

文章编号: 0253-2239(2010)s100306

双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器

范林勇 江微微 赵瑞峰 冯素春 裴 丽 简水生

(北京交通大学光波技术研究所全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 通过将一根单模双芯光纤熔接在两根单模光纤之间, 实验制得全光纤马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器。用干涉原理分别分析了该器件的传输谱相邻峰值的波长间隔与波长、双芯光纤的长度和两纤芯间的有效折射率差的关系。某固定波长处, 相邻峰值的波长间隔与该波长的平方成正比, 与双芯光纤的长度和两纤芯间的有效折射率差的乘积成反比。实验测试并分析了所制梳状滤波器的插入损耗、传输谱平坦度和消光比等特性。通过对该器件的单模光纤与双芯光纤熔接处进行拉锥处理, 可以有效降低所制器件的插入损耗, 实验制得插入损耗约为 7 dB 的梳状滤波器。传输谱最大峰值功率差可小至约 1.59 dB, 消光比可达约 13 dB。该器件制作简单, 结构紧凑, 与光纤系统具有良好的匹配性。

关键词 光纤通信; 梳状滤波器; 双芯光纤; 马赫-曾德尔干涉仪; 插入损耗; 平坦度; 消光比

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100306

Comb-Filter Based on Mach-Zehnder Interferometer Using a Twin-Core Fiber

Fan Linyong Jiang Weiwei Zhao Ruifeng Feng Suchun Pei Li Jian Shuisheng

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A comb-filter based on Mach-Zehnder interferometer (MZI) is experimentally fabricated by splicing a section of single mode twin-core fiber (TCF) between two single mode fibers (SMFs). The wavelength spacing between the adjacent transmission peaks of the transmission spectrum of the device versus wavelength, the length of the TCF and the effective index difference between the two cores are analyzed. When a wavelength is chosen, the wavelength spacing between the adjacent transmission peaks is proportional to the square of the wavelength and inversely proportional to the product of length of the TCF and the effective index difference between the two cores. The insertion loss, the flatness of the transmission spectra and the extinction ratio of the fabricated comb-filters are tested and analyzed. The insertion loss of the device decreases effectively by tapering the splicing regions between the SMFs and TCF. The device with insertion loss about 7 dB is obtained and comb-filter with extinction ratio about 13 dB are obtained. The comb-filter with maximum peak power difference as low as 1.59 dB is also obtained. This device is simple and compatible.

Key words optical fiber communications; comb-filter; twin-core fiber; Mach-Zehnder interferometer; insertion loss; flatness; extinction ratio

OCIS codes 060.2330; 120.2440; 060.2430

收稿日期: 2010-06-12; 收到修改稿日期: 2010-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(60771008)、北京市自然科学基金(4082024)和教育部博士点基金(200800040002)资助课题。

作者简介: 范林勇(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤器件与光纤传感等方面的研究。E-mail: skillfan@163.com

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、光纤有源无源器件和光纤网络等方面的研究。E-mail: ssjian@bjtu.edu.cn

1 引 言

全光纤干涉仪型梳状滤波器是一种重要的光纤器件,拥有许多优良的特性,可以应用于密集波分复用(DWDM)系统^[1~5]、光纤传感^[6~10]和光纤激光器^[11]等方面。人们提出并制作了各种不同结构的全光纤干涉仪型梳状滤波器,如迈克耳孙型、马赫-曾德尔型、法布里-珀罗型和萨尼亚克型等^[1~15]。传统的光纤迈克耳孙、马赫-曾德尔和法布里-珀罗干涉仪主要基于 3 dB 光纤耦合器,这种光纤干涉仪体积较大,容易受到外界环境(如温度和振动等)的影响,导致其传输谱不规则变化,极大限制了该类型梳状滤波器的应用。对此,人们提出并制作了各种新型全光纤干涉仪型梳状滤波器^[6~15]。其中基于双芯光纤(TCF)的干涉仪型梳状滤波器具有体积小,应用灵活,温度稳定性较好和弯曲不敏感等优良特性,引起了广泛的研究兴趣^[10,14,15]。但是基于 TCF 的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型梳状滤波器的传输谱的特性并没有得到详细的分析。

