

文章编号: 1671-5896(2020)05-0523-06

基于波片棱镜组合能量调节的切趾光纤光栅

郑钟铭¹, 国旗², 吴娜¹, 于永森², 李文昊¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 吉林大学 电子科学与工程学院, 长春 130012)

摘要: 为提高飞秒激光制备高反射率 FBG(Fiber Bragg Grating) 的边模抑制比, 提出了一种基于组合二分之一波片和格兰棱镜调节激光能量的加工方法, 制备出了高反射率和高边模抑制比的切趾光纤光栅。通过上位机输入切趾函数模型, 实时精确调节步进电机速度, 机械旋转二分之一波片位置, 实现激光能量沿光纤方向呈切趾函数分布, 从而在光纤纤芯中折射率调制区域呈切趾函数分布, 获得参数可调的切趾光纤光栅。实验表明, 该方法制备的切趾光栅在 1 550 nm 处反射率可达 70%, 边模抑制比超过 20 dB, 半高峰宽度 0.35 nm。对其温度和应力传感特性研究显示, 其温度灵敏度为 1.529×10^{-2} nm/K, 应力灵敏度为 1.61 nm/N。该方法制备的高反射率切趾光纤光栅有望应用于大功率、窄线宽的光纤激光器以及高速精确传感解调系统中。

关键词: 飞秒激光; 二分之一波片; 格兰棱镜; 切趾光纤光栅; 切趾函数

中图分类号: TN253 文献标识码: A

DOI:10.19292/j.cnki.jdxxp.2020.05.001

Apodized Fiber Grating Based on Energy Adjustment of Combined Wave Plate and Prism

ZHENG Zhongming¹, GUO Qi², WU Na¹, YU Yongsen², LI Wenhao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: In order to increase the side-mode suppression ratio of FBGs (Fiber Bragg Gratings) with high reflectivity and reduce the insertion loss caused by preparation of high reflectivity gratings using femtosecond laser pulses, we present a processing method based on a combination of a half-wave plate and a Glan prism, an apodized fiber grating with high reflectivity, high side mode suppression ratio, and low insertion loss. By inputting the apodization function model to the host computer, the stepper motor speed can be precisely adjusted in real time, and the half-wave plate position can be mechanically rotated to realize the laser energy distribution along the fiber direction as an apodization function. Finally an apodized fiber grating with adjustable parameters is obtained. The experiment shows that the apodized grating of this method can reach 70% reflectance at 1 550 nm, the side-mode suppression ratio is 20 dB with a full width at half maximum of 0.35 nm. And the temperature and strain sensing characteristics is tested. The temperature sensitivity is 1.529×10^{-2} nm/K, and the strain sensitivity is 1.61 nm/N. This high-reflectance apodized fiber gratings can be expected to be applied in high-power narrow-linewidth fiber lasers and high-speed accurate sensing demodulation system.

Key words: femtosecond laser; half-wave plate; Glan prism; apodized fiber gratings; apodisation function

收稿日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61905244)

作者简介: 郑钟铭(1992—), 男, 长春人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究实习员, 主要从事全息光栅研制研究, (Tel) 86-18404319922 (E-mail) zhengzm0707@163.com; 于永森(1974—), 男, 长春人, 吉林大学教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感及激光微纳加工研究, (Tel) 86-13844982366 (E-mail) yuys@jlu.edu.cn.

