

消除模间干涉现象的光纤光栅模式转换器

赵润晗, 孟欣禹, 赵云鹤, 司晓龙, 刘云启

(上海大学 通信与信息工程学院 特种光纤与光接入网实验室, 上海 200444)

摘要: 光纤通信技术占据了目前通信传输的主要地位,但基于波分复用技术的单模光纤通信系统目前则面临着严重的信道容量危机,因此基于多模/少模光纤的模分复用技术逐渐得到了人们的重视。模式转换器是模分复用技术中的重要器件之一,而长周期光纤光栅是一种很好的全光纤模式转换器。在利用长周期光纤光栅完成 LP_{01} 到 LP_{11} 模式转换的基础上,这种新型的模式转换器利用多模光纤消除了模式间干涉,从而使模式转换的模式纯度更高、稳定性更好,在模式转换效率达到 99.5%的同时还可以保证几乎没有模式间干涉现象的产生。同时,这种模式转换器的多种传感特性也良好,其对拉力有着很好的线性灵敏性,可以达到 2.83 nm/N 和 5.66 dB/N,因此此结构在未来的模分复用及传感领域会有重要的作用。

关键词: 模式转换; 模分复用; 长周期光纤光栅; 少模光纤

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1222001

Mode converter based on fiber grating to eliminate intermode interference phenomenon

Zhao Runhan, Meng Xinyu, Zhao Yunhe, Si Xiaolong, Liu Yunqi

(Key Lab of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Optical fiber communication technology has occupied the main position of the current communication transmission. But the single mode optical fiber (SMF) communication system based on wavelength -division -multiplexing (WDM) technology is now facing severe channel capacity crisis. Therefore, mode -division -multiplexing (MDM) technology based on the multimode or few mode fiber (FMF) has got the attention of many researchers. Mode Converter (MC) is one of the most important components in MDM technology, and long period fiber grating (LPFG) is a perfect all -fiber mode converter. The LPFG is used to convert LP_{01} mode to LP_{11} mode, and the multimode fiber is also used to eliminate inter -mode interference phenomenon in this mode converter. By using this mode converter, the converted mode has higher purity and better stability. The mode conversion efficiency reached 99.5% and there is no inter -mode interference phenomenon between these two modes. This MC device has good sensing characteristics, and this device has good linear sensitivity of strain, it can reach to 2.83 nm/N and 5.66 dB/N. So it can be concluded that this novel structure has excellent performance and will play an

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(61377083)

作者简介: 赵润晗(1992-),女,硕士生,主要从事光纤光栅和特种光纤技术方面的研究。Email: zzzrh@126.com

导师简介: 刘云启(1971-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤光栅和特种光纤技术方面的研究。Email: yqliu@shu.edu.cn

important role in the future application of optical fiber MDM and sensing field.

Key words: mode converter; mode division multiplexing; long period fiber grating; few mode fiber

0 引言

空分复用技术是一种用于解决目前带宽危机的解决方案, 其主要包括两个部分, 一是模分复用技术, 二是纤芯复用技术。其中基于多模光纤或少模光纤的模分复用技术则在成本和质量上有着较好的优势, 在最近几年得到了很多人员和机构的关注和研究。模分复用系统中的模式转换器则是其的关键器件之一。

模式转换器可以用很多方式来实现。参考文献[1]中使用一种基于硅基液晶 (LCoS) 的空间光调制器 (SLM) 来实现模式耦合, 这种装置相对较为复杂并且对仪器精密度要求高。参考文献[2]中提出了利用相位板来实现模式转换, 这种装置不仅损耗较大, 而且对精细度要求高。参考文献[3]中提到一种弯曲波导的耦合机制, 综述了低损耗弯曲波导的方法。使用光纤光栅来实现模式转换是一种较好的方式^[4-5], 包括长周期光纤光栅和光纤布拉格光栅两种, 光纤光栅体积小、损耗低、稳定性好、模式转换效率高。