本文通过在两根单模光纤(SMF)间熔接一段单

模 TCF,实验制作了多个使用 TCF 长度不同的 MZI 型梳状滤波器。分别从理论和实验上分析了该器件的梳状传输谱中相邻峰值之间波长间隔与波长、TCF 长度和两纤芯间有效折射率差的关系。实验测试并分析了所制梳状滤波器的插入损耗、传输谱平坦度和消光比等特性,对今后制作该双芯光纤 MZI 型梳状滤波器及其实用化有一定的指导意义。

2 双芯光纤 MZI 型梳状滤波器的结构与工作原理

图 1(a)为基于 TCF 的全光纤 MZI 型梳状滤波器的实验结构图。将一段长度为 L 的自制单模 TCF 熔接在两根 SMF 之间,构成 MZI,TCF 中的两个芯子构成该 MZI 的两个干涉臂。该梳状滤波器集成在一段光纤上,结构紧凑,体积较小。采用掺铒光纤放大器(EDFA)的自发辐射噪声(ASE)作为宽带光源,并从一根 SMF 输入,用光谱分析仪(OSA)监测另一根 SMF 的输出光信号。

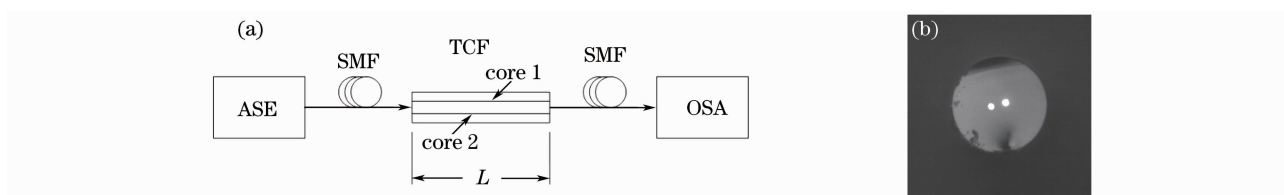


图 1 (a) 双芯光纤 MZI 型梳状滤波器结构图, (b) 实验中所用 TCF 横截面放大图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the comb-filter based of MZI using a TCF, (b) cross section micrograph of the TCF used in the experiment

实验中所使用的 TCF 的横截面的放大图如图 1(b)所示,两个折射率不同的纤芯对称分布在光纤中。该 TCF 的外径约为 $125 \mu\text{m}$,纤芯距约为 $20 \mu\text{m}$ 。采用商用熔接机,将一段 TCF 熔接在两根 SMF 之间。由于模场失配,在靠近光源的 SMF 与 TCF 的熔接点处,SMF 中的光部分耦合到 TCF 的两个纤芯中;在靠近 OSA 的 TCF 与 SMF 的熔接点处,TCF 中两个纤芯的光有部分耦合到 SMF 中。在该结构中,TCF 的两个纤芯的长度相等,即为所使用的 TCF 的长度。所使用的 TCF 的两个纤芯间的折射率差引起了两纤芯间的有效折射率差,于是产生了两纤芯间光场的相移差,从而在该器件的输出端得到梳状传输谱。由于 TCF 纤芯距达到 $20 \mu\text{m}$,且两个纤芯间存在的折射率差,可以忽略两纤芯之间的模式耦合。

