

文章编号: 0258-7025(2010)10-2565-05

基于熔融拉锥光纤布拉格光栅的光谱特性

江微微^{1,2} 赵瑞峰^{1,2} 卫 延^{1,2} 简水生^{1,2}

(¹北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044 ²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 锥形光纤是直径沿轴向逐渐变化的一种光纤。使用 broyden 迭代结合打靶法求解了基于熔融拉锥光纤布拉格光栅(FBG)的耦合模方程,数值分析了光纤轴向上的锥度对 FBG 光谱的影响。与未拉锥的均匀 FBG 相比,锥形光纤的 FBG 光谱向短波长处漂移,光谱带宽增大。由于纤芯束缚光场能力变弱,光谱的峰值反射率和透射深度均减小。锥度越大,这种现象越明显。实验中使用拉锥方法制作锥形光纤,通过在相同拉锥长度的情况下改变拉锥速度得到不同锥度的光纤,研究了锥形光纤损耗与拉锥速度的关系。使用波长为 248 nm 的紫外激光和周期为 537 nm 的均匀掩模板在所制作的锥形光纤写入布拉格光栅,研究了不同锥度光纤对光栅光谱的影响。实验结果与理论分析结果基本吻合。

关键词 光纤光栅;锥形光纤;熔融拉锥;光谱响应

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103710.2565

Spectral Characteristics of Bragg Fiber Grating Based on Fused Taper Fiber

Jiang Weiwei^{1,2} Zhao Ruifeng^{1,2} Wei Yan^{1,2} Jian Shuisheng^{1,2}

¹ Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

² Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of the Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract Taper fiber is a kind of fiber with variational diameter along the longitudinal direction. The couple mode equations of fiber Bragg grating (FBG) based on fused taper fiber are solved by numerical method of broyden and shooting, and the effect of taper along the longitudinal direction on spectrum of FBG is analysed. The results show that the spectrum of FBG shifts to short wavelength and the bandwidth broadens because of the effect of taper compared with the condition of uniform FBG. The peak reflectivity and the transmission reduce because the ability of restricting optical power of the fiber core becomes weak. The phenomena become more obvious as the taper becomes bigger. Taper fibers are fabricated by fused taper method, and different taper fibers are obtained through changing the motor velocity on the basis of the same fused taper length. The relation between motor velocity and the loss of the taper fiber is analysed. A Bragg grating is written in taper fiber with 248 nm ultraviolet laser and uniform phase mask of 537 nm, then the effect of different tapers on the spectrum is analysed. The experimental results are consistent with the theoretical results.

Key words fiber grating; taper fiber; fused taper; spectrum response

1 引 言

锥形光纤是直径沿长度方向逐渐变化的一种光

纤,由于其传输常数沿轴向不断变化,当使用均匀掩模板在锥形区域写入布拉格光栅时,会得到类似啁

收稿日期: 2010-01-18; 收到修改稿日期: 2010-03-01

基金项目: 国家 863 计划(2008AA01Z215)、国家自然科学基金(60837002)、教育部博士点基金(200800040002)和北京市自然科学基金(4082024)资助课题。

作者简介: 江微微(1982—),女,博士研究生,主要从事光无源复用/解复用器件等方面的研究。

E-mail: 06111009@bjtu.edu.cn

导师简介: 简水生(1929—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事光纤通信、光纤传感、光纤有源无源器件、光纤网络等方面的研究。E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

啾光纤光栅的效果,可作为光纤通信中的色散补偿器件^[1~3]。利用锥形光纤制作啾光纤光栅的原理分为两类^[4]:一类是光纤纤芯直径呈锥形变化,其基模有效折射率随纤芯的变化而变化,从而形成啾光纤光栅^[1~3,5];另一类是光纤包层发生锥形变化,通过应力调节形成啾光纤光栅^[6]。尽管锥形布拉格光栅在色散补偿、温度传感、应力传感及折射率传感等方面已有比较广泛的研究^[1~3,5,7,8],并且锥形光纤的功率特性已有报道^[9],但锥形光纤对布拉格光栅光谱特性的影响还没有报道。

