

文章编号: 0258-7025(2004)12-1491-04

光纤耦合器上写入光栅制作滤波器的实验研究

罗爱平¹, Emmanuel Marin², Jean-Pierre Meunier², 瞿荣辉¹, 方祖捷¹

¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800
² Laboratoire TSI, UMR CNRS 5516 Bat F, 10 Rue Barrouin, 42000 Saint-Etienne Cedex 2, France

摘要 全光纤波长选择滤波器是光纤通信系统中的重要器件, 其中将光栅写在光纤耦合器的耦合区上构成的波长选择滤波器结构紧凑、插入损耗小、费用低。报道了采用波长为 244 nm 的紫外光在由康宁 SMF-28 光纤熔融拉锥制作的 2×2 3 dB 耦合器上写入光栅的实验, 在耦合器熔锥区的适当位置写入一定长度的布拉格光栅, 可以实现全光纤多端口波长选择滤波器。实验中获得了最大反射率约为 20 dB, 线宽大于 1 nm 的滤波器, 并采用超模理论对实验结果进行了定性分析。要获得高的下载效率, 必须仔细控制写入光栅的位置和平移台的移动速度。

关键词 光纤光学; 熔锥型光纤耦合器; 布拉格光栅; 滤波器; 超模

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

All-Fiber Wavelength Selective Filter Based on UV-Written Bragg Grating in Conventional Fused Coupler

LUO Ai-ping¹, Emmanuel Marin², Jean-Pierre Meunier², QU Rong-hui¹, FANG Zu-jie¹

¹ Laboratory of Information Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Laboratoire TSI, UMR CNRS 5516 Bat F, 10 Rue Barrouin, 42000 Saint-Etienne Cedex 2, France

Abstract All-fiber wavelength-selective filters are the key components in fiber communication systems, those based on fiber couplers incorporated with Bragg gratings are compact, low insertion loss and low cost. In this paper, the filter based on 244 nm ultraviolet-written Bragg grating in hydrogen-loaded conventional 2×2 3-dB fused coupler is reported. It exists an optimized position and appropriate length of grating to obtain high reflectivity from drop port. The filter with maximum reflectivity about 20 dB, bandwidth larger than 1 nm is obtained. The results are qualitatively analyzed with supermode theory. In order to obtain high drop efficiency, the position of the grating and the speed of the step motor should be carefully controlled.

Key words fiber optics; conventional fused tapered coupler; Bragg grating; filter; supermode

1 引言

全光纤波长选择滤波器是光纤通信系统中的重要器件, 其中光纤布拉格光栅具有良好的波长选择特性, 但其缺点是只能工作在反射模式, 只有两个端口, 在系统中需与环路器结合使用^[1], 增加了系统的损耗和成本。于是人们提出直接将光栅写在光纤耦

合器的耦合区上^[2~4], 将耦合器的多端口特性和光栅的波长选择特性综合在一个器件上, 上/下载特定的波长。这样的器件结构紧凑、插入损耗小、费用低且与通信系统兼容性好, 具有潜在的市场前景。

在耦合器的耦合区写入光栅制作的滤波器有三种类型: (1) 光栅辅助型 (grating-assisted coupler, GAC), 耦合器由两根直径不同的光纤制成, 也称为

收稿日期: 2003-06-25; 收到修改稿日期: 2003-11-13

作者简介: 罗爱平(1975—), 女, 湖南浏阳人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光通信器件与技术的研究。E-mail: luoaiping2003@126.com

不对称耦合器,在其中的一根光纤上写入光栅。此类器件的优点是非干涉型的,因而对光栅的位置没有要求。缺点是在耦合区模式的叠加比普通光栅低两个量级,因此需要大的折射率调制以达到高的反射率^[2]; (2) 光栅阻止型 (grating-frustrated coupler, GFC), 耦合器由两根相同的光纤制成, 耦合效率 100%。在其中的一根光纤上写入光栅, 光栅的出现使在布拉格波长处不产生耦合, 所以称为光栅阻止型。其缺点是: 这类器件是干涉仪型的, 从而在制作过程中需要紫外修正, 增加了制作的难度。在实验上已制作出线宽为 0.7 nm, 下载中心波长为 1535 nm, 峰值透射率为 70%, 隔离度为 13 dB 的器件^[3]; (3) 光栅反射型 (Bragg reflection coupler, BRC), 这类器件是将光栅写在抛光的耦合器的两根光纤上或熔锥耦合器的腰部^[4,5]。已制作出回损大于 30 dB, 带宽为 1.2 nm 的光分插复用器 (OADM)^[4]。