基于 TCF 的 MZI 的输出端的总光强 I_{total} 为

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi, \quad (1)$$

式中 I_1, I_2 和 ϕ 分别为 TCF 中两个纤芯中的光强和相移差。

$$\phi = 2\pi(L_1 n_1 - L_2 n_2)/\lambda, \quad (2)$$

式中 λ, n_1, n_2, L_1 和 L_2 分别为光信号在真空中的波长,TCF 中两个纤芯的有效折射率和 MZI 两个干涉臂的长度。由于两个干涉臂的长度相等,即为所用 TCF 的长度 L ,于是(2)式可写成

$$\phi = 2\pi L \Delta n / \lambda, \quad (3)$$

式中 $\Delta n = n_1 - n_2$ 为两纤芯间的有效折射率差。

由(1)式和(3)式可知,传输谱中的峰值发生在满足下式的波长处:

$$m = L \Delta n / \lambda, \quad (4)$$

式中 m 为整数。

当 TCF 的长度和纤芯间的有效折射率差一定时,使 m 分别取 m 和 $m + 1$,可求得波长 λ_m 与波长 λ_{m+1} 两峰值波长之间的波长间隔 $\Delta\lambda = \lambda_m - \lambda_{m+1}$:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_m \lambda_{m+1}}{L\Delta n}, \quad (5)$$

由于在光纤的通信波长范围内, λ_m 与 λ_{m+1} 相差很小, 于是(5)式可以写成

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{L\Delta n}, \quad (6)$$

它反应了所制梳状滤波器梳状传输谱的疏密程度, $\Delta\lambda$ 越大梳状传输谱越稀, $\Delta\lambda$ 越小梳状传输谱越密。由(6)式可知, 当 TCF 的长度和两纤芯间的有效折射率差一定时, 波长 λ 附近相邻峰值的波长间隔与波长 λ 的平方成正比, 与 TCF 的长度和两纤芯间有效折射率差的乘积成反比。于是, 可以采用减小或增大 TCF 的两纤芯间折射率差, 减小或增加两纤芯间的直径差等办法来减小或增大两个纤芯间的有效折射率差, 从而得到疏密程度不同的梳状传输谱, 也可以通过减小或增大 TCF 的长度的方法来得到疏密程度不同的梳状传输谱。

3 实验结果与分析

3.1 双芯光纤 MZI 型梳状滤波器的实验制作

实验制作了所使用 TCF 长度不同的双芯光纤 MZI 型梳状滤波器。图 2(a)和图 2(b)分别为 TCF

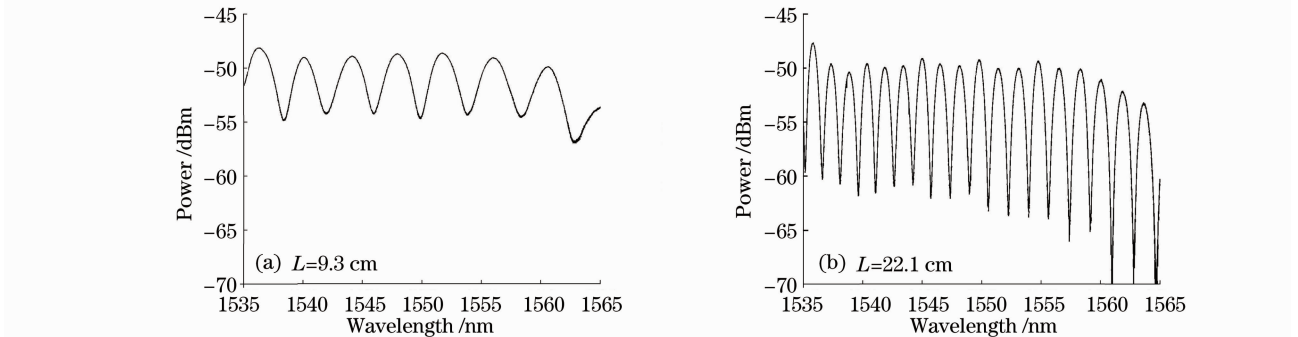


图 2 TCF 长度不同时, 所制梳状滤波器的传输谱

Fig. 2 Transmission spectra of the fabricated comb-filters with different lengths of TCF

3.2 插入损耗

图 3(a)为 TCF 长度为 22.1 cm 的梳状滤波器的传输谱[图 2(b)所示]减去 EDFA 的 ASE 谱之后的相对传输谱。由图 3(a)可见, 该器件的插入损耗约为 17 dB。较高的插入损耗主要是由 TCF 与 SMF 的熔接点处 TCF 的两个纤芯与 SMF 的纤芯之间的偏移和纤芯间的模场失配造成的。于是插入损耗 α 可以表示为

