

新型带状光纤中阵列光栅刻写方法

卢辉斌^{1,2} 李彩玲¹ 王璐¹ 江鹏¹ 王伟^{1,2} 刘燕燕^{1,2} 齐跃峰^{1,2*}

¹燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

²河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

摘要 设计了一种新型阵列光纤光栅的刻写系统, 实现了8芯带状光纤上不同波长阵列光纤光栅的刻写。其基本原理如下: 利用专门设计的带纤夹具夹持带纤, 采用电控位移平台对带纤整体施加拉力来调节波长, 逐根曝光, 并采用扫描写入的方法进行汉明切趾。利用以上系统, 实现了3 dB带宽为0.2 nm、波长间隔为0.5 nm、波长偏差小于 ± 0.05 nm、反射率为80%~85%的阵列布拉格光纤光栅刻写。此工艺自动化程度高, 光栅参数灵活可调。

关键词 光纤光学; 光纤光栅; 多波长; 带状光纤

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.1005003

Novel Fabrication Method of Multi-Wavelength Array Gratings on Ribbon Optical Fiber

Lu Huibin^{1,2} Li Cailing¹ Wang Lu¹ Jiang Peng¹ Wang Wei^{1,2}
Liu Yanyan^{1,2} Qi Yuefeng^{1,2}

¹School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Key Laboratory for Especial Optical Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A kind of novel fabrication system of array optical fiber gratings is designed, which can make multi-wavelength array optical fiber gratings on 8-core ribbon optical fiber. The principle of this system is as follows: the ribbon optical fiber is clamped by the specially-designed fixture; tension is applied on ribbon optical fiber to control and change the resonant wavelength by electrically controlled displacement platform; optical fibers are exposed under ultraviolet (UV) laser one by one; Hamming apodization is employed at the same time. Array optical fiber Bragg gratings with 0.2 nm bandwidth, wavelength interval less than 0.5 nm, wavelength deviation less than ± 0.05 nm and reflectivity from 80% to 85% on ribbon optical fiber are successfully obtained by the above system. This kind of technology is easy to adjust the parameters of the optical fiber gratings and has more automation.

Key words fiber optics; fiber gratings; multi-wavelength; ribbon optical fiber

OCIS codes 050.2770; 060.2370; 280.4788

1 引 言

带状光纤是将多根光纤紧密排列成平行带状, 单层或多层分布, 每层为4芯、6芯、8芯等, 相邻纤芯间距为250 μm 。此种结构光纤具有光纤密度高、体小质轻、光纤易识别、分路方便等优点, 可大大提高光缆中光纤的组装密度和光缆接续速度, 在大容量的光纤通信系统中得到了广泛的应用。

光纤光栅具有体积小、波长选择性好、易与光纤系统连接等优点^[1-2], 在现代光纤通信系统中广泛用作滤波器、波分复用器、均衡器、色散补偿器等^[3-7], 光纤光栅以及基于光纤光栅的器件已经成为全光网络中理想的关键器件。通信系统中常用的方式是将单纤上的光栅采用熔接或者活动连接的方式接入系统, 其缺点是连接费时、占用空间大且不可避免地引入较大插入损耗^[8-10]。

收稿日期: 2015-05-26; 收到修改稿日期: 2015-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61275093, 61205084)、河北省自然科学基金(F2015203277)

作者简介: 卢辉斌(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电检测方面的研究, E-mail: yjsbl@ysu.edu.cn.

*通信联系人。E-mail: yfqi@ysu.edu.cn

如果能够将带纤和光栅的优势结合在一起,直接在带纤上实现阵列布拉格光纤光栅(FBG)的刻写,并且每根光栅的波长、反射率等参数可根据需要灵活调整,那么此种基于带纤的阵列光栅可以使光纤通信系统的结构更为简单,连接更加方便,器件密度更高,插入损耗更小,这将大大扩展光纤光栅在光纤通信领域中的应用。本文即是寻找一种方法,利用单一相位模板,实现带纤上参数可调的光纤光栅阵列的刻写。

