

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209454

少模光纤倾斜光栅制备及扭转传感研究*

余海湖, 刘芳, 高文静, 王鑫, 郑羽

(武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心 武汉 430070)

摘要:设计了一种基于少模光纤倾斜布拉格光栅的反射型扭转传感器,小角度倾斜光栅中的纤芯基模与二阶模在光栅处发生互耦,通过测量该过程形成的反射峰强度变化实现扭转测量。分析了光栅倾斜角度对模式耦合效率的影响,采用相位掩模板法在线刻写光栅技术,在少模光纤上刻写了不同的小角度倾斜光栅;在此基础上选择倾斜角度为 1° 的光栅进行了单点、双点扭转传感实验,实验表明其反射光谱中基模与二阶模的互耦合峰(LP_{01} - LP_{11})对光纤扭转敏感,可以实现对扭转角度大小的测量。在 $-50^\circ \sim -150^\circ$ 逆时针扭转过程中,扭转灵敏度为 $0.52 \text{ dB}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$,而在 $40^\circ \sim 190^\circ$ 顺时针扭转的角度范围内,扭转灵敏度为 $0.34 \text{ dB}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ 。这种传感器具有在单根光纤上实现多点扭转传感的潜力,在多点扭转监测方面具有应用前景。

关键词:少模光纤;倾斜光栅;扭转传感;谱型调控

中图分类号: TH741 TN253 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Fabrication and twist sensing characteristics of tilted Bragg gratings in few-mode fiber

Yu Haihu, Liu Fang, Gao Wenjing, Wang Xin, Zheng Yu

(National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technology and Networks,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: A reflective torsion sensor based on the few-mode fiber tilted Bragg grating is designed. The fundamental mode and the second-order mode in the fiber core can be mutually coupled at the small-angle tilted grating. Through analyzing the couple reflection peak intensity, the torsion angle can be detected. The influence of the tilt angles on the mode coupling efficiency is analyzed with different small-angle tilted gratings written on the few-mode fiber. The tilted gratings are on-line written by using the phase mask method on a fiber drawing tower. The gratings with title angle of 1° is selected to perform single-point and double-point torsion experiments. Experimental results show that the reflection peak of the cross coupling between the fundamental mode (LP_{01}) and the second-order mode (LP_{11}) is sensitive to the twisting of the optical fiber. Thus, the twisting angle can be measured. The torsional sensitivity is $0.52 \text{ dB}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ during the counterclockwise twist from $-50^\circ \sim -150^\circ$, while the torsional sensitivity is $0.34 \text{ dB}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ in the $40^\circ \sim 190^\circ$ clockwise twist angle range. The sensor has the potential to realize multi-point torsion sensing with a single fiber, which has application prospects for multi-point torsion monitoring.

Keywords: few-mode fiber; tilted fiber Bragg grating; twist sensing; spectral shape control

0 引言

扭转作为结构安全监测中一项重要的测量参数,扭转传感器在许多场景中具有重要用途,大到对土木

建筑、机械结构等设施、设备的安全监测^[1],小到对医学智能微创器械等的实时监测^[2-3]。与传统的电、磁类扭转传感器相比较,光纤扭转传感器具有体积小、抗电磁干扰能力强、兼容性较好、灵敏度高等特点^[4-6],而受到广泛关注。

光纤扭转传感器根据类型的不同,主要可分为光纤干涉型^[7-8]、特种光纤型^[9-10]、光纤光栅型^[11-13],其中以光栅作为信号提取单元是目前最为常见的传感器。Chen等^[14]在标准单模光纤中刻写了具有 81° 倾斜角度的光栅,利用光栅的偏振特性,通过测量光纤特定的透射峰强度实现扭转测量,在 $\pm 60^\circ$ 的角度范围内其扭转灵敏度可达 $14.3 \mu\text{W}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ 。Kang等^[15]提出了一种少模长周期光栅与倾斜光栅级联的透射型扭转传感器,通过对其透射光谱中两个耦合峰强度的差值分析,在 $\pm 5.23 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}$ 的扭转率范围内(角度范围为 $\pm 30^\circ$)灵敏度为 $1.074 \text{ dB}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ 。Zhang等^[16]采用 CO_2 激光器在单模光纤的基础上设计了一种非对称的倾斜长周期光纤光栅扭转结构,结构的不对称性使其透射光谱对扭转方向具有不同的响应程度,单侧最大灵敏度为 $0.514 \text{ nm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ 。

然而,目前国内外报道的有关光纤光栅扭转传感器的研究主要基于对透射光谱的监测分析,而对扭转过程中反射光谱变化的研究较少;此外反射型的扭转传感器在结构上更加紧凑,在工程应用中可做成探头结构,便于使用和安装,可扩展光纤扭转传感器的应用范围。

本文基于拉丝塔在线刻写光栅技术,通过调整相位掩模板条纹与光纤轴向的夹角从而实现了在少模光纤中刻写小角度倾斜光栅,研究了光栅倾斜角度对光栅谱型的实际影响,提出了一种基于少模光纤倾斜光栅的反射型扭转传感器,通过测量光栅谱型,分析互耦合反射峰的强度变化,实现对扭转角度大小的测量。采用拉丝塔在线刻写光栅技术,在一根光纤上在线制备了两种波长的少模光纤倾斜光栅,在单根光纤上实现了双点扭转的同时测量。

