

文章编号: 0258-7025(2010)06-1537-05

熔锥法制作光纤光栅辅助型窄带 上下话路滤波器

江微微^{1,2} 李 坚^{1,2,3} 赵瑞峰^{1,2} 卫 延^{1,2} 董小伟^{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
³ 铁道科学研究院通信信号研究所, 北京 100081

摘要 在失配光纤耦合器的一个光纤上写入布拉格光栅构成的光栅辅助耦合器, 对光栅处于耦合区中的位置不敏感, 性能稳定, 具有非干涉型器件的优点。通过改进的熔融拉锥工艺, 利用康宁 SMF-28 和光敏光纤制作了具有均匀耦合区的耦合器, 使用波长为 248 nm 的紫外激光在均匀耦合区的光敏光纤上写入布拉格光栅, 实验获得了最大反射率为 15 dB, 透射深度 4 dB, 带宽为 0.1 nm 的窄带光栅辅助耦合器, 能够满足密集波分复用 (DWDM) 系统的需求; 并详细地分析了耦合区非均匀性对下话路特性的影响; 将制成的器件在 10 Gb/s 的光纤传输系统中进行下话路测试, 比较背靠背眼图与使用光栅辅助耦合器下话路后的眼图, 结果表明其具有很好的滤波性能。

关键词 光纤光栅; 光纤光栅辅助耦合器; 熔融拉锥; 滤波响应

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1537

Narrow Bandwidth Add/Drop Channel Filter Based on Fiber Bragg Grating Assisted Coupler Fabricated by Fused Taper Technology

Jiang Weiwei^{1,2} Li Jian^{1,2,3} Zhao Ruifeng^{1,2} Wei Yan^{1,2}
Dong Xiaowei^{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 & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

³ Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China

Abstract Grating assisted coupler which consists of a mismatched coupler with a Bragg grating written in only one core over the coupling region is a kind of non-interference device, so it is stable in performance and doesn't depend on the position of the grating in the coupler region. A coupler with uniform coupling region making of SMF-28 and photoconductive fiber is fabricated by improved fused taper technology, then a Bragg grating is written in the coupling region with 248 nm ultraviolet laser, and a narrow bandwidth grating assisted coupler with maximum about reflectivity 15 dB, transmission 4 dB and bandwidth 0.1 nm is achieved to satisfy the dense wavelength division multiplexing (DWDM) system; The effect of the uniformity of coupler on the response is studied; Its filter performance is tested in the 10 Gb/s fiber optic transmission system, and the results show that the device has good performance.

Key words fiber grating; fiber grating assisted coupler; fused taper; filter spectra

收稿日期: 2009-09-11; 收到修改稿日期: 2009-09-29

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, 主要从事光无源复用/解复用器件方面的研究。

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

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,具有波长选择能力的光上下话路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。光纤光栅耦合器型滤波器综合了光纤耦合器的多端口特性和光纤光栅良好的波长选择性特点,形成了低成本的新型全光纤上下话路滤波器^[1]。按光栅在耦合器的耦合区作用的不同,光栅耦合器型滤波器可以分为3种:光栅破坏耦合器^[2]、光栅反射耦合器^[3,4]及光栅辅助耦合器^[5,6]。其中在失配光纤耦合器的一个纤芯中写入布拉格光栅制成的光栅辅助耦合器,对光栅处于耦合区中的位置不敏感,性能更加稳定,具有非干涉型器件的优点^[7],是DWDM系统中解复用器的极佳选择。

目前这类器件的制作主要采用研磨抛光法^[2,5]、双芯光纤法^[8]和熔融拉锥法^[6,7,9]等方法。研磨法耗时长,并且在工艺上很难实现两个研磨后D型面光纤光栅的精确对准;双芯光纤的制作比较简单,但将其4个端口引出比较困难;熔融拉锥法工艺简单,操作容易,可重复性好,是一种制作光纤耦合器较为理想的方法。但传统的商用耦合器制作设备是对两个光纤的扭绞点进行定点加热^[10~12],其拉锥强度很大并且很脆弱,在紫外光写入光栅时很容易发生断裂;并且由于其耦合区呈锥形,传输常数沿锥区变化^[13,14],所以即使使用均匀布拉格光栅掩模板,也会造成类似啁啾光栅写入的效果^[15],从而增大了下话路带宽。本文采用改进的熔融工艺,制作了耦合区均匀性较好的耦合器,然后使用相位掩模法在耦合区写入布拉格光栅。