2 系统结构

系统结构如图1所示,图中OSA为光谱仪。待加工带纤事先在需要刻栅位置剥除2 cm长的带纤外套膜形成窗口,再去除光纤涂覆层,并保证窗口区之外的带纤封装外型不变,然后在12 MPa压力环境下加热载氢23 h,加热温度为75 °C^[11-12]。之后利用专门设计的带纤夹具将带纤两端分别固定在2个电控3维(3D)位移平台上。准分子激光器发出的光束经反射镜反射、柱透镜聚焦及光阑约束后经过相位模板,对去除涂覆层的带纤窗口区域第1根光纤进行曝光,待第1根曝光结束后,利用电控3维位移台将带纤向下移动250 μm,同时3维位移台向左右移动设定的距离来改变施加在带纤上的拉力,实现光栅波长的调节,进行第2根光栅的刻写。重复以上过程,直至完成带纤上所有光栅的刻写。刻写过程中移动固定在1维位移平台上的反射镜和聚焦透镜进行扫描切趾。光纤两端连接放大自发辐射(ASE)光源和光谱仪检测光纤透射光谱,对光栅写入过程进行实时监测。

为了消除激光光束对带纤中其他光纤的影响,光阑宽度设定为250 μm,每次刻写完1根后带纤下移1根光纤的距离(250 μm)。实验中使用193 nm波长紫外光源,在此波长上250 μm宽的光阑不会产生明显衍射;另外250 μm的宽度是相邻2个光纤纤芯的距离,实际上去除涂覆层后相邻2根光纤间会存在125 μm的间隙,这样即使位移平台移动时出现微小偏差,例如偏差几个或者十几个微米,也不会漏掉要刻写的光纤,同样不会重复已曝光的光纤。

实验条件:光谱仪为Ando公司的AQ-6370C型光谱仪,波长分辨率为0.02 nm;准分子激光器为COHERENT公司生产的COMPEX Pro-50准分子激光器,波长为193 nm;3维精密电控位移平台为北京微纳光科公司生产的WN301ZA,脉冲当量为0.155 μm;1维电控位移平台为中国北京卓立汉光公司生产的SC300-1B型位移平台,脉冲当量为0.155 μm。

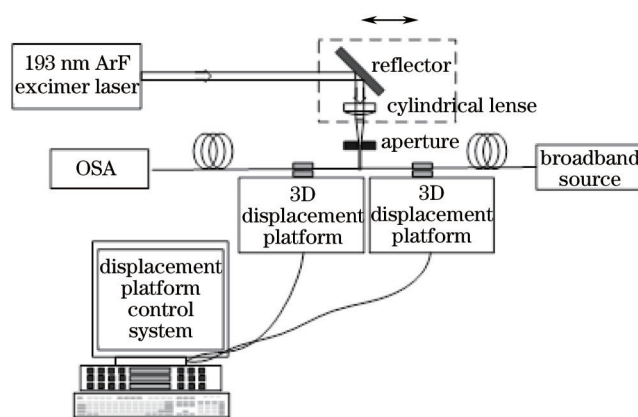


图1 系统结构示意图

Fig.1 Structure of the array fiber gratings fabrication system

3 工作原理

3.1 带纤夹具设计

为了采用位移平台来拉伸带纤,首先需要将带纤通过专门的带纤夹具固定在位移平台上,为此设计了一种可夹持不同宽度带纤且角度可调的带纤夹具。图2为带纤夹具实物图,夹具采用不锈钢材料制作,L型底板的两面均带有螺孔,可以牢固地安放在3维位移平台上。其基本原理是通过带有自锁功能的偏心轮旋转挤压顶杆,顶杆前移,推动前端的压板夹紧带纤。夹持装置宽度及角度可通过调整L型板上压板的相应位置实现。

由于光栅周期极小(纳米级),因而对曝光过程中曝光区域的移动非常敏感,轻微的带纤滑动都会导致刻栅失败。经过多次实验,将平行夹持面改为宏弯结构如图3所示,以增加摩擦阻力。宏弯轮廓曲线表达式为

$$y = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq 5 \text{ mm} \\ 4 \sin[0.4(x - 5)], & 5 \text{ mm} \leq x \end{cases} \quad (1)$$

