

基于多模干涉效应的光纤折射率传感技术研究

钱春霖¹ 陈明阳^{1,2}

¹江苏大学光电子与通信技术研究院,江苏 镇江 212013

²江苏天兴光电科技有限公司,江苏 镇江 212013

摘要 提出一种基于单模-多模-单模光纤结构的折射率传感方案,采用波谷检测方法可以提高传感灵敏度。研究发现多模光纤中模式数量对传输结果影响较大。当改变单模光纤和多模光纤的结构参数而保持其归一化频率不变,从而保证多模光纤中模式数量不变时,总能获得规则的传输曲线。增大光纤直径可以有效提高传感灵敏度。当取多模光纤纤芯直径为 $70\ \mu\text{m}$ 时,最高灵敏度达到 $3.725 \times 10^5\ \text{nm}/\text{RIU}$,检测极限为 $7 \times 10^{-7}\ \text{RIU}$ 。当多模光纤实际长度偏离设计长度时,长度偏差对传感灵敏度和检测极限的影响较小,其导致的输出光谱偏移为 $-0.07\ \text{nm}/\mu\text{m}$,利用此特性可以实现高灵敏度的应力传感。

关键词 光纤光学与光通信;光纤折射率传感器;波谷检测方法;超高灵敏度;模式数量

中图分类号 0438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.050601

Investigation on Refractive Index Sensing Based on Interference Effect in Multimode Optical Fiber

Qian Chunlin¹ Chen Mingyang^{1,2}

¹Institute of Optoelectronics and Communication Technologies, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

²Jiangsu Tianxing Photoelectric Technology LTD, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract A sensing method of refractive index based on single-mode-multimode-single-mode fiber structure is proposed. The sensor sensitivity is increased through valley detection method. It shows that number of pattern in the multimode fiber has vital influences on the transmission result. When the structure parameters of single-mode fiber and multimode fiber change and normalized frequency remains, the number of pattern of multimode fiber remains, and the regular transmission curve can be acquired. The sensitivity can be improved effectively with the increase of diameter of multimode fiber. The maximum sensitivity is $3.725 \times 10^5\ \text{nm}/\text{RIU}$ and the detection limit is $7 \times 10^{-7}\ \text{RIU}$, when the diameter of multimode fiber is $70\ \mu\text{m}$. When the actual length of multimode fiber is deviating from the design, the length of the deviation has little effect on the sensor sensitivity and detection limit, the output spectrum shift is $-0.07\ \text{nm}/\mu\text{m}$, which means it can be practiced in high sensitive stress sensing.

Key words fiber optics and optical communications; optical fiber refractive index sensor; valley detection method; ultra-high sensitivity; mode number

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 130.6010

1 引言

由于具有体积小、结构灵活、抗电磁干扰、可以实现远程操控以及传感灵敏度高等优点,光纤在折射率传感领域得到了广泛的研究和应用^[1-10]。采用多种传感机制和结构以实现折射率传感,比如基于光纤布拉格

收稿日期: 2015-10-25; **收到修改稿日期:** 2015-12-09; **网络出版日期:** 2016-03-29

基金项目: 江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ201312)、镇江市2015年度第二批科技计划(GY2015033)

作者简介: 钱春霖(1991—),男,硕士研究生,主要从事光波导、光纤技术方面的研究。E-mail:158697980@qq.com

导师简介: 陈明阳(1976—),男,博士,教授,主要从事光波导、光纤技术等方面的研究。

E-mail:miniyoung@163.com(通信联系人)

