

基于单螺旋扭转结构的取样布拉格光纤 光栅及其传感特性

陈高杨^{1,2**}, 马鹏^{1,2}, 李杰^{1,2*}, 孙立朋^{1,2}, 武创^{1,2}, 关柏鸥^{1,2}

¹暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632;

²广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632

摘要 提出一种新型取样布拉格光纤光栅传感器,用于温度和轴向应变的传感。为了制作该传感器,利用特种光纤熔接机在单模光纤上制造出单螺旋扭转结构,然后在单螺旋结构上利用紫外激光侧写和相位掩模板技术刻写布拉格光纤光栅。该取样光栅反射谱具有等间距、窄带宽的特点,并且可通过调整单螺旋扭转率来自由改变取样周期。通过实验研究了传感器对温度和光纤轴向应变的响应,结果表明:当单螺旋扭转周期 $P=504.0\ \mu\text{m}$ (扭转率 $\alpha=12.47\ \text{rad/mm}$),布拉格光栅周期 $\Lambda=544.6\ \text{nm}$,器件长度 $L=5.0\ \text{mm}$ 时,温度和轴向应变灵敏度分别为 $10.12\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ 和 $1.12\ \text{pm}/\mu\epsilon$ 。较同类型取样光栅传感器,该传感器具有制作简单、灵活性高、稳定性高和成本低的优点,且在多波长光纤激光器和多通道光谱滤波器等领域展现出应用潜力。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 布拉格光纤光栅; 单螺旋扭转

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090601

Sensing Characteristics of Sample Fiber Bragg Grating Based on Single Helically Twisted Structure

Chen Gaoyang^{1,2**}, Ma Peng^{1,2}, Li Jie^{1,2*}, Sun Lipeng^{1,2}, Wu Chuang^{1,2}, Guan Baiou^{1,2}

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

²*Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Guangzhou, Guangdong 510632, China*

Abstract A kind of novel sampled fiber Bragg grating (SFBG) sensor for temperature and axial strain sensing is proposed and demonstrated. In order to fabricate the SFBG, we make a single helical twist structure on a standard single-mode fiber by a special fiber fusion splicer, and then inscribe a fiber Bragg grating on the twist structure based on the UV-side illumination and the phase mask technique. The reflective spectrum of the SFBG has the characteristics of equal spacing and narrow bandwidth, and can be freely modified by adjustment of the twist rate of the fiber. We experimentally investigate the temperature and axial strain responses of the SFBG, and the results show that when helical twist period is $P=504.0\ \mu\text{m}$ (torsional rate is $\alpha=12.47\ \text{rad/mm}$), the period of FBG is $\Lambda=544.6\ \text{nm}$, and the device length is $L=5.0\ \text{mm}$, the measured sensitivities for temperature and axial strain are $10.12\ \text{pm}/^\circ\text{C}$ and $1.12\ \text{pm}/\mu\epsilon$, respectively. Compared with the counterparts, the SFBG has the advantages of simple fabrication, high flexibility, high stability and low cost. It has potential applications in multi wavelength fiber lasers and multi-channel spectral filters.

Key words fiber optics; fiber-optic sensors; fiber Bragg gratings; single-helical torsion

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.3735

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-04-09; 录用日期: 2018-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(61575083)、广东省自然科学基金杰出青年基金(2014A030306040)

