ln} 模式。因为不同的方位角指数之间耦合积分为零,相同的方位角指数才能出现非零的模式耦合系数。模式耦合系数可以表示为

$$\kappa = \frac{\omega}{4} \iint e_{01}(r, \theta) \Delta\epsilon_l(r) \exp(il\theta) e_{ln}^*(r, \theta) r dr d\theta, \quad (3)$$

式中 ω 为光频率, $e_{01}(r, \theta)$ 为基模的横向电场分量, $e_{ln}^*(r, \theta)$ 为LP _{ln} 模的横向电场分量,*表示共轭。文献^[18-19]已经验证了CO₂激光侧边调制制备的光栅具有平均值为零的非对称折射率调制特性,其中 $l=1$ 的分量起主要作用,其他高阶方位角指数的调制效应可忽略不计。

扭转LPG会改变CO₂激光折射率调制的变化方向。如图1所示,位置1,2,3为CO₂激光引入折射率调制的区域,虚线箭头方向表示CO₂激光的曝光方向,即折射率调制从强到弱的方向。

以扭转率 $\tau \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ 扭转光纤后,位置2相对位置1具有 $\tau\Lambda$ 的角度旋转,这样就形成了螺旋形的折射率调制,沿光纤的总微扰可以表示为

$$\Delta\epsilon(r, \theta, z) = \Delta\epsilon'(r) \exp(i\theta + i\tau z) \exp\left(i \frac{2\pi}{\Lambda} z\right), \quad (4)$$

式中 $\Delta\epsilon'(r)$ 为扭转引入的应力导致的修正径向介电常数; τ 为LPG的扭转率,即单位长度的扭转角度;分量 $\exp(i\tau z)$ 代表扭转光纤引入的折射率调制面的旋转。将(4)式代入耦合模方程,可以得到新的相位匹配条件为

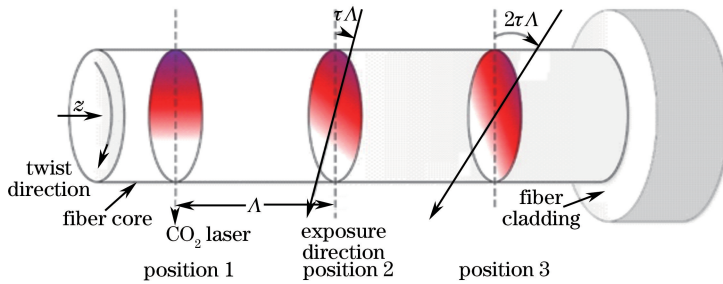


图 1 FMF-LPG 扭转图

Fig. 1 Schematic of torsion in FMF-LPG

$$\beta'_{01} - \beta'_{11} = \frac{2\pi}{\Lambda} + \tau, \quad (5)$$

式中 β'_{01} 、 β'_{11} 为扭转后 FMF-LPG 的传播常数, $\beta'_{01} = \beta_{01} + \Delta\beta_{01}$, $\beta'_{11} = \beta_{11} + \Delta\beta_{11}$ 。光纤扭转导致的传播常数改变可以表示为 $\Delta\beta_{lm} = \tau p_{44} \epsilon_{co} (l+1)/2$, 其中 $p_{44} = (p_{11} - p_{12})/2$, p_{11} 和 p_{12} 为光弹常数, ϵ_{co} 为介电常数, 此处不考虑具体的折射率梯度和光波长^[20]。需要指出的是, (5) 式右侧增加的 τ 分量只有在角向模式阶数 $l \neq 0$ 的折射率调制中才成立。而传统的紫外刻写 LPG 在光纤截面上具有均匀的折射率调制, 因此 (5) 式也不适用于这种光栅。(5) 式右侧可以表示为 $2\pi/\Lambda'$ 的形式, $\Lambda' = \Lambda - \tau\Lambda^2/(2\pi + \Lambda\tau)$ 为有效光栅周期。