使用光纤光栅实现模式转换一般是在一种单模-少模-单模结构上实现的, 在少模光纤两端接入单模光纤以观测其光谱, 在少模光纤上刻制长周期光栅来完成纤芯内部的模式转换^[6]。如果接入的两模光纤长度过短, 会产生模式间干涉, 进而影响实验效果, 使用一段较长的少模光纤来减弱模式间干涉是一种常用的做法, 但这样会产生较多的浪费, 因为光栅的长度通常比较短, 一般不会超过 20~30 mm, 而接入的少模光纤一般要达到 100 mm 以上才会使模式间干涉缓解。在实验中发现, 无需接入很长的一段少模光纤, 在整个结构中接入一小段多模光纤同样也能很好地缓解模式间干涉。因此文中在单模-少模-单模 (Single Mode Fiber - Few Mode Fiber - Single Mode Fiber, SFS) 这种传统结构的基础上加入一段多模光纤 (Multi Mode Fiber, MMF), 成为单模-少模-多模-单模 (Single Mode Fiber - Few Mode Fiber - Multi Mode Fiber - Single Mode Fiber, SFMS) 结构, 并且同样在少模光纤上刻写长周期光栅。

笔者在实验中对比了接入同样长度 FMF 的 SFS

结构和 SFMS 结构的光谱特性图, 并且对比了刻写 LPFG 之后的两种结构对比图, 以此可以得出这种结构使模式转换的模式纯度更高、稳定性更好, 在模式转换效率达到 99.5% 的同时还可以保证几乎没有模式间干涉现象的产生, 同时节省了光纤的使用成本, 同样缩减了整个器件的长度。与此同时, 该结构还有很好的拉力传感特性, 其对拉力的灵敏度可以达到 2.83 nm/N 和 5.66 dB/N, 并且线性很好, 因此也可以作为很好的拉力传感器件。

1 基本原理

文中实验的理论依据主要是光纤光栅和多模干涉这两种, 下面对这两种原理进行介绍和分析。

1.1 多模干涉原理

传统的多模干涉结构有单模-多模-单模结构, 如图 1 所示, 光从一端的单模光纤射入, 通过单模光纤耦合进入中间的多模光纤, 激励多模光纤中大量模式传输, 这种结构能够使光的模式场分布发生变化, 随后再耦合进最后的单模光纤中。

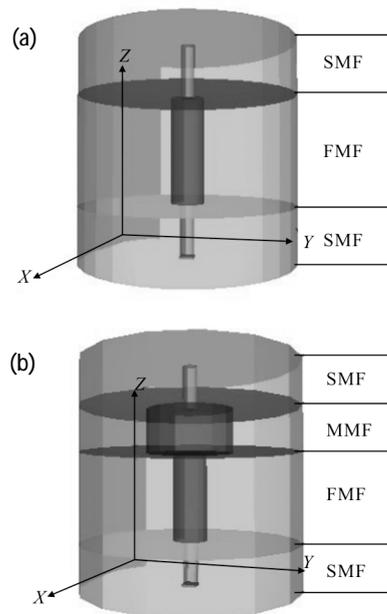


图 1 (a) 传统的单模-少模-单模结构; (b) 单模-少模-多模-单模结构

Fig.1 (a) SFS structure diagram; (b) SFMS structure diagram

光在单模光纤中是圆对称的 LP₀₁ 模式, 因此输入光的分布可以看作 E(r,0), 当输入光进入中间的多模光纤中, 会产生很多高阶的模式, 可以分解为一系列的本征模 {LP_m}。根据参考文献[7-8]可以得出在单模-少模-单模结构中只有圆对称的模式才可以被激发出来。

忽略单模到多模界面的熔接处光的反射损耗, 将 LP_{0m} 的模式场剖面看作 F_m(r), 可以得出:

$$E(r,0) = \sum_{m=1}^M C_m F_m(r) \quad (1)$$

式中: C_m 是每个模式的激励系数, 并且其值可以通过 E(r,0) 和 F_m(r) 的积分来求出:

$$C_m = \frac{\int_0^{\infty} E(r,0) F_m(r) r dr}{\int_0^{\infty} F_m(r) F_m(r) r dr} \quad (2)$$

在实验中使用的少模光纤因其纤芯直径为 19 μm, 故而光纤里只能通过 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式, 是一种两模光纤, 因此该单模-少模-单模结构不会因为多模干涉激发出更高阶的圆对称 LP₀₂ 模式, 刻写光纤光栅后得到的模式为纯净的 LP₁₁ 模式。