* E-mail: tjieli@jnu.edu.cn; ** E-mail: b215536483@live.com

1 引言

在现代通信和传感领域中,布拉格光纤光栅有着广泛的应用^[1]。例如:基于布拉格光纤光栅的双波长滤波器^[2]具有调谐速度快、调谐灵敏度高、稳定性好等优点,可应用于高速光通信和光传感领域;新型双环敏感式光纤布拉格光栅应变传感器^[3]可实现实时准确的在线监测,系统数据采集迅速,有望应用于船舶、桥梁、飞行器等需要对关键结构进行较大应变范围测量的情况。部分布拉格光栅相关应用^[4-6]需要在原有基础上再制作特殊结构,取样布拉格光栅便是其中之一,其通过在布拉格光栅上叠加不同取样函数调制纤芯折射率制成,故其反射谱具有调制取样特性。目前,取样布拉格光栅在可调分布式布拉格反射器^[7]、多波长光纤激光器^[8]、色散补偿器^[9]、多参量传感器(应变和温度传感器^[10]、折射率和温度传感器^[11])等领域得到了广泛应用。最近几十年中,制作取样布拉格光栅的很多优秀方法被提出。传统的制作方法^[12]通常是在一段光纤上逐个刻写光纤布拉格光栅,其缺点是制作较为困难,无论对振幅的 sinc 函数调制还是相移插入的控制要求都非常高,且不能灵活地控制光栅的周期数。另一种方法是在光栅刻写过程中,将一种特殊设计的振幅掩模板覆盖于相位掩模板上^[10],但这种方法受限于固定的振幅掩模板调制函数,灵活性不高。Fang 等^[13]提出一种利用 CO₂ 激光器对均匀布拉格光纤光栅周期刻写的制作方法,这种方法可灵活地改变调制函数,但是在刻写过程中器件热稳定性受到影响。Marshall 等^[14]介绍了一种利用飞秒激光器点点写入的方法,这种方法具有光栅周期、幅值和相位灵活可调整的特性,但是其复杂昂贵的系统及对激光功率和曝光位置的高精度要求限制了它的广泛应用。到目前为止,几乎所有的方法都聚焦在光纤纤芯的附加折射率调制上。

为克服上述问题,本文提出了一种在单模光纤单螺旋扭转结构上叠加刻写均匀布拉格光栅的新型取样布拉格光栅。用单螺旋扭转结构对布拉格光栅进行取样,该结构通过特种光纤熔接机(FSM-100P+)制作,可通过调整熔接机参数改变取样函数,克服了振幅掩模板取样函数固定的缺点,具有控制灵活、可重复性高及成本低等优点。并进一步研究了不同扭转周期和布拉格光栅周期对反射谱的影响,并且通过实验研究获得了该器件对温度和轴向应变的灵敏度分别为 10.12 pm/°C 和 1.12 pm/μ ϵ ,且线性度

较高。

2 器件的原理、制备及光谱特性

图 1 为本文设计的传感器结构示意图。它由在单螺旋扭转结构上叠加刻写的布拉格光栅制成。近年来,单螺旋扭转结构在模式转换器、可调谐滤波器、轨道角动量和光纤传感器等方面^[15-16]得到了广泛的应用。单螺旋扭转结构通过位移平台的平移、扭转并同时局部加热软化熔融标准单模光纤制成。当光纤被熔融扭转时,纤芯在包层内沿着单螺旋轨迹发生形变。整个结构包括一个单螺旋纤芯和一个圆柱形包层。通过使用显微镜(蔡司 Scope A1)成像发现,扭转后光纤表面光滑平整,与未扭转和刻写光栅的光纤相比,未发现明显的几何差异,呈现良好的结构特性。单螺旋扭转对光纤纵向和角向都进行周期性折射率调制,满足相位匹配和角向匹配的纤芯模式能耦合到同向包层模式中。单螺旋扭转结构周期为 P ,扭转率 $\alpha = 2\pi/P$,器件长度为 L ,其将纤芯模式 LP₀₁ 耦合到非对称模 LP_{1m}。中心波长: $\lambda_{\text{helical}} = (n_{\text{co}}^{\text{eff}} - n_{\text{cl},m}^{\text{eff}})P$,其中 $n_{\text{co}}^{\text{eff}}$ 和 $n_{\text{cl},m}^{\text{eff}}$ 分别表示纤芯模式 LP₀₁ 和包层模式 LP_{1m} 的有效折射率。布拉格光栅通过对光纤进行周期为 Λ 的折射率调制,将纤芯模式耦合到反向传输的纤芯模式 LP₀₁,中心波长: $\lambda_{\text{FBG}} = 2n_{\text{co}}^{\text{eff}}\Lambda$ 。

