

doi: 10.3788/gzxb20164511.1106006

基于花生形和光纤布喇格光栅结构的温度不敏感光纤曲率传感器

王照伟, 鲁士力, 孙明明, 金永兴

(中国计量大学 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

摘要:为了解决光纤传感器波长解调成本高以及交叉敏感的问题,提出一种温度不敏感光纤曲率传感器,该传感器是由花生形结构连接一个光纤布喇格光栅组成,对反射光采用强度解调.光进入花生形结构后激发出包层模式,通过光纤布喇格光栅反射后,反射的纤芯模再次在花生形结构产生不同阶次的包层模,然后和反射的纤芯模耦合,在反射光谱中除了光纤布喇格光栅的布喇格反射峰外,在短波长处出现若干个谐振峰,波长越小,包层模的阶次越高.实验结果表明曲率的变化范围为 $0.669\ 0\sim 1.250\ 0\ \text{m}^{-1}$ 时,测量到反射谐振峰平均光功率为 $2.260\times 10^{-7}\sim 1.501\times 10^{-7}\ \text{mW}$,灵敏度为 $-1.306\times 10^{-7}\ \text{mW}/\ \text{m}^{-1}$,在温度范围 $25\ ^\circ\text{C}\sim 75\ ^\circ\text{C}$ 内,反射包层模光功率基本保持不变.该传感器成本低且花生形结构制作简单、机械强度大.

关键词:光纤光学;传感器;包层模;反射光;曲率;温度

中图分类号:TP21.14

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)11-1106006-5

Temperature-insensitive Curvature Sensor Based on a Peanut-shape Structure and a FBG

WANG Zhao-wei, LU Shi-li, SUN Ming-ming, JIN Yong-xing

(Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A temperature-independent curvature sensor was presented for solving the high cost of wavelength demodulation and cross sensitive problem. The sensor consists of a fiber Bragg grating spliced after a peanut-shaped fiber, and it is reflected light intensity demodulation. With the broadband light entering the peanut-shaped structure, the cladding mode is excited, being reflected by the FBG, the reflected core mode is excited by the peanut-shape structure again making several ranking cladding modes, which interference with the core mode. The reflected spectrums not only consist of the FBG peak but also consist of several resonant peaks, the shorter the wavelength is, the higher ranking of the cladding mode is. The experiment results show that the intensity of the reflected resonant peaks decreases from $2.260\times 10^{-7}\ \text{mW}$ to $1.501\times 10^{-7}\ \text{mW}$ with the curvature increases from $0.669\ 0\ \text{m}^{-1}$ to $1.250\ 0\ \text{m}^{-1}$. The average curvature sensitivity is $-1.306\times 10^{-7}\ \text{mW}/\ \text{m}^{-1}$. Temperature test on the structure shows that the power of the reflected cladding modes made little change with temperature increases from $25\ ^\circ\text{C}$ to $75\ ^\circ\text{C}$. The proposed curvature sensors is less expensive and the peanut-shaped structure has the feature of easy making and high mechanical strength etc.

Key words: Fiber optics; Sensor; Cladding mode; Reflected light; Curvature; Temperature

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.3735; 060.2340; 060.2300

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB327804)、浙江省公益项目(No. 2014C33065)和浙江省安全生产科技计划(No. 2014A1004)资助

第一作者:王照伟(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感. Email: P1504085224@cjlu.edu.cn

导师(通讯作者):金永兴(1972-),男,教授,硕士,主要研究方向为光纤传感和光纤通信. Email: jinyongxing@cjlu.edu.cn

收稿日期:2016-05-04; **录用日期:**2016-07-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光纤传感器因其具有体积小、抗电磁干扰能力强、灵敏度高特点,被广泛应用于温度^[1]、折射率^[2]、曲率^[3]等物理量的测量.随着曲率测量被越来越多地应用到机械工业、航空航天以及工程结构健康监测中,曲率测量技术得到迅速的发展.典型的曲率传感器利用了如光纤布喇格光栅^[4]、长周期光栅^[5]、倾斜光纤光栅^[6]、全光纤的马赫-曾德干涉仪^[7-9]、光纤迈克尔逊干涉仪^[10]、多芯光子晶体光纤^[11]和双芯光子晶体^[12]等一些特种光纤.目前基于不同结构的全光纤马赫-曾德干涉仪的曲率传感器,基本都采用波长解调的方式,即通过测量谐振峰的波长移动来获得曲率变化,波长解调需要昂贵的光谱分析设备.因此,在实际测量中采用简单的解调技术具有重要的意义.