修改后的夹具夹持效果得到很大改善,实验结果表明此种结构既能牢固地夹持带纤,又能够保证带纤涂覆层的完整。

3.2 带纤窗口的剥除

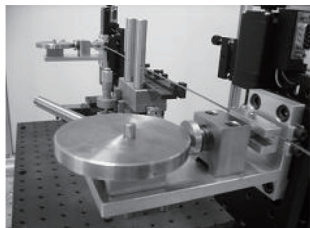


图2 光纤夹具图

Fig.2 Ribbon optical fiber holder

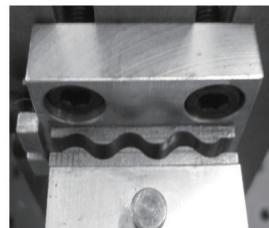


图3 宏弯结构接触面图

Fig.3 Macrobend structure of ribbon optical fiber holder

要在带纤的中间剥除一段 2 cm 的窗口,除了要去掉带纤外套层,还要剥除组成带纤的每根单纤上的涂覆层,且不能破坏窗口之外的带纤结构。目前市面没有专门的带纤窗口剥除器,对此尝试了多种方法,如三氯乙烯有机溶剂浸泡、高温气化等,效果都不理想。前者耗时 72 h 以上且最终光纤表面附着物很难清理;后者会造成光纤变脆,刻栅时容易断裂。最后,使用剃须刀片刮除的方法解决了这一问题。剥除时,使刀片以合适的角度在带纤两面反复刮除,直至带纤外套层和单纤涂覆层剥除干净,使用酒精进行清洁。初期的成功率并不高,有时会造成肉眼不可见的光纤损伤,导致后期光栅刻写施加较大拉力时光纤断裂。经过一段时间练习后,剥除质量、速度和成功率都得到较大提高,成功率能够稳定在 90% 以上。

3.3 波长调节装置及方法

光栅刻写中波长调节常用的方法是采用悬挂砝码的方式,通过改变施加在光纤上的拉力来实现波长调节。此种方法结构简单,能够精确调整光纤上的拉力,但其缺点是效率低,自动化程度差,尤其对于带纤这种多纤结构来说悬挂砝码工作量很大,所以本研究中采用精密电控位移平台编程来实现光纤上拉力的改变,从而实现单模板下不同谐振波长光栅的刻写。实验中首先刻写中心波长最大的光栅,之后在原有拉力的基础上,逐个增大施加在带纤上的拉力,从而改变光纤上的拉伸量,直至完成带纤上所有光栅的刻写。

本文中带纤为并列单排 8 芯带纤,要求相邻光栅中心波长差 0.5 nm,最长波长与最小波长差 3.5 nm,此时尚处于光纤的弹性形变范围内,光栅波长漂移与拉伸量呈线性关系^[13-15]。设 L 为带纤长度, P 为位移平台的脉冲当量, Λ 为模板周期, N 个脉冲所对应的光栅周期改变量 $\Delta\Lambda$ 为

$$\Delta\Lambda = \frac{N \cdot P \cdot \Lambda}{L} \quad (2)$$

则波长漂移 0.5 nm 需要的脉冲数 N 可表示为

$$N = \frac{0.5 L}{P \cdot 2\Lambda \cdot n_{\text{eff}}} \quad (3)$$

式中 n_{eff} 为纤芯有效折射率,这里取 1.447,本实验中 L 为 400 mm。

3.4 光纤滑动规律分析

通过施加在带纤上的拉力来控制光栅谐振波长,当拉力比较大时,光纤可能发生滑动。布拉格光栅周期极小,只有数百个纳米,刻栅过程中轻微的光纤滑动都会造成刻栅失败,而带纤中 8 根单纤上任何一个光栅参数不符合要求,整个带纤即报废,因而需要确定光纤的滑动规律来克服光纤滑动造成的影响。刻栅初期,带纤夹具的夹持面采用铝合金材料平面结构,时常会出现带纤中某一个单纤滑动,光纤上的应力改变,谐振波长改变,导致光栅反射谱出现双峰结构,反射功率下降,刻栅失败,当加大夹持力度时,又会造成带纤外包层破裂、挤压变形和光纤碎裂等问题。

由于光纤滑动距离极小,而且发生时间和位置都不确定,肉眼无法察觉,在确定光纤滑动规律时,采用图像处理的方法,采集刻栅过程中带纤上的动态图像,然后对图像进行处理和分析,得到图像中对应像素点的移动情况从而掌握光纤滑动规律。图 4 和图 5 分别是光纤未滑动和滑动情况下的显微图像、灰度图像和

滑动值。相关参数如下:图像取样时间 60 s, 取样间隔 1 s, 图像分辨率 1024 pixel*786 pixel, 以此推知每个像素点对应的距离约 0.342 μm 。由图 4(c)可以看出, 此段光纤在采样的 60 s 内基本没有滑动, 对比图 5(c)可看出, 此时光纤在采样区间内发生了明显滑动, 最大滑动距离为 150 pixel。由(2)式可求出 150 pixel 距离对应的光栅波长漂移约为 0.19 nm, 此分析结论与实验现象能够很好地吻合。后续研究还发现, 造成这种滑动的原因主要是由组成带纤的单纤在拉丝过程中芯径的微小偏差所引起的。弄清楚滑动的规律和原因以后, 如前所述, 采用宏弯的夹持面结构很好地解决了这一问题。