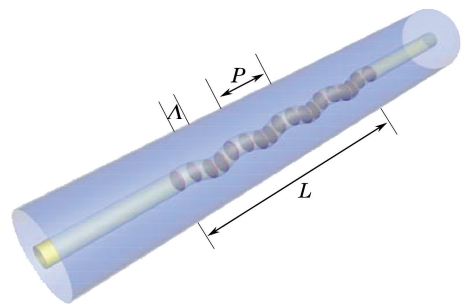


图 1 取样布拉格光纤光栅的结构示意图

Fig. 1 Schematic of the sample fiber Bragg grating structure

实验中,首先利用特种光纤熔接机(FSM-100P+)对标准单模光纤进行扭转。使 FSM-100P+ 自带的光纤夹具以轻微的拉力将光纤固定,严格保持光纤沿轴向竖直。设置左夹具旋转马达旋转速度为 0.05 (°)/ms,平移马达速度可根据取样函数的需要而改变,放电量通过熔接机放电校正确定。当启动扭转程序时,一对 FSM-100P+ 专用电极开始放电熔融软化光纤,左夹具旋转,并与右夹具保持相对位置不变,

同时沿轴向右平移, 夹具施加外力使光纤发生形变。这种方法对单螺旋扭转结构刻写能量的控制更稳定、均匀、有效。随后, 利用 193 nm 的 ArF 准分子激光器透过相位掩模板对单螺旋扭转结构叠加刻写布拉格光栅。激光器单脉冲能量和频率分别为 2.5 mJ 和 200 Hz。利用一块柱透镜将紫外光聚焦在单螺旋结构上, 能量密度为 100 mJ/cm^2 。相位掩模板放置在柱透镜和单螺旋扭转结构之间, 与单螺旋扭转结构相距 $100 \mu\text{m}$ 且平行。由于双光子效应, 故该方法具有较高的写入效率。实验中, 单螺旋扭转结构周期 P 被设置在 $100 \sim 1000 \mu\text{m}$ (扭转率 $\alpha = 6.28 \sim 62.83 \text{ rad/mm}$)。布拉格光栅周期 Λ 由相位掩模板决定, 被设置为 $530 \sim 550 \text{ nm}$ 。布拉格光栅叠加刻写长度(器件长度)统一为 5.0 mm 。最后用宽带光源 (BBS) 和分辨率为 0.1 nm 的光谱仪 (OSA) 来观测取样布拉格光栅的反射谱。

在使用准分子激光器刻写过程中发现, 当默认刻写速度为 0.02 mm/s 时, 最后得到的光谱插入损耗较大, 且光谱毛刺较多不光滑。随后, 把刻写速度修改为 0.1 mm/s , 并在器件同一段上反复刻写适量次数, 降低了激光器刻写对器件结构的破坏, 最终得到插入损耗较小且较为光滑的光谱。图 2 为该取样布拉格光栅的典型光谱特征。该光栅扭转周期 $P = 554.4 \mu\text{m}$ (扭转率 $\alpha = 11.33 \text{ rad/mm}$), 布拉格光栅周期为 $\Lambda = 535.2 \text{ nm}$, 器件长度为 5.0 mm , 激光器单脉冲能量和频率分别为 2.5 mJ 和 200 Hz 。随着叠加刻写次数增加, 1550 nm 处各级取样峰消光比在增大, 取样峰包络也在展宽。当取样周期恒定时, 取样峰包络主要取决于取样光栅段长度 $Z_g^{[17]}$, 刻写次数增加导致激光光斑外围能量加强, 从而缩短取样光栅段长度。因此, 随着刻写次数增加, 取样峰包络逐渐展宽, 但在刻写过程中相邻峰间距始终保

持不变, 这是因为取样周期始终保持恒定。透射光插入损耗约 3 dB , 最大消光比可达 7 dB , 满足光传感领域的应用要求, 且光谱对称, 相邻峰间距约 1.94 nm 。另外, 通过优化刻写次数、单脉冲能量还可进一步增加最大消光比。