在这些类型中, 在熔锥耦合器的熔锥区写入光栅更容易制作结构紧凑、体积小的波长选择滤波器。但已有的实验报道都是采用由包层和纤芯同时具有光敏性的光纤所制作的耦合器^[5~7]。这不仅增加了接入损耗, 而且增加了器件的成本。本文报道了在普通 2×2 熔锥型耦合器上写入光栅的特性。实验表明, 利用这些普通的 3 dB 耦合器, 可以实现多端口波长选择滤波器。

2 器件的工作原理

分析耦合器的特性有两种方法: 普通耦合模理论和局部模式理论。普通耦合模理论只适用于弱熔融的耦合器, 当耦合器是强熔融, 即耦合器的横截面接近圆形, 普通耦合模理论已不适用, 此时应将耦合器的耦合区当成一个复合结构考虑, 该结构的局部模式称为超模, 耦合器的功率输出特性取决于超模之间累积的相位差^[8]。若耦合器是绝热的 (即无损耗), 则只需要考虑前两个超模: 偶次模 SLP₀₁ 和奇次模 SLP₁₁。考虑实验中所用耦合器的横截面接近圆形, 本文采用超模理论进行理论和实验分析。

若在耦合器的熔锥区写入光栅 (如图 1 所示), 从端口 1 输入光波, 满足布拉格波长的光波将被反射至输入端, 从哪个端口输出则取决于超模之间累积的相位差, 此时的相位差包括耦合器和光栅共同产生的相位差, 由光栅的位置和长度所决定。如果相位差等于 π , 则该光波将完全从端口 2 输出, 即被

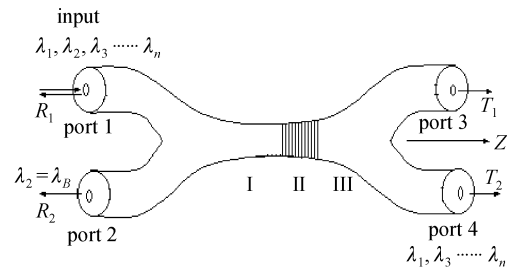


图 1 在耦合器熔锥区写入光栅制作滤波器的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of filter based on Bragg grating in fused tapered coupler

下载, 其余波长的光波将不受影响地通过。若该器件具有对称性, 则可以在端口 3 上载该光波, 这样在同一器件上同时实现分插复用器的功能。这样的多端口波长选择滤波器集成了耦合器和光栅的功能, 结构紧凑, 费用低, 插入损耗小。光栅的特性可由方程组描述^[9]

$$\begin{aligned} \frac{db_m(z)}{dz} &= i\kappa_m(z)b_{-m}(z)e^{-i[(2\beta_m-K)z-\Theta]} \\ \frac{db_{-m}(z)}{dz} &= -i\kappa_m(z)b_m(z)e^{i[(2\beta_m-K)z-\Theta]} \quad (m=1,2) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 b_m 和 b_{-m} 分别为前向和后向传输超模的幅度 ($m=1$, 对应 SLP₀₁ 模; $m=2$, 对应 SLP₁₁ 模), β_m 为没有写入光栅时超模的传输常数, K 为光栅的波数, Θ 为光栅的初始相位, κ_m 为光栅的耦合系数 (κ_1 为 SLP₀₁ 与 SLP₋₀₁ 的耦合系数, κ_2 为 SLP₁₁ 与 SLP₋₁₁ 的耦合系数)。