对于写在锥形光纤上的布拉格光栅(FBG),本文采用 broyden 迭代结合打靶法求解 FBG 满足的耦合模方程,数值分析了光纤锥度对 FBG 中心波长、带宽及损耗的影响。在实验制作中,锥形光纤最基本的问题是光纤纤芯或者包层的锥形如何实现。对于本文所研究的纤芯锥形变化的光纤,一般采用熔融拉锥的方法使纤芯和包层发生同样的变化^[10]。熔融拉锥的方法有:利用 CO₂ 激光束的拉锥方法^[10]、电阻丝加热拉锥^[11]和火焰加热拉锥^[12]。使用氢氧焰结合高精度电机制作锥形光敏光纤,通过在拉锥长度相同的情况下控制气体流量和电机拉锥速度控制光纤的锥度,然后使用波长为 248 nm 的紫外激光在锥区写入布拉格光栅。研究了不同锥度光纤对 FBG 光谱的影响,实验结果与理论分析结果基本吻合。

2 理论分析

锥形光纤的结构如图 1 所示,其形状根据制作方法通常被考虑为抛物线形、正弦形和多项式形等。考虑到本论文使用火焰加热拉锥方法,光纤锥形区纤芯半径表述为^[13]

$$r(z) = 0.5(r_1 + r_2) - 0.5(r_1 - r_2) \times \frac{\tanh[v(z - l/4)]}{\tanh(vl/4)}, \quad (1)$$

式中 l 为熔锥区长度, r_1 和 r_2 分别为锥区腰部始端

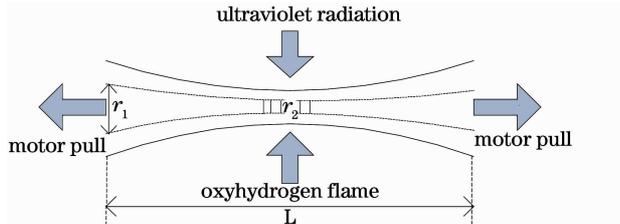


图 1 锥形光纤的结构和制作示意图

Fig. 1 Schematic of construction and fabrication of tapered fiber

和中部的纤芯半径, v 为电机拉锥速度。图 2 给出了不同拉锥速度时光纤锥区纤芯半径沿光纤轴向的变化情况。对比三个拉锥速度结果,可以看出,拉锥速度越大,纤芯半径变化越大。因此通过控制拉锥速度,可以得到不同的光纤锥区锥度。

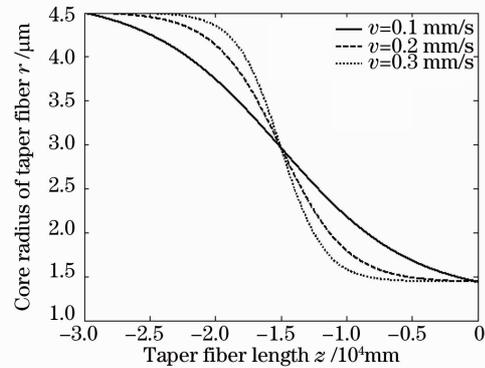


图 2 拉锥纤芯半径沿光纤轴向的变化

Fig. 2 Shape profiles of the fused taper fiber with variation of the longitudinal length

FBG 的折射率调制可以表示为 $\Delta n = \delta n \times \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda}z + \varphi(z)\right]$, 根据弱导条件和耦合模理论,描述 FBG 的耦合方程可以表示为^[14]

$$\frac{dR}{dz} = i\delta R(z) + i\kappa S(z), \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\delta S(z) - i\kappa^* R(z), \quad (3)$$

式中 $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}\delta n + 2\pi n_{\text{eff}}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B}\right) - \frac{1}{2}\frac{d\varphi}{dz}$, $\kappa = \frac{\pi}{\lambda}\delta n$, $R(z)$ 和 $S(z)$ 分别为前向和后向传输模的振幅。数值分析时,其边界条件为 $R(L)=0, S(0)=1$ 。由于方程输入条件的两点边值性,使用 broyden 迭代结合打靶法求解耦合模方程,即可得到基于锥形光纤的 FBG 的光谱特性。

3 数值分析

3.1 相位匹配条件

对于均匀的布拉格光栅,其布拉格波长可以表示为^[14]: $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, 其中 n_{eff} 为光纤基模有效折射率, Λ 为写入的光栅周期。对于锥形光纤,其锥区纤芯半径的变化导致基模有效折射率 n_{eff} 的变化。图 3 给出了纤芯半径 r 分别为 3.5, 4.0 和 4.5 μm 的情况下光栅周期 Λ 与 r 之间的匹配关系。可以看出,对于固定的 Λ , 布拉格波长 λ_B 随 r 的减小而减小。