的长度为 9.3 cm 和 22.1 cm 时, EDFA 的 ASE 经过所制梳状滤波器后的传输谱。如图 2(a)所示, 当 TCF 的长度为 9.3 cm 时, 在 1535 nm 附近该梳状滤波器的传输谱相邻峰值的波长间隔约为 3.77 nm, 在 1550 nm 附近, 波长间隔约为 3.81 nm, 在 1565 nm 附近, 波长间隔约为 4.62 nm。如图 2(b)所示, 当 TCF 的长度为 22.1 cm 时, 在 1535 nm 附近, 该梳状滤波器的传输谱相邻峰值的波长间隔约为 1.52 nm, 在 1550 nm 附近, 波长间隔约为 1.60 nm, 在 1565 nm 附近, 波长间隔约为 1.81 nm。由实验结果可知, 所制梳状滤波器的传输谱的相邻峰值的波长间隔随着波长的增大而增大。在某波长处, 相邻峰值的波长间隔随着所使用的 TCF 的长度的增大而减小。这与第 2 节的理论分析相符合。图 2 中所制梳状滤波器传输谱的峰值功率随波长发生变化的现象, 可能是所使用的 EDFA 的 ASE 光谱不平坦和不同波长的光从 SMF 耦合到 TCF 两个芯子中的光功率不同共同作用的结果。图 2 的光谱是用 ANDO AQ6317 OSA 以 0.01 nm 的分辨率测量的结果。

$$\alpha = -20 \lg \left\{ \frac{2n_T}{n_S} \left| \frac{\iint_{\infty} E_S E_T^* dA}{\iint_{\infty} |E_T|^2} \right|^2 \right\}, \quad (7)$$

式中 n_S 和 n_T 分别为 SMF 和 TCF 纤芯折射率, E_S 和 E_T 分别为 SMF 和 TCF 中基模的电场分布。当基模场分布采用高斯近似时, (7)式可进一步表示为

$$\alpha = -20 \lg \left\{ \frac{8n_T}{n_S} \frac{\omega_S^2 \omega_T^2}{(\omega_S^2 + \omega_T^2)^2} \exp \left[-\frac{d^2}{2(\omega_S^2 + \omega_T^2)} \right] \right\}, \quad (8)$$

式中 ω_S 和 ω_T 分别为 SMF 和 TCF 基模的模场半径, d 为 TCF 的两个纤芯间的距离。考虑 SMF 的纤芯在 TCF 的两个纤芯之间。根据(8)式计算得, 器件的插入损耗为 20 dB。实验所制器件的插入损耗(17 dB)小于理论计算值(20 dB), 这是光束干涉使相应波长处光强加强的结果。

在 TCF 与 SMF 的熔接处进行熔融拉锥, 可以有效降低 TCF 与 SMF 的熔接损耗^[16,17]。于是, 采用商用光纤熔接机的拉锥功能分别对这种双芯光纤 MZI 型梳状滤波器的两个 TCF 与 SMF 的熔接点进行拉锥处理。重新制作一双芯光纤 MZI 型梳状

滤波器, 并对其进行上述拉锥处理。图 3(b)为拉锥处理后, 将所制 TCF 长度为 22.1 cm 的器件的传输谱减去 ASE 谱, 得到的相对传输谱。由图 3(b)可见, 所制器件的插入损耗约为 7 dB。实验表明, 对 TCF 与 SMF 的熔接点的拉锥处理可以有效降低所制器件的插入损耗。进一步优化拉锥参数还可能进一步降低所制器件的插入损耗, 这些还有待于进一步的研究。此外, 还可以通过优化 TCF 的结构设计, 在光纤熔接机上选择合适的熔接时间、熔接电流等参数^[8]的方法来降低插入损耗。TCF 与 SMF 的熔接区域可以通过外加涂覆来增加熔接强度。