基于光纤布喇格光栅的反射包层模式耦合传感器易于制作,在光纤传感领域越来越受到重视.这种传感器常用于测量温度^[13]、曲率^[14]、折射率^[15-16]等,传感器主要采用波长解调的方式,同时采用布喇格反射模和包层反射模的不同特性,实现两个物理量的同时测量或者解决两个物理量的交叉敏感问题.由于采用波长解调方式,实际使用过程中,这些测量方法往往存在系统复杂、成本高等问题.

本文提出了一种基于花生形和光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)结构的反射光光纤曲率传感器,其中单个花生形结构和FBG组成光纤传感头,FBG反射包层模式的功率受到传感器曲率的影响,因此可以通过测量反射包层模式的功率实现对曲率的测量.同时由于包层模能量对温度不敏感,使得传感器避免了温度交叉敏感,且传感器是强度调制,避免了使用昂贵的光谱解调设备.

1 传感器的结构与原理

利用基于花生形结构和FBG的混合结构的光纤传感器的反射光谱实现曲率的测量.除了透射光谱,这种混合结构传感器的反射光谱也可以被用于曲率的测量.与透射光谱的波长解调不同,反射光谱采用的是强度解调,在实际的应用中不需要复杂昂贵的光谱仪,用相对廉价的光功率计即可实现.

传感器的曲率实验装置如图1,包括台式宽带光源(Benchtop Broadband Source, BBS)、光功率计(Optical Power Meter, OPM)以及光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA).其中,BBS发出波长范围为1 460~1 640 nm的宽带光.花生形结构(Peanut-shape structure)的一端与宽带光源相连接,光谱仪通过3 dB耦合器接收反射光.两个平台,一个位置固定,另一个可以移动,用于改变传感器的曲率.弯

曲的半径与可移动平台向前推进的距离有关.

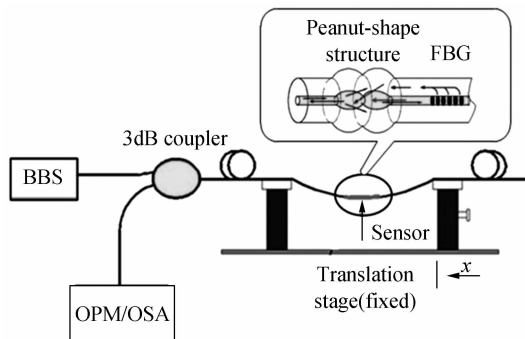


图1 曲率测试实验装置

Fig. 1 Curvature measurement experimental apparatus

实验中,宽带光源经过花生形结构分光,再经过FBG反射纤芯光后,一部分反射光泄漏至包层与纤芯.光再次经过花生形结构耦合产生干涉光,形成FBG反射峰和包层模干涉峰,通过改变两个平移台之间的距离来改变光纤传感模块曲率,从而改变输出光强,通过光功率计测量干涉光光强^[14].

如图2,宽带光源发出的光在单模光纤的纤芯中以基模传输,经过花生形结构时,一部分纤芯模式被激发到包层中形成包层模式,另一部分继续在纤芯中传输(由于这一段单模光纤的涂覆层被剥离,包层模式的衰减相对较小),当纤芯模式和包层模式经过FBG时,纤芯中基模的特定波长(FBG反射波长)被反射,并有一部分被激发到包层,再次经过花生形结构时包层模和纤芯模被耦合产生了除FBG反射峰以外的包层模干涉峰,选择峰值较大的包层模干涉峰作为对曲率感应的的基础,即根据反射光的包层模干涉峰能量值对结构曲率的感应,可以作出包层膜的量值和传感结构曲率的线性关系.由于花生形结构对温度敏感度很低,而温度只能改变FBG反射光的光谱波长,并不会改变光能量,因此反射光包层模能量仅受曲率影响而不受温度影响.