因此,当写入的光栅周期 Λ 一定时,相比于写入纤芯半径均匀的 FBG 光谱,写入锥形光纤的 FBG 光谱中心波长会向短波长方向移动。

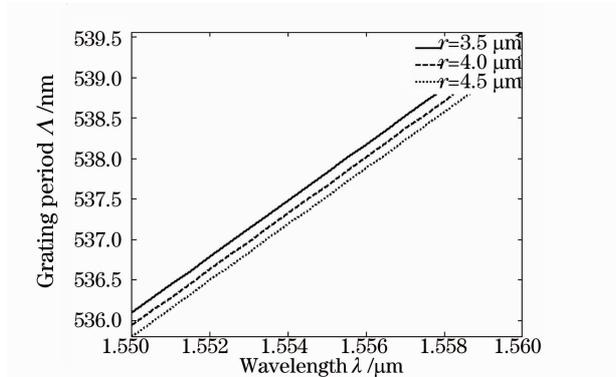


图 3 不同纤芯半径时的相位匹配条件

Fig. 3 Phase-matching conditions with different core radii

3.2 锥形光纤光栅的光谱特性

为对比未拉锥的均匀光纤与拉锥后的锥形光纤的分析结果,首先给出布拉格光栅写入均匀光纤的光谱结果,如图 4 所示。其中光纤参数为:光纤纤芯半径 $r_1=4.5 \mu\text{m}$,芯包折射率差 $\Delta=0.3312\%$,光栅写入长度 $L_{\text{grating}}=10 \text{ mm}$,折射率调制 $\Delta n=0.0003$,光栅周期 $\Lambda=537 \text{ nm}$,拉锥速度为 0.1 mm/s 。为研究锥区对 FBG 光谱的影响,只分析 FBG 写入单向锥区的情况,这就需要改变锥区腰部中心纤芯半径 r_2 的设

置。图 5 数值计算了在与图 4 取相同的光纤及光栅参数下,不同 r_2 对光谱的影响,其中图 5(a)中 $r_2=3.24 \mu\text{m}$,图 5(b)中 $r_2=2.16 \mu\text{m}$ 。对比图 4,5 可以看出,由于光纤锥度的影响,FBG 光谱向短波长方向移动,这一点可由 3.1 节的相位匹配条件解释;同时带宽增大,光谱峰值反射率及透射深度降低,这是由于锥区纤芯半径不断变化,因而导致传输常数沿锥区变化,写入布拉格均匀光栅后造成啁啾光栅的效果,同时随着纤芯半径变小,光纤归一化参数 V 值变小,光纤束缚光场能力变小,损耗变大,因而光谱总体反射率及透射深度降低;另外,对比图 5(a)和(b)可以看出, r_2 值越小,即锥区锥度越大,中心波长漂移、带宽增大、反射峰值及透射深度降低的现象将越明显。

