

文章编号 1004-924X(2017)07-1771-06

# 扭转螺旋型力学微弯长周期光纤光栅 的光谱特性

石胜辉<sup>1,2</sup>, 赵明富<sup>1,2</sup>, 罗彬彬<sup>1,2\*</sup>, 汤斌<sup>1,2</sup>, 陈立功<sup>1</sup>

(1. 重庆理工大学 电气与电子工程学院, 重庆 400054;

2. 重庆理工大学 现代光电检测技术与仪器重点重庆市实验室, 重庆 400054)

**摘要:**利用两个交替放置的周期性 V 型刻槽板对均匀扭转后的普通单模光纤径向施力制作螺旋型力学微弯长周期光纤光栅(H-MLPFG)。通过实验研究了周期压力和扭转率对该光栅传输谱特性的影响, 以及其偏振相关特性。结果表明, 施加在光纤的径向压力可以改变 H-MLPFG 的耦合强度, 但不影响其谐振波长变化,  $LP_{13}$  耦合模耦合强度在波长 1 549.75 nm 处为 30.1 dB。当光纤扭转率由 0 增大到 5.38 rad/cm,  $LP_{11}$ 、 $LP_{12}$  和  $LP_{13}$  模对应的扭转灵敏度分别为 1.59、1.82 和 2.24 nm/(rad·cm<sup>-1</sup>)。光纤扭转率为 0.90 rad/cm 时,  $LP_{13}$  包层模具有最大偏振相关损耗, 在波长 1 550.45 nm 处偏振相关损耗约为 6.86 dB, 对应的谐振波长分离值为 1.4 nm。该方法制作的 LPFG 模式耦合强度和谐振波长具有可调谐和可重构性的优点、且结构简单, 在光纤通信和传感领域具有潜在的应用价值。

**关键词:** 光纤光学; 长周期光纤光栅; 微弯效应; 光弹效应; 扭转

中图分类号: TN253 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20172507.1771

## Spectral characteristics of helicoidal mechanically-induced long-period fiber grating

SHI Sheng-hui<sup>1,2</sup>, ZHAO Ming-fu<sup>1,2</sup>, LUO Bin-bin<sup>1,2\*</sup>, TANG Bin<sup>1,2</sup>, CHEN Li-gong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Modern Photoelectric Detection Technology and Instrument, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

\* Corresponding author, E-mail: lbinbin@cqut.edu.cn

**Abstract:** A helicoidal mechanically-induced long-period fiber grating (H-MLPFG) was formed by pressing a twisted fiber from two sides with two V-shaped identical periodically grooved plates. The influence of periodical pressure and twist rate on transmission spectrum of the H-MLPFG were investigated experimentally, together with the polarization characteristics. The results show that the depth of the coupling strength varies with the amount of pressure applied to the fiber, otherwise the

收稿日期: 2017-02-20; 修订日期: 2017-03-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61505017); 重庆市教委科学技术研究项目(No. KJ1709192; KJ1709211); 重庆市科委前沿与应用基础研究计划一般项目(No. cstc2014jcyjA0081; cstc2015jcyjA40035); 中国博士后基金资助项目(No. 2016M592649); 重庆理工大学青年科研项目星火支持计划(No. 2015XH05)

resonant wavelength of the H-MLPFG is independent of it. The peak coupling strength of LP<sub>13</sub> mode coupling is 30.1 dB at 1 549.75 nm. Twist sensitivities of the H-MLPFG is 1.59, 1.82 and 2.24 nm/(rad · cm<sup>-1</sup>) for LP<sub>11</sub>, LP<sub>12</sub> and LP<sub>13</sub> mode couplings respectively when the twist rates increase from 0 to 5.38 rad/cm. The maximum PDL is approximately 6.86 dB at 1 550.45 nm for LP<sub>13</sub> cladding mode and the corresponding resonant wavelength separation value is 1.4 nm. The H-MLPFG exhibits merits of tunable and reconstructable for coupling strength and resonant wavelength, simple and easy operation, thus has potential applications in fields of fiber-optic communications and fiber-optic sensing.