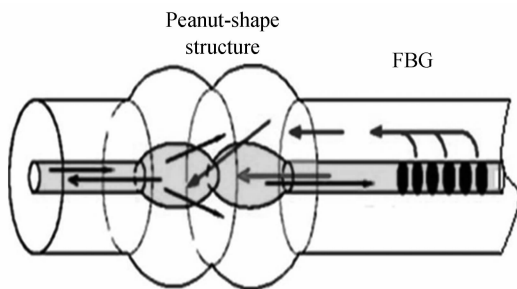


图2 微观结构及模式耦合图

Fig. 2 Microscopic structure and modes coupling

2 曲率和温度的测量原理

为了方便观察反射光谱中的包层模,实验未使用光功率计(OPM)而是使用光谱仪(OSA).实际应用中

无需观察反射光谱,测量反射光强度即可.

曲率的计算公式为^[17]

$$c = \frac{1}{R} \approx \sqrt{\frac{24x}{L_1^3}} \quad (1)$$

式中, R 为光纤弯曲的曲率半径,当光纤被拉直时,可移动平台的位置为初始位置; x 为可移动平台相对于初始位置向前移动的距离,即光纤被拉直时 $x=0$,设定平台每次向前推进 0.1 mm ; L_1 为光纤被拉直时两平台之间的距离,实验中 $L_1=215.0\text{ mm}$,传感器的长度 $L=21.0\text{ mm}$.当光纤被弯曲时,纤芯和包层会产生不同的应变,导致 Δn_{eff} 发生变化,其中, Δn_{eff} 为包层和纤芯的有效折射率差,应变差值为^[18]

$$\Delta \epsilon = \frac{d}{R} \quad (2)$$

式中, d 为纤芯中心和包层之间的距离,弯曲后 Δn_{eff} 为^[8]

$$\Delta n_{\text{eff}} = \Delta n_{\text{eff}}^0 + k \Delta \epsilon \quad (3)$$

包层模式与纤芯模式在传感器弯曲情况下的有效折射率差是 Δn_{eff}^0 , k 为应变折射率系数.透射光谱波谷的波长为^[8]

$$\lambda_m = \frac{2\Delta n_{\text{eff}}^0 L}{2N+1} + \frac{2kLd}{2N+1} \times \frac{1}{R}, N=1,2,3,\dots \quad (4)$$

根据快速傅里叶变换频谱图,与纤芯模式发生干涉的包层模式可近似认为只有一阶根, Δn_{eff}^0 为固定值,式(4)中的 λ_m 与 c 的关系是线性的.

由图3可以看出光源发出宽带光以后经过 3 dB 耦合器到达温控台,由温控台控制传感光纤的温度,并按照一定的间隔增长,这里把温度设置为 $25\text{ }^\circ\text{C} \sim 75\text{ }^\circ\text{C}$,观察由FBG反射的光再经过花生形结构后光谱能量变化情况.

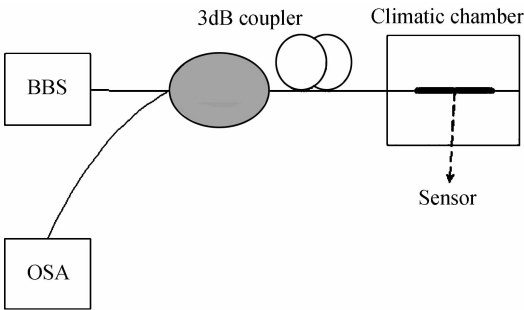


图3 传感器的温度测量实验装置

Fig. 3 The experimental apparatus of temperature measurement on the sensor

3 实验结果和讨论

在光谱仪的分辨率为 0.01 nm 的条件下,传感器的反射光谱如图4,除了明显的FBG主峰,还有许多被FBG反射至包层形成的包层模,这些后向传输的包层模式经过花生形结构时被重新耦合到纤芯.图4中,包

层模式的强度明显小于FBG的反射峰,原因是FBG对纤芯模式的反射率大于对包层模式的反射率.被FBG反射进入包层而形成的后向传输的包层模式的波段在FBG布喇格波长的左边,原因是包层的有效折射率相对较低.