1.2 光纤光栅原理

光纤光栅是一种通过改变光纤的纤芯折射率来完成许多传感或者通信方面应用的全光纤器件, 根据刻写光栅的周期长短, 可以把光纤光栅区分为长周期光纤光栅和光纤布拉格光栅两种。光纤光栅的应用非常多, 参考文献[9-13]显示了光纤光栅在传感方面和通信方面的诸多应用。

文中使用二氧化碳激光器刻写周期为 1 190 μm 的长周期光纤光栅, 刻写过程和相关的理论分析参见参考文献[14]。通过刻制长周期光纤光栅, 得到的结构示意图如图 2(a) 所示, 同时因为这个结构为上下不对称的结构, 笔者还对比了光从两个方向入射后得到的光谱图对比。通过图 2(b) 可以看出, 该结构

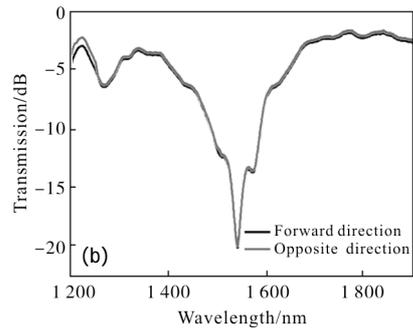
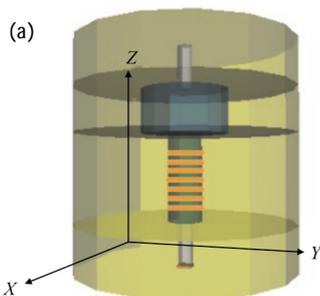


图 2 (a) 在少模上刻写长周期光纤光栅的单模-少模-多模-单模结构; (b) 光从两个不同方向的单模光纤入射光谱图对比

Fig.2 (a) SFMS structure diagram with LPFG carved in FMF; (b) Contrast of spectrum between two different incident direction

虽然是一个上下不对称的结构, 但无论光从哪一端的单模光纤射入, 其光谱基本相同。

二氧化碳激光器通过在光纤方向上进行横向扫描, 每一步扫描相当于光栅的周期。由于 FMF 暴露在一侧的激光束上, 激光束在纤芯上会产生不对称的折射率分布, 这就会激发 LP₀₁ 模和 LP₁₁ 模式之间的模式转换。刻写的 LPFG 能实现模式转换的周期可以通过以下公式实现:

$$\Lambda = \lambda_{res} (n_{eff,01} - n_{eff,mn}) \quad (3)$$

式中: λ_{res} 是谐振波长; Λ 是光栅的周期; n_{eff,01} 和 n_{eff,mn} 是 LP₀₁ 模式和 LP_{mn} 模式的有效折射率。对于给定的一个谐振波长, 可以通过公式来确定对应的光栅周期。通过适当选择光栅参数, 将 LP₀₁ 模式引入光纤中, 可以高转换效率转换成高阶纤芯模式。

2 实验结果

2.1 实验结构及参数

在实验中用到的光纤有康宁公司生产的标准单模光纤以及一些特种光纤, 如 19 μm 纤芯的少模光纤、50 μm 纤芯的多模光纤, 参数如表 1 所示。

表 1 实验中用到的光纤参数

Tab.1 Fiber parameters in experiment

Fiber type	Core refractive index	Cladding refractive index	Core diameter/ μm
SMF	1.468 2	1.462 9	8.2
FMF	1.449	1.444	19
MMF	1.482	1.466	50

2.2 透射谱对比

从图 3 中可以看出,图 3(a)是该单模-少模-多模-单模结构的透射谱,在使用 1 190 μm 周期来刻写长周期光纤光栅后很快就可以出现透射峰,其峰值最高可达到 -20 dB 以下,即 99% 以上的转换效率,并且可看出其 -10 dB 以下(转换效率 90% 以上)的光谱带宽可以达到 100 nm,即意味着这种结构有很宽的光谱适应度。对于整个光波带宽来说,在 1 550 nm 处出现的透射峰可以很好地应用于现在的单模光纤常用波长,并且通过改变光栅的周期或能量,可以使得这种转换效率更高、光谱带宽更广。图 3(b)是该结构在少模光纤长度相同时有无多模光纤时的透射谱对比,从图中可以很明显的看出这种新结构能很好地消除普通单模-少模-单模结构的模式间干涉。