**Key words:** fiber optics; long period fiber grating; micro-bend effect; photo-elastic effect; twist

## 1 引言

长周期光纤光栅 (Long Period Fiber Grating, LPFG) 是一种透射型光栅, 其周期在 100 μm ~ 1 mm, 光纤纤芯折射率的周期性微扰使纤芯传输的基模能量耦合到同向传输的不同阶次包层模中, 从而在传输谱中对应的谐振波长处产生一系列损耗峰。LPFG 具有结构简单、附加损耗低、抗电磁干扰、无后向反射、与光纤兼容等优点, 广泛应用在光纤通信和光纤传感领域中。它可用作带通滤波器<sup>[1]</sup>、在掺铒光纤放大器中用作增益平坦器<sup>[2]</sup>、调谐环形掺铒光纤激光器<sup>[3]</sup>、温度不敏感模式转换器<sup>[4]</sup>, 以及折射率传感、气体传感或生物化学传感<sup>[5-7]</sup>等。

LPFG 的制作方法有很多种, 目前最常用的方法是通过紫外曝光在光纤纤芯形成周期性折射率调制形成光栅<sup>[8]</sup>。由于 LPFG 周期可达数百微米, 近几年人们通过采用扭转光纤形成螺旋状周期结构的方法制作 LPFG。Kopp<sup>[9]</sup>等首次通过均匀扭转非圆对称纤芯截面光纤而形成周期性双螺旋对称结构光栅, 然而这种方法制作的光栅周期仅为 78 μm。Oh<sup>[10]</sup>等报道了一种利用连续单面 CO<sub>2</sub> 激光束曝光扭转光纤产生对称螺旋折射率调制而形成 LPFG。该光栅在 1 545.8 nm 处的耦合强度为 11.4 dB, 并且比传统 CO<sub>2</sub> 脉冲制作的 LPFG 具有更低的偏振相关损耗, 可用作扭转传感器。Jung<sup>[11]</sup>等利用 CO<sub>2</sub> 激光曝光扭转光纤制作了 LPFG。该光栅在谐振波长 1 586 nm 处的耦合强度为 13 dB 左右, 可用作弯曲和应变传感器。Ivanov<sup>[12]</sup>等基于光纤纤芯和包层存在一定离心率, 提出了一种扭转普通单模光纤产生周期性螺旋形变形成 LPFG 的新方法。由于离

心率小于 1 μm, 该 LPFG 的耦合强度最大为 5 dB 左右。此外, 扭转其他类型光纤同时利用 CO<sub>2</sub> 激光束曝光制作螺旋型 LPFG 也受到了国内外学者的关注<sup>[13-15]</sup>, 这种 LPFG 用作弯曲和应变传感器以及带通滤波器等。然而, 上述方法所制作的扭转螺旋型 LPFG 的耦合强度最大仅为 20 dB, 且不可重构。

本文提出采用两个周期相同的 V 型刻槽板对均匀扭转的普通单模光纤径向施力制作螺旋型 LPFG, 通过实验研究不同压力和扭转率时光栅的传输谱特性, 以及该光栅的偏振相关特性。实验结果表明, 该方法制作的扭转螺旋力学微弯 LPFG (Helicoidal Mechanically-induced LPFG, H-MLPFG) 的耦合强度随径向周期压力的增加而增大, 且谐振波长随扭转率的增大向短波方向迁移。此外, 通过扭转光纤可以对 H-MLPFG 产生的双折射进行补偿。

## 2 基本原理

通常情况下, 无扭转 LPFG 的谐振波长满足如下相位匹配条件<sup>[8]</sup>:

$$\lambda_{\text{res}}^n = (n_{\text{core}}^{\text{eff}} - n_{\text{clad}(n)}^{\text{eff}}) \Delta, \quad (1)$$

式中:  $n_{\text{core}}^{\text{eff}}$  和  $n_{\text{clad}(n)}^{\text{eff}}$  分别为在谐振波长  $\lambda_{\text{res}}^n$  处的纤芯基模和  $n$  阶包层模的有效折射率,  $\Delta$  为光纤光栅周期。