0 引言

光纤光栅由于具有体积小、波长可选择性、抗电磁干扰、全兼容于光纤等优点^[1-4],且其谐振波长对温度、应变等物理量变化敏感,所以广泛应用于光纤通信和传感领域^[5-6]。自从20世纪70年代光纤光栅技术发展以来,随着对其研究投入的加深,光纤光栅的制造技术和应用领域不断扩大,人们根据需要可制备出各种参数类型的光纤光栅^[7-8],满足光纤通信和传感领域的各种发展需求,使其成为最主要的光纤无源器件之一。

在光通信领域中,光纤光栅由于波长选择性好,可灵活设计光栅使用参数,因此可作为宽、窄带的各类带通、带阻滤波器使用。其中均匀布拉格光纤光栅具有较窄的反射频带,可根据需要制备不同反射率的光栅。但当反射率较高时,会产生较大的旁瓣,造成相邻信道相互串扰。同时在光纤传感和光纤激光领域,高反射率光栅带来较大旁瓣的光谱效果,会增大系统解调难度以及降低激光脉冲的选择性。人们发现对光栅周期或折射率进行切趾型函数的调制可有效抑制旁瓣振荡^[9-10]。研究光纤光栅切趾优化光谱的方法,以获得良好的旁瓣抑制,对提升光纤光栅的性能,推动其在光纤通信和传感领域的应用发展具有重要意义^[11-12]。目前,已有多种光纤光栅的切趾技术方法,例如:切趾相位掩模版法、扫描法、多次曝光法和利用紫外脉冲相干写入切趾光纤光栅法等^[13-16]。受限于实际情况和条件,以上方法大部分基于全息相位掩模制作光纤光栅,均有各自优缺点,例如掩模版价格昂贵、光栅周期固定或需要复杂稳定的光路等。此外基于这几类方法制作的UV(Ultraviolet)诱导光栅通常光栅长度大于5 mm,在传感领域还会受到传感区过长,受感应区不均匀而产生啁啾现象,因此根据实际应用情况和参数要求,需选用合适的切趾技术方法。飞秒激光具有超短脉冲宽度和高峰值功率等优势,可作为一种极佳的光学微纳加工手段,并已应用于光纤光栅加工中^[17-19]。超快飞秒激光能在透明介质材料中诱导永久性的折射率变化,因此飞秒光纤光栅具备极佳的热稳定性。对石英光纤光栅,可在800℃的高温条件下保持光谱性质稳定,能满足一些极端环境的应用,如高温传感和高功率激光输出等^[20-23]。Williams等^[9]提出一种飞秒激光斜向切趾的方法,通过精确控制聚焦的激光脉冲在光纤纤芯中的位置,使脉冲激光作用的折射率调制区域在纤芯中实现均匀斜向分布,从而实现纤芯中间耦合效率最高,接近纤芯边缘耦合效率逐渐降低的切趾效果。但该方法需要实时调节物镜聚焦深度或轨迹移动角度,会带来一定的结构不对称性,在制备反射率为85%的切趾FBG(Fiber Bragg Grating)时,边模抑制比为12 dB。

笔者提出了一种使用飞秒激光制备切趾光纤光栅的新方法。通过将二分之一波片与格兰棱镜组合的方法控制飞秒激光脉冲能量,在逐点刻写光栅的过程中,通过程序控制步进电机,调整二分之一波片的旋转角度和速度,调制写入光栅过程中的激光脉冲能量,使沿光纤方向上折射率调制幅度符合切趾型函数分布,从而实现切趾光栅的效果。测试表明,制备高反射率切趾FBG时,仍然具有较高的边模抑制比,同时具有较高的温度和应力灵敏度以及稳定性。

1 原理及制备过程

光纤光栅可视为介质内部存在周期性折射率变化的体光栅,其纤芯内部的有效折射率分布沿光纤方向可以表示为^[22]

$$n(z) = n_{\text{eff}} + \Delta n(z) \left\{ 1 + \nu \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right\} \quad (1)$$

其中 n_{eff} 为纤芯的有效折射率, $\Delta n(z)$ 为纤芯有效折射率变化包络函数, ν 为条纹可见度, Λ 为光栅周期, $\varphi(z)$ 可描述光栅啁啾量。