光栅 (FBG)^[1-3]、长周期光纤光栅^[4]、环形缠绕单模光纤^[5]、等离子体波导共振^[6]、法布里珀罗干涉结构^[7]、光子晶体光纤^[8-10]以及单模—多模—单模结构 (SMS) 光纤^[11]等。其中 Ji 等^[4]提出一种基于微光纤的长周期光栅的折射率传感方案,得到的检测极限为 1.67×10^{-5} RIU。Bahrami 等^[6]基于等离子体波导共振原理,实验得到其 TM 和 TE 偏振方向的检测极限分别为 5×10^{-7} RIU 和 1.4×10^{-6} RIU。Sun 等^[9]提出了基于选择性谐振耦合的折射率传感方案,传感灵敏度可达 8500 nm/RIU,其检测极限为 2.02×10^{-6} RIU。

SMS 光纤传感方案的基本工作原理主要是多模光纤因多模干涉而形成的自成像效应。通常是将多模光纤长度取为其周期性出现的自成像位置,使得在标准情况下输出达到最大,再通过检测其峰值波长随外界环境因素变化时的移动量来实现传感的目的^[12-14]。除了普通光纤的优点外,SMS 结构还具有结构简单、制备工艺不复杂以及其他较好的性能,因此 SMS 结构除了用于折射率传感外,同样还应用于温度传感和应力传感^[15-20],以及模式转换^[21]等方面的研究。

Wang 等^[22]利用 SMS 结构的自成像原理,选取不同的自成像位置,测量传输损耗的变化,结果表明:在 $[1.333, 1.382]$ 的折射率区间,其检测极限为 4.05×10^{-5} RIU。Wu 等^[23]基于 SMS 结构的自成像效应,通过检测输出光谱的移动来确定折射率的变化,实验表明,采用直径为 $80 \mu\text{m}$ 的多模光纤,液体折射率在 $[1.342, 1.352]$ 区间时灵敏度为 180 nm/RIU,液体折射率在 $[1.431, 1.437]$ 区间时的灵敏度可达 1815 nm/RIU。总体而言,基于 SMS 结构的光纤传感器灵敏度不高,主要原因是 SMS 光纤传感一般是通过检测其输出光谱的波峰的位移来获得折射率变化信息的。由于波峰较宽且对外界环境影响变化相对较为缓慢,所以其传感灵敏度通常达不到很高的水平。而高效的传感方案通常是以检测输出光谱的谷值位置来实现的。本文提出基于 SMS 结构的波谷检测方法以实现高灵敏度传感。

2 数值模拟

折射率传感 SMS 结构如图 1 所示,其中多模光纤两端连接着同等规格的单模光纤,多模光纤的包层已被腐蚀掉。然后将多模光纤整体置于待检测液体溶液中,液体折射率低于纤芯折射率,从而起到包层的作用。当光从单模光纤输出并进入多模光纤后,将在多模光纤中激发出多个模式,由于不同模式的传播常数不同,所以多模光纤输出端进入到单模光纤的能量将取决于这些模式之间的干涉效应。而包围多模光纤的液体的折射率将直接影响多模光纤中模式的传播常数,进而影响其输出时的干涉效应。这样便可从单模光纤输出的光谱变化中反映出液体折射率的变化。

选取纤芯折射率为 $n_o = 1.4583$,包层折射率为 $n_c = 1.4503$,单模光纤纤芯直径 $d_s = 6 \mu\text{m}$,多模光纤纤芯直径 $d_c = 30 \mu\text{m}$ 。即单模光纤与多模光纤仅纤芯直径不同,其他参数相同,其目的是减少光纤连接时,纤芯折射率不匹配而引起的损耗。输入光的中心波长取为 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 。希望通过检测单模光纤的输出光谱的谷值来实现传感,为此,需要确定多模光纤的长度。图 2 给出了输出能量随着多模长度 L 变化时的变化曲线。由图 2 可知,输出能量在很多位置出现极小值,且有一定的周期性。这意味着当多模光纤长度取在这些位置时,其输出频谱会出现波谷。