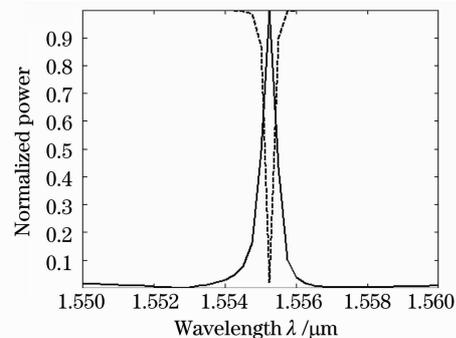


图 4 布拉格光栅写入均匀光纤时的光谱

Fig. 4 Spectrum of Bragg fiber grating written in uniform fiber

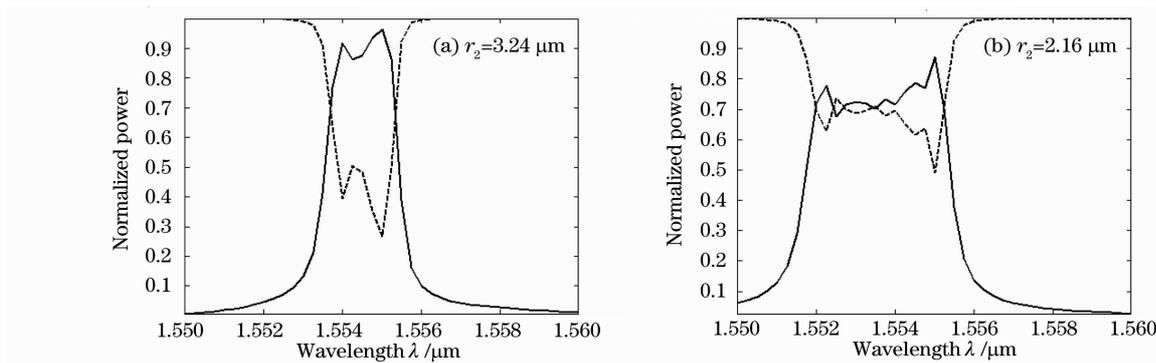


图 5 布拉格光栅写入锥形光纤时的光谱

Fig. 5 Spectra of Bragg fiber grating written in taper fiber

4 实 验

4.1 锥形光纤的制作

实验制作使用熔锥方法,该方法工艺简单,操作容易,可重复性好,已广泛应用于光纤耦合器等器件的制作^[15~17]。实验使用的是实验室自行研制的光敏光纤。首先将光纤固定于光纤夹具上,调节夹具的

位置使光纤纵向与氢氧焰垂直以保证受热均匀。然后由电机带动夹具沿光纤纵向施加拉力,同时移动氢氧焰对光纤进行加热,并使用功率计对光功率进行监测。由于使用的是窄口的喷灯,气流较大时会引起火焰不稳,因此在能够熔融光纤的前提下使用较小的气流量。实验中发现,电机拉锥速度对光纤的功率变化

有较大的影响,图6是在拉锥速度分别为1.25 mm/s和1.5 mm/s的情况下监测到的光功率随拉锥长度的变化关系。可以看出,在一定的拉锥长度范围内,光纤锥区的锥度满足绝热慢变近似条件^[10],光功率损失很少;随着拉锥长度进一步增大,光纤拉锥坡度增大,基本模式与高阶模式耦合,产生损耗,导致光功率不断降低。另外,对比图6(a)和(b)可见,拉锥速度越大,光纤的绝热慢变区域越小,在相同的拉锥长度的

情况下损耗越大。根据这一结果,实验中选择拉锥长度为480 mm,这时以1.25 mm/s进行拉锥的光纤直径由125 μm 变为35 μm ,功率损失为0.8 dB,以1.5 mm/s进行拉锥的光纤直径由125 μm 变为32 μm ,功率损失为2.7 dB。相应的光纤锥区显微图像如图7(a),(b)所示,以单位拉锥长度上半径的变化率衡量锥度,则两种速度的锥度分别为 1.875×10^{-7} 和 1.9375×10^{-7} 。