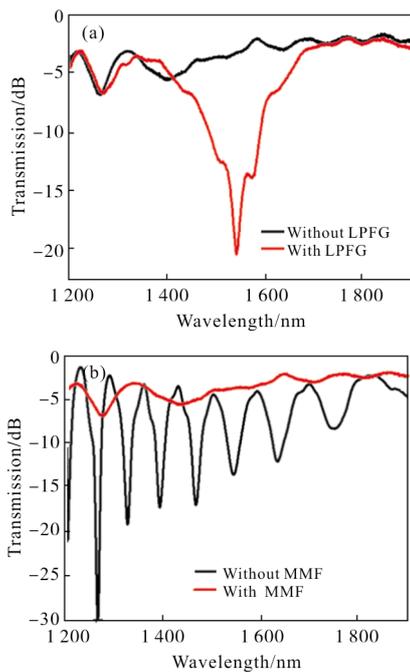
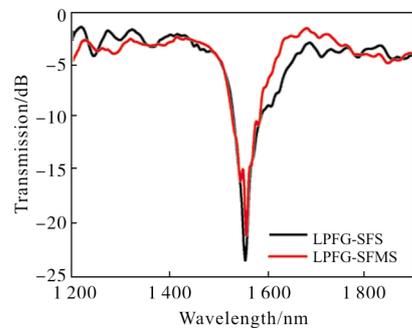


图 3 (a)单模-少模-多模-单模结构刻写长周期光纤光栅前后的透射谱;(b)少模光纤长度相同时有无多模光纤时的透射谱对比

Fig.3 (a)Transmission spectrum of SFMS structure diagram with LPFG carved in FMF; (b) Transmission spectrum comparison of SFMS structure with MMF and without MMF

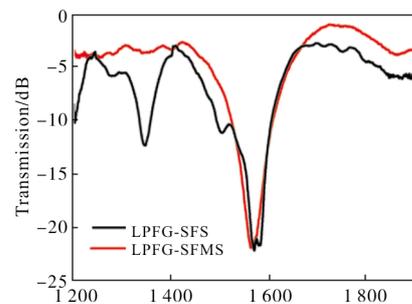
刻制的光栅周期都为 1 190 μm ,刻写时所有的有效矢量步长和步间延时分别是 0.001 2 mm 和 300 μs ,Q 释放时间是 55 μs ,将上述两个结构的光谱特性图进行对比。如图 4(a)所示,SFS 结构通过一

段较长的 FMF(一般大于 100 mm,这里使用的长度是 120 mm)来减缓模式间干涉现象,而 SFMS 结构则通过接入一段很短的 MMF(实验中用到 5 mm)来减缓,SFMS 结构中 FMF 长度只有 20 mm,可以看出二者的光谱图基本一致。因此可以得出结论,即在 SFS 结构中加入一段 MMF 再在 FMF 上刻写 LPFG 时,只会影响其干涉情况,不会影响整个结构的模式转换特性。而在图 4(b)中,SFS 结构和 SFMS 结构的 FMF 都固定为 20 mm,此时 SFS 结构中的干涉现象会比较严重,再刻写光栅后其整个光谱会有干涉峰出现影响效果,且 SFS 结构的整体衰减大于 SFMS 结构。



(a) SFS 结构中 FMF 长度为 120 mm 而 SFMS 结构中 FMF 长度为 20 mm 刻制 LPFG 光谱图对比

(a) Spectrum comparison of LPFG-SFS structure with 120 mm FMF and LPFG-SFMS structure with 20 mm FMF



(b) SFS 结构中 与 SFMS 结构中 FMF 长度都为 20 mm 刻制 LPFG 光谱图对比

(b) Spectrum comparison of LPFG SFS and LPFG SFMS structure both with 20 mm FMF

图 4 SFS 结构与 SFMS 结构上刻制 LPFG 光谱图对比

Fig.4 Spectrum comparison of LPFG-SFS structure and LPFG-SFMS structure

2.3 折射率特性

这种单模-少模-多模-单模结构的折射率特性如图 5 所示,由图 5 可以看出这种结构有着很好的

折射率稳定性,当外界环境折射率变化时,其传输谱基本不发生变化,在折射率由 1 逐渐增加至 1.463 时,波长的漂移小于 1 nm,同时透射率的漂移小于 1 dB,基本保持不变。