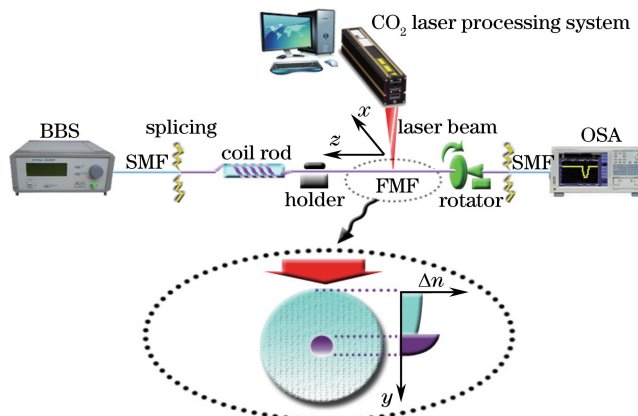
从 (5) 式的差分形式可以推导出光栅的扭转灵敏度为

$$\Delta\lambda = -(\Delta\beta_{01} - \Delta\beta_{11} + \tau) \left(\frac{d\beta_{01}}{d\lambda} - \frac{d\beta_{11}}{d\lambda} \right)^{-1}, \quad (6)$$

式中 $\Delta\beta_{01} - \Delta\beta_{11}$ 可理解为引入的圆双折射对波长漂移的影响, τ 可理解为有效光栅周期变化对波长漂移的影响, 式中第二个乘积项表示的是光栅扭转对模式色散的影响。选择 FMF 来制备 LPG 是因为 FMF 具有更高的色散因子, 有利于增强灵敏度。

3 实验与分析

实验所采用的 FMF 在 1550 nm 处的纤芯、包层折射率分别为 1.449 和 1.444, 纤芯直径为 19 μm 且比 SMF 大, 可支持更多的传播模式。实验采用高频 CO₂ 激光脉冲写入法制备 FMF-LPG。刻写系统包括 CO₂ 激光器、宽带光源 (BBS)、光谱分析仪 (OSA) 以及控制计算机, 该系统配置如图 2 所示。激光束通过硒化锌 (ZnSe) 透镜聚焦为直径约为 50 μm 的光斑, 在二维扫描振镜反射下激光束可以扫描焦平面的一块特定区域。刻写 FMF-LPG 需要的 CO₂ 激光功率比刻写 SMF 要低很多, 这种更低功率激光调制的制备方法可以保证 FMF-LPG 的机械强度不会降低。实验中, 使用适当优化的放电方法, 将一段长度约为 5 m 的 FMF 两端熔接 SMF, 并分别连接 BBS 和 OSA。BBS 的激光波长区间为 400 ~ 2000 nm, 平均功率为

图 2 高频 CO₂ 激光器刻写 FMF-LPG 的实验装置图Fig. 2 Experimental setup of FMF-LPG inscription with high frequency CO₂ laser

-30 dBm·nm⁻¹; OSA(型号 AQ6370c, YOKOGAWA 公司, 日本)的工作波长范围为 1200~2400 nm。光源输入一侧的 SMF 和 FMF 的熔接点容易激发 FMF 中的高阶模式, 为了保证 FMF 中 LP₀₁ 模的纯净度, 采用一种模式剥离器来消除高阶模式^[21], 具体方法是将输入端的 FMF 在直径为 10 mm 的玻璃棒上缠绕 20 圈。将 FMF 自然拉直, 使其一侧固定, 另一侧使用旋转夹具固定, 即可进行 LPG 的刻写。

CO₂ 激光刻写 FMF-LPG 是在光纤侧面曝光, CO₂ 激光的强度会沿着光纤横向逐渐衰减, 这是由光纤本身的吸收造成的^[22], 如图 2 中的放大图所示。由于 FMF 具有很大的纤芯直径, 因此其纤芯中会形成很强的非对称折射率, 这也正是 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模发生耦合的必备条件^[23]。设置光栅周期为 1.24 mm, 周期数约为 30, 只进行一次扫描循环即可得到性能优异的 FMF-LPG, 其透射光谱如图 3 所示。不同于传统的具有多个谐振峰的 SMF-LPG, 如图 3 所示, 该 FMF-LPG 在 1200~1800 nm 波段只有一个谐振峰, 其谐振峰位置为 1550.6 nm。扣除光纤的衰减后, 在谐振峰波长处以 LP₀₁ 模传输的光能量几乎全部经 LPG 转换为 LP₁₁ 模, 其转换效率为 98.5%。虽然转换后的 LP₁₁ 模为 FMF 的传导模式, 但输出 SMF 具有比 FMF 小的数值孔径, LP₁₁ 模进入 SMF 后会逐渐消逝, 这是透射谱曲线中谐振峰为损耗峰的原因。谐振峰的半峰全宽为 34.3 nm。