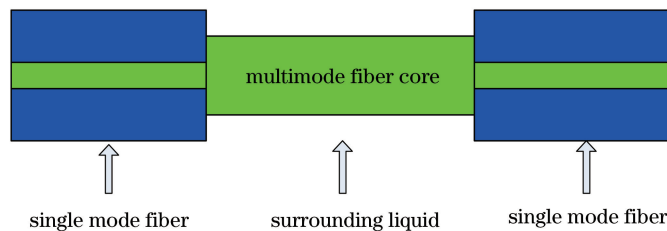


图 1 SMS 光纤传感结构

Fig. 1 Structure of SMS fiber sensor

根据图 2 的结果,将多模光纤长度取为 $L = 9652 \mu\text{m}$ 。图 3 给出其输出频谱随着液体折射率 n_L 的变化情况。引用文献^[9]中关于传感灵敏度和检测极限的定义。灵敏度为 $S = \partial \lambda / \partial n$,检测极限为 $\delta n \approx 3/4.5 \times \lambda_{\text{FWHM}} / (S \times f_{\text{SNR}}^{0.25})$,其中 λ_{FWHM} 是半峰全宽, f_{SNR} 是信噪比,比如当信噪比为 50 dB,其值就是 $10^{(50/10)}$ 。由图 3 可知,液体折射率较小的变化即可引起波谷波长较大的移动,且波谷的半峰全宽均较小。

经计算可得,传感器的灵敏度可达 3.68×10^4 nm/RIU,检测极限为 1.63×10^{-6} RIU。其传感性能,特别是在灵敏度方面,要明显优于同样采用 SMS 结构但基于自成像效应的波峰检测方法的传感技术。

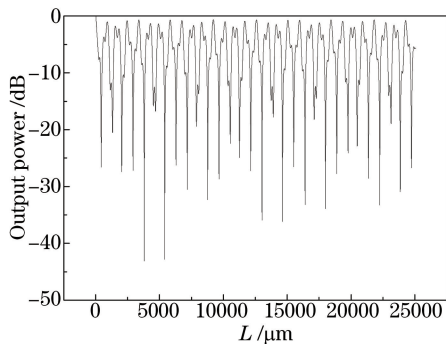


图 2 输出能量随着多模光纤长度的变化曲线

Fig. 2 Curve of output power change with the length of multimode fiber

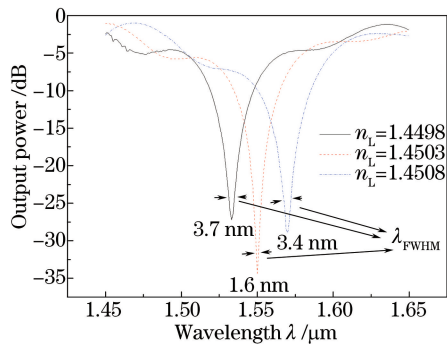


图 3 不同液体折射率情况下的光谱偏移

Fig. 3 Spectral shift with different refractive indexes

图 4 给出了当 $d_c = 30 \mu\text{m}$, 多模光纤长度 L (分别对应图 2 中相应的输出能量的极小值位置) 取不同值时的灵敏度和检测极限的规律。由图 4 可知,除了在较短的多模光纤长度情况下,其检测极限变化较大外,在其他不同位置其传感灵敏度和检测极限值只在小范围内波动,可见光纤长度 L 的选择对灵敏度和检测极限结果影响不大。这意味着可以根据需要选择合适的多模光纤长度实现相似的传感性能。

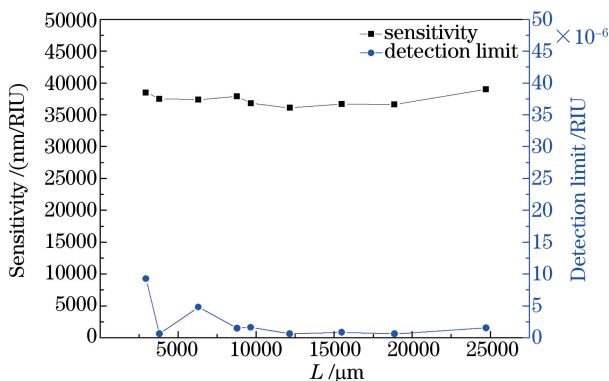


图 4 灵敏度和检测极限在不同多模光纤长度时的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of sensitivity and detection limit with different lengths of multimode fiber

