

文章编号: 0258-7025(2010)04-1028-05

高精度双折射可控保偏光纤光栅研究

裴丽 赵瑞峰 宁提纲 祁春慧 李卓轩 高嵩

(北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 自主研制了大长度光纤轴向研磨厚度精确控制装置和电弧放电光纤研磨截面高精度抛光装置。研磨精度达 $0.01\ \mu\text{m}$,研磨长度可大于 $100\ \text{mm}$,且能实现多光纤同时轴向研磨。利用该装置可精确控制保偏光纤光栅(PMF-FBG)侧面研磨厚度,从而实现大长度高精度双折射可控保偏光纤光栅的制作,保偏光纤光栅两个反射峰的间距可以通过研磨量精确控制。实验表明,研磨保偏光纤的一侧外包层半径由 $125\ \mu\text{m}$ 到 $65\ \mu\text{m}$,保偏光纤光栅两个反射峰的间距由 $0.34\ \text{nm}$ 改变为 $0.208\ \text{nm}$ 。

关键词 光通信;可控双折射;光纤侧面研磨;保偏光纤光栅

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.1028

Controllable Birefringent Polarization-Maintaining Fiber Bragg Grating with High Precision

Pei Li Zhao Ruifeng Ning Tigang Qi Chunhui Li Zhuoxuan Gao Song

(Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract An optical fiber long length side-grinding device with controllable and high precision grinding thickness, and a setup for high-precision polishing of the optical fiber section by using an arc discharge method are self-made. The grinding precision is $0.01\ \mu\text{m}$, the grinding length can be longer than $100\ \text{mm}$, and multi-fibers can be grinded at the same time. By using the devices, the side grinding thickness of the polarization-maintaining fiber Bragg grating (PMF-FBG) can be controlled, and long length, high precision controllable PMF-FBG can be fabricated. The span of the two wavelengths of the PMF-FBG can be controlled accurately. The experiment results show that when the radius of the grinding side of the PMF-FBG changed from $125\ \mu\text{m}$ to $65\ \mu\text{m}$, the wavelength span of the PMF-FBG changed from $0.34\ \text{nm}$ to $0.208\ \text{nm}$.

Key words optical communications; controllable birefringence; optical fiber side-grinding; polarization-maintaining optical fiber grating

1 引言

自从1987年G. Meltz等实现了光纤Bragg光栅的紫外光侧面写入技术以后,许多研究机构对光纤光栅产生了极大的兴趣。目前,光纤光栅在光纤激光器、光纤滤波器、光纤传感、光上下话路等领域正在发挥越来越大的作用^[1~5]。

保偏光纤具有高双折射率,由于其对两个正交的偏振光具有较强的偏振保持能力,并且与普通单

模光纤有良好的相容性而在光纤通信和光纤传感系统中得到越来越广泛的应用。其传输模为两个偏振方向互相垂直的基模 HE_{11x} 和 HE_{11y} ,传输常数分别为 β_x 和 β_y 。在保偏光纤中写入光纤光栅,等效于在两个主轴上分别写入一个光纤光栅,因此可以直接获得双波长单偏振光纤光栅。形状双折射是获得保偏光纤的有效方法之一,为了灵活实现双折射程度的调整,光纤侧面不同厚度的研磨是一种行之有效

收稿日期:2009-05-22;收到修改稿日期:2009-07-24

基金项目:国家自然科学基金(60771008,60837002)、北京市自然科学基金(4082024)、留学回国人员基金(教外2008890)和教育部博士点基金(20080040002)资助课题。

作者简介:裴丽(1970—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感、光纤无线通信、光网络和光器件方面的研究。E-mail:lipei@bjtu.edu.cn