微调 LPG 的周期, 透射谱中的谐振波长值会产生相应偏移, 其对应关系如图 4 中的三角符号所示。随着光栅周期的增大, FMF-LPG 的谐振峰会向短波长方向偏移, 该现象与 SMF-LPG 是相反的。使用 COMSOL 软件进行有限元分析, 并根据调整后的相位匹配条件 $\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{eff}}^{01} - n_{\text{eff}}^{11})\Lambda$ 得到该 FMF 的相位匹配曲线, 如图 4 中的实线所示, 此处 n_{eff}^{01} 和 n_{eff}^{11} 分别为 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模的有效折射率, 可通过有限元分析求得。计算中用到的纤芯-包层折射率差为 0.5%, 且纤芯直径为 19 μm。相位匹配曲线对 LPG 传感器具有重要的意义, 因为它决定了模间色散对其敏感性的影响程度, 文献^[11]对此有详细描述。基于图 4 中的结果, 计算得到 1550 nm 处的色散因子 $d\beta_{01}/d\lambda - d\beta_{11}/d\lambda = -1.8 \text{ m}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。

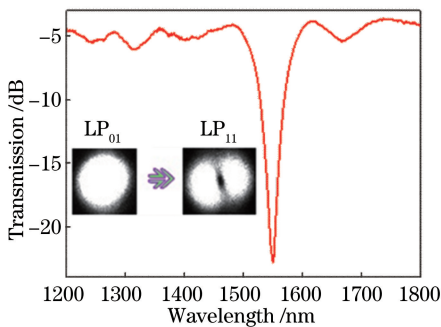


图 3 FMF-LPG 的透射谱及模式光斑

Fig. 3 Transmission spectrum and mode light spot of FMF-LPG

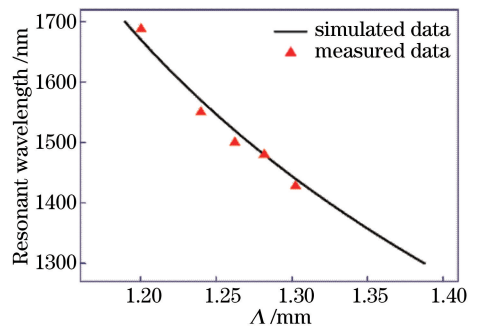


图 4 FMF-LPG 谐振波长随光栅周期的变化

Fig. 4 Resonant wavelength of FMF-LPG as a function of grating period

将刻有 LPG 的 FMF 自然拉伸, 并将其水平放置到夹具上。固定夹具如图 5 所示, 左侧用普通夹具固定, 右侧使用光纤旋转夹具夹紧。分别定义旋转夹具的顺时针方向和逆时针方向为正角度和负角度。扭转率可以定义为 $\tau = \pi\varphi/L$, 其中 φ 为旋转夹具的旋转角度, L 为左右两个夹具中间的光纤长度。本实验中 φ 的范围为 $[-6\pi, 6\pi]$, $L = 178 \text{ mm}$ 。以 $\pi/3$ 弧度为步长, 从起始位置分别旋转夹具正负 3 圈, 即扭转率为 $\pm 105 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$, 得到的实验结果如图 6 所示。扭转率增大时, FMF-LPG 的透射谱谐振峰向长波方向移动; 而扭转率减小时, FMF-LPG 的透射谱谐振峰向短波方向移动。扭转率与对应的谐振峰波长关系如图 6(b) 所示, 可以发现 $-105 \sim 105 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ 范围内, 谐振峰波长的漂移与扭转率呈良好的线性关系。将所有点进行线性拟合, 可以得到线性表达式为 $y = 0.5286x + 1549.5$, 进一步得到 FMF-LPG 的扭转灵敏度为 $0.5286 \text{ nm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 比普通 SMF-LPG 的扭转灵敏度高接近一个数量级^[9], 而且根据波长漂移的方向可以判断出扭转的方向, 同时可以通过判断谐振波长偏移方向来测量扭转方向。顺时针(逆时针)扭转在有效的光栅周期中产生减量(增量), 导致谐振谷产生红移(蓝移)。此外, 如果不受 CO₂ 激光器写入光栅的光纤脆弱性的限制, 其线性工作范围还可以进一步扩大。