1 少模光纤倾斜光栅谱型调控的原理

图1为倾斜光栅刻写在光纤纤芯处的结构示意图,与普通布拉格光栅折射率调制条纹平行于光纤轴向的法线不同,倾斜光栅的调制条纹与法线呈一个 θ 夹角,即为倾斜光栅的倾斜角。

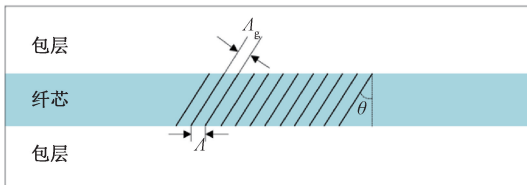


图1 倾斜光栅结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tilted fiber Bragg grating structure

Λ_g 为倾斜光栅的周期在数值上等于相位掩模板周期的 $1/2$, Λ 为沿光纤轴向方向上倾斜光栅的有效周期,两者之间的关系如式^[17](1)所示。

$$\Lambda = \frac{\Lambda_g}{\cos \theta} \quad (1)$$

本文拉制的少模光纤的具体结构参数如下:纤芯折射率 n_1 为1.450,包层折射率 n_2 为1.445,纤芯与包层折射率差0.34%,纤芯直径 $2a$ 为 $13.28 \mu\text{m}$,光纤直径为 $200 \mu\text{m}$ 。对于结构参数确定的光纤,其归一化频率 V 可由以下公式^[18]计算得到:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

当工作波长 λ 为 1550 nm ,由上述公式可得归一化频率 $V=3.238$,由于 $2.405 < V < 3.832$,光纤纤芯中可以稳定传输两种线偏振模式即基模(LP_{01})和二阶模(LP_{11})。

对于少模光纤光栅,两种纤芯模在光栅处产生反向耦合的过程中,不仅会发生 LP_{01} 模、 LP_{11} 模两种同模式自身之间前向传输模式与后向反射模式的耦合,还会发生 LP_{01} 模与 LP_{11} 模之间的前向传输模式与后向反射模式的相互耦合。根据模式耦合理论,对于少模光纤中两个模式 u 、 v ,由光栅带来的横向耦合系数^[19]可以定义为:

$$K_{uv} = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \iint_{\infty} (n^2 - n_0^2) \times \mathbf{e}_u \mathbf{e}_v^T dx dy \quad (3)$$

其中, ω 是光的角频率, ϵ_0 是介电常数, n 是光栅折射率微扰部分, n_0 是光纤折射率分布, \mathbf{e}_u 和 \mathbf{e}_v^T 分别为 u 、 v 两个模式的横向电场分布。

采用光栅模拟软件*OptiGrating*对少模光纤光栅进行模拟仿真,可得到基模(LP_{01})、二阶模(LP_{11})在模式耦合过程中形成三个耦合峰的反射率变化规律,如图2所示。对于 LP_{01} 、 LP_{11} 自耦合模式其反射率在光栅倾斜角度为 0° 时最大,随着倾斜角度的增大其反射率总体呈下降趋势;但对于 LP_{01} - LP_{11} 互耦合模式,在倾斜角度为 0° 时两个模式之间理论上不会发生相互耦合,随着倾斜角度的增大其耦合效率出现了先增加后减小的趋势,其反射率的最大值对应的倾斜角度为 2° 。

倾斜布拉格光栅在少模光纤纤芯中的实际倾斜角度是通过调节相位掩模板的倾斜角度(即相位掩模板与垂直平面间的夹角)来实现,两者之间的关系式为^[20]:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{1}{n_w \tan \theta_r}\right) \quad (4)$$

式中: θ 为光栅的倾斜角度, θ_r 为相位掩模板的倾斜角度, n_w 为 193 nm 波长下光纤的折射率。通过计算便可得到光栅的倾斜角度 θ 与相位掩模板的倾斜角度 θ_r 之间的比值约为1.56。当相位掩模板的倾斜角度 $\theta_r=0^\circ$ 时,光栅不发生倾斜即为通常的布拉格光栅;当相位掩模板的倾斜角度 $\theta_r=0.96^\circ$ 时,实际刻写的光栅的倾斜角度 $\theta=1.5^\circ$ 。

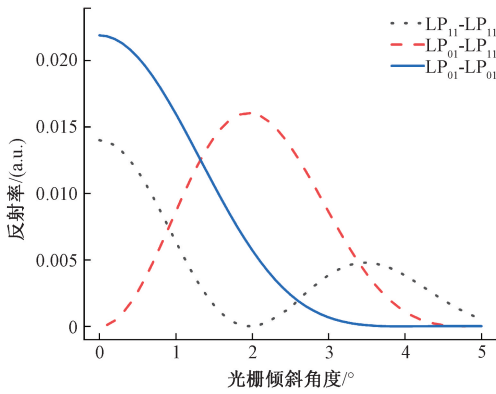


图 2 不同倾斜角度下模式耦合峰的反射率变化

Fig. 2 Reflectance changes of mode coupling peaks with different angles of titled grating