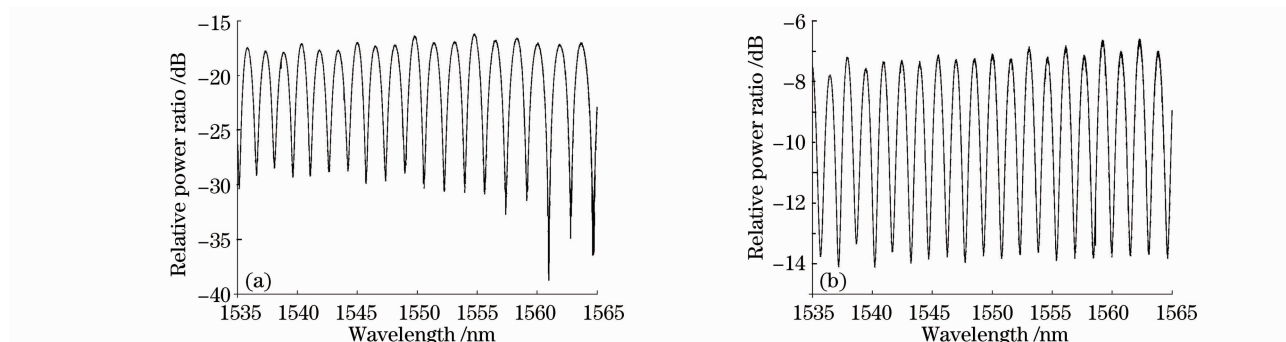


图 3 所制梳状滤波器的相对传输谱。(a) SMF 与 TCF 的熔接处未经过拉锥处理, (b) SMF 与 TCF 的熔接处经过拉锥处理

Fig. 3 Relative transmission spectra of the fabricated comb-filters. (a) splicing regions between the SMF and TCF without tapered, (b) splicing regions between the SMF and TCF which are tapered

3.3 传输谱平坦度

由图 2 可见, 所制梳状滤波器传输谱的峰值功率随波长发生变化, 图 2(a)中, 最大峰值功率差为 1.73 dB, 图 2(b)中最大峰值功率差为 5.59 dB, 这可能是由于所使用的 EDFA 的 ASE 光谱的不平坦所引起的^[9]。于是, 将所制梳状滤波器的光功率减去 ASE 的光功率, 得到两个相应的相对传输谱, 如图 4 所示。由图 4 可见, 减去 ASE 的光功率后, 所制梳状滤波器的传输谱的平坦度有了较大的改善,

图 4(a)中最大峰值功率差约为 1.59 dB, 图 4(b)中最大峰值功率差约为 1.66 dB。但是, 从图 4 可以看出, 所制梳状滤波器的传输谱的峰值仍然存在微小的波动。我们推测这是由于在 SMF 与 TCF 的熔接点, 不同波长的光从 SMF 耦合到 TCF 两个芯子中的光功率不同所引起的, 即当光从 SMF 耦合到 TCF 中时, TCF 两个芯子中光功率的大小可能与波长有关。因此, 所制梳状滤波器传输谱的峰值功率随波长发生变化的现象, 可能是所使用的 EDFA 的