切趾光纤光栅折射率调制的包络函数振幅沿光纤方向一般呈钟罩形函数包络。几种典型的包络函数有高斯分布函数、超高斯分布函数和升余弦函数,其函数表达式分别如下^[22]

$$\Delta n_{\text{eff}}(z) = \Delta n_{\text{eff}} \exp \left(-\frac{4 \ln 2 z^2}{W^2} \right) \quad (2)$$

$$\Delta n_{\text{eff}}(z) = \Delta n_{\text{eff}} \exp \left[-\ln^2 \left(2z/W \right)^{2n} \right] \quad (3)$$

$$\Delta n_{\text{eff}}(z) = \Delta n_{\text{eff}} \frac{1}{2} [1 + \cos(\pi z/W)] \quad (4)$$

其中 W 为半高全宽(FWHM: Full Width at Half Maximum)。

以高斯分布函数为例,当半高峰宽度一定时,纤芯有效折射率 n_{eff} 沿光纤方向调制如式(1)所示,即可获得高斯型切趾光栅效果。在实际加工过程中,通过旋转半波片,控制激光脉冲能量,配合调整平台移动速度,使纤芯内部折射率调制深度如同式(1)。

飞秒激光逐点法制备切趾光纤光栅的原理图如图1所示,加工系统组成主要包括: 1) 1 030 nm 飞秒激光器; 2) 倍频晶体; 3) 半波片和格兰棱镜; 4) 聚焦系统(Olympus, 60 倍物镜/数值孔径 1.42); 5) Aerotech 气浮平台; 6) CCD(Charge Coupled Device) 成像系统。基本原理是通过 BBO(β -BaB₂O₄) 倍频晶体将 1 030 nm 飞秒激光倍频为 515 nm,在光路中将二分之一波片固定在通过上位机控制的机械旋转支架上,可改变激光偏振态,同时和格兰棱镜组合控制激光脉冲输出能量。在物镜前方使用功率计标定出二分之一波片旋转不同角度下的激光脉冲能量。在二分之一波片旋转过程中,激光能量会从最低逐渐升高到最高,再逐渐降低为最低状态。通过上位机程序输入函数模型,精确调节步进电机速度,机械旋转二分之一波片位置,实现激光能量类高斯型函数分布效果。配合气浮平台移动速度,可在纤芯中间调制出折射率切趾效果,从而可灵活设计制备出周期和反射率可调的切趾光栅。

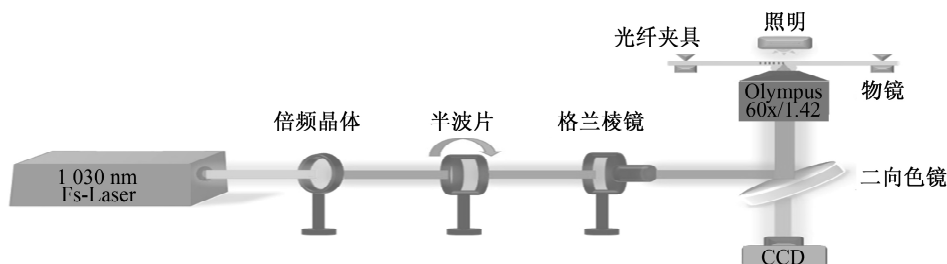


图1 逐点刻写技术制备切趾光纤光栅的装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the device for preparing apodized fiber gratings by point-by-point inscription technology

飞秒激光直写采用 Light Conversion 公司 Pharos 高功率飞秒泵浦激光器。Pharos 是单一集成飞秒激光系统,拥有毫焦耳脉冲能量和高平均功率。激光工作波长 1 030 nm,脉冲宽度 2.9×10^{-13} s,重复频率可调,最高可达 1 MHz。通过倍频晶体 BBO 可将 1 030 nm 激光倍频为 515 nm,本实验采用的重复频率为 400 Hz,单脉冲能量为 80 nJ,激光经过 60 × 奥林巴斯油浸物镜($N_A = 1.42$)聚焦到被放置在 Aerotech 气浮平台上的标准单模石英光纤中(SMF-28e),聚焦到纤芯的激光光斑直径大约为 500 nm。三维平台移动速率为 0.428 4 mm/s。通过程序输入切趾函数模型,机械控制二分之一波片旋转速度,改变激光线偏振态的旋转角度和速度,使经过格兰棱镜的激光强度呈现切趾函数分布效果。