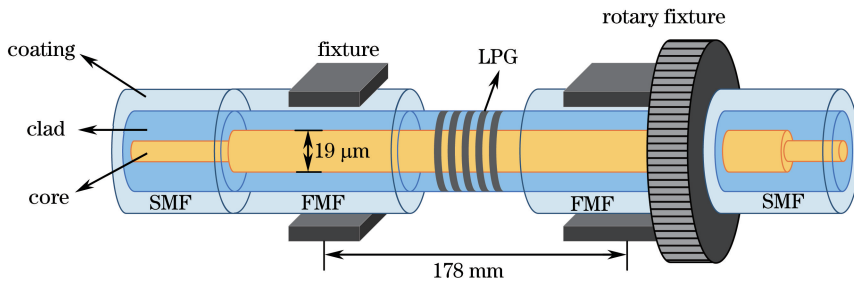


图 5 传感器结构示意图

Fig. 5 Diagram of sensor structure

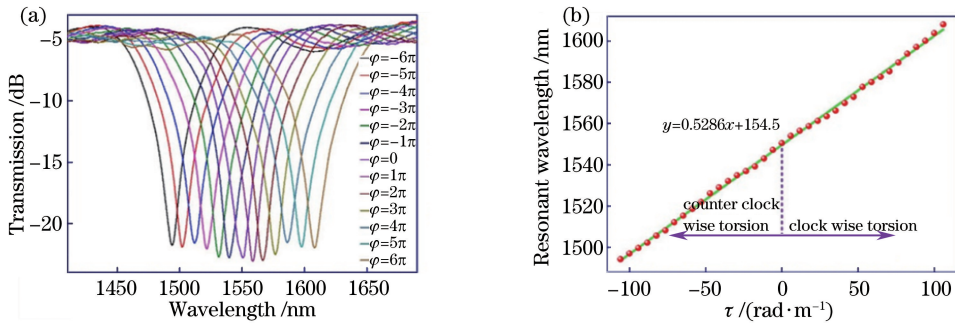


图 6 FMF-LPG 的扭转响应。(a)不同扭转率下的透射谱;(b)谐振波长与扭转率的关系

Fig. 6 Torsion response of FMF-LPG. (a) Transmission spectra under different torsion rates;

(b) relationship between resonant wavelength and torsion rate

为了验证实验结果与理论推导的一致性,将二者进行对比。之前计算的色散因子和光纤参数分别为 $p_{44}=0.075$, $\epsilon_{co}=2.100$, 据此得到扭转灵敏度为 $0.598 \text{ nm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 。有效光栅周期的变化引起 $0.555 \text{ nm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 的灵敏度变化,其在扭转响应中起主导作用。相比之下,圆双折射的变化仅引起 $0.043 \text{ nm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 的灵敏度变化。然而,由于模式色散的影响,SMF-LPG 的扭转灵敏度低得多。将 SMF 中的 LP_{01} 和 LP_{15} 模式进行比较,计算得到 $d\beta_{01}/d\lambda - d\beta_{15}/d\lambda$ 在波长 1550 nm 处的增量约为 $10.4 \text{ m}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$,这意味着 SMF-LPG 的扭转响应只有同等情况下 FMF-LPG 的 $1/6$ 。

4 FMF-LPG 的交叉敏感性分析

进一步对 FMF-LPG 的外部折射率敏感性和温度敏感性进行了测试。首先将 FMF-LPG 放置在蔗糖溶液中,将其两端分别连接光源和 OSA。实验在恒定室温 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) 下进行,通过调节蔗糖溶液的浓度改变光栅的外部折射率。4 组折射率对应的 FMF-LPG 的透射光谱曲线如图 7(a) 所示,谐振峰波长和对应折射率的关系如图 7(b) 所示。可以看出,折射率从 1.33 变化到 1.43 时,谐振峰波长几乎没有变化,这说明谐振峰很难受到外部环境折射率的影响,主要原因是其耦合模式为纤芯模。