将光纤的归一化频率固定,从而使多模光纤中的模式数量一定。在此基础上,改变光纤的直径来了解其对传感性能的影响。在前述结构中,单模光纤和多模光纤($d_c = 30 \mu\text{m}$)的归一化频率分别为 1.854 和 9.27。这里取多模纤芯直径 $d_c = 50 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 。当 $d_c = 50 \mu\text{m}$ 时,对应的纤芯和包层折射率分别为 $n_o = 1.4583$ 和 $n_c = 1.4554$,单模光纤纤芯直径 $d_s = 9.95 \mu\text{m}$ 。当 $d_c = 70 \mu\text{m}$ 时,对应的纤芯和包层折射率分别为 $n_o = 1.4583$ 和 $n_c = 1.4568$,单模光纤纤芯直径 $d_s = 13.87 \mu\text{m}$ 。

图 5(a)、(b)分别给出了此时多模光纤纤芯直径 $d_c = 50 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 时,输出能量随着多模光纤长度 L 变化曲线。由图 2 和图 7 可知,在保持归一化频率不变的情况下,增大多模纤芯直径时,其极值点位置仍然具有较好的周期性。此外随着 d_c 的增大,其极值点的周期也有所增大。

图 6(a)、(b)分别给出了当多模光纤纤芯直径 $d_c = 50 \mu\text{m}$ 和 $70 \mu\text{m}$ 时,灵敏度和检测极限随多模光纤长度 L 的变化曲线。由图 8 可知,随着 L 的变化,灵敏度和检测极限仅在小范围内波动。这一特点与归一化频率相同,而这与 $d_c = 30 \mu\text{m}$ 时的情况相似。由此也验证了所提出的多模光纤中的模式数量影响传感性能的假设。同时可见,随着 d_c 的增大,灵敏度得到大幅度地提高。其中 $d_c = 50 \mu\text{m}$ 时,灵敏度达到 1×10^5 nm/RIU 以上,检测极限均在 4.29×10^{-6} RIU 以下; $d_c = 70 \mu\text{m}$ 时,灵敏度达到 1.825×10^5 nm/RIU 以上,检测极限均在 2.91×10^{-6} RIU 以下。这个传感灵敏度达到了极高的数值,而检测极限也达到了其他较优的光纤折射率传感方案相当的水平。这是因为此种情况下,较大的 d_c 致使多模光纤纤芯和包层之间的

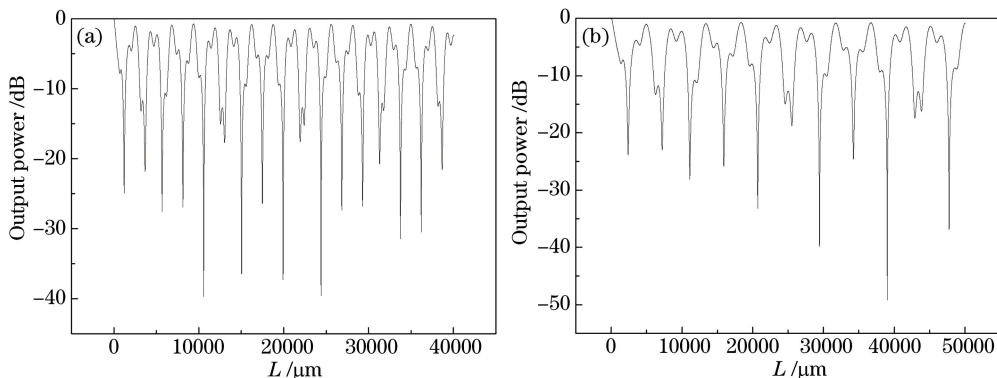


图5 输出能量随着多模光纤长度变化曲线。(a) $d_c = 50 \mu\text{m}$; (b) $d_c = 70 \mu\text{m}$

Fig. 5 Curves of output power change with the length of multimode fiber. (a) $d_c = 50 \mu\text{m}$; (b) $d_c = 70 \mu\text{m}$