众所周知, 单模光纤中实际上传输两个相互垂直的偏振模式。理想情况下, 单模光纤具有圆柱状几何外形和垂直于轴向各向同性的光学属性, 这两个偏振模式是简并的, 即为非双折射光纤。当受到应力、弯曲、扭转等外界微扰时, 光纤中会产生双折射现象。因此, 光纤中的非双折射现象可以变化为双折射现象。当光纤受到扭转和应力产生形变时,

光纤偏振模式的简并度被破坏,光纤中产生双折射,导致 LPFG 的相位匹配条件发生改变,所以谐振波长  $\lambda_{res}^n$  随扭转率  $\theta$  的变化关系为:

$$\frac{d\lambda_{res}^n}{d\theta} = \Lambda \left( \frac{dn_{core}^{eff}}{d\theta} - \frac{dn_{clad}^{eff}(c_n)}{d\theta} \right), \quad (2)$$

光弹效应和微弯效应引起光纤有效折射率的变化对光纤中所产生的剪应力非常敏感。扭转条件下剪应力与光纤直径以及所施加的扭转率成比例关系。对于单模光纤来说,包层直径远大于纤芯直径。当光纤受到扭转时,作用于包层的剪应力远大于作用于纤芯的剪应力,扭转导致的纤芯有效折射率的变化要远远小于包层有效折射率的变化。因此,假设  $dn_{core}^{eff} \ll dn_{clad}^{eff}(c_n)$ , 且认为纤芯有效折射率的变化为一常数,则式(2)可近似写为:

$$\frac{d\lambda_{res}^n}{S\theta} = -\Lambda \left( \frac{dn_{clad}^{eff}(c_n)}{d\theta} \right). \quad (3)$$

于是,光栅谐振波长迁移为:

$$\Delta\lambda_{res}^n = -\Lambda \cdot \delta n_{clad}^{eff}(c_n). \quad (4)$$

当长度为  $L$  的光纤被扭转时,剪切力和光弹效应使它产生双折射现象。由于光纤本征双折射并不明显,单位长度光纤受到的剪切力和光弹效应诱导产生的双折射  $\Delta\beta$  可以表示为:

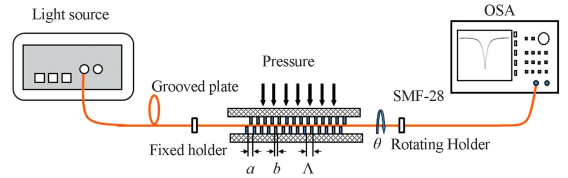
$$\Delta\beta = n_{co}^2 (P_{11} - P_{12}) \frac{\varphi}{2L}, \quad (5)$$

式中:  $P_{11}$  和  $P_{12}$  为光弹常数,  $n_{co}$  为纤芯的折射率。对于纯硅来说,  $n_{co} = 1.46$ ,  $P_{11} - P_{12} = 0.15$ 。因此,扭转导致的双折射使包层模的有效折射率发生变化,LPFG 的相位匹配条件也相应地发生了变化。

### 3 光栅制作

力学微弯 LPFG 由弹光效应和微弯效应引起光纤折射率周期性调制而成<sup>[16]</sup>, 折射率调制使纤芯基模与同向传输的不同阶次包层模发生耦合。H-MLPFG 制作的实验装置如图 1 所示。将带有涂覆层的普通单模光纤 (Corning: SMF-28) 的左端用自行设计的光纤固定器固定,然后在右端把光纤沿光轴按照顺时针或逆时针方向(逆着光传输的方向)旋转一定的角度  $\theta$  后固定,最后放置在两个相同的周期性 V 型刻槽板之间,刻槽板错开半个周期交叉放置。刻槽板是自行设计,并找相关厂家制作而成的。刻槽板的周期为  $600 \mu\text{m}$ , 周期数为 200 个,其中槽宽  $a = 400 \mu\text{m}$ , 凸