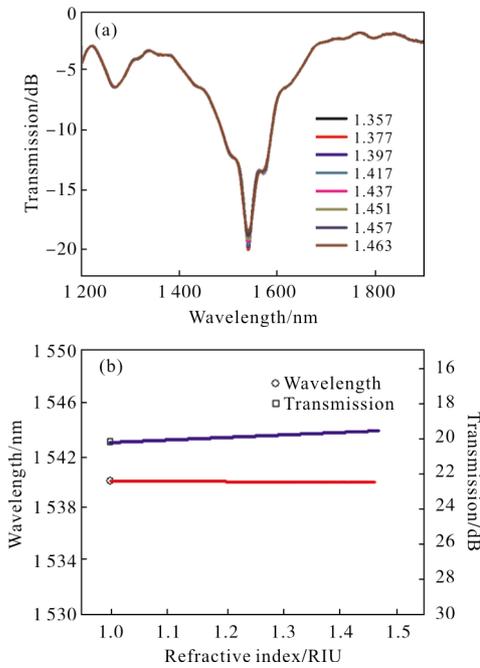


图 5 在少模上刻写长周期光纤光栅的单模-少模-多模-单模结构的折射率特性

Fig.5 Characteristic of refractive index of LPFG carved SFMS structure in few mode

因为光纤中的包层模式对折射率非常敏感,因此如果转换的模式中存在包层模,则应当有较大的折射率灵敏性。从图 5 的特性中可以明确看出在笔者提出的模式转换结构中不存在包层模,因此可以保证在此模式转换器中模式转换的纯度。

2.4 温度特性

这种结构对于温度也有很好的透射谱线性变化,从图 6 中可以看出当温度从 20~110 °C 变化时,这种结构的波长会往短波漂移小于 1.5 nm,透射峰

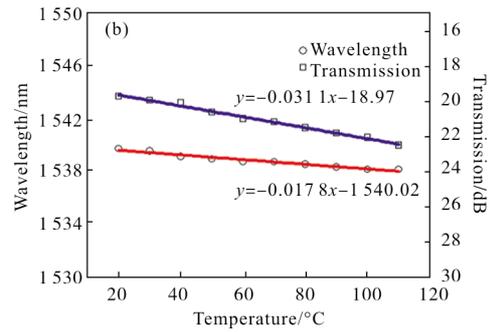
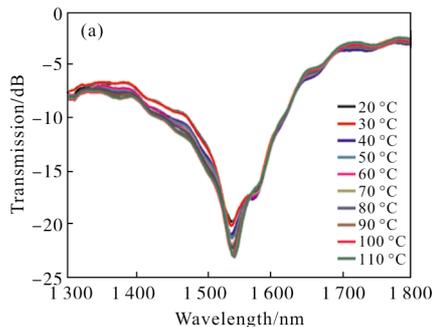


图 6 在少模上刻写长周期光纤光栅的单模-少模-多模-单模结构的温度特性

Fig.6 Characteristic of temperature of LPFG carved SFMS structure in few mode

峰值会加深 3 dB 左右,波长漂移变化微小,透射峰峰值变化较小,并且都有较好的线性特性,其变化的值分别是 0.018 nm/°C 和 0.031 dB/°C。

2.5 弯曲特性

这种结构对于弯曲也有很好的稳定性,从图 7 中可以看出当曲率变化时,这种结构的透射谱有一定的变化,但维持在一个很低的值,在曲率由 0 变为 6.06 时,波长往长波方向,其值漂移小于 1.5 nm,同时透射率的漂移小于 1 dB,都是较为微小的变化,并且同样都有很好的线性特性,其变化的值分别是 0.285 nm·m 和 0.103 dB·m。