接下来, 进一步分析改变单螺旋扭转周期和布拉格光栅周期对取样光谱的影响。首先, 固定单螺旋扭转周期为 $504.0 \mu\text{m}$, 器件长度为 5.0 mm , 激光器单脉冲能量和频率分别为 2.5 mJ 和 200 Hz 。将布拉格光栅周期分别改为 $535.2, 540.8, 544.6 \text{ nm}$ 。相同扭转周期时, 不同布拉格周期反射谱如图 3 所示。

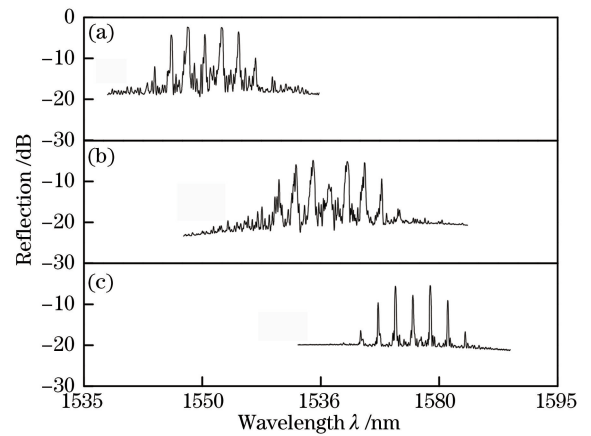


图 3 相同扭转周期 $P = 504.0 \mu\text{m}$ 时, 不同布拉格周期 Λ 时反射谱对比。

(a) $\Lambda = 535.2 \text{ nm}$; (b) $\Lambda = 540.8 \text{ nm}$; (c) $\Lambda = 544.6 \text{ nm}$
Fig. 3 Comparison of reflection spectra for the sample fiber Bragg grating with the same torsional cycle $P = 504.0 \mu\text{m}$. (a) $\Lambda = 535.2 \text{ nm}$; (b) $\Lambda = 540.8 \text{ nm}$; (c) $\Lambda = 544.6 \text{ nm}$

由图 3 可知, 当固定单螺旋扭转周期, 增大布拉格光栅周期时, 3 组反射谱中心波长分别为 $1550.26, 1566.11, 1576.67 \text{ nm}$, 而相邻峰间距分别为 $2.13, 2.17, 2.21 \text{ nm}$ 。由此可知: 随着布拉格光栅周期增大, 取样峰的中心波长和相邻峰间距也会增大, 而光谱包络有微弱展宽, 类似于传统的取样布拉格光纤光栅。

然后, 固定布拉格光栅周期为 535.2 nm , 器件长度为 5.0 mm , 激光器单脉冲能量和频率分别为 2.5 mJ 和 200 Hz 。将单螺旋扭转周期分别改为 $453.6, 504.0, 554.4 \mu\text{m}$ 。相同布拉格光栅周期时, 不同扭转周期反射谱如图 4 所示。