折射率差变小。而折射率差越小,外界环境(折射率)的变化对光纤中传输模式的影响也就越大,从而使得输出光谱更易受到外界环境的影响。由检测极限计算公式可知,检测极限随着灵敏度的增加而变小。所以灵敏度和检测极限在此种方法下均得到了较好的效果。

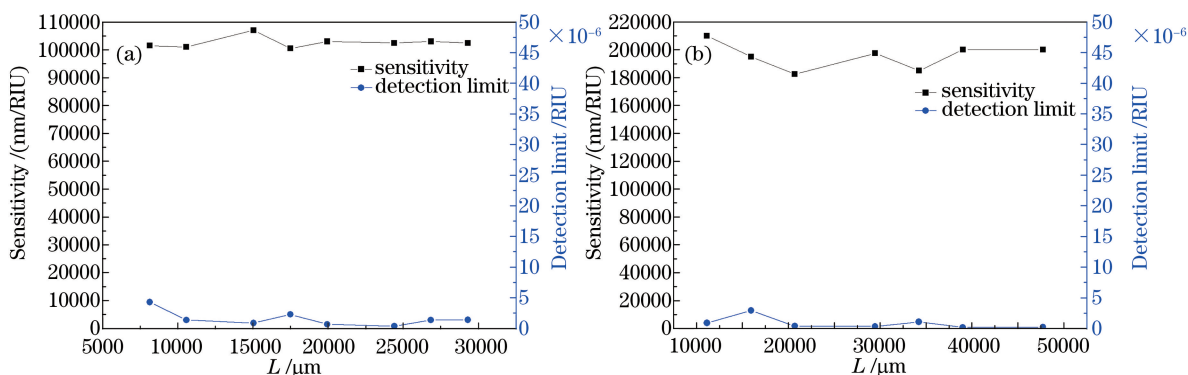


图6 灵敏度和检测极限在不同多模光纤长度时的变化曲线。(a) $d_c = 50 \mu\text{m}$; (b) $d_c = 70 \mu\text{m}$

Fig. 6 Changing curves of sensitivity and detection limit with different lengths of multimode fiber.

(a) $d_c = 50 \mu\text{m}$; (b) $d_c = 70 \mu\text{m}$

根据图 5(b)的结果,选取多模光纤长度 $L = 29450 \mu\text{m}$ 。图 7 给出了多模光纤直径 $d_c = 70 \mu\text{m}$,多模光纤长度 $L = 29450 \mu\text{m}$ 时,其传感灵敏度和检测极限随液体折射率 n_L 的变化曲线。由图 7 可知,液体折射率在 $[1.4564, 1.4571]$ 区间范围内时,其传感灵敏度均达到 $1.5 \times 10^5 \text{ nm/RIU}$ 以上,检测极限在 $3.92 \times 10^{-6} \text{ RIU}$ 以下。并且随着 n_L 的增加,灵敏度越来越大。这是因为 n_L 越接近纤芯的折射率,多模光纤的包层和纤芯之间的折射率差就越小,其传感灵敏度也就越高。