2 少模光纤倾斜光栅的刻写

根据上述模拟计算结果,采用相位掩模法刻写布拉格光栅,通过旋转相位掩模板,在少模光纤中刻写倾斜光栅。在拉丝塔上在线制备^[21]少模光纤倾斜光栅的过程为:光敏光纤预制棒以一定的进料速度送入石墨电阻加热炉中,使其升温至 2 000℃,其下端软化后,在光纤牵引轮拉力作用下成为裸光纤。裸光纤在下行过程中,在经过相位掩模法光栅刻写平台时,193 nm 的准分子激光器发出的单脉冲激光(脉冲宽度为 10 ns,脉冲能量约为 10 mJ),在整形、聚焦后,透过相位掩模板,在裸纤纤芯中形成干涉条纹,刻写成布拉格光栅。裸光纤继续下行,隔一段距离之后,再刻写另一个光栅,最终在一根光纤上刻写多个光栅,形成光栅阵列。在刻写过程中,通过自动切换装置,切换相位掩模板,从而在光纤中写入不同波长的光栅。在裸光纤中刻写光栅后,裸纤继续下行,经由涂覆、固化装置涂覆光纤保护层,最后收丝上盘。倾斜光栅刻写所用实验光路如图 3 所示,紫外脉冲准分子激光器

(型号:COMPex 205F,脉冲波长:193 nm)发射出的一束脉冲激光,其光斑尺寸为 12 mm×6 mm,通过一个光阑和一个包含凹透镜和凸透镜的透镜组对光斑进行扩束整形,再由一块凸透镜将横向聚焦后的 8 mm×0.7 mm 线性亮斑照射在经石墨熔炉拉制出来的裸光纤上。在凸透镜与裸光纤之间加装一个相位掩模板(周期为 1 071.93 nm),光在通过相位掩模板时会发生衍射形成明暗相间的干涉条纹并作用在光纤上,通过调整相位掩模板的倾斜角度 θ_t ,来实现对不同倾斜角度光栅的刻写。

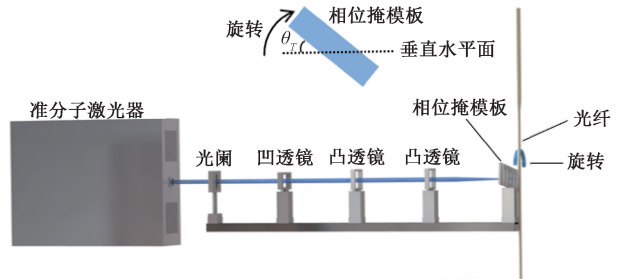


图 3 倾斜光栅刻写的光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of writing optical path of tilted fiber Bragg grating

少模光纤倾斜光栅在不同倾斜角度下的光栅谱型如图 4 和 5 所示。当光栅倾斜角度为 0° 时基模自耦合形成的反射峰 ($LP_{01}-LP_{01}$) 的强度以及二阶模自耦合形成的反射峰 ($LP_{11}-LP_{11}$) 的强度处于最高值,随着倾斜角度的增大其强度总体呈现逐渐减小的趋势;而对于基模与二阶模互耦合形成的反射峰 ($LP_{01}-LP_{11}$) 的强度,其趋势为在 0°~2° 之间,随着光栅倾斜角度的增大而增大,在 0° 时处于最小值,在 1° 时 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰的强度与 $LP_{11}-LP_{11}$ 峰的强度近乎相等,而在 1.5° 时 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰的强度与 $LP_{01}-LP_{01}$ 峰的强度近乎相等,在 2° 时 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰的强度达到最大值,之后其强度值则随着倾斜角度的增大逐渐减小,该变化过程与理论计算基本一致。

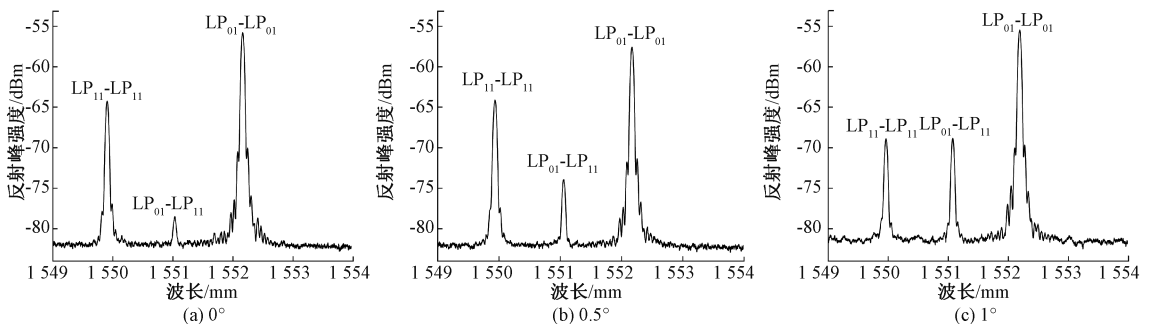


图 4 倾斜角度为 0°、0.5°、1° 的少模光纤倾斜光栅反射光谱

Fig. 4 The reflection spectrum of the tilted Bragg gratings in few-mode fiber with tilt angles of 0°, 0.5°, and 1°