根据 FBG 的相位匹配条件^[7]

$$m\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (5)$$

其中 m 为光栅阶数, λ_B 为 FBG 中心波长。制备的切趾 FBG 光栅周期 $\Lambda = 1.071 \mu\text{m}$,光栅阶数 $m = 2$,获得的 FBG 中心波长 λ_B 在 1 550 nm 左右。可通过光纤耦合器、NKT Photonics 超连续谱光源和 AQ6370D 光谱仪组合成光谱测试系统,测试 FBG 的反射光谱和透射光谱。

为清晰看出切趾与未切趾光栅的区别,分别制备出了长度为 55 μm 的切趾和未切趾的 FBG,显微照片对比如图 2 所示,可观察到超高峰值功率密度的飞秒脉冲聚焦到纤芯内部形成了周期性、局域化和损伤性的折射率调制。图 2a 中未切趾的 FBG,相同激光能量对纤芯折射率调制部分呈均匀周期分布。图 2b 中的切趾 FBG,由于在机械旋转二分之一波片过程中,激光能量呈类高斯函数分布,中间能量最高,由中间向两侧能量逐渐变低,作用在纤芯中的脉冲能量呈现类高斯函数分布,即沿光纤周期方向上的折射率调制强度类高斯函数分布。由图 2b 可观察到在长度 55 μm 的切趾 FBG 两端折射率调制弱于中间,切趾 FBG 两端折射率调制深度最低,而中间区域调制深度最大,光栅对比度最明显。

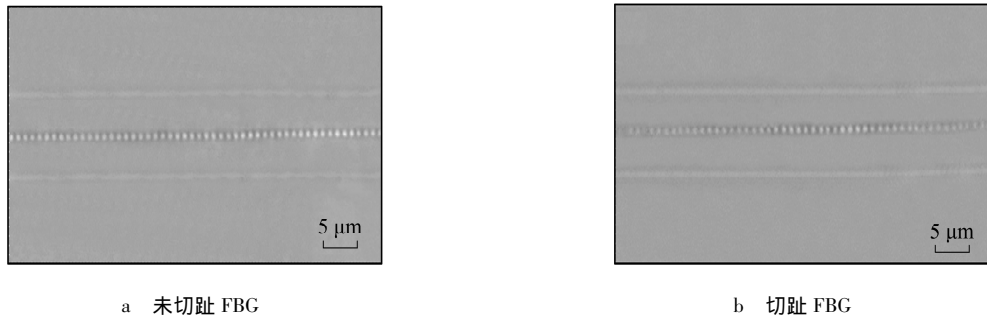
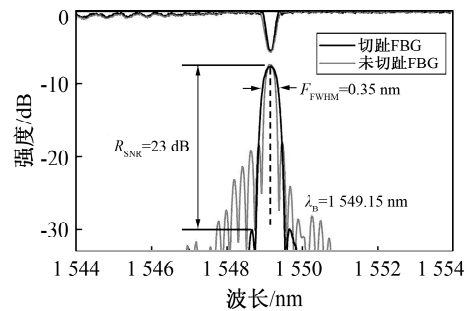


图 2 制备的 FBG 的显微照片

Fig. 2 Micrograph of the prepared FBGs

切趾前后的 FBG 光谱如图 3 所示。加工时设定的 FBG 谐振波长在 1 550 nm 处，由于光纤夹具对光纤具有轻微拉伸作用，制备完成后应力释放，引起 FBG 谐振波长轻微漂移，最终得到的 λ_B 在 1 549.15 nm 处。由图 3 可看出，制备相同反射率的光栅，采用该方法获得的切趾 FBG 边模抑制比远大于未经切趾的 FBG，切趾后边模抑制比达到 23 dB，半高峰宽度为 0.35 nm，反射率为 70%，同时在 1 550 nm 附近的插入损耗仍小于 1 dB，这表