2 器件的工作原理

光栅辅助耦合器的结构如图1所示,即在构成

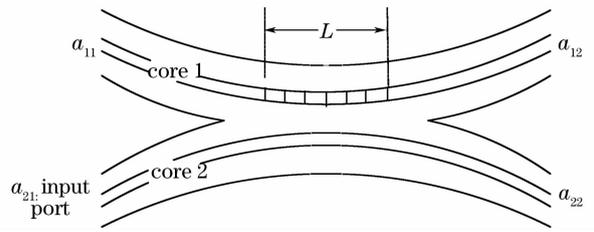


图 1 光纤光栅辅助耦合器结构示意图

Fig. 1 Schematic of fiber grating assisted coupler
耦合器耦合区的两失配光纤(即两个光纤的传输常数不同)中的一个纤芯上写入长度为L的布拉格光栅。假设多波长复用信号从a₂₁端口输入,由于两光纤失配,功率不会从a₂₁端口耦合到a₁₂端口,但由于布拉格光栅的存在,当相位匹配条件β₁(λ₁₂) + β₂(λ₁₂) = 2π/Λ满足时,将在a₁₁端口对波长λ₁₂的信号实现有效的下话路^[5],其他波长从a₂₂端口透射输出;而当波长为λ₁₂的上话路信号从a₁₂端口输入时,在光栅的辅助耦合作用下λ₁₂信号将从a₂₂端口输出,完成上话路功能。

目前对于光纤光栅耦合器型滤波器的理论分析主要有3种:普通耦合模理论^[4]、耦合超模理论^[16]和统一耦合模理论^[7,17]。普通耦合模理论在由导模变成包层模的耦合区是无效的;耦合超模理论在考虑布拉格光栅引起的反射和耦合作用的同时没有考虑耦合器本身的耦合作用。对图1所示的写入光栅的复合双芯光纤结构,在弱导和弱耦合近似下,同时考虑到由光栅折射率调制引起的耦合和由光纤消逝场引起的耦合,各个端口的输出特性可由统一耦合方程组描述^[7,17]

$$\frac{d\mathbf{V}}{dz} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{V},$$

式中 $\mathbf{V} = [g_{1+}(z), g_{1-}(z), g_{2+}(z), g_{2-}(z)]^T$, $g_{i+}(z), g_{i-}(z)$ 为纤芯*i*(*i* = 1, 2)中前向和反向的慢变振幅, $M = \frac{1}{1 - N_{12}^2}$, $N_{12} = \int_{\infty} \psi_1 \psi_2 dA$ 为纤芯1, 2中光场在无穷大横截面上的交叠积分,

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} -(C_{11} - N_{12}C_{12}) & -\left(\frac{K_{11} - N_{12}K_{12}}{2}\right)\exp(j\delta_1 z) & -(C_{21} - N_{12}C_{22})\exp(j\Delta\beta z) & -\left(\frac{K_{21} - N_{12}K_{22}}{2}\right)\exp(j\delta_{12} z) \\ \left(\frac{K_{11} - N_{12}K_{12}}{2}\right)\exp(-j\delta_1 z) & C_{11} - N_{12}C_{12} & \left(\frac{K_{21} - N_{12}K_{22}}{2}\right)\exp(-j\delta_{12} z) & (C_{21} - N_{12}C_{22})\exp(-j\Delta\beta z) \\ -(C_{12} - N_{12}C_{11})\exp(-j\Delta\beta z) & -\left(\frac{K_{12} - N_{12}K_{11}}{2}\right)\exp(j\delta_{12} z) & -(C_{22} - N_{12}C_{21}) & -\left(\frac{K_{22} - N_{12}K_{21}}{2}\right)\exp(j\delta_2 z) \\ \left(\frac{K_{12} - N_{12}K_{11}}{2}\right)\exp(-j\delta_{12} z) & (C_{12} - N_{12}C_{11})\exp(j\Delta\beta z) & \left(\frac{K_{22} - N_{12}K_{21}}{2}\right)\exp(-j\delta_2 z) & C_{22} - N_{12}C_{21} \end{bmatrix},$$