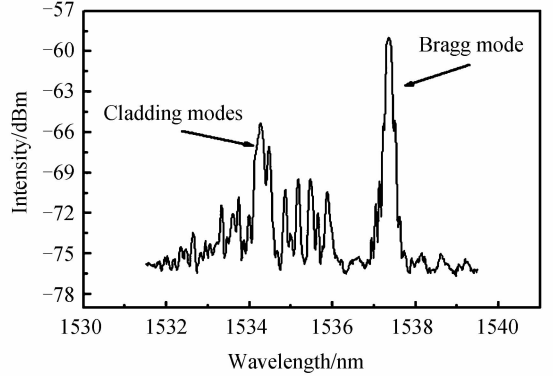


图4 传感器的反射光谱

Fig. 4 The reflecting spectrum of the sensor

不同曲率下的反射光谱如图5,随着曲率的增加,FBG的主峰基本不变,原因是FBG的主峰是纤芯模式,单模光纤中纤芯位于光纤的中心轴上直径在 $8\text{ }\mu\text{m}$ 左右,纤芯模式主要是基模,在弯曲程度较小的情况下,纤芯模式衰减较小可以忽略.相对于纤芯模式的较小的模场直径,包层模式的模式数量较多,在单模光纤中分布的范围远远大于纤芯模式,对曲率的变化非常敏感.弯曲破坏了原来包层模式稳定的条件,导致一些旧的模式消失的同时一些新的模式被激发出来.曲率的增加导致包层模式的强度明显减小,表明曲率的增加使第一次经过花生形结构后形成的包层模式变大,而这部分光并不会被FBG反射,即反射的包层模减少.所以曲率实验是基于强度解调的,在不同的曲率下测量包层模式的光强,确定二者的关系.实验中测量反射谱的不是光功率计而是光谱仪,通过对包层模式的光谱积分运算得到包层模式的光强.

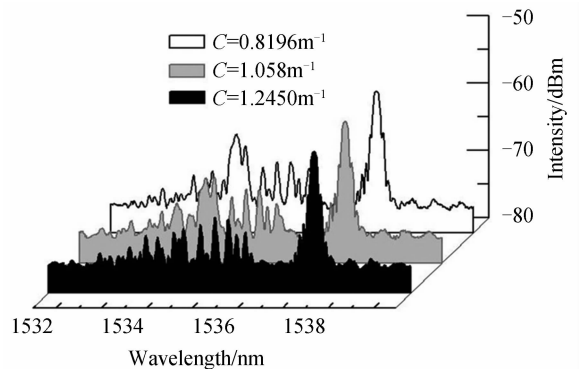


图5 传感器在不同曲率下的反射光谱

Fig. 5 The reflecting spectrums of the sensor at different curvatures

不同曲率下FBG的反射光谱如图6,在弯曲不大的范围内,由于FBG对曲率的变化不敏感,随着曲率

的增加,FBG的主峰基本不变,波长没有明显的漂移,强度也没有明显的变化.在实际应用中,此部分光信号没有意义,要增加带通滤波装置以滤除该段光强,使进入测量装置的光全部为由FBG产生的后向传输的包层模式.

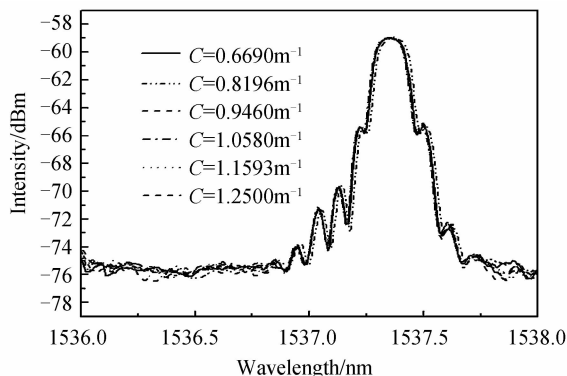


图6 传感器在不同曲率下FBG的反射光谱
Fig. 6 The reflecting spectrum of FBG of the sensor at different curvatures

在光强单位为 mW 时,不同曲率下的包层模式的反射光谱如图 7,由于曲率的测量是基于强度解调的,需要测量包层模式的功率,从图 7 中的包层模式光谱中可以看出,包层模式分布在波长为 1 533.00~1 536.00 nm 的范围内,故对此波段内的包层模式积分得出总功率.先将功率的单位由 dBm 转换成 mW,再对这个波段的光谱做积分运算.从图 7 中可以看出在此波段内,整个曲线的面积为积分后的光功率值.在曲率的变化范围为 0.669 0~1.250 0 m⁻¹ 时,随着曲率的增加,积分后的光功率明显减小,变化范围为 2.260×10⁻⁷~1.501×10⁻⁷ mW,平均灵敏度为 -1.306×10⁻⁷ mW/m⁻¹.