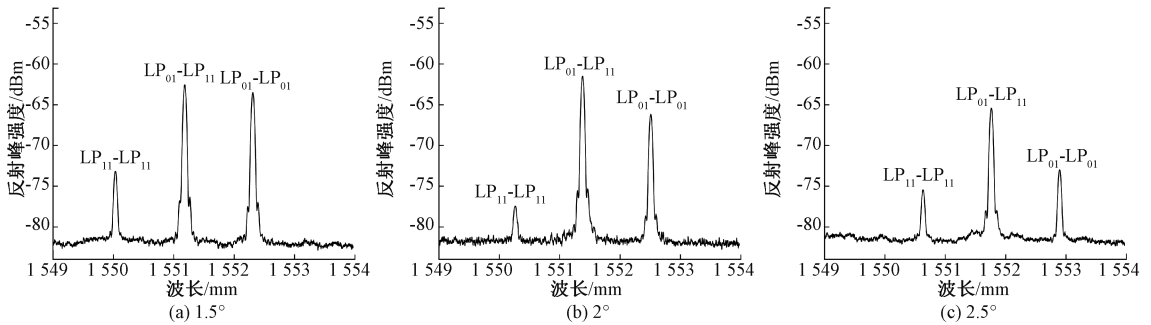


图5 倾斜角度为 1.5°、2°、2.5° 的少模光纤倾斜光栅反射光谱

Fig. 5 The reflection spectrum of the tilted Bragg gratings in few-mode fiber with tilt angles of 1.5°, 2°, and 2.5°

3 扭转传感实验及分析

3.1 单点扭转传感实验

利用少模光纤倾斜光栅的进行单点扭转传感实验,采用的实验装置如图6所示。放大自发辐射宽带光源(型号:JW8004C,工作带宽:1 525~1 565 nm)发出的光经过环形器由单模光纤跳线与少模光纤的焊接点耦合进少模光纤纤芯中,并继续向前传输至倾斜光栅处,经由光栅反射回去的光信号由光纤光谱仪(型号:AQ6370D,分辨率:0.02 nm)实时监测并记录。其中少模光纤倾斜光栅的左端光纤经由光纤固定夹具固定在平台上,右端通过光纤旋转器夹住光纤,带动光纤实现不同角度、不同方向的扭转,光栅位于扭转光纤段的中间区域,受扭转作用的影响时会引起基模与二阶模耦合效率的改变,最终表现为反射光谱的变化。为防止光纤在扭转时受到弯曲变化的影响,将光纤纤端与一个重量为 20 g 的砝码相连并置于滑轮上,以此来提供一个恒定的轴向张力使光纤处于绷直状态。

实验装置中参与光纤扭转实验的少模光纤长度 L 为 15 cm,倾斜光栅位于两者的中间,光栅刻写长度为 10 mm。起始零点为光栅未发生扭转时的绷直状态,通过光纤旋转器的转动来改变光纤的扭转状态,规定顺时针方向转动时的角度为正值,每隔 10° 记录一次反射光谱的变化,研究少模光纤倾斜光栅发生扭转时的反射光谱与扭转角度的变化规律。

选取了光栅倾斜角度为 1° 的少模光纤进行了扭转传感实验,光纤扭转过程中的反射光谱随扭转角度的变化规律如图6所示。少模光纤倾斜光栅的反射光谱中基模 LP₀₁ 与二阶模 LP₁₁ 耦合所形成的 3 个反射峰强度随扭转角度的改变其变化情况有所不同,基模的自耦合峰(LP₀₁-LP₀₁)的强度不会受到扭转角度的影响而发生变化;二阶模的自耦合峰(LP₁₁-LP₁₁)的强度随扭转角度的增大而减小,但其变化范围较小,小于 3 dB 并且无较为明显的规律;而基模与二阶模的互耦合峰(LP₀₁-LP₁₁)的