其中 $C_{ij}, K_{ij} (i, j = 1, 2)$ 分别为光纤间的消逝场引起的耦合系数和光栅的折射率调制引起的耦合系数; $\delta_1 = 2\beta_1 - (2\pi/\Lambda), \delta_2 = 2\beta_2 - (2\pi/\Lambda), \delta_{12} = \beta_1 + \beta_2 - (2\pi/\Lambda), \Delta\beta = \beta_1 - \beta_2, \beta_i$ 为纤芯 i 中的传输常数 ($i = 1, 2$), Λ 为光栅周期。数值分析时采用打靶法结合 Broyden 迭代求解耦合方程组^[18], 即可得到耦合器各个端口的输出特性。

3 器件的实验研究

3.1 光栅辅助耦合器的实验制作

实验过程中首先制作光纤失配耦合器, 耦合器的制作采用康宁 SMF-28 和实验室自行制作的光敏光纤, 这样可以保证构成耦合器的两个光纤之间具有一定的失配度; 然后使用相位掩模法在所制作的耦合器的耦合区写入布拉格光栅。熔融拉锥法是一种制作光纤耦合器较为普遍的方法, 但传统的商用熔锥机是对两光纤的绞扭点进行定点加热, 因此制作出来的耦合器耦合区呈锥形, 两光纤绞扭, 易断裂, 其结果如图 2 所示, 其中图 2(a) 为高倍显微镜下观察到的呈锥形变化的耦合区; 图 2(b) 为观察到的两光纤在耦合区的绞扭现象。为制作出耦合区均匀性较好的耦合器, 自主设计了一套高精度熔融拉锥设备。首先通过高分辨率显微镜的实时监控确保两光纤平行紧贴固定于耦合平台上, 如图 3(a) 所示; 制作过程中使用实验室自主设计的具有宽均匀加热区的氢氧焰喷灯作为加热源; 通过电机移动对光纤施加纵向拉力, 同时缓慢移动喷灯, 从而完成耦合器的制作。实验过程中, 电机移动速度和氢气流量对耦合区的均匀性有重要影响^[10]。通过优化氢气流量和电机速度, 从而制作出耦合区长度和均匀性满足要求的光纤耦合器, 如图 3(b) 所示。由于耦合区两光纤是平行的, 不存在相交, 均匀性较好, 因

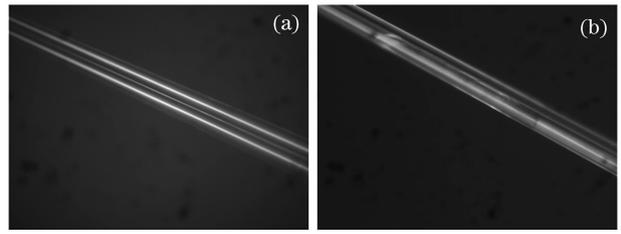


图 2 (a) 呈锥形变化的耦合区; (b) 光纤在耦合区的绞扭现象

Fig. 2 (a) Coupling region with taper variation; (b) two fibers twisted in the coupling region

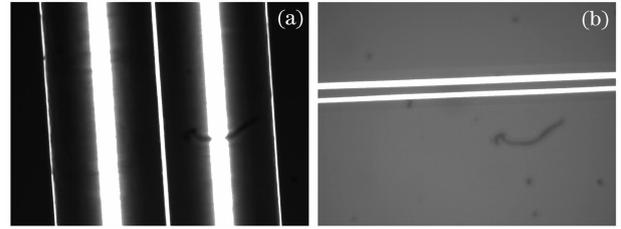


图 3 耦合区两光纤平行放置示意图

(a) 熔锥前; (b) 熔锥后

Fig. 3 Schematic of two parallel fibers placed in the coupling region. (a) before fusing taper; (b) after fusing taper