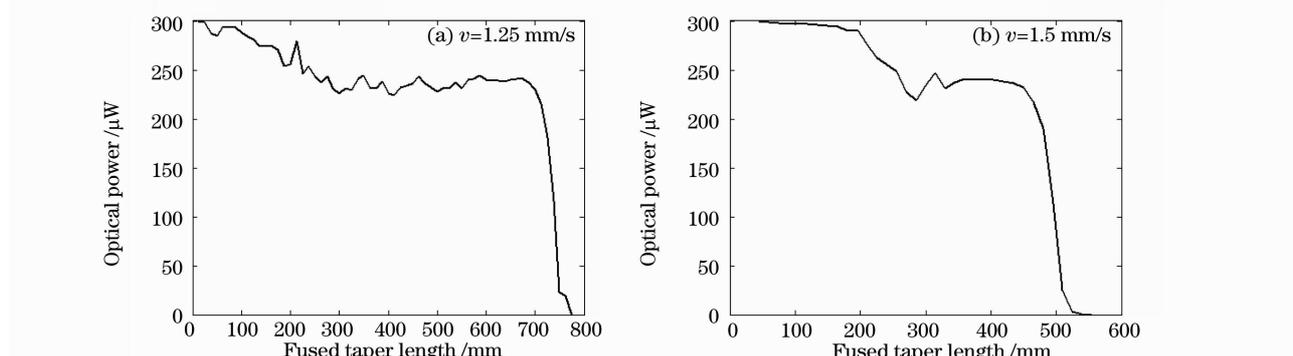


图6 锥形光纤功率损耗随拉锥长度的变化

Fig. 6 Variation of power of taper fiber with fused taper length

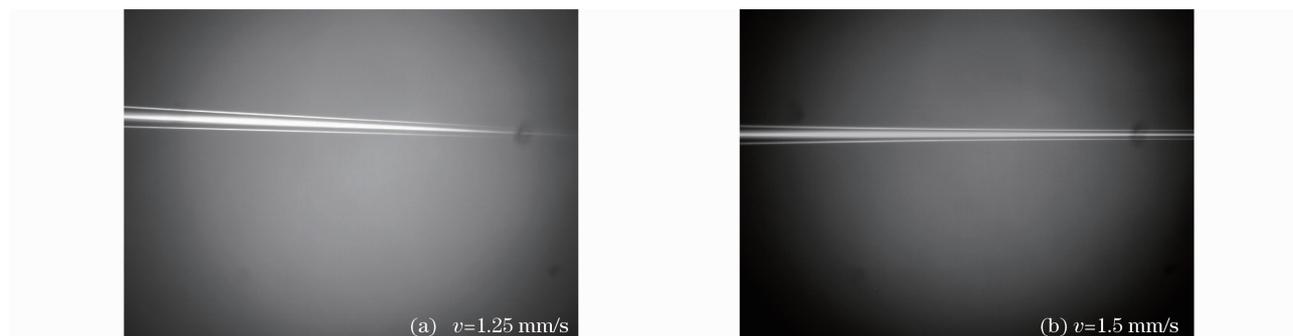


图7 熔融拉锥光纤锥区显微图像

Fig. 7 Microscopical figure of fused fiber taper

4.2 锥形光纤光栅的光谱特性

由于分析的是FBG写入单向锥形光纤的情况,因此在光栅写入之前,使用高精度显微镜观察光纤锥区,确定单向锥区区域并做标记,以保证光栅只写入单向锥区。光栅写入过程中使用的是KrF准分子激光器,输出波长为248 nm,输出能量为80 mJ,掩模板的周期为537 nm,光栅写入长度为20 mm。制作过程中使用分辨率为0.01 nm的ANDO AQ6317C光谱仪实时监测反射端口和透射的输出情况。图8是光栅写入没有拉锥的均匀光纤的光谱结果,其中心波长为1544.878 nm,带宽约为0.4 nm,反射峰值20 dB,透射深度为25 dB。图9为FBG写入拉锥速度分别为1.25 mm/s和1.5 mm/s的锥形光纤的结果,图9(a)中光谱中心波

长为1542.70 nm,带宽为0.7 nm,反射峰值为15 dB,透射深度为10 dB;图9(b)中光谱中心波长

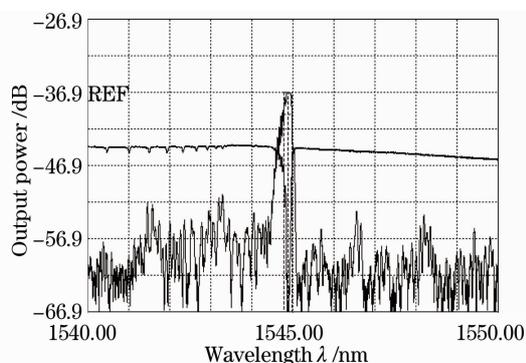


图8 布拉格光栅写入均匀光纤时的实验结果
Fig. 8 Experimental result of Bragg fiber grating written in uniform fiber

为 1541.55 nm, 带宽为 1 nm, 反射峰值为 10 dB, 透射深度为 1.5 dB。对比图 8, 9 可以看出, 由于光纤锥区的影响, 实验测得的光谱中心波长向短波长移