明该切趾方法制备高反射率光栅时未引入大的插入损耗。
图 3 切趾 FBG 和未切趾 FBG 的透射和反射光谱
Fig. 3 Transmission and reflection spectra of apodized FBGs and unapodized FBGs

2 传感响应测试及分析

对制备的切趾 FBG 分别进行温度和应力的传感特性研究。首先进行高温退火过程，将切趾 FBG 放置于高温炉中，从室温升高至 800 °C 并维持 2 h，然后冷却至室温，该过程是为了消除切趾 FBG 制备过程中不稳定结构以及残余应力。退火后的反射峰强度会有轻微减小，主要是由于退火过程擦除了一部分低折射率调制深度的不稳定的光栅，最后保留了稳定的 II 型耐高温光栅。然后以 10 °C /min 的速率进行升温，每升高 100 °C，恒温 15 min，并记录一次光谱数据，直至升温到 800 °C。在室温 25 ~ 800 °C 范围内，一共记录了 9 个光谱数据，切趾 FBG 谐振波长 λ_B 随温度变化的漂移曲线如图 4 所示。

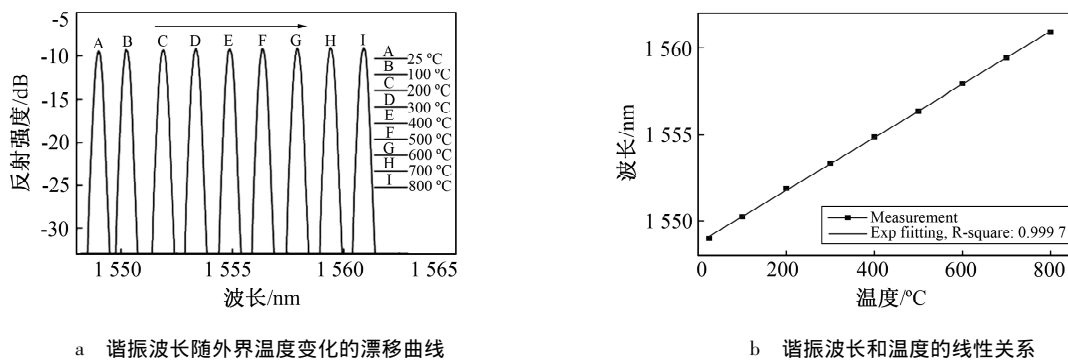


图 4 切趾 FBG 温度响应特性

Fig. 4 Temperature response characteristics of apodized FBGs

由图 4a 可见，随着温度升高，由于光纤的热膨胀效应和热光效应，光纤光栅周期和纤芯有效折射率发生变化，切趾 FBG 的谐振波长 λ_B 向长波方向漂移，其温度灵敏度为 1.529×10^{-2} nm/K ($R^2 = 0.9997$)。结果表明该切趾 FBG 可以在 800 °C 的高温环境中稳定工作，具有很好的温度灵敏度和稳定性。

将切趾 FBG 放入应力测试装置中,每增加 0.1 N 记录一次光谱,直至增加到 1.0 N,共计获得 11 个光谱数据,其谐振波长 λ_B 随应力变化的漂移曲线如图 5 所示。