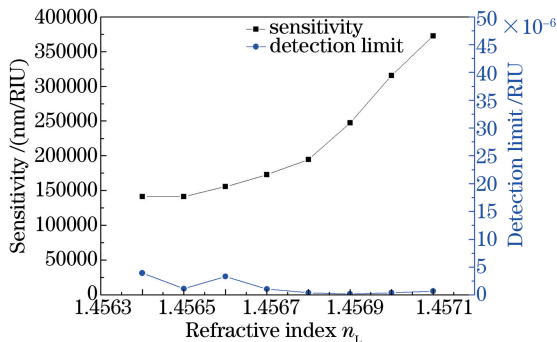


图7 灵敏度和检测极限随着 n_L 的变化曲线

Fig.7 Curves of the sensitivity and detection limit change with n_L

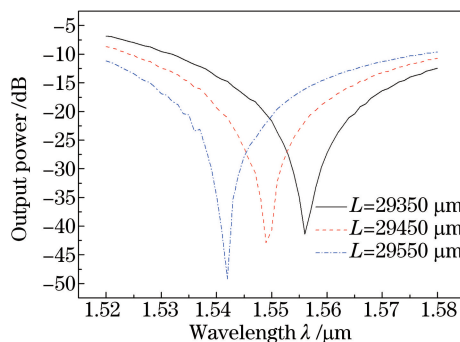


图8 不同多模长度下的光谱偏移

Fig. 8 Spectral shift with different lengths of multimode fiber

多模光纤的长度误差同样可能会影响其传感性能。为分析这个问题,图 8 给出了多模光纤的长度偏离设计长度时光纤的输出频谱曲线。由图 8 可知,存在长度偏差时,主要是致使频谱发生移动。在偏差小于 $100\ \mu\text{m}$ 时,长度的偏差对光谱的移动的影响约为 $-0.07\ \text{nm}/\mu\text{m}$ 。可见光谱移动对长度变化较为敏感,根据应力对光纤长度的影响的研究^[17],发现此特点可以应用于应力传感。长度为 $29350, 29450, 29550\ \mu\text{m}$ 时的灵敏度分别为 $2 \times 10^5, 1.975 \times 10^5, 1.98 \times 10^5\ \text{nm}/\text{RIU}$,可见长度偏移对灵敏度影响不大。且不同长度下频谱的检测极限也均小于 $0.34 \times 10^{-6}\ \text{RIU}$ 。由此可见,多模光纤的长度在小范围内的偏差对灵敏度和检测极限的影响均不大。

3 结 论

提出一种基于 SMS 光纤结构的折射率传感方案,以波谷检测来实现高灵敏度传感。主要研究了多模光纤纤芯直径和多模光纤长度以及模式数量对输出的影响。当改变单模光纤和多模光纤的结构参数而保持其归一化频率不变时,增大光纤直径可以有效地提高传感灵敏度。研究发现液体折射率在 $[1.4564, 1.4571]$ 区间内,灵敏度达到 $3.725 \times 10^5\ \text{nm}/\text{RIU}$,且检测极限低至 $7 \times 10^{-7}\ \text{RIU}$ 。可见波谷检测方法实现了在检测极限较好的情况下拥有极高的灵敏度的目标。当多模光纤的长度偏离设计长度时,多模光纤的长度偏差对精度和检测极限的影响均不大,且多模长度的偏差对光谱的移动的影响约为 $-0.07\ \text{nm}/\mu\text{m}$,此特点适宜应用于应力传感。本文方法在灵敏度和检测极限方面均得到非常好的效果,且该结构本身具有较好的容错性,因而可以在传感方面得到更多的应用。