而可以保证在光栅写入后得到均匀布拉格光栅的写入效果。

在光栅写入之前, 将耦合器耦合区与掩模板平行放置, 并将光敏光纤与掩模板临近, 从而保证紫外光只在光敏光纤上实现折射率调制, 而没有光敏性的普通单模光纤则不受影响。光栅写入过程中使用的是 KrF 准分子激光器, 输出波长为 248 nm, 输出能量为 80 mJ, 掩模板的周期为 537 nm, 光栅长度为 30 mm。制作过程中使用分辨率为 0.01 nm 的 ANDO AQ6317C 光谱仪实时监测下话路端口的输出情况。图 4(a) 为制作的光栅辅助耦合器的下话路滤波光谱, 图 4(b) 为其透射光谱。从图 4(a) 可以

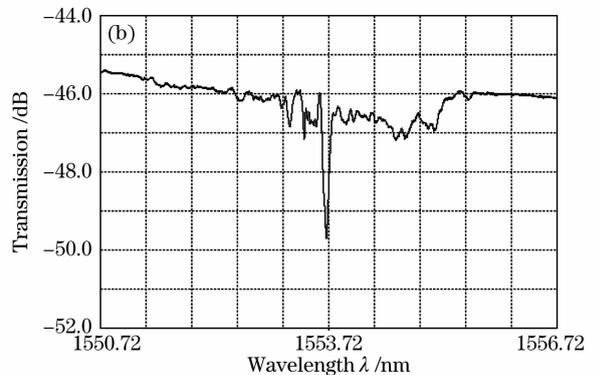
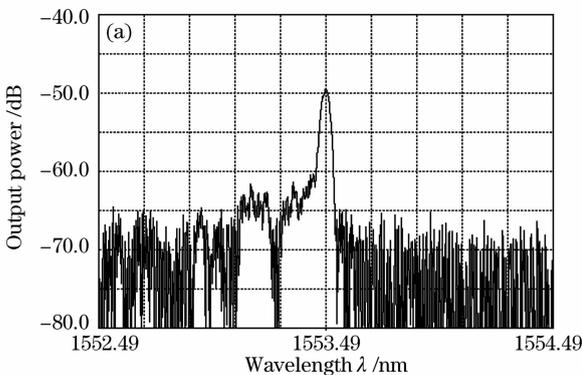


图 4 光栅辅助耦合器滤波响应。(a) 下话路滤波响应; (b) 透射端口响应

Fig. 4 Filter spectra of grating assisted coupler. (a) drop channel filter spectra; (b) transmission filter spectra

看出,其下话路光谱比较平滑,反射率为15 dB,并且由于耦合区比较均匀,下话路光谱不存在展宽现象,与文献[6]中得到的0.3 nm的带宽、文献[7]中得到的0.4 nm的带宽、文献[9]中得到的1 nm的带宽相比,实验获得的低至0.1 nm的带宽更适合 DWDM 系统使用;另外,从图 4(b)可以看出,其透射深度为 4 dB,器件的透射深度较低,这是因为在使用熔锥法制作耦合器的过程中,为获得均匀的耦合区,将耦合区做得较长,从而导致耦合器本身的损耗较大。后续的实验将进行降低插入损耗的工作。

3.2 熔锥区非均匀性的影响

在器件的制作过程中,光纤耦合器耦合区的均匀性直接决定下话路滤波特性的好坏。图 5(a)是在与图 4 取相同的光栅参数下将光栅写入传统熔锥

方法制作的耦合器的耦合区,可以看出,由于熔锥区不均匀,下话路带宽达到3 nm,反射率约为10 dB;图 5(b)是在将光栅写入改进熔锥方法制作的耦合器的耦合区边缘,其下话路带宽为2 nm,反射率约为10dB。从图 5(a),(b)可知,耦合区对器件的影响来自两方面,一方面是在耦合器的制作过程中由于拉锥或加热不均匀所造成的耦合区不均匀,如图 5(a)所示;另一方面是将光栅写入了熔融拉锥程度逐渐降低的耦合区边缘,如图 5(b)所示。这两种情况都会使消逝场耦合系数形成一种类似啁啾的效果,导致下话路光谱带宽增大。因此改进熔融拉锥技术,提高耦合区的均匀性对于制作高质量的光栅辅助耦合器是非常重要的。