的方法。目前的光纤研磨技术主要存在 3 个问题：1) 光纤研磨长度的限制。虽然光纤的端面研磨，以及短距离光纤轴向研磨在最近几年取得了较大的发展，但是对于长度大于 100 mm 光纤的轴向研磨至今仍是一个技术难点，国内外未见相关加工的报道。人工研磨虽然有可能加大光纤的研磨长度，但是对研磨人员的技术水平有较高要求，而且耗时较长，水气等外界因素对研磨后光纤的性能影响巨大，容易造成很大的器件损耗。2) 研磨厚度的检测。目前采用的测厚仪价格十分昂贵（国外产品价格高达数万美元以上），而且由于光纤自身的特点（直径仅 125 μm ），要求光纤研磨的精度必须控制在微米量级。此外光纤为圆形且透明，测厚难度较大，传统的测厚仪很难达到要求。3) 光纤研磨后的抛光质量。国外利用低功率 CO_2 激光光源对光纤端面进行抛光加工，虽然其表面质量有所改善，但抛光后光纤端面的表面粗糙度仍高达 0.1 μm ，插入损耗的最佳值还高达 1.45 dB，不能满足光纤通信发展的要求。

经过多年研究，本研究小组实现了光纤侧面研磨厚度精确控制以及电弧放电光纤研磨截面高精度抛光，并已申请专利。以此为基础，对 140 mm 长的保偏光纤光栅 (PMF-FBG) 进行了侧面研磨抛光，光纤光栅研磨厚度在 0.01 μm 的精度中调整，可以通过研磨量的精确控制，获得反射波长间隔满足需求的高精度双折射可控保偏光纤光栅，其在光栅传感系统中能够有效克服光栅传感器的温度和应力交叉敏感，成为一种理想的传感方案。利用保偏光纤上写入的双波长单偏振光纤光栅，对于进一步制作波长满足国际电信联盟 (ITU-T) 建议波长的偏振稳定光纤激光器具有重要的意义^[6,7]。

2 理论分析

2.1 保偏光纤光栅光谱特性

当光敏光纤通过紫外激光时，光纤的折射率将随光强的空间分布发生相应变化，如果使其内部折射率呈现周期性分布，并保存下来，就成为光纤光栅。布拉格光栅的基本特性就是它是以共振波长为中心的—个光学滤波器，该共振波长称为布拉格波长^[8~12]，且

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光纤的有效折射率， Λ 为光纤布拉格光栅的周期。

保偏光纤中写入布拉格光纤光栅时，由于保偏光纤在两个正交偏振轴上的折射率不同，写入光栅

存在两个反射峰，且两个反射峰之间的波长间距为

$$\delta\lambda_B = 2|n_x - n_y|\Lambda, \quad (2)$$

式中 n_x 和 n_y 分别为保偏光纤两个正交偏振轴 x 轴和 y 轴对应的有效折射率。

2.2 侧面研磨量变化对保偏光纤有效折射率的改变

光波导中模式的传输常数用 β 表示，工作光波长为 λ ，保偏光纤侧面研磨之前，假设 x 轴和 y 轴方向的有效折射率分别为 n_{x0} 和 n_{y0} ，随着研磨量的增加， $|n_x - n_y|$ 的值随之改变，由 (2) 式可以看出光栅两个反射峰之间的间距发生变化，通过高精度研磨量的控制，可以实现保偏光纤光栅双波长间距的精细调整。

实验中选择的保偏光纤为应力双折射保偏光纤，几何形状为圆对称。为了简化计算，做如下近似：光纤轴向研磨平面的法线方向为 y 轴方向，研磨过程中，假设 x 轴方向没有应力和半径改变，则忽略 n_x 的变化，只考虑研磨光纤包层变薄对 n_y 的影响。初始状态，芯子折射率和半径为 n_{y0} 和 a_0 ，第一包层折射率和半径为 n_2 和 a_2 ，第二包层为空气，折射率为 1。光纤研磨后 a_2 变为 a_2' ，且 $a_2' < a_2$ 。

场分量 e_z, h_z 满足 Bessel 方程

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\psi}{dr} + \left(k^2n_i^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{r^2}\right)\psi = 0, \quad (3)$$

式中 $\psi = \psi(r)$ 代表 e_z 或 h_z ， $n_i = n_{y0}, n_2, 1, m = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ 。