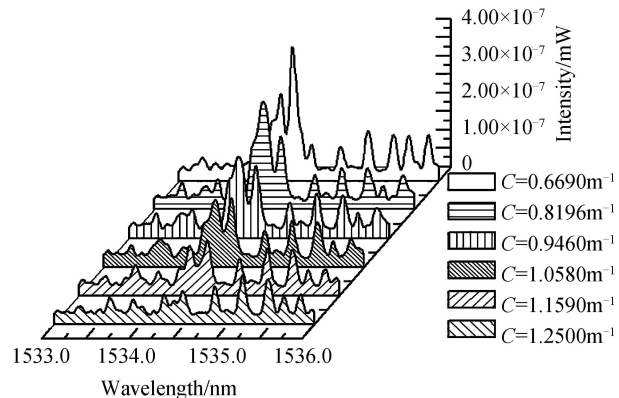


图7 传感器不同曲率下包层模式的反射光谱
Fig. 7 The reflecting spectrum of cladding modes of the sensor at different curvatures

曲率的变化与包层模式的功率的拟合曲线如图 8,明显看出二者已经具备线性关系.根据最大限度的减小误差拟合方式采用了二项式拟合.后向传输的包层模式的功率与曲率的拟合曲线公式为

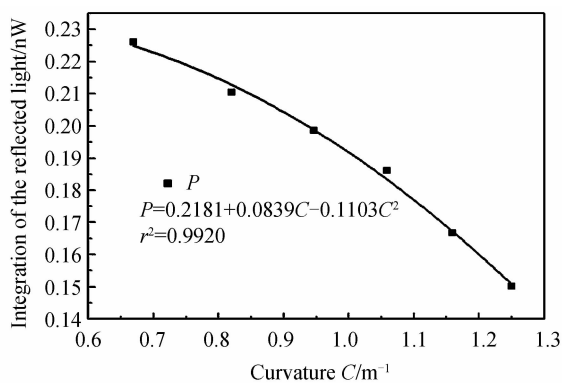


图8 曲率与包层模式光功率的拟合曲线
Fig. 8 The curve fitting between the curvature and the cladding modes power

$$P=0.2181+0.0839C-0.1103C^2 \quad (5)$$

线性拟合度 $r^2=0.9920$.由于实验中采用了 3 dB 耦合器将被耦合到纤芯的后向传输的包层模式输入光谱仪,导致功率损失一半.解决的方法是使用三端环形器代替 3 dB 耦合器,使包层模式全部被输入到测量装置以提高灵敏度.

温度测试结果可从图 9 中看出,光谱随温度增加明显在向右漂移,但是 FBG 反射峰峰值能量不变,而且包层模式的峰值能量也基本不受温度影响.

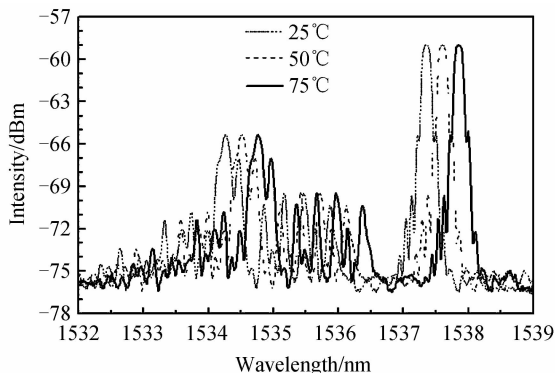


图9 传感器反射光谱随温度的变化
Fig. 9 The reflecting spectra of the sensor within different temperatures

4 结论

提出了一种基于花生形和 FBG 结构的光纤曲率传感器,该传感器利用反射包层模平均光功率随着传感器曲率而变化,同时不随外界的温度而改变的特性,实现对曲率的温度不敏感测量.实验结果表明:在曲率的变化范围为 0.669 0~1.250 0 m⁻¹ 时,随着曲率的增加,积分后的包层膜光功率明显减小,变化范围为 2.260×10⁻⁷~1.501×10⁻⁷ mW,平均灵敏度为 -1.306×10⁻⁷ mW/m⁻¹,具有较好二次函数拟合度.本传感器测量方式采用了强度解调,相比波长调制,解调方式简单,同时整个传感器尺寸小,灵敏度高.