齿的宽度  $b = 200 \mu\text{m}$ 。用重物在刻槽板上垂直均匀施加压力  $P$  ( $P$  与重物的质量  $m$  满足关系式  $P = mg$ ), 使被扭转的光纤发生形变,周期性微弯效应及弹光效应产生的周期性折射率调制在光纤中形成 LPFG, 其周期与刻槽板周期相同。光纤的输入端接超连续非偏振宽谱光源 (Koheras: Superk™ Compact), 输出端接入光谱分析仪 (OSA: AQ6370B), 用来记录 LPFG 传输谱。实验过程中,为了防止凸齿对刻槽板之间的光纤涂覆层的损伤,每次扭转光纤时把刻槽板移开,然后对扭转后的光纤沿光纤径向施力形成光栅。



(a) 示意图

(a) Schematic diagram



(b) 实物图

(b) Experimental setup

图 1 H-MLPFG 制备实验系统

Fig. 1 Experimental system of H-MLPFG fabrication

## 4 结果与分析

### 4.1 压力对扭转螺旋 LPFG 传输谱的影响

LPFG 作为光无源器件的一个优势就是其传输谱阻带幅度的可调性。采用图 1 所示的实验装置,首先将顺时针方向扭转后的光纤放入两个相同周期性 V 型刻槽板中,然后对刻槽板沿光纤径向施加压力。图 2 给出了扭转率为  $1.79 \text{ rad/cm}$  时 LPFG 在不同压力下的传输谱。对于采用力学微弯法写入的无相移 LPFG 而言,周期性压力

通过弹光效应对光纤产生的微小形变关于光纤轴线为非对称性,因此,纤芯基模  $LP_{01}$  和非轴对称包层模  $LP_{1m}$  在谐振波长处发生耦合。由图 2 可知,在所观察波长 1 400~1 650 nm 内共出现 3 个耦合谐振峰,从左到右分别对应着纤芯基模  $LP_{01}$  与  $LP_{11}$ ,  $LP_{12}$  和  $LP_{13}$  包层模耦合。

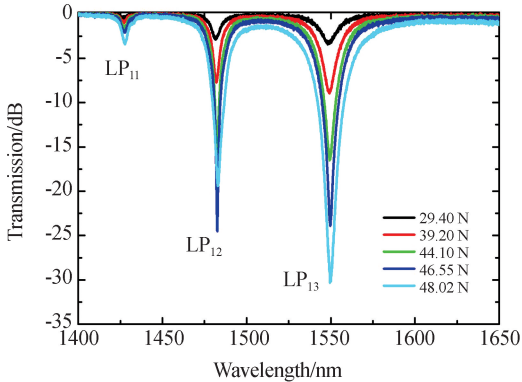


图 2 不同压力下 H-MLPFG 的传输谱

Fig. 2 Transmission spectra of H-MLPFG under different pressures

在谐振波长处,纤芯基模与包层模的耦合强度随  $\sin(\kappa d)$  ( $\kappa$  为耦合系数,  $d$  为光栅长度) 变化,而耦合系数  $\kappa$  与周期压力所导致的折射率变化量成正比,因此,随着压力从 29.40 N 增加到 48.02 N,折射率调制增强,纤芯基模与包层模的耦合强度也随之增强,即传输谱的阻带深度不断增加。同时,光纤弯曲的程度越严重,被涂覆层吸收掉的纤芯基模越多,故带外损耗也随着压力的增加而增大。在同一压力作用下,  $LP_{13}$  包层模的损耗峰幅度最大,这是因为包层模的能量密度在纤芯中的分布随包层模阶次的增加而增大。当压力增大至 48.02 N 时,  $LP_{12}$  包层耦合模已经发生过耦合,而  $LP_{13}$  包层耦合模在 1 549.75 nm 处的耦合强度已达到 30.1 dB,远大于其他扭转螺旋型 LPFG 的模式耦合强度<sup>[9-15]</sup>。通过改变施加在光纤上的周期压力可以改变折射率的调制强度,从而影响 LPFG 传输谱的阻带深度,这对滤波器的性能调整非常方便。与采用紫外光写入的 LPFG 传输谱中会出现一些旁瓣不同,采用该方法写入的光栅传输谱中并没有出现旁瓣,这是因为力学写入的光纤光栅折射率调制存在自切趾效应。此外,从图 2 中还可以看出,在欠耦合状态下所有模式的谐振波长并没有随着压力的增大或减小而发生漂移。