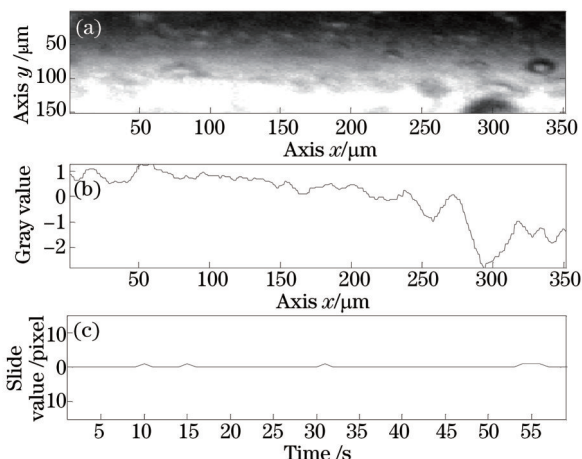


图 4 光纤未滑动时的图像处理过程。(a) 光纤显微图像; (b) 光纤灰度图像; (c) 光纤滑动值

Fig.4 Image processing of the fiber without slide.
(a) Microscopic image of the fiber; (b) gray image of the fiber; (c) slide value

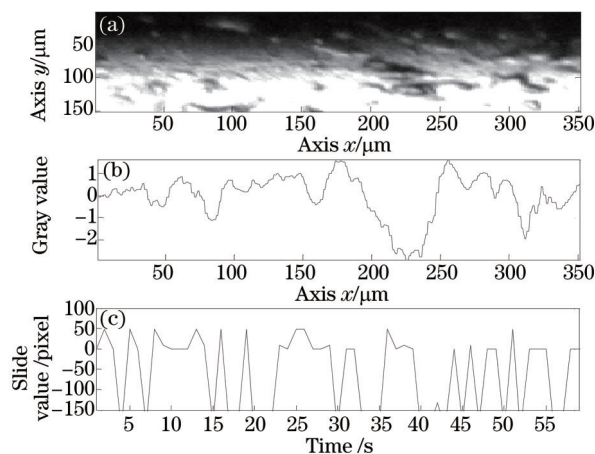


图 5 光纤滑动时图像处理过程。(a) 光纤显微图像; (b) 光纤灰度图像; (c) 光纤滑动值

Fig.5 Image processing of the fiber with slide on fiber.
(a) Microscopic image of the fiber; (b) gray image of the fiber; (c) slide value

3.5 带纤中残余应力的消除

由于带纤生产过程中封装工艺的影响, 带纤中会存在残余应力, 即组成带纤的各单纤应力特性并不完全一致。另外, 组成带纤的不同单纤纤径也可能存在差异。这些不一致和差异会导致刻栅过程中相同拉力下波长漂移不一致, 因而必须在拉伸过程中进行补偿和矫正。对同一批次的 2 根带纤, 实验编号分别为 7-2 和 8-2, 对其分别进行残余应力测试, 初始波长偏差趋势如图 6 所示, 可以看出, 相同条件下, 2 根带纤中的单纤具有类似的偏差特性, 第 1 根单纤出现较大正向偏差, 第 2 和第 7 根出现较大负向偏差, 最大波长偏差为 0.31 nm。这种规律性为波长矫正提供了可能, 本文根据初始偏差的不同, 对拉伸量进行微调补偿, 很好地实现了残余应力的偏差矫正。

根据带纤理想拉伸量以及初始应力偏差数据, 可以计算出每 1 根光纤上的拉伸量。根据(3)式可得出每脉冲当量对应的波长移动为 0.6 pm, 设第 k 根光纤上的初始波长偏差为 Δ_k pm, 则第 k 根光纤上所需的拉伸脉冲数 N_k 为

$$N_k = (500 + \Delta_k) / 0.6 \quad (4)$$

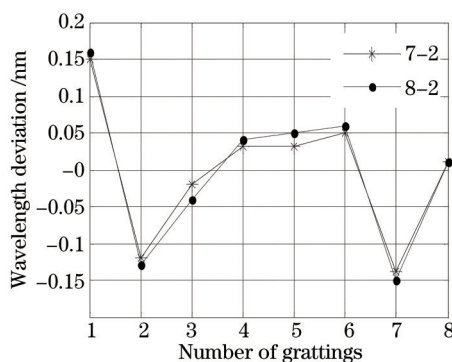


图 6 带纤中各单纤初始波长偏差

Fig.6 Deviation of original wavelength of each ribbon optical fiber grating

4 实验结果

按照前述刻写流程,充分注意刻栅过程中的影响因素,本文成功地在8芯带纤上实现了3 dB带宽为0.2 nm、波长间隔为0.5 nm、反射率为80%~85%的阵列布拉格光纤光栅刻写,波长偏差和透射率如图7所示。由图7可以看出,波长偏差小于0.05 nm,透射率偏差小于1 dB。图8为光谱仪测得的阵列光栅透射谱。