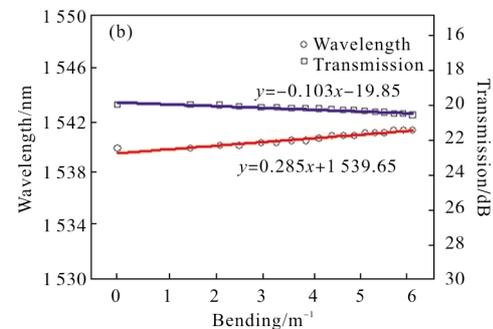
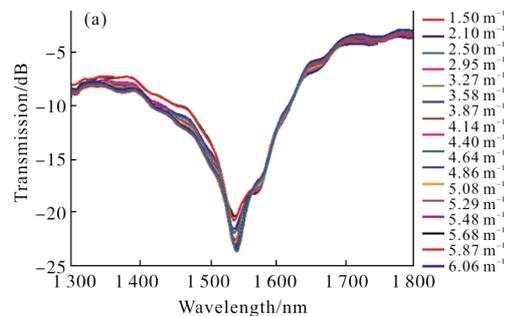


图 7 在少模上刻写长周期光纤光栅的单模-少模-多模-单模结构的弯曲特性

Fig.7 Characteristic of bending of LPFG carved SFMS structure in few mode

2.6 偏振特性

如图 8 可以看出, 这种结构有着比较好的偏振稳定性, 在实验中使用实验室的光器件分析仪 (N7788BD, 安捷伦) 分析其传输谱。

图 8 中的 PDL P1 和 PDL P2 分别对应应在最大和最小传输功率时两种不同偏振状态的光形态中, 这种结构的两种光谱特性图, PDL 则是他们差值的绝对值, 是光设备在所有偏振状态下最大传输和最小传输的比率。

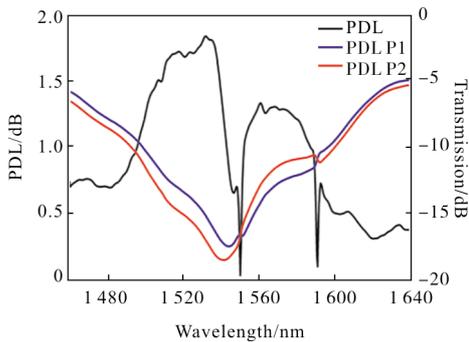


图 8 在少模上刻写长周期光纤光栅的单模-少模-多模-单模结构的偏振特性

Fig.8 Characteristic of PDL of LPFG carved in SFMS structure in few mode

PDL、P1、P2 可以用以下关系来表示: $PDL = |10\log(T_{max}/T_{min})| = |10\log(T_{max}) - 10\log(T_{min})| = |P1 - P2|$, 其中 T_{max} 和 T_{min} 分别对应被测试器件全部偏振态中的最大传输和最小传输。从图中可以看出这种结构的偏振依赖性损耗较低, 全波长小于 2 dB, 在透射峰的地方偏振依赖性损耗(PDL)值有升高, 这是因为透射峰波长处发生了模式转换, 将圆对称的 LP_{01} 模式转换为非圆对称的 LP_{11} 模式。

2.7 拉力特性

这种结构的拉力特性有着非常好的线性, 在实验中使用力新宝数显推拉力计来测量其每变化 0.1 N 时的光谱变化, 从图 9 中可以很清楚地看出其波长和透射峰峰值的变化。把 0.1 N 换算成对应的微应力 $113.2 \mu\epsilon$, 绘制了当拉力变化时, 其波长和透射峰峰值的变化情况。从图中可以看出拉力与波长、拉力与透射峰峰值的对应变化有着很好的线性, 其中拉力与波长的灵敏度为 $2.5 \text{ pm}/\mu\epsilon$, 即 $2.83 \text{ nm}/\text{N}$; 拉力与透射峰峰值的灵敏度为 $0.005 \text{ dB}/\mu\epsilon$, 即