由图 4 可知, 固定布拉格光栅周期, 增大单螺旋扭转周期时, 3 组反射谱中心波长均为 1550.26 nm

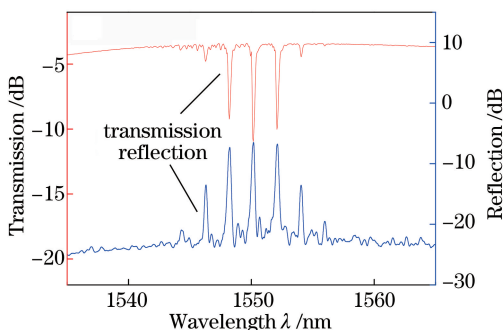


图 2 取样布拉格光栅典型光谱

Fig. 2 Typical spectrum of the sample fiber Bragg grating structure

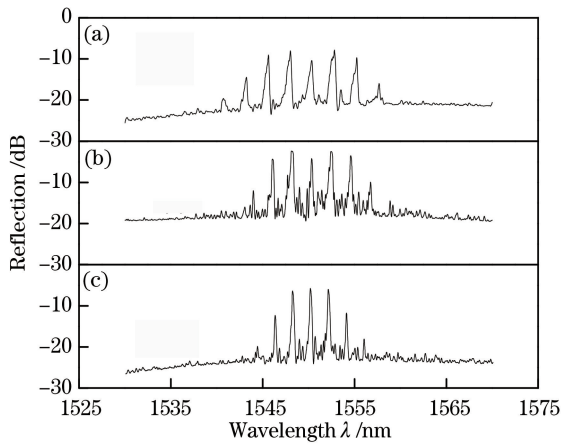


图4 相同布拉格周期 $\Lambda = 535.2$ nm 时, 不同扭转周期 P 时反射谱对比。

(a) $P = 453.6 \mu\text{m}$; (b) $P = 504.0 \mu\text{m}$; (c) $P = 554.4 \mu\text{m}$
 Fig. 4 Comparison of reflection spectra for the different torsional periodic P with the same Bragg grating $\Lambda = 535.2$ nm. (a) $P = 453.6 \mu\text{m}$; (b) $P = 504.0 \mu\text{m}$; (c) $P = 554.4 \mu\text{m}$

左右,而相邻峰间距分别为 2.41, 2.13, 1.94 nm。结果显示,随着扭转周期增大,取样峰的相邻峰间距减小,光谱包络也随之变窄,但中心波长几乎不受影响。

3 传感器温度与轴向应变传感特性

对于取样布拉格光栅而言,由于参加耦合的

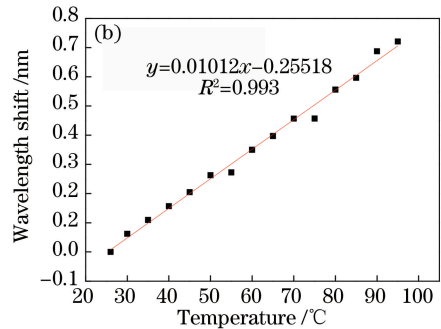
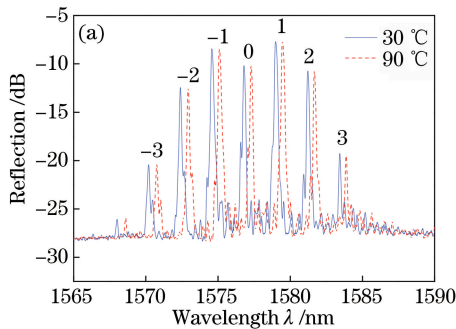


图5 取样布拉格光栅温度响应。(a)不同温度下的反射谱;(b) 0级峰波长漂移与温度的关系

Fig. 5 Temperature response of the sample Bragg grating. (a) Reflective spectra under different temperatures; (b) relationship between peak-level 0 wavelength shift and temperature

为研究轴向应变传感特性,将其两端自然绷直并固定于电控位移平台上,平台与光纤均保持轴向严格竖直,室温保持 26°C ,通过计算机控制距离为 500.0 mm 的两位移平台沿轴向拉伸,每次拉伸 0.06 mm,共拉伸 0.6 mm,并记录应变 $0 \sim 1200 \mu\epsilon$ 时反射谱的变化过程。图 6(a)为不同轴向应变下的反射谱漂移,当应变 $0 \sim 720 \mu\epsilon$ 时,反射谱发生明

LP_{01} 模式主要能量可以被很好地限制在纤芯内,所以该取样布拉格光栅具有折射率不敏感的特性。通过实验也进一步证实了这一点,现主要对其温度和轴向应变传感特性进行研究。使用的取样布拉格光栅参数如下:单螺旋扭转周期 $P = 504.0 \mu\text{m}$,布拉格光栅周期 $\Lambda = 544.6$ nm,器件长度为 5.0 mm,激光器单脉冲能量和频率分别为 2.5 mJ 和 200 Hz。