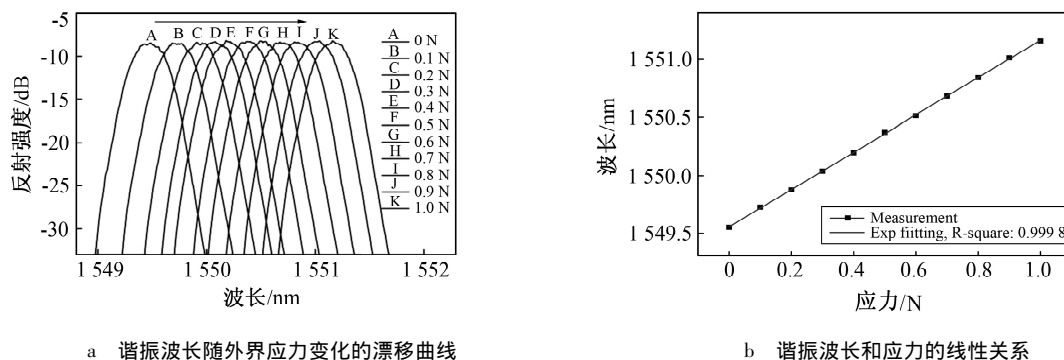


图 5 切趾 FBG 应力响应特性

Fig. 5 Strain response characteristics of apodized FBGs

由图 5a 可见,随着应力增加,切趾 FBG 的谐振波长向长波方向漂移,其应力灵敏度为 1.61 nm/N ($R^2 = 0.9998$)。该方法制备的切趾 FBG 温度和应力传感特性与之前报道的单模石英飞秒 FBG 温度和应力灵敏度基本在同一数量级。

3 结 语

笔者提出了一种基于二分之一波片和格兰棱镜组合的方法制备切趾 FBG,该方法通过旋转二分之一波片调节激光线偏振态,从而改变通过格兰棱镜的出射激光强度,改变逐点刻写光纤光栅过程中不同位置折射率调制幅度,在沿光纤方向上折射率调制幅度符合切趾型函数分布,实现了切趾光栅的效果。在制备的光栅反射率为 70% 时,边模抑制比达到 23 dB,半高宽 0.35 nm,插入损耗小于 1 dB。这种切趾 FBG 还具有很好的高温稳定性,得到的温度和应力的灵敏度分别为 1.529×10^{-2} nm/K 和 1.61 nm/N。该光栅可应用于大功率、窄线宽的光纤激光器以及高速精确传感解调系统中。

参考文献:

- [1] MIHAILOV S J. Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments [J]. Sensors, 2012, 12(2): 1898-1918.
- [2] LIU B, YU Z H, HILL C, et al. Sapphire-Fiber-Based Distributed High-Temperature Sensing System [J]. Optics Letters, 2016, 41(18): 4405-4408.
- [3] YAN A D, CHEN R Z, ZAGHLOUL M, et al. Sapphire Fiber Optical Hydrogen Sensors for High-Temperature Environments [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(1): 47-50.
- [4] LIU Z J, YU Y S, ZHANG X Y, et al. An Optical Microfiber Taper Magnetic Field Sensor with Temperature Compensation [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(9): 4853-4856.
- [5] 张叶浩, 衣文索, 崔光磊, 等. 干涉型光纤预警系统入侵信号的调制解调技术 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2018, 36(1): 3-10.
ZHANG Yehao, YI Wensuo, CUI Guanglei, et al. Research on Modulation and Demodulation of Intrusion Signal Based on Interferometric Optical-Fiber Early-Warning System [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2018, 36(1): 3-10.
- [6] 郭继坤, 陈司晗. 矿井下分布式光纤定位精度及感测距离研究 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2018, 36(5): 28-33.
GUO Jikun, CHEN Sihan. Research on Location Accuracy and Sensing Distance of Distributed Optical Fiber under Mine [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2018, 36(5): 28-33.
- [7] GUO Q, YU Y S, ZHENG Z M, et al. Femtosecond Laser Inscribed Sapphire Fiber Bragg Grating for High Temperature and Strain Sensing [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2019, 18: 208-211.
- [8] ZHENG Z M, YU Y S, ZHANG X Y, et al. Femtosecond Laser Inscribed Small-Period Long-Period Fiber Gratings with Dual-Parameter Sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(3): 1100-1103.