根据在各个边界上 $e_\varphi, h_\varphi, e_z$ 和 h_z 的连续条件，可以获得特征方程

$$|\overrightarrow{\text{SA}} \overrightarrow{\text{KK}}| = 0, \quad (4)$$

式中 $\overrightarrow{\text{KK}} = \overrightarrow{\text{P}}_{32}, \overrightarrow{\text{SA}} = \overrightarrow{\text{P}}_{32}^{-1}\overrightarrow{\text{P}}_{23}\overrightarrow{\text{P}}_{21}^{-1}\overrightarrow{\text{P}}_{12}, \overrightarrow{\text{P}}_{21}$ 与 $\overrightarrow{\text{P}}_{12}$ 分别为 $r = a_1$ 时对应的 $e_{\varphi 2}, h_{\varphi 2}, e_{z2}, h_{z2}$ 以及 $e_{\varphi 1}, h_{\varphi 1}, e_{z1}, h_{z1}$ 满足的矩阵。 $\overrightarrow{\text{P}}_{32}$ 与 $\overrightarrow{\text{P}}_{23}$ 分别为 $r = a_2$ 时对应的 $e_{\varphi 3}, h_{\varphi 3}, e_{z3}, h_{z3}$ 以及 $e_{\varphi 2}, h_{\varphi 2}, e_{z2}, h_{z2}$ 满足的矩阵。通过数值解法可以得到各个传输模式所对应的传输常数，进一步获得研磨光纤包层后波导的有效折射率为

$$n'_y = \beta / (2\pi / \lambda). \quad (5)$$

2.3 理论分析结果

选择保偏光纤的参数为： $n_{x0} = 1.4450, n_{y0} = 1.4447$ ，光栅周期为 534 nm，可得初始状态下光栅双波长为

$$\lambda_{x0} = 1543.3 \text{ nm}, \quad \lambda_{y0} = 1542.9 \text{ nm},$$

$$\delta\lambda_B = 2|n_{x0} - n_{y0}|\Lambda \approx 0.34 \text{ nm},$$

(5) 和 (2) 式相结合，可得不同光纤侧面研磨量对应保偏光纤光栅双波长间距变化情况的理论计算结

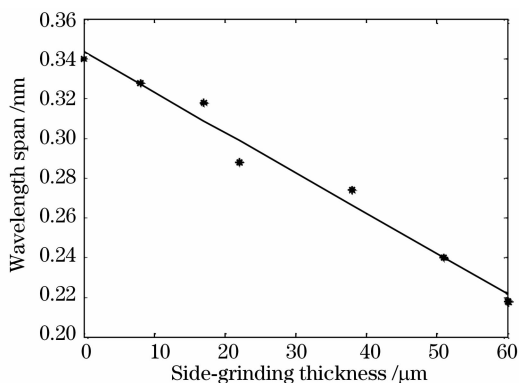


图1 保偏光纤光栅双波长间距变化理论分析结果
Fig. 1 Theory analysis results of wavelength span of PMF-FBG

果,如图1所示。

由图1可见,随着光纤侧面研磨量的增加,保偏光纤光栅双波长间距变小,且变化率约为 $0.0020 \text{ nm}/\mu\text{m}$ 。

3 高精度双折射可控保偏光纤光栅的制作

3.1 光纤侧面研磨厚度精确控制方法及装置

图2为自主研制的光纤侧面研磨厚度精确控制装置,利用该装置实现高精度($0.01 \mu\text{m}$)、大长度(大于 100 mm)保偏光纤光栅的侧面研磨厚度精确控制。

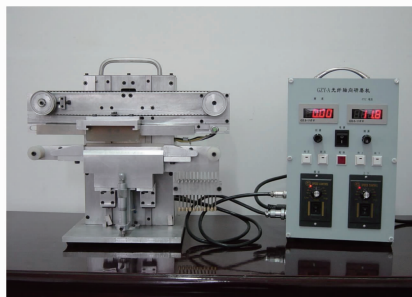


图2 光纤轴向磨抛厚度精确控制装置

Fig. 2 Optical fiber side-grinding setup

本装置可实现以下功能:1) 通过调节施加在压电陶瓷(PZT)上的电压,改变待研磨保偏光纤光栅与基准块的相对位置,不仅光纤光栅的研磨厚度可自由调整,而且精度可达 $0.01 \mu\text{m}$ 。2) 保偏光纤光栅的研磨长度由定位传感器精确控制,可以对长度为 140 mm 的保偏光纤光栅进行轴向研磨。3) 本装置保偏光纤光栅放置于微晶玻璃上(热膨胀系数为 $10^{-7}/\text{C}$ 量级),有效避免了研磨过程中材料发热引起的损耗。