为研究该取样布拉格光栅的温度传感特性,将其放入加热箱中,温度可由电路进行控制。在其两端分别连接宽带光源(BBS)和分辨率为 0.1 nm 的光谱仪(OSA)。实验中,设定加热箱温度从 26°C 开始,每次升高一定温度直至 95°C ,当每个温度点对应的光谱稳定后再记录。图 5(a)为不同温度下反射光谱的漂移。当温度从 30°C 逐渐升高至 90°C 时,反射谱发生明显红移。通过取点计算,得出各级反射峰温度灵敏度分别为: $S_T^{(-3)} = 10.09 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $S_T^{(-2)} = 10.10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $S_T^{(-1)} = 10.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $S_T^{(0)} = 10.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $S_T^{(1)} = 10.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $S_T^{(2)} = 10.13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, $S_T^{(3)} = 10.14 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,其中上角标数字表示级数(下同)。通过比较发现各级反射峰灵敏度大致相当,差异性约为 0.5% ,且随着波长的增加各级反射峰灵敏度整体呈增大趋势,说明各级反射峰温度灵敏度与波长有关。图 5(b)为 0 级峰波长漂移与温度变化的关系。通过 origin 线性拟合实验数据可知,温度传感灵敏度为 $10.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,拟合优度为 0.993 。

显红移。通过取点计算,得出各级反射峰轴向应变灵敏度分别为: $S_S^{(-3)} = 1.11 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $S_S^{(-2)} = 1.12 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $S_S^{(-1)} = 1.12 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $S_S^{(0)} = 1.12 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $S_S^{(1)} = 1.12 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $S_S^{(2)} = 1.13 \text{ pm}/\mu\epsilon$, $S_S^{(3)} = 1.13 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。通过比较发现各级反射峰灵敏度大致相当,差异性约为 1.7% ,且随着波长的增加各级反射峰灵敏度整体呈增大趋势,说明各级反射

峰轴向应变灵敏度与波长有关。图 6(b) 为 0 级峰波长漂移随轴向应变的变化关系。通过 origin 线性

拟合实验数据,可以得到其轴向应变传感灵敏度为 $1.12 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 拟合优度为 0.998。

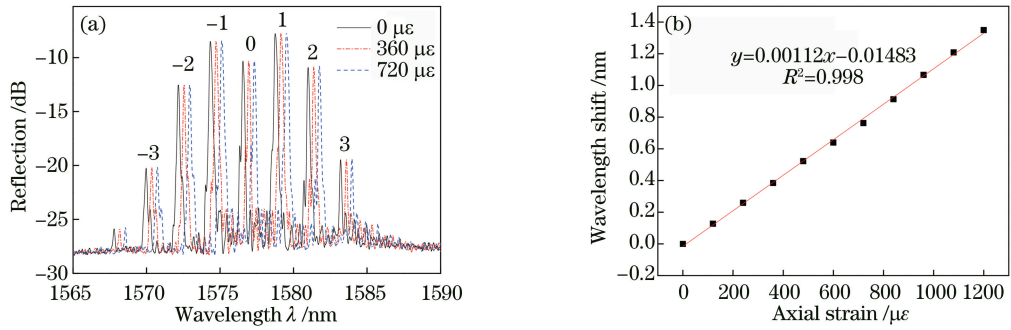


图 6 取样布拉格光栅的轴向应变响应。(a) 不同轴向应变下的反射谱;(b) 0 级峰波长漂移与轴向应变的关系
Fig. 6 Axial strain response of the sample Bragg grating. (a) Reflective spectra under different axial strains; (b) relationship between peak-level 0 wavelength shift and axial strain

4 结 论

通过在单螺旋扭转结构上叠加刻写布拉格光纤光栅,提出一种新型取样布拉格光纤光栅。并利用固定变量法,得出以下结论:布拉格光栅周期对中心波长、峰间距有影响,单螺旋扭转周期对各级谐振峰间距有影响,而中心波长几乎不受影响。并通过实验得到该器件对温度和轴向应变的响应系数分别为 $10.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 和 $1.12 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。该器件较之前提出的同类型器件具有制作简单、灵活性高、稳定性高、成本低等优点,在多波长光纤激光器和多通道光谱滤波器等研究领域展现出应用潜力。