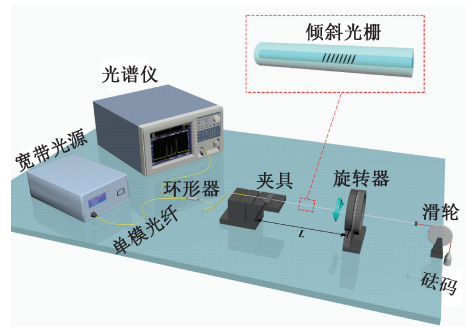


图6 单点扭转传感实验装置

Fig. 6 Single-point torsion sensing experimental device

强度则会随着扭转角度的增大而呈现不断减小的趋势。从结果上可看出倾斜光栅几个反射峰对扭转具有不同响应情况,具体原因如下:对于偏振模 LP₀₁ 模式其模场在空间上呈对称分布,即是一种圆对称模式,而二阶模 LP₁₁ 模式则是一种非圆对称模式,其沿角方向上的电场分布是不连续的,被分为两部分。当光纤发生扭转时,LP₀₁ 模式的模式分布由于圆对称性其变化程度很小,可忽略不计,因此扭转不会对 LP₀₁-LP₀₁ 峰强度产生影响;对于非圆对称 LP₁₁ 模式其模式分布受到光纤扭转的影响而变化程度较大,具体变化包括模式旋转以及模式沿角方向产生畸变,在结果上则表现为 LP₁₁-LP₁₁ 反射峰的强度会随扭转角度的增大而减小,但其变化范围较小;而基模与二阶模互耦合反射峰(LP₀₁-LP₁₁)的强度变化要明显大于二阶模 LP₁₁ 自耦合峰强度变化,原因是光纤的扭转对二阶模 LP₁₁ 参与的互耦合影响要大于其本身参与的自耦合影响。对于任意的布拉格光栅,其反射谱形受到光栅自身结构和参与耦合的光纤模式电场分布的共同影响,与单模光纤相比,少模光纤在扭转过程中 LP₀₁ 模式和 LP₁₁ 模式会产生明显的差异性变化,其耦合峰除受到光栅扭转影响外还受到两个模式差异性变化的影响,导致该反射峰强度对光纤扭转十分敏感,因而可以实现对扭转的测量。

与单模光纤相比,少模光纤扭转传感的灵敏度更高。其原理为:单模光纤仅支持基模(LP_{01})传输,如果在单模光纤中写入倾斜光栅,在倾斜光栅处反向耦合的过程中,仅能产生基模的自耦合峰($LP_{01}-LP_{01}$),由于 LP_{01} 模式具有圆对称性,光纤的扭转几乎不改变 LP_{01} 模式的模场分布,扭转对 $LP_{01}-LP_{01}$ 峰强度产生的影响较小。由图 7 可知,光纤基模自耦合峰($LP_{01}-LP_{01}$)的强度几乎不会随扭转改变,因此单模光纤倾斜光栅对扭转不敏感。

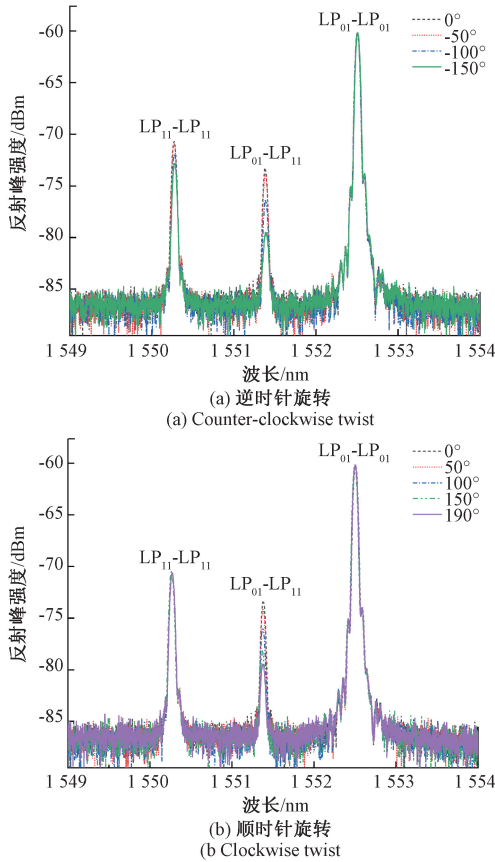


图 7 少模光纤倾斜光栅反射光谱随扭转角度的变化

Fig. 7 Variation of reflection spectrum of few-mode fiber tilted grating with twist angle

位于光纤固定夹具与旋转器之间的一段光纤发生扭转时,轴向不同位置的光纤的扭转角不同,因此需要引入公式来对扭转率进行量化^[22]。

$$\gamma = \tau/L \tag{5}$$

式中: τ 表示光纤旋转器在旋转时的角度值; L 表示位于光纤固定夹具与光纤旋转器之间的光纤长度 0.15 m;根据上述公式计算可得出光纤在扭转时对应的扭转率变化范围。

光纤在扭转过程中互耦合峰强度随扭转率的变化关系如图 8 所示,在 $-40^\circ \sim 30^\circ$ ($-4.65 \sim 3.49 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$) 的扭转范围内, $LP_{01}-LP_{11}$ 互耦合峰强度变化较小,其原因是

在初始扭转位置的左右两侧较小的扭转率范围内,光栅部位对于扭转的响应较弱,而随着扭转率的增大,其变化规律呈线性。在左侧 $-5.82 \sim -17.45 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ ($-50^\circ \sim -150^\circ$ 角度范围内) 逆时针扭转过程中,耦合峰强度变化的拟合线为 c ,扭转灵敏度为 $0.52 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$;在右侧 $4.65 \sim 22.11 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ ($40^\circ \sim 190^\circ$ 角度范围内) 顺时针扭转过程中,其拟合线为 d ,扭转灵敏度为 $0.34 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 。由于光栅倾斜角度的存在,使其在不同的扭转方向上灵敏度具有差异性。