- [9] WILLIAMS R J, VOIGTLANDER C, MARSHALL G D, et al. Point-by-Point Inscription of Apodized Fiber Bragg Gratings [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(15): 2988-2990.
- [10] ZHAO Y S, CHE N N, GONG J H, et al. Distributed Measurement of Regeneration Ratios of an Apodized Type I Fiber Bragg Grating [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(24): 6127-6132.
- [11] MOHAMMED N A, EL SERAFY H O. Ultra-Sensitive Quasi-Distributed Temperature Sensor Based on an Apodized Fiber Bragg Grating [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(2): 273-282.
- [12] KUMARI C R U, SAMIAPPAN D, KUMAR R, et al. Development of a Highly Accurate and Fast Responsive Salinity Sensor Based on Nuttall Apodized Fiber Bragg Grating Coated with Hygroscopic Polymer for Ocean Observation [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53(1): 1-8.
- [13] 王迪, 李璇, 皮浩洋, 等. 相位掩模板干涉场及其对光纤光栅损耗的影响 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 292-299.
WANG Di, LI Xuan, PI Haoyang, et al. Interference Field Behind Phase Mask and Its Influence on the Loss Characteristic in Fiber Bragg Gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 292-299.
- [14] 唐晓辉, 张文, 莫禾胜. 基于多次曝光法啾啾光纤光栅的研究 [J]. *光通信技术*, 2009(8): 21-22.
TANG Xiaohui, ZHANG Wen, MO Hesheng. Based on Repeated Exposure Study of Chirped Fiber Grating [J]. *Optical Communication Technology*, 2009(8): 21-22.
- [15] 李栩辉, 夏历, 刘晶雯, 等. 啾啾和切趾函数可调的光纤光栅的扫描写入法 [J]. *半导体光电*, 2001, 22(1): 15-17.
LI Xuhui, XIA Li, LIU Jingwen, et al. A Novel Method for Fabricating Adjustable Apodized and Chirped Gratings by UV Light Scanning Writing Technology [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2001, 22(1): 15-17.
- [16] 饶明辉, 何振江, 杨冠玲, 等. 偏振控制法紫外写入 Bragg 光纤光栅的特性分析 [J]. *激光技术*, 2004, 28(1): 62-65.
RAO Minghui, HE Zhenjiang, YANG Guanling, et al. The Advance of Polarization Control Method to Ultraviolet Written Bragg Gratings [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 62-65.
- [17] XU X Z, HE J, LIAO C R, et al. Multi-Layer, Offset-Coupled Sapphire Fiber Bragg Gratings for High-Temperature Measurements [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4211-4214.
- [18] XU X Z, HE J, LIAO C R, et al. Sapphire Fiber Bragg Gratings Inscribed with a Femtosecond Laser Line-by-Line Scanning Technique [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(19): 4562-4565.
- [19] YANG S, HOMA D, PICKRELL G, et al. Fiber Bragg Grating Fabricated in Micro-Single-Crystal Sapphire Fiber [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 62-65.
- [20] CHEN C, ZHANG X Y, YU Y S, et al. Femtosecond Laser-Inscribed High-Order Bragg Gratings in Large-Diameter Sapphire Fibers for High-Temperature and Strain Sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3302-3308.
- [21] CHEN C, ZHANG X Y, WEI W H, et al. Multi-Resonance Peaks Fiber Bragg Gratings Based on Largely-Chirped Structure [J]. *Optics Communications*, 2018, 412(1): 150-154.
- [22] THOMAS J, VOIGTLANDER C, BECKER R G, et al. Femtosecond Pulse Written Fiber Gratings: A New Avenue to Integrated Fiber Technology [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(6): 709-723.
- [23] 洪从胜, 徐新华, 吕昌贵, 等. 切趾光纤光栅技术及其研究进展 [J]. *光电子技术与信息*, 2002, 15(3): 1-6.
HONG Congsheng, XU Xinhua, LÜ Changgui, et al. Technologies and New Progress of Apodized Fiber Grating [J]. *Optoelectronic Technology and Information*, 2002, 15(3): 1-6.

(责任编辑: 刘俏亮)