参 考 文 献

- [1] Othonos A, Kalli K, Kohnke G E. Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing[M]. Massachusetts: Artech House, 1999.
- [2] Zhang A L, He P D, Pan H G, *et al.* Design of electrically controlled double wavelength orthogonal polarization tunable filter [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 072301.
张爱玲, 何培栋, 潘洪刚, 等. 电控可调谐的正交偏振双波长滤波器的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 072301.
- [3] Zhu X Y, Liu H L, Ni Y, *et al.* New Double-Loop desensitization FBG strain sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030605.
朱星盈, 刘化利, 倪屹, 等. 新型双环减敏式光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030605.
- [4] Cai H W, Huang R, Qu R H, *et al.* All-fiber interleave filter using Mach-Zehnder-based sampled fiber gratings [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(3): 243-246.
- [5] Tian L, Zhang A L. Dual wavelength filtering properties of phase-shifted fiber Bragg grating and sampled fiber Bragg grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2896-2900.
田力, 张爱玲. 相移光栅及取样光栅的双峰滤波特性 [J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2896-2900.
- [6] Zhang Y J, Wang M, Wang Z F, *et al.* Fabrication of chirped and tilted fiber Bragg gratings and investigation of Raman filtering effect [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0106002.
张宇菁, 王蒙, 王泽锋, 等. 啁啾倾斜 Bragg 光纤光栅制作及 Raman 滤除研究 [J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0106002.
- [7] Ibsen M, Eggleton B J, Sceats M G, *et al.* Broadly tunable DBR fibre laser using sampled fibre Bragg gratings [J]. Electronics Letters, 1995, 31(1): 37-38.
- [8] Chow J, Town G, Eggleton B, *et al.* Multiwavelength generation in an erbium-doped fiber laser using in-fiber comb filters [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(1): 60-62.
- [9] Ouellette F, Krug P A, Stephens T, *et al.* Broadband and WDM dispersion compensation using chirped sampled fibre Bragg gratings [J]. Electronics Letters, 1995, 31(11): 899-901.
- [10] Guan B O, Tam H Y, Tao X M, *et al.* Simultaneous strain and temperature measurement using a

- superstructure fiber Bragg grating [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(6): 675-677.
- [11] Shu X W, Gwandu B A L, Liu Y, *et al.* Sampled fiber Bragg grating for simultaneous refractive-index and temperature measurement [J]. Optics Letters, 2001, 26(11): 774-776.
- [12] Ibsen M, Durkin M K, Cole M J, *et al.* Sin-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(6): 842-844.
- [13] Fang X, He X Y, Liao C R, *et al.* A new method for sampled fiber Bragg grating fabrication by use of both femtosecond laser and CO₂ laser [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2646-2654.
- [14] Marshall G D, Williams R J, Jovanovic N, *et al.* Point-by-point written fiber-Bragg gratings and their application in complex grating designs [J]. Optics Express, 2010, 18(19): 19844-19859.
- [15] Zhang L. Research on the fabrication and characteristics of the laser written helical long-period fiber gratings [D]. Shanghai: Shanghai University, 2016: 86-100.
张亮. 激光写入螺旋光纤长周期光栅制备与特性研究 [D]. 上海: 上海大学, 2016: 86-100.
- [16] Xu H X. Chiral long period fiber grating and its applications in optical fiber sensing and conversion of the orbital angular momentum of light [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 103-128.
许华醒. 长周期手征光栅及其在光纤传感和光轨道角动量调制中应用的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 103-128.
- [17] He X Y, Yu Y L, Huang D, *et al.* Analysis and applications of reflection-spectrum envelopes for sampled gratings [J]. Journal of Lightwave Technology, 2008, 26(6): 720-728.