需要说明的是,其他扭转率下 LPFG 的传输谱在相同压力下均存在类似的变化规律。

#### 4.2 光纤扭转率对 LPFG 光谱的影响

为了研究光纤扭转率对 LPFG 光谱的影响,首先定义扭转率为单位长度 (cm) 光纤被扭转的度数。使用图 1 所示的实验装置测量了相同压力下 LPFG 在光纤顺时针扭转时不同扭转率光栅的传输谱,结果如图 3 所示。由图 3 可知:随着扭转率的增大,光栅的 3 个耦合包层模的谐振波长均向短波长方向迁移,这与 Ivanov<sup>[12]</sup> 所报道的结果是一致的。这是因为单位长度内扭转率越大,光纤受到的剪切力越大,使得包层模的有效折射率变化远大于纤芯有效折射率的变化。根据式 (4),光栅谐振波长漂向短波长方向。同时,由于纤芯基模和包层模之间的耦合强度的变化会引起不同包层模谐振损耗的变化。此外,  $LP_{12}$  模的谐振损耗峰要比  $LP_{13}$  的损耗峰更尖锐,这主要是因为短波长处光栅色散曲线的斜率更大<sup>[12]</sup>。在实验中还发现,无论光纤是顺时针或是逆时针方向被扭转,施加径向压力后形成 LPFG 谐振波长的漂移方向是一样的,且同时向短波方向漂移,这与  $CO_2$  激光脉冲写入扭转型 LPFG 谐振波长的漂移方向是不一样的<sup>[14]</sup>。因为  $CO_2$  激光脉冲曝光扭转光纤制作 LPFG 时,两端同时同向或反向扭转光纤会明显地减小或增大光栅的扭转周期。

图 4 给出了相同压力下光栅谐振波长随扭转率的变化关系。当光纤扭转率由 0 增大到 5.38 rad/cm,  $LP_{11}$ 、 $LP_{12}$  和  $LP_{13}$  模对应的谐振波长变

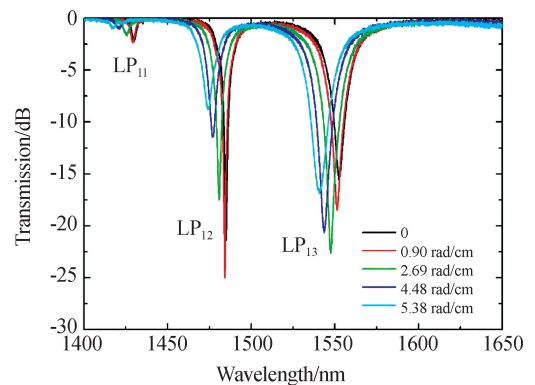


图 3 不同扭转率下 H-MLPFG 的传输谱

Fig. 3 Transmission spectra of H-MLPFG under different twist rates

化量分别为 8.6,9.8 和 12.05 nm,由此计算得到光栅扭转的灵敏度分别为 1.59,1.82 和 2.24 nm/(rad·cm<sup>-1</sup>)。根据色散方程可知,包层模的有效折射率随模式阶次的增大而减小,模场分布区间随有效折射率的增加而增大<sup>[11]</sup>,所以扭转率对 LP<sub>13</sub>模场区域的影响更大。根据式(4),LP<sub>13</sub>谐振模的迁移波长量最大。因此,当此光栅用于光纤传感时,高阶次谐振包层模具有更高的扭转灵敏度。值得注意的是,在光纤所能承受的扭转率范围内,如果逐步增大光纤扭转率,LPFG 谐振波长的可调范围也将继续增加。

rad/cm 时偏振光通过 LPFG 后的最大损耗与最小传输损耗以及 PDL。由图可以看出,不同偏振状态下的谐振波长和耦合强度不同。由于耦合强度随着模式阶数的增大而增强,PDL 随着包层模阶数的增加而增大,LP<sub>13</sub>模的 PDL 在波长 1 551.45 nm 处为 5.68 dB,对应的谐振波长分离值为 1.4 nm,比光纤无扭转形成的力学微弯 LPFG 的 PDL 和谐振波长分离值都要小<sup>[17]</sup>。因此,通过扭转光纤可以对力学微弯 LPFG 产生的双折射进行补偿<sup>[18]</sup>。如果继续增大径向周期性压力,H-LPFG 的 PDL 将进一步增大。