3.2 电弧放电光纤研磨截面高精度抛光方法及装置

图3为自主研制的电弧放电光纤研磨截面高精度抛光装置,该装置利用两电极间的放电电弧对研磨后保偏光纤光栅表面进行抛光处理,以便去除保偏光纤光栅研磨过程中产生的微裂损伤,提高研磨光纤光栅的质量。



图3 电弧放电光纤研磨截面高精度抛光装置

Fig. 3 Optical fiber section polishing with arc discharge

本装置可实现以下功能:1) 采用电弧放电抛光的方法,通过PZT调节研磨抛光后的保偏光纤光栅与电极的相对位置,利用电弧放电所产生的高温将研磨保偏光纤光栅的表面进行熔化,从而有效消除研磨保偏光纤光栅表面的粗糙度,抑制微裂纹或凹坑造成的较大损耗。2) 通过精密导向机构和定位传感器,使放电电极沿着研磨后待抛光保偏光纤光栅的轴向移动,从而实现对保偏光纤光栅抛光的长



图4 侧向研磨后的光纤

Fig. 4 Optical fiber after side-grinding

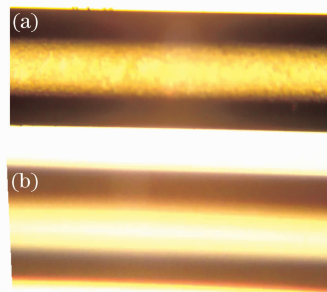


图5 抛光前(a)后(b)的光纤研磨侧面
Fig. 5 Optical fiber section before (a) and after (b) polishing

度进行任意调节。3) 利用电机速度控制器对电极移动速度进行控制。

侧向研磨后的光纤如图 4 所示。研磨抛光前后的光纤如图 5 所示。显微镜下观察可以看到抛光后的保偏光纤光栅非常透明, 抛光后的光纤光栅性能稳定, 基本上消除了光纤光栅表面微裂纹的影响。