$5.66 \text{ dB}/\text{N}$, 可以看到变化较大。

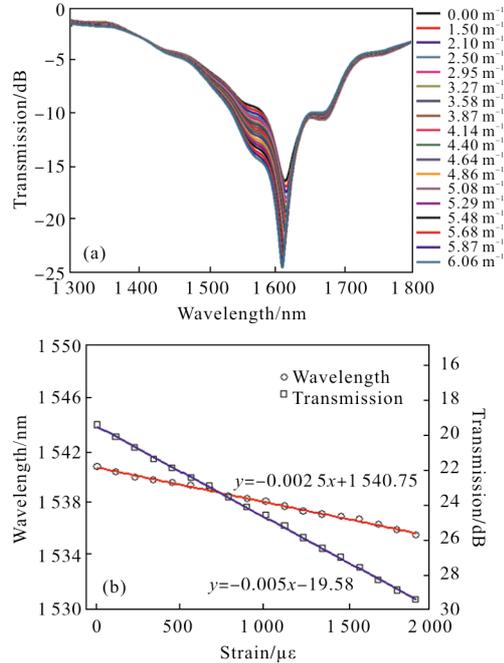


图 9 在少模上刻写长周期光纤光栅的单模-少模-多模-单模结构的拉力特性

Fig.9 Characteristic of strain of LPFG carved SFMS structure in few mode

3 结论

文中设计了一种全光纤的模式转换器结构, 这种新型的模式转换器能够很好地完成转换效率达到 99.5% 的模式间转换, 且转换纯度可以得到保证。这种结构很好地消除了 SFS 结构的模式间干涉现象, 同时还缩减了器件的成本。与此同时, 该器件还有很好的拉力传感特性。其对拉力的灵敏度可以达到 $2.83 \text{ nm}/\text{N}$ 和 $5.66 \text{ dB}/\text{N}$, 且其对折射率、温度、弯曲和偏振都不是非常敏感, 因此这种结构也可以作为一种全新的拉力传感器件, 且不用担心交叉敏感的情况。

现有的全光纤模式转换器有的不能保证模式的转换纯度, 有的则没有较高的模式转换效率, 还有的不能很好地减弱模式间干涉。传统的方法会产生较多的光纤浪费并且增加整体器件长度, 而文中提出的结构能够使得光纤成本降低, 同时减少了整体器件的长度, 并且也能很好地减弱模式间干涉现象。其对拉力的敏感具有很好的线性特性, 可用于拉力的测量和量化。因此这种新型的全光纤模式转换器有着很好的特性, 在未来的模分复用领域和光纤传

感领域会有很好的作用。

参考文献：

- [1] Johannes Von Hoyningen Huene. LCoS-based mode shaper for few-mode fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (15): 18097-18110.
- [2] Muhammad M Ali. Characterization of mode coupling in few-mode FBG with selective mode excitation [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2015, 27(16): 1713-1716.
- [3] Gao Feng, Qin Li. Research progress of bent waveguide and its applications [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 176-193. (in Chinese)
- [4] Xiang Qian, Chang Lijun. Design and optimization of mode converter based on long period fiber grating [C]//*SPIE*, 2016, 10158: 101580H.
- [5] Dong Jiangli, Chang Kinseng. Temperature-insensitive mode converters with CO₂-laser written long-period fiber gratings [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2015, 27(9): 1006-1009.
- [6] Zhao Yunhe, Liu Yunqi. Mode converter based on the long-period fiber gratings written in the two-mode fiber [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6186-6195.
- [7] Christos Tsekrekos, Dimitris Syvridis. All-fiber broadband LP₀₂ mode converter for future wavelength and MDM systems [J]. *IEEE Photonic Technology Letters*, 2012, 24 (18): 1638-1641.
- [8] Muhammad W S, Mehta A. Wavelength tunable fiber lens based on multimode interference [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(2): 469-477.
- [9] Sun Baochen, Hou Yuemin. Coupling characteristics between fiber grating and stimulated Brillouin signal [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 484-490. (in Chinese)
- [10] Wang Leijie, Zhang Ming. A displacement measurement system for ultra-precision heterodyne Littrow grating interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 2975-2985. (in Chinese)
- [11] Liu Chao, Zhang Wen. Dual-parameter sensing characteristics of long period fiber grating cascaded with fiber MZ structure fabricated by CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0922001. (in Chinese)
- [12] Zhang Faxiang, Lv Jingsheng. High sensitive fiber Bragg grating micro-vibration sensor with shock resistance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822002. (in Chinese)
- [13] Guo Yongxing, Xiong Li, Kong Jianyi, et al. Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 50-58. (in Chinese)
- [14] Jiang Meng. Research on sensor and demodulation multiplexing technology based on long period fiber Bragg grating [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese)