

基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器

江微微^{1,2} 赵瑞峰^{1,2} 范林勇^{1,2} 裴 丽^{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 基于失配光纤耦合器的波长特性,从理论上详细分析了两芯间隔 d ,两芯之间的失配度 $\Delta\beta$ 及耦合区长度 z 对其光谱特性的影响。结果表明,当 $\Delta\beta$ 和 d 较小时光纤耦合器可以成为梳状滤波器。 $\Delta\beta$ 主要影响梳状滤波器的消光比, z 和 d 在两芯子匹配的情况下主要影响峰值波长位置和间隔。通过将一根两芯间隔 $d=12\ \mu\text{m}$ 的单模双芯光纤(TCF)的一个芯子熔接在两根单模光纤(SMF)之间,实验制得基于双芯光纤耦合器的全光纤型梳状滤波器,其消光比可达 25 dB,插入损耗为 3.1 dB。通过使用不同长度的 TCF 获得了不同的峰值波长间隔,并使用波长为 248 nm 的紫外光对其峰值波长和消光比进行了调节。

关键词 光纤光学; 双芯光纤耦合器; 梳状滤波器; 消光比; 峰值波长间隔

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0505001

Comb-Filter Based on Twin-Core Fiber Coupler

Jiang Weiwei^{1,2} Zhao Ruifeng^{1,2} Fan Linyong^{1,2} Pei Li^{1,2} Jian Shuisheng^{1,2}

(¹ Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
² Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China)

Abstract Based on the wavelength characteristic of mismatch fiber coupler, the effects of the distance d and the mismatch $\Delta\beta$ between the two cores, the coupling length z on its spectrum characteristics are analyzed theoretically. It is proposed that the fiber coupler can be a comb-filter when $\Delta\beta$ and d are very small. $\Delta\beta$ mainly effects the extinction ratio, d and z mainly effect the interval of the resonant peaks respectively when the two cores are matched. An all-fiber comb-filter based on twin-core fiber coupler is experimentally fabricated by splicing a section of single mode twin-core fiber (TCF) with core center-to-center distance of $12\ \mu\text{m}$ between two single mode fibers (SMFs), and the filter's extinction ratio and insertion loss are 25 dB and 3.1 dB respectively. The interval of the resonant peaks can be changed by using TCF of different lengths, and the peak wavelength and extinction ratio are modulated by ultraviolet light of 248 nm.

Key words fiber optics; twin-core fiber coupler; comb-filter; extinction ratio; interval of the resonant peaks

OCIS codes 060.0060; 060.1810; 060.2280

1 引 言

密集波分复用(DWDM)技术为光纤通信向大容量、高速率发展提供了有效途径,是光纤通信能够真正走向实用和大量占领市场的关键。作为 DWDM 系统中的一种关键器件,能够降低分波器信

道间隔要求的梳状滤波器的滤波性能和价格将对整个系统的性能产生至关重要的影响。目前梳状滤波器的主要类型有晶体双折射型^[1]、马赫-曾德尔(MZ)干涉仪型^[2]、法布里-珀罗干涉滤光片型^[3]和光子晶体型^[4]等。其中全光纤 MZ 型梳状滤波器^[5]

收稿日期: 2010-09-21; **收到修改稿日期**: 2011-02-20

基金项目: 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,主要从事双芯光纤及全光纤型滤波器等方面的研究。

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、光纤有源无源器件及光纤网络等方面的研究。E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

具有结构简单、制作成本低、信道均匀性好、与光纤系统的匹配性好和插入损耗低等优点,成为人们研究的热点之一。

传统的全光纤型 MZ 干涉仪一般是基于 3 dB 光纤耦合器,这种结构实际制作时,除第一个耦合器的分光比可以准确控制外,其余耦合器的分光比由于光的干涉效应而无法实时监测,经常凭经验拉伸,难以制作出高精度的梳状滤波器,需要采用级联等方法对分光比进行精确的监测和控制^[6]。另外,为了提高滤波器的消光比,通常需要调节光的偏振态或在输出端加上反射进行二次干涉的方法^[7~9],大大增加了 MZ 干涉仪设计的难度。近年来,人们又提出了一种基于双芯光纤(TCF)的 MZ 干涉结构^[10]。由于 TCF 结构稳定,因而在构成基于干涉原理的器件方面具有较大的优势。但这种结构的分束与合束是通过将单模光纤(SMF)熔接在 TCF 两个芯子的中间完成的,SMF 中的功率在向 TCF 两个芯子耦合的过程中损失较大,因而导致器件插入损耗较大,文献^[10]报道的插入损耗达到 15 dB,文献^[11]对这种 MZ 干涉仪型梳状滤波器的熔接点进行拔锥处理以降低其插入损耗,但其插入损耗仍高达 7 dB。

本文基于两平行光纤的失配耦合理论^[12,13],分析了光纤耦合器的光谱特性,给出一种基于两芯间隔较小、耦合区较长的光纤耦合器的梳状滤波器结构,并详细分析了光纤的结构参数对其光谱的影响。实验中通过将不同长度的 TCF 其中一个芯子与两个 SMF 熔接,实验制得插入损耗为 3.1 dB、消光比达到 25 dB 的全光纤型梳状滤波器。并使用波长为 248 nm 的紫外光对其进行了峰值波长和消光比的调节。

2 理论分析

2.1 失配光纤耦合理论

在弱导和弱耦合近似下,忽略自耦合效应,在耦合区有模式耦合方程组^[12,13]

$$\begin{cases} \frac{dA_1(z)}{dz} = i\beta_1 A_1(z) + iC_{12} A_2(z) \\ \frac{dA_2(z)}{dz} = i\beta_2 A_2(z) + iC_{21} A_1(z) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $A_1(z), A_2(z)$ 为两光纤的模场振幅, β_1 和 β_2 为两光纤的传输常数, C_{12} 和 C_{21} 为耦合系数,实际近似中有 $C_{12} = C_{21} = C$ 。求解(1)式,可得两光纤输出端口的光功率分别为

$$P_1(z) = |A_1(z)|^2 = 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \quad (2)$$

$$P_2(z) = |A_2(z)|^2 = F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \quad (3)$$

两芯子之间的耦合系数 C 的表达式为

$$C = \frac{(2\Delta)^{1/2} U^2 K_0(Wd/\rho)}{\rho V^3 K_1^2(W)}, \quad (4)$$

式中 Δ 为纤芯和包层之间的折射率差, ρ 为光纤纤芯半径, d 为发生耦合的两光纤之间的距离, U 为纤芯横向传播常数, W 为包层横向衰减常数, V 为光纤归一化频率, U, W, V 都是与波长有关的参数, K_0, K_1 为零阶和一阶修正第二类 Bessel 函数。 F 称为功率因子,其表达式为

$$F = \left[1 + \frac{(\Delta\beta)^2}{4C^2}\right]^{-1/2}, \quad (5)$$

式中 $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ 为两光纤之间的失配度。图 1 首先给出 d 分别为 15, 20 和 25 μm 时耦合系数 C 的波长特性。可以看出,波长越长, C 值越大,越利于两个芯子之间的耦合。另外从(2),(3)式可知, F 也是一个很重要的参数,以二次方形式决定耦合器输出功率幅值,表明功率幅值对光波长的依赖关系。结合(4),(5)式,失配度越小, F 系数越大;纤芯间隔 d 越小,耦合系数 C 越大, F 系数越大。其与 d 和两芯失配度关系如图 2(a),(b)所示。图 2(a)中 $\Delta\beta = 6.5 \times 10^{-4}$, d 分别为 20, 25 和 30 μm ;图 2(b)中 $d = 15 \mu\text{m}$, $\Delta\beta$ 分别为 $3.2 \times 10^{-4}, 6.5 \times 10^{-4}, 9.9 \times 10^{-4}$ 。从图 2 可以看出, d 越小, $\Delta\beta$ 越小(即两芯子越匹配), F 系数越大,两芯之间参与耦合的功率越多,耦合效果越好。在(2),(3)式中,由于参数 C 和 F 都是波长的函数,因此光纤耦合器输出功率不仅相对于耦合长度 z 是 \sin 函数形状的梳状光谱,其相对于波长也是 \sin 函数形状的梳状光谱,即光纤耦合器有成为梳状滤波器的潜力。由于这种梳状滤波是基于两个芯子之间的耦合的, C 越大, F 越大,越利于梳状滤波光谱的形成。

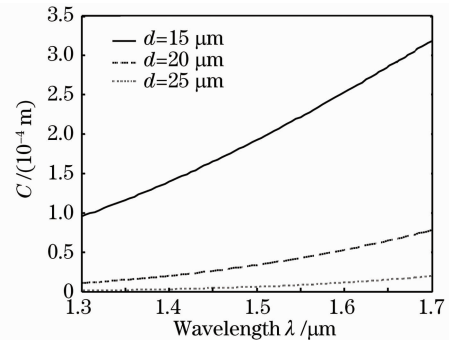
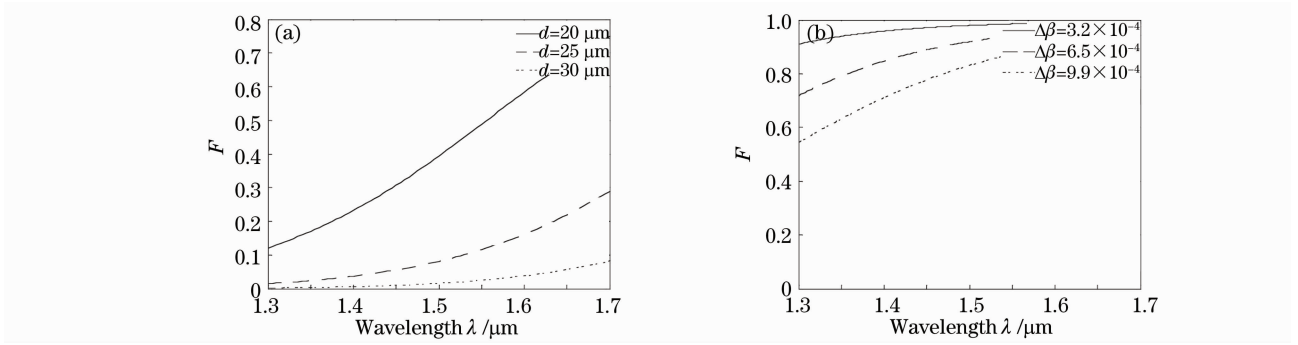


图 1 不同纤芯间隔 d 时的耦合系数
Fig. 1 Coupling coefficient of different core distances

图2 (a)不同纤芯间隔 d 时的 F 系数, (b)不同失配度 $\Delta\beta$ 时的 F 系数Fig. 2 (a) F coefficient of different core distances, (b) F coefficient of different mismatches

2.2 梳状滤波器的光谱特性

从(2),(3)式可知,耦合器的输出特性直接取决于 C, F 和耦合器长度 z ,但从根本上取决于光纤参数 $\Delta\beta, d$ 和 z 。图3给出了输出功率随 $\Delta\beta$ 的变化,其中 $d=15 \mu\text{m}, z=8 \text{ cm}$,失配度分别为 $9.9 \times 10^{-4}, 6.5 \times 10^{-4}$ 和 0。可以看出,失配度越小,梳状滤波器的消光比越高。这是因为失配度的变化导致两个芯子之间的耦合发生变化,因而导致消光比发生变化。以下将主要分析 $\Delta\beta=0$ 的情况,这时 $F=1$,分光比定义为在只有一个光波导输入的条件下耦合端输出功率与总输入功率之比,因而可表示为

$$R(\lambda) = \sin^2(Cz). \quad (6)$$

定义分光比随波长变化曲线的斜率为波长灵敏度^[14],

$$\frac{dR(\lambda)}{d\lambda} = \cos(2Cz)z \frac{dC}{d\lambda}, \quad (7)$$

耦合器光谱的峰值波长发生在满足公式

$$Cz = \frac{m\pi}{2} \quad (8)$$

的波长处。

图4给出输出功率随 d 和 z 的变化。图4(a)

中 $z=20 \text{ cm}, d$ 分别为 $15 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$,结合图1可知, d 越小, C 越大,由(5)式中的 \sin 函数可知梳状滤波器的峰值波长间隔越小;图4(b)中 $d=15 \mu\text{m}, z$ 分别为 8 cm 和 20 cm ,可以看出,随着 z 的增大,峰值波长间隔减小,这也可以由(5)式中 \sin 函数得到理解。综合以上的数值分析,光纤耦合器要想作为梳状滤波器,除了两芯子之间必须尽量匹配,还要求芯距较小和耦合区较长,这对于由两根 SMF 制作的光纤耦合器是无法达到的,必须通过双芯光纤来实现。

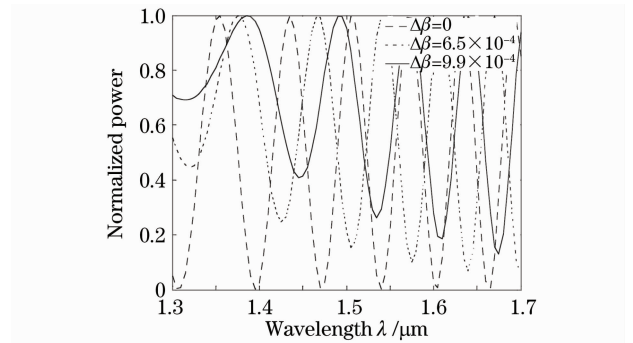
图3 不同失配度 $\Delta\beta$ 时的光谱响应

Fig. 3 Spectra response of different mismatches

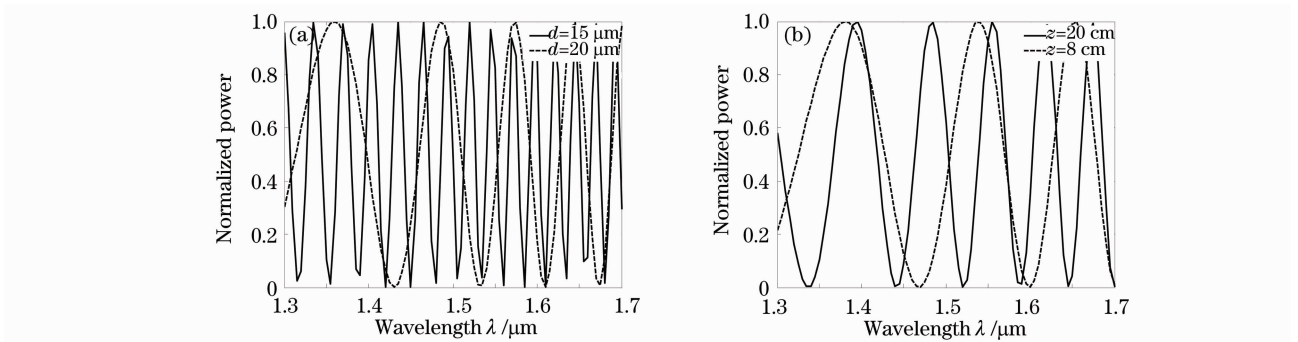
图4 (a)不同纤芯间隔 d 时的光谱响应, (b)不同间隔耦合区长度 z 时的光谱响应

Fig. 4 (a) Spectra response of different core distances, (b) spectra response of different coupling lengths

3 实验研究

3.1 实验制作

首先制作 TCF,由理论分析可知对 TCF 的要求是两芯子之间有较强的耦合。实验制作时设计芯距为 $12\ \mu\text{m}$,外径为 $125\ \mu\text{m}$ 。使用的预制棒石英纯度约为 95%,而用于填充的高纯石英芯棒芯包比为 1:2,当将纤芯拉丝成满足单模条件的 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 的尺寸时,有效包层仅为 $16\sim 20\ \mu\text{m}$,对光场的束缚能力较弱,从而增强两芯子之间的耦合,其横截面如图 5(a)所示。实验中制作的基于 TCF 耦合器的梳状滤波器的结构如图 5(b)所示,将一根长度为 L 的

TCF 其中一个芯子的两端与 SMF 熔接,两段 SMF 分别连接宽带光源和光谱仪(OSA)作为光源和监测设备。实验结果如图 6 所示,图 6(a)是 TCF 长 28 cm 时得到的波长响应光谱,插入损耗约为 6 dB,消光比约为 25 dB,1550 nm 处峰值波长间隔约为 15 nm。滤波器的插入损耗主要源于 SMF 与 TCF 一个芯子的熔接损耗,可以通过优化熔接参数使其得到改善。图 6(b)是长为 18 cm 的 TCF 在优化熔接参数后得到的光谱,插入损耗约为 3.1 dB,消光比约为 25 dB,1550 nm 处峰值波长间隔约为 23 nm。

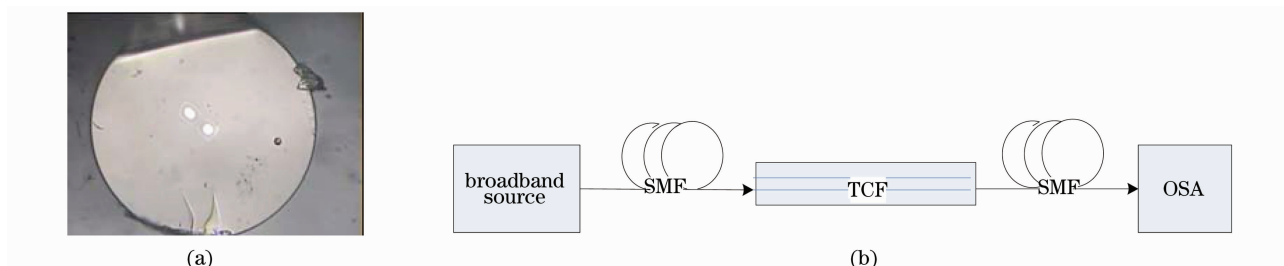


图 5 (a)实验中所用双芯光纤横截面图,(b)基于双芯光纤耦合器的梳状滤波器结构

Fig. 5 (a) Cross section of the TCF used in the experiment, (b) configuration of comb filter based on two core fiber couplers

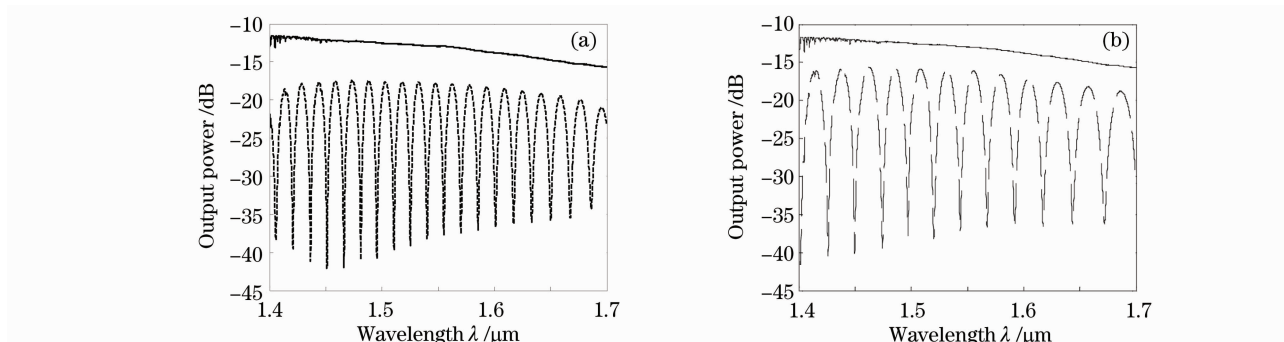


图 6 (a)TCF 长度为 28 cm 时的光谱响应,(b) TCF 长度为 18 cm 时的光谱响应

Fig. 6 (a) Spectrum response of 28 cm TCF, (b) spectrum response of 18 cm TCF

3.2 梳状滤波器光谱的紫外调节

为使滤波器的谐振波长满足实际应用要求,必须对其进行波长调节,目前广泛使用的是紫外曝光的方法^[15,16],即具有光敏性的光纤在紫外光的照射下折射率发生永久性改变的现象。首先将 TCF 在氢气室中氢载两周使其具有光敏性,然后两端熔接 SMF 制成梳状滤波器。所使用的紫外光波长为 248 nm,频率为 10 Hz,功率为 80 mJ。将 TCF 剥去涂敷后置于高精度移动平台上,由移动平台带动 TCF 进行紫外曝光,平台移动速度 0.05 mm/s。图 7 是沿 TCF 轴向曝光 1 cm 和 3 cm 的实验结果。可以看出,曝光 1 cm 和 3 cm 在 1550 nm 处分别使

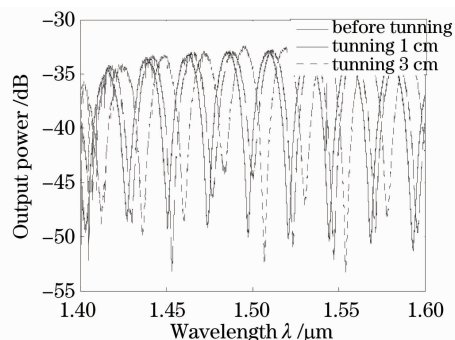


图 7 TCF 在紫外光调节 1 cm 和 3 cm 时的光谱响应

Fig. 7 TCF's spectra response of tuning length 1 cm and 3 cm with ultraviolet light

光谱向长波方向漂移了 3 nm 和 10 nm,同时部分波长的消光比也发生了变化。这是因为紫外曝光使芯子折射率增加,从而使两芯子之间的耦合系数减小。由图 1 可知,相同参数下长波较短波处耦合系数大,因此当外界条件导致 C 变小时,需要更长的波长来满足(7)式,因而紫外曝光的结果是导致光谱响应向长波处漂移。另外,紫外曝光改变了两芯子之间的耦合,因而使部分波长的消光比发生变化。

4 结 论

基于光纤的失配耦合理论的波长特性,从理论上分析了基于光纤耦合器的梳状滤波器的光谱特性。实验中通过将不同长度的 TCF 其中一个芯子与两个 SMF 熔接制作了不同峰值波长间隔的梳状滤波器,其消光比可以达到 25 dB,插入损耗为 3.1 dB。使用波长为 248 nm 的紫外激光对其进行调节,由于紫外曝光使芯子折射率增加,这种调节会使响应光谱向长波方向漂移,同时部分波长的消光比也可能发生变化。

参 考 文 献

- Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu. A tunable interleaver filter based on analog birefringent units [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**(4-6): 283~294
- Zhang Qiang, Huang Dexiu, Zhang Xinliang *et al.*. Ring and phase assisted Mach-Zehnder modulator for radio-over-fiber system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2194~2199
张强,黄德修,张新亮等.用于光纤无线通讯的微环相位辅助型马赫-曾德尔调制器[J].*光学学报*, 2007, **27**(12): 2194~2199
- Qing Ye, Ronghui Qu, Zujie Fang. Generation of millimeter-wave sub-carrier optical pulse by using a Fabry-Perot interferometer[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1): 8~10
- Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua *et al.*. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multiplayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1695~1699
张文富,方强,程益华等.正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J].*光学学报*, 2007, **27**(9): 1695~1699
- Feng Dejun, Kai Guiyun, Liu Zhiguo *et al.*. Study of all-fiber reflected Mach-Zehnder interferometric multi-wavelength filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 332~335
- 冯德军,开桂云,刘志国等.全光纤反射式马赫-曾德尔干涉型多波长滤波器的研究[J].*光学学报*, 2002, **22**(3): 332~335
- Lu Huaiwei, Zhang Yu'e, Luo Guanwei. Flat-top interleaver of cascaded MZ interferometer with 2×2 and 3×3 fiber couplers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(7): 1021~1025
鲁怀伟,张玉娥,罗冠玮.基于 2×2 和 3×3 耦合器的级联马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器[J].*光学精密工程*, 2007, **15**(7): 1021~1025
- Aiping Luo, Zhichao Luo, Wencheng Xu *et al.*. Wavelength switchable flat-top all-fiber comb filter based on a double-loop Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 6056~6063
- Li Jie, Huang Yonglin, Kai Guiyun *et al.*. Study of extinction ratio of Mach-Zehnder interferometer and implementation of single-channel optical switch [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 916~919
李杰,黄勇林,开桂云等.马赫-曾德尔干涉仪消光比和单通道光开关[J].*光学学报*, 2003, **23**(8): 916~919
- Yonglin Huang, Jie Li, Guiyun Kai *et al.*. High extinction ratio multiplexer/demultiplexer with a Mach-Zehnder interferometer and a fiber loop mirror [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(2): 63~64
- Suchun Feng, Honglei Li, Ou Xu *et al.*. Compact in-fiber Mach-Zehnder interferometer using a twin-core fiber[C]. ACP 2009 Technical Digest, Shanghai, FA6
- Fan Linyong, Jiang Weiwei, Zhao Ruifeng *et al.*. Temperature characteristic of in-fiber Mach-Zehnder interferometer using twin-core fiber[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(1): 1~8
范林勇,江微微,赵瑞峰等.双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪的温度特性[J].*光学精密工程*, 2011, **19**(1): 1~8
- Allan W. Snyder, Adrian Ankiewicz. Optical fiber couplers-optimum solution for unequal cores[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **6**(3): 463~474
- Zhang Ruifeng, Ge Chunfeng, Wang Shuhui *et al.*. Fused biconical taper all-wave coupler[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(2): 390~394
张瑞峰,葛春峰,王书慧等.熔锥型全波耦合器[J].*物理学报*, 2003, **52**(2): 390~394
- Liu Chunyu, Ye Hong'an, Cao Xue. Fiber coupler sensitive to wavelength used to demodulate wavelength shift of fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1623~1626
柳春郁,叶红安,曹雪.用于光纤光栅解调的波长敏感光纤耦合器[J].*光学学报*, 2006, **26**(11): 1623~1626
- S. J. Ashby, R. B. Charters, J. D. Love *et al.*. Large wavelength shifts in UV-exposed 3 dB and WDM fused taper fibre couplers[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(20): 1696~1697
- G. R. Atkins, J. W. Arkwright, S. J. Hewlett. UV tuning of coupling in twin-core optical fibres [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(25): 2165~2166