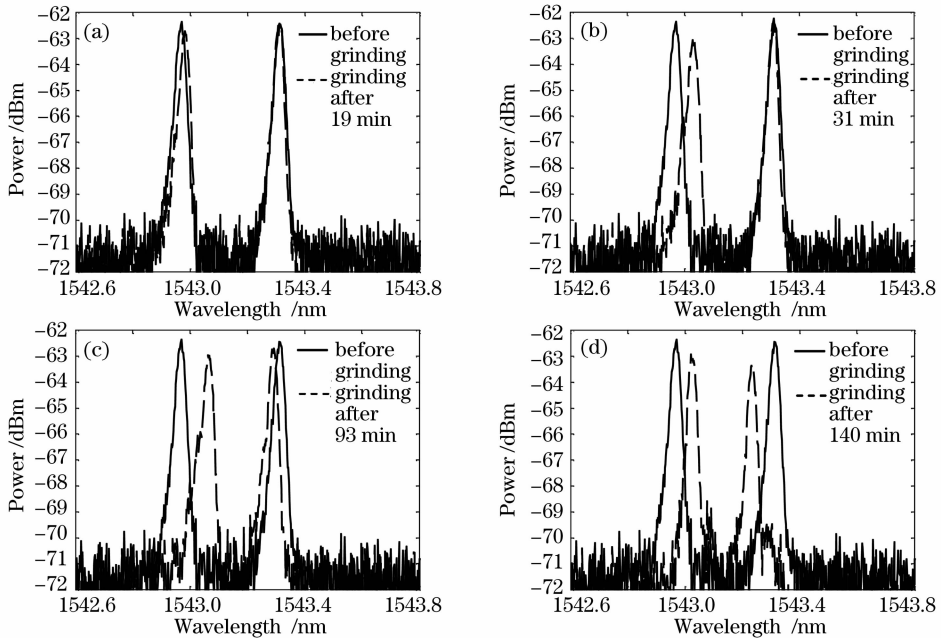


图 6 实验结果

Fig. 6 Experimental results

实验测得不同光纤侧面研磨量对应保偏光纤光栅双波长间距变化情况如图 7 所示。

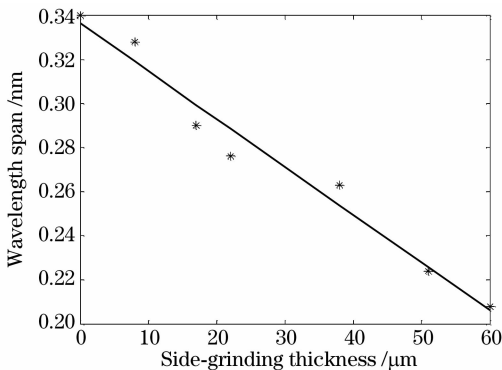


图 7 保偏光纤光栅双波长间距变化实验结果

Fig. 7 Experimental results of wavelength span of PMF-FBG

由图 7 可见, 随着光纤侧面研磨量的增加, 保偏光纤光栅双波长间距变小, 且变化率约为 $0.0022 \text{ nm}/\mu\text{m}$ 。

4.2 抛光前后保偏光纤光栅的光谱变化

侧面研磨后的光纤表面不可避免地会存在微裂

4 实验结果

4.1 保偏光纤研磨后光纤光栅双波长的变化

利用图 2, 3 所示的实验装置, 对写入 140 mm 长光纤光栅的保偏光纤侧面研磨和抛光, 用 ANDO AQ6317 光谱仪测量保偏光纤光栅双波长的变化, 实验结果如图 6 所示。

纹, 这将导致其损耗随着时间的推移迅速加大, 因此, 必须对侧面研磨后的光纤表面进行抛光。采用图 3 所示装置对侧面研磨的光纤进行抛光, 光谱仪测量侧面研磨保偏光纤光栅抛光前后的光谱如图 8 所示。

4.3 实验结果分析

由图 6 可见, 随着保偏光纤轴向研磨量的增加, 保偏光纤光栅双波长间距逐渐变小, 这是由于研磨量增加, 光纤包层沿 y 轴变薄, 对应的有效折射率 n_y 增加, 两个正交偏振轴的有效折射率差变小所致。比较图 1 和图 7 的结果, 发现不同光纤侧面研磨量对应保偏光纤光栅双波长间距变化率基本一致, 光纤侧面研磨量较小时, 理论分析结果和实验结果基本吻合, 随着光纤侧面研磨量的增加, 理论分析结果较大。其原因是理论分析时, 近似认为 n_x 保持不变, 而在实际光纤研磨过程中, 研磨量较小时, n_x 相对稳定, 而当研磨量增大后, n_x 会发生改变, 导致保偏光纤光栅的双波长位置都会变化。图 6 中保偏光纤双波长位置的变化与上述分析一致。

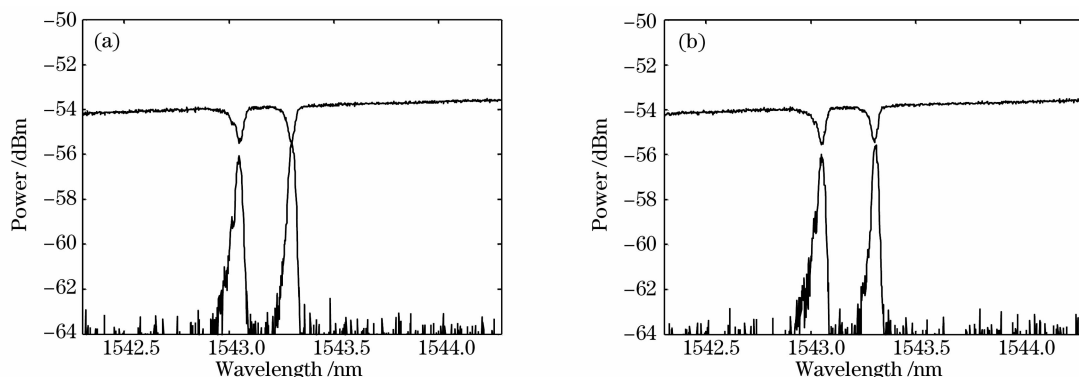


图 8 侧面研磨保偏光纤光栅抛光前后的光谱。(a) 抛光前;(b) 抛光后

Fig. 8 Optical spectrum of PMF-FBG before and after polishing. (a) before polishing; (b) after polishing