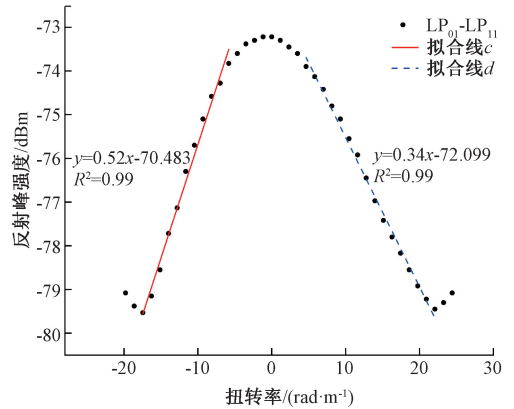


图 8 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰强度随扭转率变化

Fig. 8 The relationship between the peak intensity of $LP_{01}-LP_{11}$ and torsion rate

3.2 双点扭转传感实验

为了研究基于少模光纤倾斜光栅的反射型扭转传感结构在多点扭转传感中的应用潜力,基于相位掩模板切换技术,采用两块周期分别为 1071.93 nm 、 1074.69 nm 的相位掩模板,在少模光纤中写入倾斜角度为 1° 的两种波长的少模光纤倾斜光栅,两个光栅间隔为 1 m ,分别记为 TFBG-1、TFBG-2。

对上述双波长光栅进行双点扭转传感实验,采用的实验装置如图 9 所示,为研究扭转过程中两个扭转位置之间的干扰效应,在实验过程中采用如下方案:在对 TFBG-1 进行扭转测量时,TFBG-2 将保持静止;同样的,对 TFBG-2 进行扭转测量时,需要将 TFBG-1 保持静止。在整个测量过程中,通过光纤光谱仪同时记录下 TFBG-1 与 TFBG-2 整体的光谱变化情况,以便后续对实验结果的分析。

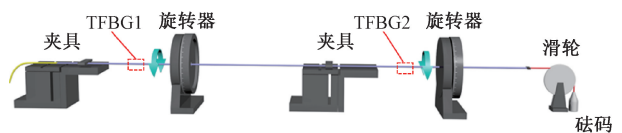


图 9 双点扭转传感实验装置

Fig. 9 Two-point torsion sensing experimental device

在扭转 TFBG-1 而 TFBG-2 保持静止时,两者反射光谱中 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰强度随扭转率的变化情况如图 10 所示。对于 TFBG-1 逆时针扭转时,在 $-4.65 \sim -17.45 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ (扭转角度为 $-40^\circ \sim -150^\circ$) 扭转范围内,其扭转灵敏度为 $0.55 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$;当顺时针扭转 TFBG-1 时,在 $8.14 \sim 23.27 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ (扭转角度为 $70^\circ \sim 200^\circ$) 的扭转范围内,其扭转灵敏度为 $0.41 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 。而 TFBG-2 的 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰在受到前端 TFBG 1 扭转影响其强度发生了波动变化,但范围较小不超过 2.8 dB 。对于 TFBG-2 未发生扭转但 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰的强度却产生了波动变化其原因如下:对 TFBG-1 进行扭转时光纤纤芯中的 LP_{01} 模式由于其模场分布具有圆对称性,因此 LP_{01} 模式变化很小可以忽略不计;而 LP_{11} 模式其模场分布为非圆对称性,光纤的扭转会使其模式分布发生较大变化。当未发生模式变化的 LP_{01} 模式与发生模式改变的 LP_{11} 模式通过 TFBG-1 继续向前传输至未发生扭转的 TFBG-2 处时,不变的 LP_{01} 模式与变化的 LP_{11} 模式参与的模式互耦合所形成的 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰强度则会产生变化。

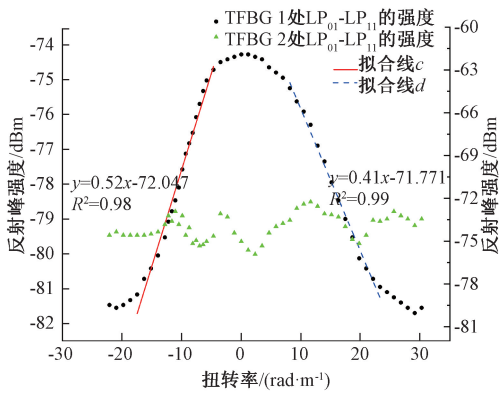


图 10 双点扭转传感测量过程中 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰强度随扭转率的变化(TFBG-1 扭转、TFBG-2 静止)
Fig. 10 The relationship between the peak intensity of $LP_{01}-LP_{11}$ and torsion rate during two-point torsion sensing measurement (grating-1 twisted, grating-2 static)