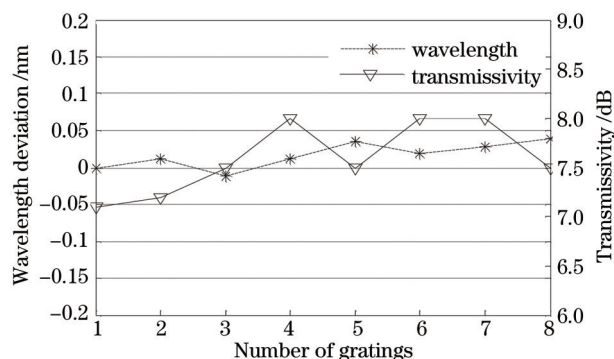


图7 阵列光栅波长偏差和透射率图

Fig.7 Wavelength deviation and transmittivity of array optical fiber gratings

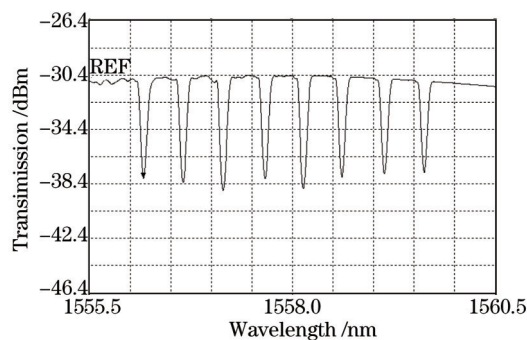


图8 阵列光栅透射谱

Fig.8 Transmission spectrum of array optical fiber gratings

实际应用中为了防止光纤光栅断裂,需要将光纤光栅进行封装保护。采用矩形不锈钢管对刻写完成后的带纤进行封装,矩形钢管由底座和顶板组成,长30 mm、宽3 mm、高2.5 mm。将带纤装入方形不锈钢管中,两侧用橡胶头固定,同时在橡胶头处进行粘胶处理,最后扣上顶板,室温下静置24 h即可。为减小外界应力对光栅的影响,封装过程中应使带纤保持松弛状态。封装前后的阵列光栅如图9所示。



图9 阵列光栅封装。(a)装上底板的阵列光栅;(b)封装完成的阵列光栅

Fig.9 Package of array optical fiber gratings. (a) Array grating fixed on base; (b) array grating packaged

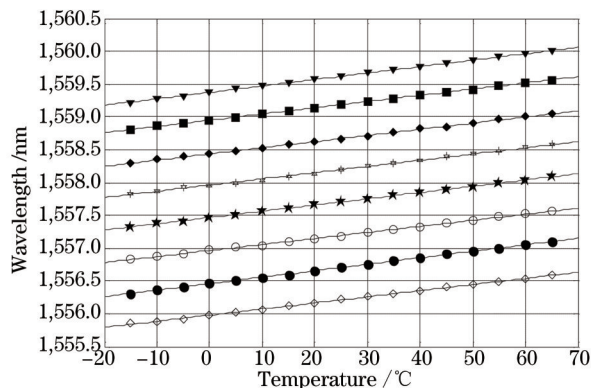


图10 阵列光栅温度特性

Fig.10 Temperature characteristic of array optical fiber grating

阵列光栅的温度一致性和稳定性是应用中一个必须要注意的问题,为了尽量不引入影响温度一致性的因

素,在封装时没有对光栅进行涂覆,这样可以取得比较好的温度一致性。图10是带纤上8根光栅的温度响应曲线,可以看出,当温度从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 过程中,各光栅的温度响应基本一致,响应斜率为 $9.5\sim 9.7\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。尽管如此,当温度变化 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,将引入接近 200 pm 的波长漂移,在要求波长稳定的应用环境中仍需采取其他补偿措施来消除温度影响,这也是下一步要研究的内容。