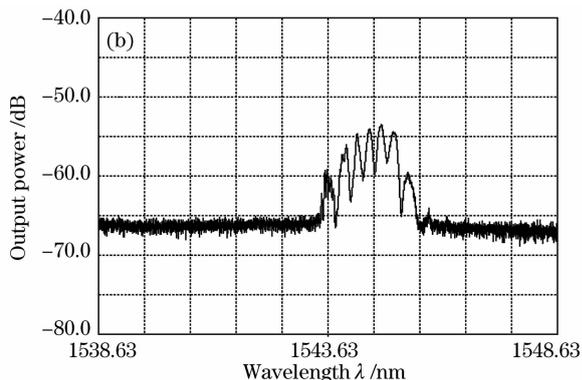
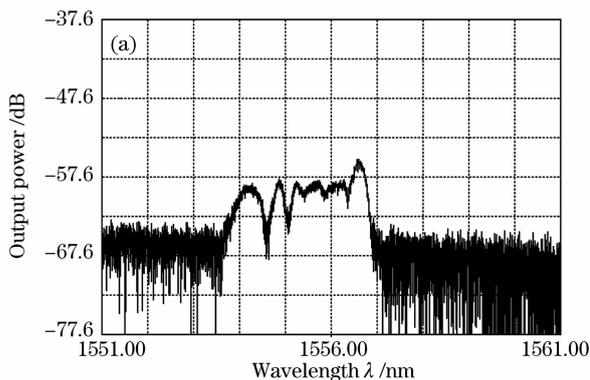


图 5 光栅写在非均匀耦合区时的下话路滤波响应

(a) 光栅写入锥形耦合区;(b) 光栅写入均匀耦合区锥形变化边缘

Fig. 5 Drop channel filter spectra with grating written in the uniformity coupling region. (a) grating written in the taper coupling region; (b) grating written in the taper edge of the uniform coupling region

3.3 光栅辅助耦合器下话路特性测试

为了验证所制作器件的实用性,将其在光纤传输系统中简单地进行了下话路测试。传输光路图如图 6 所示,其中 TL 为型号 Agilent8146A 的可调谐激光器,oscilloscope 为型号 Agilent86100B 的示波器。GAC 为光栅辅助耦合器,调制器 MD 和掺铒光纤放大器 EDFA 均为实验室自行制作。使用的是 10 Gb/s 的非归零(NRZ)信号,将可调谐激光器调至器件的下话路波长,分别进行了背靠背(没有接入 EDFA 及 GAC)测试和接入光栅辅助耦合器的下话



图 6 使用光栅辅助耦合器下话路的光纤传输系统示意图

Fig. 6 Schematic of fiber optic transmission system with grating assisted coupler as a drop channel filter

路测试。比较两种测试下的眼图(图 7),消光比损失了 0.76 dB,这主要是由 GAC 本身的插入损耗造成的;信噪比由 8.97 变为 4.12,这主要是由 EDFA 的噪声引起的。经 GAC 下话路后的眼图眼皮厚度很小,没有产生眼图的畸变,获得了较好的下话路效果。

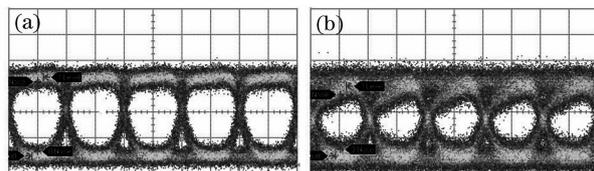


图 7 光栅辅助耦合器下话路测试。(a) 背靠背眼图;(b) 使用光栅辅助耦合器下话路的眼图

Fig. 7 Drop channel test of grating assisted coupler. (a) back-to-back eye diagram; (b) eye diagram with grating assisted coupler as a drop channel filter

4 结 论

使用改进的熔融拉锥法制作了耦合区比较均匀的光纤耦合器,由于耦合区比较均匀,与已有报道的实验结果相比,使用此耦合器制作的窄带光栅辅助耦合器的带宽可低至0.1 nm,器件下话路滤波特性较好,非常适合 DWDM 系统使用。将所制作的器件在10 Gb/s的光纤传输系统进行下话路测试,获得了较好的眼图结果。因此,改进熔锥技术,提高耦合区的均匀性对改善光栅辅助耦合器的滤波特性是非常重要的。