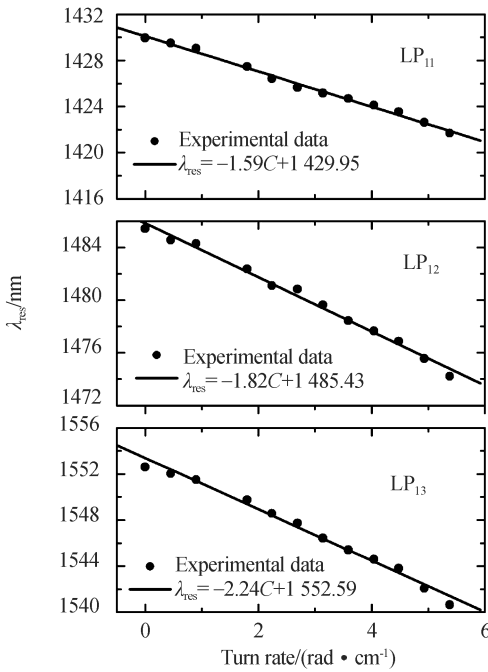


图 4 谐振波长随扭转率的变化关系

Fig. 4 Resonant wavelength versus twist rate for several cladding modes of H-MLPFG

### 4.3 扭转螺旋 LPFG 的偏振特性

为了研究 LPFG 的偏振特性,在图 1 所示实验装置中的超连续非偏振宽谱光源和 LPFG 之间分别加入光纤在线起偏器和偏振控制器。宽谱光源出射的光经过在线起偏器后变为线偏振光进入偏振控制器,通过调整偏振控制器的波片相对光轴的位置来改变单模光纤中光的偏振态,然后使用 OSA 观察不同偏振态的光经过 LPFG 后的传输谱。LPFG 传输谱的最大损耗与最小损耗之差为偏振相关损耗(Polarization Dependent Loss,PDL)。图 5 给出了光纤扭转率为 0.90

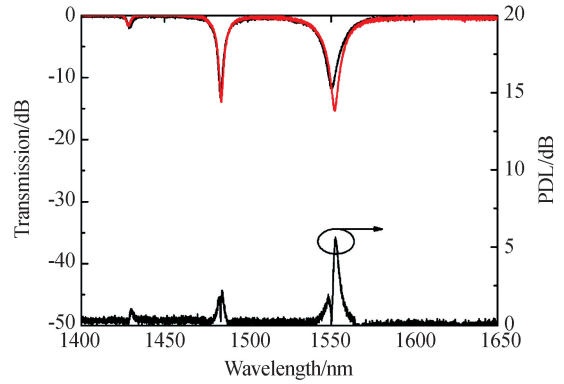


图 5 H-MLPFG 的传输谱和偏振相关损耗

Fig. 5 Transmission and PDL spectra of H-MLPFG

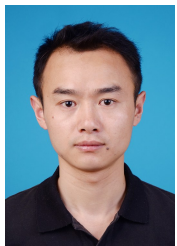
## 5 结 论

由于耦合强度和中心波长可以分别通过改变在光纤上施加的径向压力和扭转率实现,本文利用两个交替放置的周期性 V 型刻槽板对扭转单模光纤沿径向施力制作了 H-MLPFG。实验研究了周期性压力和扭转率对该光栅传输谱的影响及其偏振相关特性。实验结果表明,H-MLPFG 的耦合强度随周期压力的增大而增大,最大谐振耦合强度可达 30.1 dB。当光纤扭转率由 0 增大到 5.38 rad/cm 时,LP<sub>11</sub>,LP<sub>12</sub> 和 LP<sub>13</sub> 模对应的谐振波长变化量分别为 8.6,9.8 和 12.05 nm。通过扭转光纤可以有效减小力学微弯 LPFG 的 PDL。在普通单模光纤里采用力学微弯法制作 LPFG,不需要紫外光或高功率激光器等昂贵的写入设备,具有可调谐、结构简单、廉价和易于操作的优点,因此在光谱滤波、可变光衰减和增益平坦等光纤通信和光纤传感领域具有潜在的应用价值。