动, 同时带宽变大, 反射峰及透射深度降低; 对比图 9(a) 和 (b) 可以看出, 光纤锥度越大, 这种光谱变化越明显, 实验结果与理论结果相符。

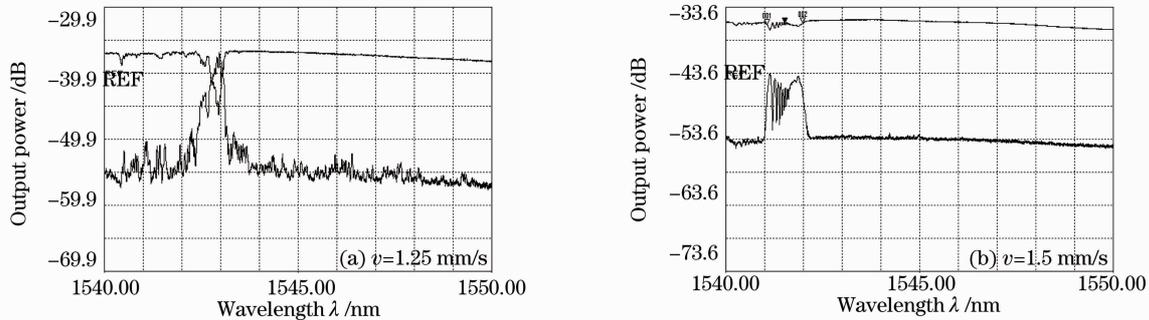


图 9 布拉格光栅写入锥形光纤时的实验结果

Fig. 9 Experimental results of Bragg fiber grating written in taper fiber

5 结 论

使用 broyden 迭代结合打靶法数值分析了基于熔锥拉锥光纤的布拉格光栅的光谱特性。结果表明, 由于锥度的影响, FBG 光谱向短波长处漂移, 光谱带宽增大, 同时反射峰值和透射深度降低。实验中使用熔锥方法制作锥形光纤, 通过改变拉锥速度获得不同的光纤锥度。使用波长为 248 nm 紫外激光和周期为 537 nm 的均匀掩模板在所制作的锥形光纤写入布拉格光栅, 研究锥区对光谱的影响, 实验结果与理论分析结果定性符合。

参 考 文 献

- 1 J. Zhang, P. Shum, X. P. Cheng *et al.*. Analysis of linearly tapered fiber Bragg grating for dispersion slope compensation[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(10): 1389~1391
- 2 Bin Li, Huai Wei, Zhongwei Tan. The dispersion and dispersion slope characteristics of the fiber gratings fabricated in tapered fiber[C]. *SPIE*, 2009, **7630**: 763018
- 3 J. Mora, B. Ortega, M. V. Andres *et al.*. Tunable dispersion device based on a tapered fiber Bragg grating and nonuniform magnetic fields[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(7): 951~953
- 4 Li Bin. The Fiber Gratings for Dispersion Compensation and Fiber Lasers[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007, 55~62
李 彬. 用于色散补偿、光纤激光器中的光纤光栅[D]. 北京: 北京交通大学, 2007, 55~62
- 5 D. Monzo' n-Herna' ndez, J. Mora, P. Pe' rez-Milla' n *et al.*. Temperature sensor based on the power reflected by a Bragg grating in a tapered fiber[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(12): 2393~2396
- 6 J. L. Cruz, L. Dong, S. Barcelos *et al.*. Fiber Bragg gratings with various chirp profiles made in etched tapers[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(34): 6781~6787
- 7 Orlando Frazão, Susana F. O. Silva, Ariel Guerreiro *et al.*. Strain sensitivity control of fiber Bragg grating structures with fused tapers[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(36): 8578~8582
- 8 Xiong Yikun, Huang Xuguang. Optical fiber sensor for liquid refractive index based on fiber optic taper [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1956~1960
熊贻坤, 黄旭光. 基于熔融拉锥光纤的液体折射率传感器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1956~1960
- 9 Zhao Chujun, Fan Dianyuan, Zhou Ping *et al.*. Power distribution characteristics of tapered fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 422~425
赵楚军, 范滇元, 周 萍 等. 锥形光纤的功率分布特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 422~425
- 10 Luo Aiping. The Theoretical and Experimental Investigations of Fusion-Tapered Fiber Devices[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004, 19~22
罗爱平. 若干熔锥型光纤器件的理论和实验研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2004, 19~22
- 11 Denis Donlagi. In-line higher order mode filters based on long highly uniform fiber tapers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(9): 3532~3539
- 12 J. Mora, A. Diez, V. Miguel *et al.*. Tunable dispersion compensator based on a fiber Bragg grating written in a tapered fiber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(12): 2631~2633
- 13 Libo Yuan, Zhihai Liu, Jun Yang *et al.*. Bitapered fiber coupling characteristics between single-mode single-core fiber and single-mode multicore fiber [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(18): 3307~3312
- 14 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 15 Jiang Weiwei, Li Jian, Zhao Ruifeng *et al.*. Analysis of fiber grating filters written in fiber coupler by employing the unified coupled-mode theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 644~649
江微微, 李 坚, 赵瑞峰 等. 用统一耦合模理论分析光纤光栅耦合器型滤波器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 644~649
- 16 Shuai Cijun, Duan Ji'an, Cai Guohua. Research on morphology and microstructure in the taper region of fused fiber devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 121~125
帅词俊, 段吉安, 蔡国华. 熔融光纤器件熔锥区的形貌和微观结构研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 121~125
- 17 Jiang Weiwei, Li Jian, Zhao Ruifeng *et al.*. Narrow bandwidth add/drop channel filter based on fiber Bragg grating assisted coupler fabricated by fused taper technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1537~1541
江微微, 李 坚, 赵瑞峰 等. 熔锥法制作光纤光栅辅助型窄带上下话路滤波器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1537~1541