参考文献

- [1] KOO K P, KERSEY A D. Bragg grating-based laser sensors systems with interferometric interrogation and wavelength division multiplexing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(7): 1243-1249.
- [2] KIM Y J, PAEK U C, LEE B H. Measurement of refractive index variation with temperature by use of long-period fiber gratings[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(15): 1297-1299.
- [3] WANG Dong-yuan, SUN Ming-ming, JIN Yong-xing, *et al.* Simultaneous measurement of curvature and temperature based on optical fiber sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1106004
王栋远,孙明明,金永兴,等. 同时测量温度和曲率的光纤传感器[J]. *光子学报*, 2015, **44**(11): 1106004.
- [4] FENG Ding-yi, QIAO Xue-guang, ALBERT J. Off-axis ultraviolet written fiber Bragg gratings for directional bending measurements[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(6): 1201-1204.
- [5] ZHOU Quan, ZHANG Wei-gang, CHEN Lei, *et al.* Bending vector sensor based on a sector-shaped long-period grating[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(7): 713-716.
- [6] JIN Yong-xing, CHAN C C, DONG Xin-yong, *et al.* Temperature-independent bending sensor with tilted fiber Bragg grating interacting with multimode fiber [J]. *Optics Communications*, 2009, **282**(19): 3905-3907.
- [7] FRAZAO O, VIEGAS J, CALDAS P, *et al.* All-fiber Mach-Zehnder curvature sensor based on multimode interference combined with a long-period grating[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(21): 3074-3076.
- [8] GONG Hua-ping, YANG Xiao, NI Kai, *et al.* An optical fiber curvature sensor based on two peanut-shape structures modal interferometer [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(1): 22-24.
- [9] MONZON H D, MARTINEZ R A. Compact optical fiber curvature sensor based on concatenating two tapers[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(22): 4380-4382.
- [10] LIN Qiao, CHEN Liu-hua, LI Shu, *et al.* Optical fiber bending sensor based on Michelson interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 251-254.
林巧,陈柳华,李书,等. 基于迈克尔逊干涉的光纤弯曲传感器[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 251-254.
- [11] SALCEDA D G, VAN N A, ANTONIO L J E, *et al.* Compact fiber-optic curvature sensor based on super-mode interference in a seven-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(7): 1468-1471.
- [12] HARHIRA A, LAPOINTE J, KASHYAP R. High sensitivity inline fiber Mach-Zehnder interferometer bend sensor using a twin core fiber [C]. SPIE, 2010, **7653**: 765315.
- [13] RONG Qiang-zhou, QIAO Xue-guang, ZHANG Jing, *et al.* Simultaneous measurement for displacement and temperature using fiber Bragg grating cladding mode based on core diameter mismatch[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(11): 1645-1650.
- [14] ZHOU Wen-jun, ZHOU Yan, DONG Xin-yong, *et al.* Fiber-optic curvature sensor based on cladding-mode Bragg grating excited by fiber multimode interferometer[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(3): 1051-1057.
- [15] YANG Shen, SUN Hao, YUAN Liu-tong, *et al.* Refractive index and temperature sensor based on cladding-mode Bragg grating excited by abrupt taper interferometer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, **11**(12): 120604.
- [16] HAN Ming, GUO Fa-wen, LU Yong-feng. Optical fiber refractometer based on cladding-mode Bragg grating [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(3): 399-401.
- [17] WANG Yi-ping, RICHARDSON D, BRAMBILLA G, *et al.* Intensity measurement bend sensors based on periodically tapered soft glass fibers[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(4): 558-560.
- [18] GIINDER M J, MACPHERSON W N, MCBIDE R, *et al.* Bend measurement using Bragg gratings in multicore fiber [J]. *Electronics Letters*, 2000, **36**(2): 120-121.