另外,对 FMF-LPG 的温度敏感性进行了验证。首先将 FMF-LPG 放置在条形加热炉中,同时将 FMF-LPG 两端连接光源和 OSA。控制加热炉温度从 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 逐步升温至 $95 \text{ }^\circ\text{C}$,温度间隔步长为 $10 \text{ }^\circ\text{C}$,在每个温度点稳定 5 min 后再记录透射光谱。透射谱中的谐振峰波长与对应温度的关系如图 7(c) 所示,将所有点进行直线拟合后,可以得到 FMF-LPG 的温度敏感性为 $10 \text{ pm} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。温度响应很低的原因是:FMF-LPG 的耦合模式为纤芯 LP_{01} 和 LP_{11} 模式,二者具有相近的传播常数和热光系数。

需要强调的是,FMF-LPG 的扭转敏感性增强并不依赖于对模式色散因子的控制,使得 FMF-LPG 保持其较弱的温度响应。对比 FMF-LPG 的性能参数,可以发现所提出的基于 FMF-LPG 的扭矩传感器相比传统 LPG 扭转传感器,不仅灵敏度有所提高,还大大扩展了扭转工作范围。特别是相比于干涉型扭转传感器,所提出的基于 FMF-LPG 的扭矩传感器虽然灵敏度略低,但线性工作范围比前者增大了数倍,可适用于大范围扭转的应用。

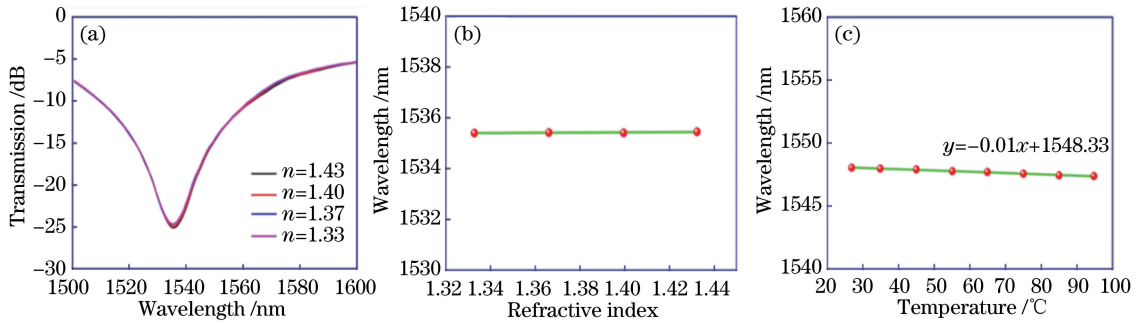


图7 (a)外界折射率变化范围为1.33~1.43时FMF-LPG的透射谱;(b)谐振波长与外界环境折射率之间的关系;(c)谐振波长与外界温度之间的关系

Fig. 7 (a) Transmission spectrum of FMF-LPG with external refractive index changing from 1.33 to 1.43; (b) relationship between resonant wavelength and external refractive index; (c) relationship between resonant wavelength and external temperature