参 考 文 献

- Cai Haiwen, Luo Aiping, Chen Gaoting *et al.*. Fiber grating filters writing in fiber coupler [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(9):979~982
蔡海文,罗爱平,陈高庭等. 光纤耦合器型光纤光栅滤波器[J]. *光子 • 激光*, 2002, **13**(9):979~982
- J. L. Archambault, P. St. J. Russell, S. Bachelos *et al.*. Grating-frustrated coupler: a novel channel dropping filter in single-mode optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3):180~182
- Ingolf Baumann, Joachim Seifert, Walter Now *et al.*. Compact all-fiber add-drop-multiplexer using fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(10):1331~1333
- S. Sergei, Orlov Amnon Yariv, Scott Van Essen. Coupled-mode analysis of fiber-optic add/drop filters for dense wavelength-division multiplexing [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10):688~690
- L. Dong, P. Hua, T. A. Birks *et al.*. Novel add/drop filters multiplexing optical for wavelength division fiber systems using a Bragg grating assisted mismatch coupler [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(12):1656~1658
- Beatriz Ortega, Liang Dong, Laurence Reekie. All-fiber optical add-drop multiplexer based on a selective fused coupler and a single fiber Bragg grating [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(33):7712~7717
- Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Add/drop channel filter based on fiber Bragg grating assisted coupler fabricated by asymmetric fused taper technology [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(9):4739~4742
董小伟,裴丽,简水生. 非对称熔锥法制作光纤光栅辅助耦合器型上下话路滤波器[J]. *物理学报*, 2006, **55**(9):4739~4742
- Honglin An, Brian Ashton, Simon Fleming. Long-period-grating-assisted optical add-drop filter based on mismatched twin-core photosensitive-cladding fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(4):343~345
- Luo Aiping, Emmanuel Marin, Jean-Pierre Meunier *et al.*. All-fiber wavelength selective filter based on UV-written Bragg grating in conventional fused coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1491~1494
罗爱平, Emmanuel Marin, Jean-Pierre Meunier 等. 光纤耦合器上写入光栅制作滤波器的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1491~1494
- Shuai Cijun, Duan Ji'an, Cai Guohua. Research on morphology and microstructure in the taper region of fused fiber devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):121~125
帅词俊,段吉安,蔡国华. 熔融光纤器件熔锥区的形貌和微观结构研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1):121~125
- 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
- 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,葛春风,王书慧等. 熔锥型全波耦合器[J]. *物理学报*, 2003, **52**(2):390~394
- Kwang Yong Song, Byong Yoon Kim. Broad-band LP02 mode excitation using a fused-type mode-selective coupler [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(12):1734~1736
- Kwang Yong Song, In Kag Hwang, Seok Hyun Yun *et al.*. High performance fused-type mode-selective coupler using elliptical core two-mode fiber at 1550 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(4):501~503
- Dong Xiaowei, Xu Ou, Lu Shaohua *et al.*. Design and experiment of add/drop filter based on double-fiber-Bragg-gratings coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1106~1109
董小伟,许鸥,鲁韶华等. 双光栅耦合器型上下话路滤波器的设计和实验[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1106~1109
- E. Marin, R. Ghosh, S. Lacroix *et al.*. Bragg grating effects in optical fiber couplers calculated by coupled supermode theory [C]. *SPIE*, 1998, **3542**:32~42
- Jiang Weiwei, Li Jian, Zhao Ruifeng *et al.*. Analysis of fiber grating filters writing in fiber coupler by employing the unified coupled-mode theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3):644~649
江微微,李坚,赵瑞峰等. 用统一耦合模理论分析光纤光栅耦合器型滤波器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3):644~649
- Li Jian. Study on photosensitive erbium doped fibers and Bragg grating-assisted coupler for add/drop filters [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. 95~96
李坚. 光敏掺铒光纤和光纤布拉格光栅辅助耦合器型上下话路滤波器的研制[D]. 北京:北京交通大学, 2009. 95~96