参 考 文 献

- 1 Q Zhang, N J Ianno, M Han. Fiber-optic refractometer based on an etched high- q π -phase-shifted fiber-Bragg-grating [J]. *Sensors*, 2013, 13(7):8827-8834.
- 2 F Yuan, G F Yan, Y B Zhang. Reflective fiber refractometer based on fiber Bragg grating inscribed in thin-core-fiber[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015, 47(7):1983-1989.
- 3 Q Zhang, L L Hu, Y F Qi, *et al.*. Fiber-optic refractometer based on a phase-shifted fiber Bragg grating on a side-hole fiber[J]. *Opt Express*, 2015, 23(13):16750-16759.
- 4 W B Ji, S C Tjin, B Lin, *et al.*. Highly sensitive refractive index sensor based on adiabatically tapered microfiber long period gratings [J]. *Sensors*, 2013, 13(10):14055-14063.
- 5 P F Wang, Y Semenova, Q Wu, *et al.*. Macrobending single-mode fiber-based refractometer[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(31):6044-6049.
- 6 F Bahrami, M Maisonneuve, M Meunier, *et al.*. An improved refractive index sensor based on genetic optimization of plasmon waveguide resonance[J]. *Opt Express*, 2013, 21(18):20863-20872.
- 7 O Frazão, P Caldas, J L. Santos, *et al.*. Fabry-Perot refractometer based on an end-of-fiber polymer tip[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(16):2474-2476.
- 8 J N Wang, J L Tang. Photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing[J]. *Sensors*, 2012, 12(3):2983-2995.
- 9 B Sun, M Y Chen, Y K Zhang, *et al.*. Microstructured-core photonic-crystal fiber for ultra-sensitive refractive index sensing[J]. *Opt Express*, 2011, 19(5):4091-4100.
- 10 Bi Weihong, Shen Yuan, Liu Qiang, *et al.*. Refractive index sensing characteristics of a mach-zehnder interferometer based on directly photonic crystal fiber [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5):0505008.
毕卫红, 申 远, 刘 强, 等. 直接熔融塌陷光子晶体光纤马赫曾德尔干涉仪的折射率传感特性[J]. *中国激光*, 2014, 41(5):0505008.
- 11 Y Zhao, L Cai, H F Hu. Fiber-optic refractive index sensor based on multi-tapered SMS fiber structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(11):6348-6353.
- 12 L B Soldano, E C M Pennings, L B Soldano, *et al.*. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications[J]. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(4):615-627.
- 13 Q Wang, G Farrell, W Yan. Investigation on single-mode-multimode-single-mode fiber structure [J]. *J Lightwave*

- Technol, 2008, 26(5):512-519.
- 14 W S Mohammed, A Mehta, E G Johnson. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. J Lightwave Technol, 2004, 22(2):469-477.
- 15 Huang Zejia, Li Qiang, Xu Yaqin, *et al.*. Research on temperature sensing characteristics based on modular interference of single-mode-multimode-single-mode fiber [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6):0605001.
黄泽钺, 李 强, 徐雅芹, 等. 基于单模多模单模光纤模间干涉的温度传感特性研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0605001.
- 16 Q Wu, Y Semenova, A M Hatta, *et al.*. Bent SMS fiber structure for temperature measurement [J]. Electronics Letters, 2010, 46(16):1129-1130.
- 17 Q Wu, A M Hatta, P Wang, *et al.*. Use of a bent single SMS fiber structure for simultaneous measurement of displacement and temperature sensing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(2):130-132.
- 18 D P Zhou, L Wei, W K Liu, *et al.*. Simultaneous strain and temperature measurement with fiber Bragg grating and multimode fibers using an intensity-based interrogation method [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(7): 468-470.
- 19 S M Tripathi, A Kumar, R K Varshney, *et al.*. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode structures [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(13):2348-2356.
- 20 Q Wu, A M Hatta, Y Semenova, *et al.*. Use of a single-multiple-single-mode fiber filter for interrogating fiber Bragg grating strain sensors with dynamic temperature compensation [J]. Appl Opt, 2009, 48(29):5451-5458.
- 21 C P Tsekrekos, D Syvridis. All-fiber broadband mode converter for future wavelength and mode division multiplexing systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(18): 1638-1641.
- 22 P Wang, G Brambilla, M Ding, *et al.*. Investigation of single-mode-multimode-single-mode and single-mode-tapered-multimode-single-mode fiber structures and their application for refractive index sensing [J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28 (5):1180-1186.
- 23 Q Wu, Y Semenova, P F Wang, *et al.*. High sensitivity SMS fiber structure based refractometer--analysis and experiment [J]. Opt Express, 2011, 19(9):7937-7944.