5 结 论

提出了基于FMF-LPG的扭矩传感器,所提传感器具有灵敏度高、线性工作范围大的特点。FMF-LPG基于高频 CO_2 激光脉冲写入法制备,与SMF不同的是,FMF-LPG的谐振峰是两个纤芯模 LP_{01} 和 LP_{11} 的耦合。理论分析表明,扭转FMF-LPG可以改变LPG的有效周期,从而使谐振波长发生漂移。FMF-LPG的扭转灵敏度可达 $0.528 \text{ nm} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$,比普通SMF-LPG的扭转灵敏度约提高一个数量级。实验结果与理论分析结果一致。得益于FMF中 LP_{01} 和 LP_{11} 模式具有非常相近的传播常数和热光系数,FMF-LPG具有低至 $10 \text{ pm} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ 的温度响应。由于 LP_{01} 和 LP_{11} 模式均是纤芯模,因此温度响应基本不受环境折射率变化的影响。FMF-LPG传感器在高灵敏度扭矩传感器方向有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Chen L, Zhang W G, Wang L, *et al.* In-fiber torsion sensor based on dual polarized Mach-Zehnder interference[J]. Optics Express, 2014, 22(26): 31654-31664.
- [2] Song B B, Miao Y P, Lin W, *et al.* Multi-mode interferometer-based twist sensor with low temperature sensitivity employing square coreless fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26806-26811.
- [3] Zhou Q, Zhang W, Chen L, *et al.* Fiber torsion sensor based on a twist taper in polarization-maintaining fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23877-23886.
- [4] Song B B, Zhang H, Miao Y P, *et al.* Highly sensitive twist sensor employing Sagnac interferometer based on PM-elliptical core fibers[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15372-15379.
- [5] Kim H M, Kim T H, Kim B, *et al.* Temperature-insensitive torsion sensor with enhanced sensitivity by use of a highly birefringent photonic crystal fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(20): 1539-1541.
- [6] Guo Yongxing, Kong Jianyi, Xiong Hegen, *et al.* Advances in robot force/torque tactile sensing technology based on fiber Bragg grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050006.
郭永兴, 孔建益, 熊禾根, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的机器人力/力矩触觉传感技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 050006.
- [7] James S W, Tatam R P. Optical fibre long-period grating sensors: Characteristics and application[J]. Measurement Science & Technology, 2003, 14(5): R49-R61.
- [8] Lu Jianguo, Gu Zhengtian, Gao Kan. Spectral characteristics of cascaded tilted long period fiber gratings[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1005005.
陆建国, 顾铮先, 高侃. 级联倾斜长周期光纤光栅传输谱特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1005005.
- [9] Rao Y J, Wang Y P, Ran Z L, *et al.* Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO_2 laser pulses[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1320-1327.

- [10] Zhu T, Rao Y J, Wang J L. Characteristics of novel ultra-long-period fiber gratings fabricated by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. Optics Communications, 2007, 277(1): 84-88.
- [11] Shu X W, Zhang L, Bennion I. Fabrication and characterization of ultra-long-period fibre gratings[J]. Optics Communications, 2002, 203(3/4/5/6): 277-281.
- [12] Shu X W, Zhang L, Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255-266.
- [13] Wang Y P. Review of long period fiber gratings written by CO₂ laser[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(8): 081101.
- [14] Zhang Shan, Huang Zhanhua, Li Guifang, *et al.* Temperature-insensitive strain sensing based on few mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(2): 0210002.
张珊, 黄战华, 李桂芳, 等. 温度不敏感的少模光纤应变传感[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0210002.
- [15] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, *et al.* Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 521-531.
- [16] Wang B, Zhang W G, Bai Z Y, *et al.* CO₂-laser-induced long period fiber gratings in few mode fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(2): 145-148.
- [17] Dong J L, Chiang K S. Temperature-insensitive mode converters with CO₂-laser written long-period fiber gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(9): 1006-1009.
- [18] Chan H M, Alhassen F, Tomov I V, *et al.* Fabrication and mode identification of compact long-period gratings written by CO₂ laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(8): 611-613.
- [19] Jin L, Jin W, Ju J. Directional bend sensing with a CO₂-laser-inscribed long period grating in a photonic crystal fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(21): 4884-4891.
- [20] Ivanov O V. Propagation and coupling of hybrid modes in twisted fibers[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(4): 716-723.
- [21] Li A, Amin A A, Chen X, *et al.* Reception of mode and polarization multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM signal over a two-mode fiber[C]. National Fiber Optic Engineers Conference, 2011: PDPB8.
- [22] van Wiggeren G D, Gaylord T K, Davis D D, *et al.* Axial rotation dependence of resonances in curved CO₂-laser-induced long-period fibre gratings[J]. Electronics Letters, 2000, 36(16): 1354-1355.
- [23] Wu C, Liu Z Y, Chung K M, *et al.* Strong LP₀₁ and LP₁₁ mutual coupling conversion in a two-mode fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(4): 1080-1086.