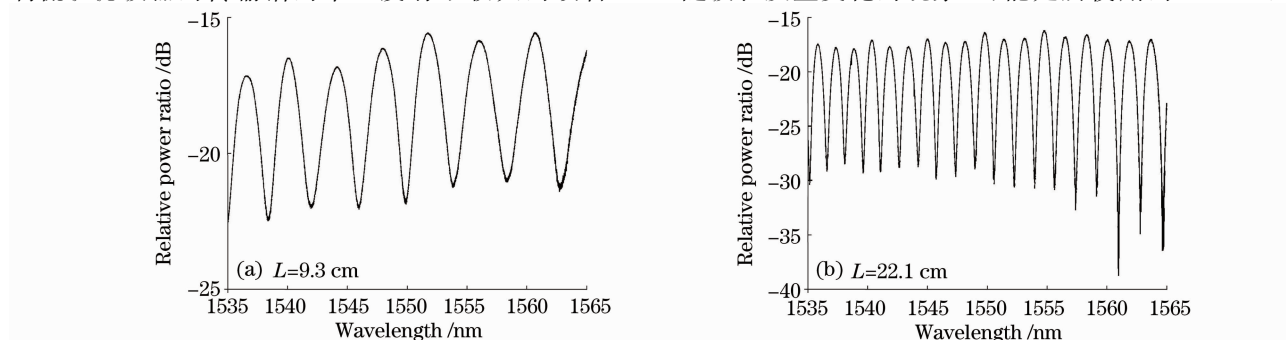


图 4 TCF 长度不同时, 所制梳状滤波器的相对传输谱

Fig. 4 Relative transmission spectra of the fabricated comb-filters with different lengths of TCF

ASE 光谱的不平坦和不同波长的光从 SMF 耦合到 TCF 两个芯子中的光功率不同共同作用的结果。

3.4 消光比

消光比是滤波器的一个重要参数,是滤波器滤波性能的好坏的一个重要指标。由图 2 可知,所制的两个梳状滤波器的消光比不同。图 2(a)所示梳状滤波器的消光比约为 6 dB,图 2(b)所示梳状滤波器的消光比约为 13 dB。推测这主要是由于这两个梳状滤波器中 TCF 的两个芯子间的光功率比不同所引起的。假设在 MZI 型梳状滤波器的一端的 SMF 中输入一归一化功率为 1 的宽带光源,所用的 TCF 的长度为 20 cm,TCF 的两个芯子的有效折射率差为 0.002。因为这里主要关注消光比随 TCF 的两个芯子间光功率比的变化,所以假设 TCF 中两个芯子的有效折射率差不随波长变化。根据(1)式,分别计算出 TCF 的两个芯子间光功率比值不同时梳状滤波器的传输谱,如图 5 所示。由图 5 可以看出,当 TCF 的两个芯子间光功率比为 1 时,传输谱的消光比达到最大,干涉程度最强;当 TCF 的两个芯子间光功率差异越来越大时,传输谱的消光比越来越小,干涉程度减弱;随着 TCF 的两个芯子间光功率差异继续增大,当 TCF 中只有一个芯子有光功率时,传输谱的消光比为 0,干涉现象消失。根据以上分析,基于 TCF 的 MZI 型梳状滤波器的消光比与 TCF 的两个芯子间的光功率比有关。两个芯子间的光功率比为 1 时,该器件的消光比达到最大,随着两个芯子间的光功率差异的增大,该器件的消光比减小。

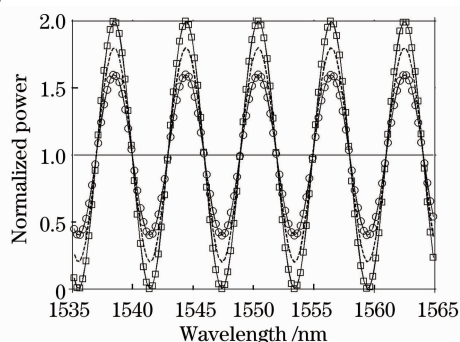


图 5 TCF 中两芯子间光功率比分别为 1(带方框实线)、1:4(虚线)、1:9(带圆圈实线)和 0(实线)时,梳状滤波器的传输谱

Fig. 5 Calculated transmission spectra of the comb-filters with power ratio between two cores in the TCF set to be 1 (solid line with square on it), 1:4(dashed line), 1:9(solid line with circle on it) and 0 (solid line)