图 11 为对同一根少模光纤倾斜光栅的后端 TFBG-2 扭转而前端 TFBG-1 保持静止过程中两者反射光谱中 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰强度与扭转率之间的关系。可以看出在对 TFBG-2 逆时针扭转过程中,在 $-3.49 \sim -11.63 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ (扭转角度为 $-30^\circ \sim -100^\circ$) 的扭转范围内,其扭转灵敏度为 $0.57 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$;而在对 TFBG-2 顺时针扭转过程中,在 $5.81 \sim 17.45 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ (扭转角度为 $50^\circ \sim 150^\circ$) 扭转范围内,其扭转灵敏度为 $0.42 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 。值得注意的是,相较于图 10,此时处于静止状态的 TFBG-1 反射谱形中 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰的强度几乎不受到后端 TFBG-2 扭

转作用影响发生变化,这证明了对于少模光纤结构,其纤芯二阶模式 LP_{11} 会因光纤扭转发生一定模场分布变化,并且这种变化可以继续向后端传输,影响下游光栅的谱形信息,这在一定程度上限制了少模光纤光栅阵列多点传感的复用能力。

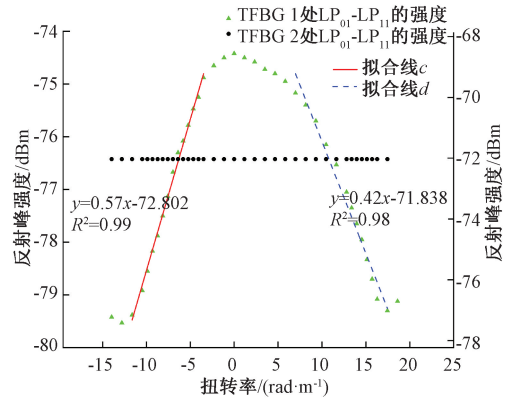


图 11 双点扭转传感测量过程中 $LP_{01}-LP_{11}$ 峰强度随扭转率的变化(TFBG-1 静止、TFBG-2 扭转)

Fig. 11 The relationship between the peak intensity of $LP_{01}-LP_{11}$ and torsion rate during two-point torsion sensing measurement (grating-1 static, grating-2 twisted)

综上所述,所设计的反射型扭转传感器可通过测量互耦合反射峰 ($LP_{01}-LP_{11}$) 的强度变化实现扭转测量。表 1 列举出了部分作者报道的不同类型光纤扭转传感器的实验结果,通过对比,可见本论文研究的传感器的灵敏度较高,能在单根光纤上实现双点扭转测量。

表 1 不同类型光纤扭转传感器的对比

Table 1 Comparison of different fiber optic twist sensors

类型	灵敏度	测量方式	单纤双点扭转测量	参考文献
马赫-曾德干涉型	0.34 $\text{dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	透射型	否	文献[7]
保偏光子晶体光纤	0.299 $\text{dB}/^\circ$	透射型	否	文献[9]
高双折射光纤光栅	0.13/ rad	反射型	否	文献[11]
单模光纤倾斜长周期光栅	0.51 $\text{nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	透射型	否	文献[16]
少模光纤倾斜长周期光栅	0.37 $\text{nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	透射型	否	文献[23]
少模光纤倾斜光栅	0.52, 0.34 $\text{dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$	反射型	是	本文工作

4 结 论

本文提出了一种结构紧凑,可实现对单点及双点扭转测量的反射型扭转传感器。基于相位掩模法刻写光栅的原理,调整相位掩模板与垂直平面间的夹角,实现了在少模光纤上刻写小角度倾斜光栅,研究了实际刻写光栅倾斜角度对光栅谱型的影响;通过对反射光谱中基模与二阶模的互耦合峰 LP_{01} - LP_{11} 强度的测量,实现了在一定角度范围内对扭光纤扭转大小的测量。在 $-50^\circ \sim -150^\circ$ 逆时针扭转和 $40^\circ \sim 190^\circ$ 顺时针扭转范围内,其扭转灵敏度分别为 $0.52 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 和 $0.34 \text{ dB}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 。后续工作将继续对不同倾斜角度的少模光纤光栅的扭转特性进行研究,进一步探索不同阶数的模式互耦形成的反射峰实现扭转传感的机理。

参考文献

- [1] BUDINSKI V, DONLAGIC D. Fiber-optic sensors for measurements of torsion, twist and rotation: A review [J]. *Sensors*, 2017, 17(3): 443-472.
- [2] XU R, YURKEWICH A, PATEL R V. Curvature, torsion, and force sensing in continuum robots using helically wrapped FBG sensors [J]. *IEEE Robotics & Automation Letters*, 2016, 1(2): 1052-1059.
- [3] FREDIANI G, VANNETTI F, ZONFRILLO G, et al. Monitoring flexions and torsions of the trunk via gyroscope-calibrated capacitive elastomeric wearable sensors [J]. *Sensors*, 2021, 21(20): 6706-6706.
- [4] 王彦, 金萍, 赵慧, 等. 基于 FBG 柔性传感器的形状重构[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(12): 83-91.
WANG Y, JIN P, ZHAO H, et al. Shape reconstruction based on the FBG flexible sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(12): 83-91.
- [5] 周湛, 张志坤, 赵振刚, 等. 基于光纤传感的输电线路悬垂绝缘子风偏角监测研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(3): 81-87.
ZHOU ZH, ZHANG ZH K, ZHAO ZH G, et al. Monitoring of wind deflection angle of suspension insulator string for power lines based on optical fiber sensing [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(3): 81-87.
- [6] 高东, 孟凡勇, 宋言明, 等. 植入光纤光栅的软体驱动器形状传感研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(2): 155-163.
GAO D, MENG F Y, SONG Y M, et al. Research on the shape sensing of embedded fiber Bragg grating for soft actuator [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(2): 155-163.
- [7] DONG Y, SUN C, XIAO H, et al. Twist and temperature characteristics of the PD-NSN fiber structure based on in-line Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 33: 39-44.
- [8] SONG B, ZHANG H, MIAO Y, et al. Highly sensitive twist sensor employing Sagnac interferometer based on PM-elliptical core fibers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15372-15379.
- [9] FU H Y, KHIJWANIA S K, TAM H Y, et al. Polarization-maintaining photonic-crystal-fiber-based all-optical polarimetric torsion sensor [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): 5954-5958.
- [10] NAEEM K, KIM B H, KIM B, et al. Simultaneous multi-parameter measurement using Sagnac loop hybrid interferometer based on a highly birefringent photonic crystal fiber with two asymmetric cores [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3589-3601.
- [11] 吴飞, 杨红艳, 滕峰成, 等. 高双折射光纤光栅扭转传感器的设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2006 (S2): 1590-1591.
WU F, YANG H Y, TENG F CH, et al. Design of torsion based on high birefringence fiber grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006 (S2): 1590-1591.
- [12] LU Y, SHEN C, CHEN D, et al. Highly sensitive twist sensor based on tilted fiber Bragg grating of polarization-dependent properties [J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(5): 491-494.
- [13] YAN B, LUO Y, BHOWMIK K, et al. Twist effect and sensing of few mode polymer fiber Bragg gratings [J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 411-418.
- [14] 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.
- [15] KANG Y, LIU Y, ZHI W, et al. Twist sensor based on long period grating and tilted bragg grating written in few-mode fibers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 7102708-7102708.
- [16] ZHANG Y X, ZHANG W G, WU P F, et al. Torsion bidirectional sensor based on tilted-arc long-period fiber grating [J]. *Optics Express*, 2019, 27 (26): 37695-37705.

- [17] QI J. A comparison study of the sensing characteristics of FBG and TFBG [J]. *Sensor Review*, 2013, 33(1): 68-79.
- [18] 申莎莎. 少模光纤光栅的飞秒激光制备及其特性[J]. *传感器与微系统*, 2019, 38(8):18-20.
SHEN SH SH. Few modes FBG inscribed by femtosecond laser and its characteristics [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2019, 38(8): 18-20.
- [19] GAO Y, SUN J, SIMA C. Simultaneous high bit-rate format and mode conversion with a single tilted apodized few-mode fiber Bragg grating [J]. *Optics Communications*, 2016, 377(1): 115-119.
- [20] MIHAILOV S J, WALKER R B, LU P, et al. UV-induced polarisation-dependent loss (PDL) in tilted fibre Bragg gratings: Application of a PDL equalizer [J]. *IEE Proceedings Optoelectronics*, 2002, 149(56): 211-216.
- [21] 余海湖, 郑羽, 郭会勇, 等. 光纤光栅在线制备技术研究进展 [J]. *功能材料*, 2014, 45(12): 12001-12005.
YU H H, ZHENG Y, GUO H Y, et al. Research progress in online preparation techniques of fiber Bragg gratings on optical fiber drawing tower [J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(12): 12001-12005.
- [22] ZHAN W, KAI G, DONG X, et al. Temperature-independent FBG-type torsion sensor based on combinatorial torsion beam [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2002, 14(8): 1154-1156.
- [23] ZHAO Y, LIU Y, ZHANG L, et al. Mode converter

based on the long-period fiber gratings written in the two-mode fiber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6186-6195.

作者简介



E-mail: hhyu@whut.edu.cn

Yu Haihu received his B. Sc. degree, M. Sc. degree, and Ph. D. degree all from Wuhan University of Technology in 1984, 1987, and 2001, respectively. He is currently a research fellow at Wuhan University of Technology. His main research interests include special fiber and sensor.



E-mail: Zhengyu0816@whut.edu.cn

Zheng Yu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology Wuchang Branch in 2001, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Wuhan University of Technology in 2014 and 2017. His main research interests include design, fabrication and application of microstructure optical fiber.

余海湖, 1984 年于武汉理工大学获得学士学位, 1987 年于武汉理工大学获得硕士学位, 2001 年于武汉理工大学获得博士学位, 现为武汉理工大学研究员, 主要研究方向为特种光纤及传感器等方面的研究。

郑羽 (通信作者), 2001 年于华中科技大学武昌分校获得学士学位, 2014 年于武汉理工大学获得硕士学位, 2017 年于武汉理工大学获得博士学位, 主要研究方向为微结构光纤设计、制备及应用等方面的研究。