5 结 论

本文给出了一种在带纤上实现阵列光栅刻写的方法。将带纤和光栅的优势结合在一起,直接在带纤上实现阵列光栅的刻写,并且每根光栅的波长、反射率等参数可灵活调整。此种基于带纤的阵列光栅可以使光纤通信系统结构更为简单,连接更加方便,光栅密度更高,插入损耗更小,将大大扩展光纤光栅在光纤通信领域的应用。

参 考 文 献

- 1 Wu Yonghong, Shao Changjiang, Qu Wenjun, *et al.*. Nonlinear opto-mechanical transformation equation for FBG strain sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9):1946-1951.
吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 光纤光栅应变传感器光-力转换的非线性方程[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1946-1951.
- 2 Yuan W, Stefani A, Bang O. Tunable polymer fiber Bragg grating (FBG) inscription: Fabrication of dual-FBG temperature compensated polymer optical fiber strain sensors[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2012, 24(5): 401-403.
- 3 Wang Y, Gong J, Dong B, *et al.*. A large serial time-division multiplexed fiber Bragg grating sensor network[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(17): 2751-2756.
- 4 Zhang Hailiang, Tang Ming, Xie Yiwei, *et al.*. Programmable bandwidth-tunable and wavelength-variable fiber grating filter[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706011.
张海亮, 唐明, 谢意维, 等. 可编程带宽波长独立可调光纤光栅滤波器[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706011.
- 5 Zhang W, Webb D J, Peng G. Polymer optical fiber Bragg grating acting as an intrinsic biochemical concentration sensor[J]. Opt Lett, 2012, 37(8): 1370-1372.
- 6 Zhang W, Webb D J. Humidity responsivity of poly(methyl methacrylate)-based optical fiber Bragg grating sensors[J]. Opt Lett, 2014, 39(10): 3026-3029.
- 7 Qu Li, Meng Yu, Zhuo Zhongchang, *et al.*. Study on delay and dispersion characteristics of the fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0806001.
屈丽, 孟瑜, 卓仲畅, 等. 光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔时延和色散特性的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0806001.
- 8 Yu Hua, He Wei, Guo Huiyong, *et al.*. Study of fiber Bragg fabrication online on draw tower via phase mask method and equipment manufacturing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0505001.
余华, 何伟, 郭会勇, 等. 基于相位掩模板的拉丝塔在线制作光纤布拉格光栅方法及装置研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0505001.
- 9 Wang Wei, Li Ran, Niu Xiaoyan, *et al.*. Research and fabrication of a ultraviolet curable polymeric arrayed waveguide grating with nonlinear cladding[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0505002.
王雷, 李然, 牛小艳, 等. 非线性包层结构紫外固化聚合物阵列波导光栅研制[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0505002.
- 10 Yan Fei, Chen Tao, Cui Wei, *et al.*. Bandwidth characteristics of fiber Bragg grating fabricated with femtosecond laser radiation[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1105001.
严飞, 陈涛, 崔巍, 等. 基于飞秒激光器维纳加工技术制备的光纤布拉格光栅的带宽特性[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1105001.
- 11 Li Jianzhi, Jiang Desheng. Hydrogen loading and fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2006, 20(5): 518-522.
李剑芝, 姜德生. 载氢与光纤布喇格光栅[J]. 材料研究学报, 2006, 20(5): 518-522.
- 12 Zhu Jingjing, Jiang Yurong, Xue Wei. Research on the hydrogen-load of B-Ge co-doped fiber chemical composition grating[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(1): 83-86.
朱晶晶, 蒋玉蓉, 薛唯. 硼锗共掺光纤CCG的载氢研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(1): 83-86.
- 13 Song Zhiqiang, Qi Haifeng, Li Shujuan, *et al.*. Research on control technology of fiber grating wavelength by pulling force in grating fabrication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706009.
宋志强, 祁海峰, 李淑娟, 等. 光纤光栅制作中波长拉力控制技术的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706009.
- 14 Liu Yan, Zheng Kai, Tan Zhongwei, *et al.*. Good performance of chirped fiber Bragg gratings obtained by asymmetrically one-side exposure apodization[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(11): 5859-5865.
刘艳, 郑凯, 谭中伟, 等. 非对称单侧曝光光切趾使啁啾光纤光栅获得优化性能[J]. 物理学报, 2006, 55(11): 5859-5865.
- 15 Mohammed N A, Ali T A, Aly M H. Evaluation and performance enhancement for accurate FBG temperature sensor measurement with different apodization profiles in single and quasi-distributed DWDM systems[J]. Opt Laser Eng, 2014, 55: 22-34.

栏目编辑: 王晓琰