4 结 论

将一根单模 TCF 熔接在两根 SMF 之间,实验制得全光纤 MZI 型梳状滤波器。在该梳状滤波器的梳状谱中,某固定波长处,相邻峰值的波长间隔与该波长的平方成正比,与双芯光纤的长度和两纤芯间的有效折射率差的乘积成反比。所制梳状滤波器较高的插入损耗主要是由于 TCF 与 SMF 熔接时,熔接点处的模场失配造成的。通过对该器件的单模光纤与双芯光纤熔接处进行拉锥处理,可以有效降低所制器件的插入损耗。所制梳状滤波器传输谱的峰值功率随波长发生变化的现象,可能是所使用的 EDFA 的 ASE 光谱的不平坦和不同波长的光从 SMF 耦合到 TCF 两个芯子中的光功率不同共同作用的结果。所制梳状滤波器的消光比与 TCF 的两个芯子间光功率比有关,当 TCF 的两个芯子间光功率比为 1 时,消光比达到最大,随着两个芯子间光功率差异的增大,消光比减小。

参 考 文 献

- X. Fang, R. O. Claos. Polarization-independent all-fiber wavelength-division multiplexer based on a Sagnac interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(20): 2146~2148
- D. Chen, S. Qin, S. He. Channel-spacing-tunable multi-wavelength fiber ring laser with hybrid Raman and Erbium-doped fiber gains[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3): 930~935
- Dong Xiaowei, Pei Li, Xu Ou *et al.*. Study of interleaver based on ring resonator assisted Mach-Zehnder interleaver [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 638~642
董小伟,裴丽,许鸥等. 环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 638~642
- Li Weibin, Sun Junqiang. Analysis of characteristics of the interleaver based on a double-coupler resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1191~1194
李卫彬,孙军强. 一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分析 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1191~1194
- Huang Yonglin, Dong Xingfa, Li Jie *et al.*. Research of optical add-drop multiplexer based on Mach-Zehnder interferometer and fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 423~426
黄勇林,董兴法,李杰等. 基于马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅的光分插复用器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 423~426
- Z. Tian, S. S. H. Yam, H. P. Loock. Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(10): 1105~1107
- Y. Rao, M. Deng, De. Duan *et al.*. In-line fiber Fabry-Perot refractive-index tip sensor based on endlessly photonic crystal fiber [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, **148**(7): 33~38
- Q. Li, C. H. Lin, P. Y. Tseng *et al.*. Demonstration of high extinction ratio modal interference in a two-mode fiber and its applications for all-fiber comb filter and high-temperature sensor [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **250**(2): 280~285
- B. Dong, D. Zhou, L. Wei *et al.*. Temperature- and phase-independent lateral force sensor based on a core-offet multi-mode fiber interferometer [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(23):

- 19291~19296
- 10 Libo Yuan, Jun Yang, Zhihai Liu. Two-core fiber based in-fiber integrated interferometers and its sensing applications [C]. Proceeding of the 2007 Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronics Conference, Shanghai, China, SC3. S2. 2, October 2007
- 11 S. Feng, O. Xu, S. Lu *et al.*. Switchable multi-wavelength erbium-doped fiber lasers based on a Mach-Zehnder interferometer using a twin-core fiber[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(6): 064208
- 12 Y. Jung, S. Lee, B. H. Lee *et al.*. Ultracompact in-line broadband Mach-Zehnder interferometer using a composite leaky hollow-optical-fiber waveguide[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(24): 2934~2936
- 13 Y. Li, X. Bao. The observation of comblike transmission spectrum from a tapered single mode fiber tip[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**: 261107
- 14 Libo Yuan, Jun Yang, Zhihai Liu *et al.*. In-fiber integrated Michelson interferometer [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(18): 2692~2694
- 15 S. Feng, H. Li, O. Xu *et al.*. Compact in-fiber Mach-Zehnder interferometer using a twin-core fiber[C]. ACP 2009 Technical Digest, Shanghai, China, FA6, November 2009
- 16 L. Yuan, Z. Liu, J. 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
- 17 Zhu Xiaoliang, Yuan Libo, Liu Zhihai *et al.*. Coupling approach and mechanism of single-core and twin-core fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 913~917
朱晓亮, 苑立波, 刘志海 等. 单芯光纤与双芯光纤的耦合方法与耦合机制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 913~917