## 参考文献:

- [1] ABRISHAMIAN F, MORISHITA K. Single-channel bandpass filters formed by a metal-doped fiber and long-period gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(8): 868-871.
- [2] ZHANGA P, CHEN X W, GUAN Z G, *et al.*. Optimization of step-changed long-period gratings for gain-flattening of EDFAs [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(1): 121-123.
- [3] 姜明顺, 冯德军, 隋青美. 机械感生长周期光纤光栅的可调谐环形光纤激光器[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 311-316.
- JIANG M SH, FENG D J, SUI Q M. Tunable ring fiber laser using mechanical-induced long-period fiber grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 311-316. (in Chinese)
- [4] DONGJ L, CHIANG K S. Temperature-insensitive mode converters with CO<sub>2</sub>-laser written long-period fiber gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(9): 1006-1009.
- [5] MARQUES L, HERNANDEZ F U, JAMES S W, *et al.*. Highly sensitive optical fibre long period grating biosensor anchored with silica core gold shell nanoparticles [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016, 75: 222-231.
- [6] QUERO G, ZUPPOLINI S, CONSALES M, *et al.*. Long period fiber grating working in reflection mode as valuable biosensing platform for the detection of drug resistant bacteria [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 230: 510-520.
- [7] WANG T, YASUKOCHI W, KORPOSH S, *et al.*. A long period grating optical fiber sensor with Nano-assembled porphyrin layers for detecting ammonia gas [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 228: 573-580.
- [8] VENGSARKAR A M, LEMAIRE P J, JUDKINS J B, *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 58-65.
- [9] KOPPV I, CHURIKOV V M, SINGER J, *et al.*. Chiral fiber gratings [J]. *Science*, 2004, 305(5680): 74-75.
- [10] OH S, LEE K R, PAEK U C, *et al.*. Fabrication of helical long-period fiber gratings by use of a CO<sub>2</sub> laser [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(3): 1464-1466.
- [11] JUNGH, SHIN W, KIM J K, *et al.*. Bending and strain sensitivities in a helicoidal long-period fiber gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(17): 1232-1234.
- [12] IVANOVO V. Fabrication of long-period fiber gratings by twisting a standard single-mode fiber [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3290-3292.
- [13] SHIN W, LEE Y L, YU B A, *et al.*. Spectral characterization of helicoidal long-period fiber gratings in photonic crystal fibers [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(17): 3456-3459.
- [14] SHIN W, OH K, YU B A, *et al.*. All-fiber band-pass filter based on helicoidal long-period grating pair and null core hollow optical fiber with flexible transmission control [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(2): 153-155.
- [15] ZHANG L, LIU Y Q, ZHAO Y H, *et al.*. High sensitivity twist sensor based on helical long-period grating written in two-mode fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(15): 1629-1932.
- [16] ZHOU X J, SHI S H, ZHANG Z Y, *et al.*. Refractive index sensing by using mechanically induced long-period grating [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(1): 119-125.
- [17] 石胜辉, 周晓军, 张旨遥, 等. 机械微弯长周期光纤光栅的制备及其光学特性研究[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(10): 1447-1450.
- SHI SH H, ZHOU X J, ZHANG ZH Y, *et al.*. Experimental investigation on spectrum characteristics of mechanically-induced long-period gratings [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, 22(10): 1447-1450. (in Chinese)
- [18] CHO J Y, LEE K S. A birefringence compensation method for mechanically induced long-period fiber gratings [J]. *Optics Communications*, 2002, 213(4-6): 281-284.

## 作者简介:



石胜辉(1980—),男,重庆人,博士,讲师,2005年于长春理工大学获得学士学位,2008年于昆明理工大学获得硕士学位,2013年于电子科技大学获得博士学位,主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail: shshill@cqut.edu.cn

## 通讯作者:



罗彬彬(1981—),男,广西人,博士,副教授,2003年、2006年、2012年于电子科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光纤传感技术、光信号处理方面的研究。E-mail: lbinbin@cqut.edu.cn