由图 8 可见,抛光前后保偏光纤光栅的光谱基本稳定,因为电弧放电光纤研磨截面高精度抛光装置中的电弧虽然含有紫外光,但是本抛光装置电弧距离侧面研磨光纤的表面还有一定距离,其抛光主要是利用电弧放热使得光纤表面热熔化消除了微裂纹,光纤芯子基本不受影响。此外,由于表面微裂纹的消除,光纤光栅的透射谱深度还略有改善。

5 结 论

许多高精度光纤器件制造过程中的一道关键工序就是光纤端面或光纤轴向的研磨,经过多年研究,本研究小组实现了光纤侧面研磨厚度精确控制以及电弧放电光纤研磨截面高精度抛光,并以此为基础,对保偏光纤光栅进行了侧面研磨抛光,光纤光栅研磨厚度在 $0.01\ \mu\text{m}$ 的精度中调整,通过研磨量的精确控制,可获得高精度双折射可控保偏光纤光栅。实验结果表明本方案切实可行。

参 考 文 献

- Zhu Yingxun, Wang Rong, Ding Xiaoguang *et al.*. Using a step-sampling-chirped grating to realize spectral-phase en/decoding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12):1888~1893
朱英勋,王 荣,丁晓光等. 用分段采样啁啾光栅实现谱相位编码[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12):1888~1893
- Kenneth O. Hill, Gerald Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1263~1275
- Y. Gong, X. Liu, L. Wang *et al.*. Optimal design of multichannel fiber Bragg grating filters with small dispersion and low index modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(15):3235~3240
- Xu Lingling, Jin Long, Kai Guiyun *et al.*. Switchable dual-

- wavelength erbium-doped fiber laser with a tilted fiber Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1658~1662
徐玲玲,金龙,开桂云等. 利用倾斜光纤光栅的可开关双波长光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1658~1662
- Wei Ting, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Temperature-insensitive fiber Bragg grating pressure sensing with plane round metal diaphragm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):80~84
尉 婷,乔学光,贾振安等. 平面圆形膜片式光纤布拉格光栅温度补偿压强传感[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):80~84
- Ning Tigang, Pei Li, Hu Xudong *et al.*. Dual-wavelength of single polarized fiber laser based on common active fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12):1868~1871
宁提纲,裴 丽,胡旭东等. 单偏振双波长非保偏有源掺杂光纤激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12):1868~1871
- S. Matsumoto, M. Takabayashi, K. Yoshiara *et al.*. Tunable dispersion slope compensator with a chirped fiber grating and a divided thin-film heater for 160-Gb/s RZ transmissions [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **24**(7):902~906
- Pei Li, Jian Shuisheng, Yan Fengping *et al.*. The dispersion compensation of optical fiber Bragg grating on the long-distance G. 652 fiber transmission system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):220~224
裴 丽,简水生,延风平等. 普通单模光纤传输系统的光纤光栅色散补偿研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):220~224
- A. S. Paterno, V. de Oliveira, T. S. Figueredo *et al.*. Multiplexed fiber Bragg grating interrogation system using a modulated fiber Bragg grating and the tunable-filter method [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, **6**(6):1662~1668
- Xiao Wang, Qihua Zhu, Yanlei Zuo *et al.*. Matched wavelength and incident angle for the diagnostic beam to achieve coherent grating tiling [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4):241~243
- Jia Weiguo, Shi Peiming, Yang Xingyu *et al.*. Modulation instability of fiber Bragg gratings with raised cosine apodization [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):930~934
贾维国,史培明,杨性愉等. 升余弦变迹布拉格光纤光栅中的调制不稳定性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):930~934
- Liu Qiuping, He Xingdao, Zhang Aiyun *et al.*. Linear solution for coupled-wave equation of nonlinear recording grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):977~980
刘秋平,何兴道,张霏云等. 线性化求解非线性记录光栅耦合波方程[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):977~980