实际上, 可将整个结构分为三个区域 (图 1): 超模在区域 I 和 III 传输时只累积相位差 Φ_1 和 Φ_3 (Φ_1, Φ_3 由两个超模的传输常数所确定), 每个超模的幅度都没有改变; 在区域 II, 由于光栅的作用, 前向和后向传输的超模的耦合改变了每个超模的幅度, 同时产生相位差 Φ_2 (其值由公式 (1) 计算得出的两个超模的幅角确定)。若布拉格波长的光波完全从端口 2 下载, 则必须满足相位关系

$$2\Phi_1 + \Phi_2 = \pi \quad (2)$$

所以光栅应写在偏离耦合器中心一定距离的位置。

3 实验结果与分析

实验所用的耦合器是由康宁 SMF-28 光纤熔融拉锥制作的 3 dB 耦合器, 其熔融程度 (熔锥区耦合器横截面的横向最大高度对纵向最大长度的比值) 约为 0.9, 耦合区的长度 ~ 13 mm, 根据前面所述的

超模理论计算得出两超模在耦合器的输出端口累积的相位差 $\cong \pi/2$ 。在写光栅前,耦合器在 11145.75 kPa,室温下载氢 5 天。光源为氩离子倍频激光器,其输出波长为 244 nm。耦合器固定在平移台上,平移台可以左右移动,从而可以控制写入光栅的长度和曝光量。实验装置示意图如图 2 所示。

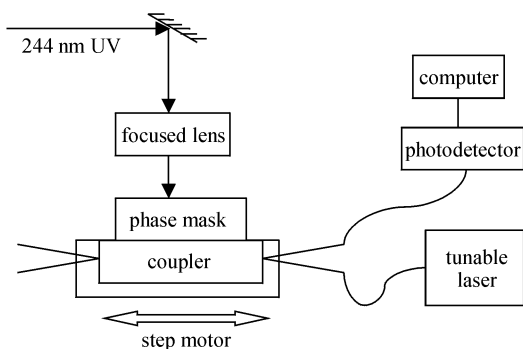


图 2 在耦合器上写光栅的实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup of writing Bragg grating in fused coupler

由于两超模在 3 dB 耦合器的输出端口累积的相位差 $\cong \pi/2$, 根据前面的理论分析可知,为了满足相位关系(式(2)),光栅应写在偏离耦合器中心一定距离的位置。在实验中,均匀光栅写在偏离耦合器中心约为 0.5 mm 左右的地方,长度为 4 mm,光栅周期为 0.529 μm 。激光器的输出功率为 91 mW,平移台的移动速度为 0.01 mm/s。图 3 为实验测得的反射谱,由图看出:1) 该器件两端的反射谱形状和线宽不一样;2) 两反射谱的反射率不一样。这是由耦合器的形状与光栅的位置共同引起的。在耦合器的熔锥区,纤芯的直径沿其长度变化,超模经历从纤芯模转变为包层模再变为纤芯模的过程,其有效折射率也不断变化。当在耦合器的熔锥区写入光栅时,下载端口的反射谱特性不仅与光栅本身的特性有关,还取决于反向传输的两超模所累积的相位差,此时的相位差是由熔锥区和光栅共同产生的。因此光栅的位置很关键。对图 3(a),因为沿着光栅的长度上,超模的有效折射率不一样(逐渐增大),布拉格波长不一样,且光栅反射的光波在传输过程中所产生的相位差更容易接近 π , 从而端口 2 的反射谱比普通光栅反射谱宽,同时也是出现边带的原因(这时的耦合系数类似于高斯变迹光栅耦合系数的上升沿),而在靠近光栅的一端,只有穿透深度比较深的光波(即在有效折射率比较小的一边),其相位差更接近 π 一些,因此反射谱的波长出

现在波长较短的一边,谱宽也较窄。另外,注意到反射谱的反射率较低,这是因为紫外光所引起的折射率调制幅度较小,光栅耦合强度不够,可以通过调整平移台的移动速度来控制写入光栅过程中所产生的折射率调制。图 4 是平移台速度为 0.001 mm/s,光栅周期为 0.54 μm ,光栅偏离耦合器的中心 ~ 1 mm,其他条件相同的情况下,从下载端口所测得的反射谱。从图中可以看出,反射率得到很大的提高,最大反射率约为 20 dB,而其线宽大于 1 nm。

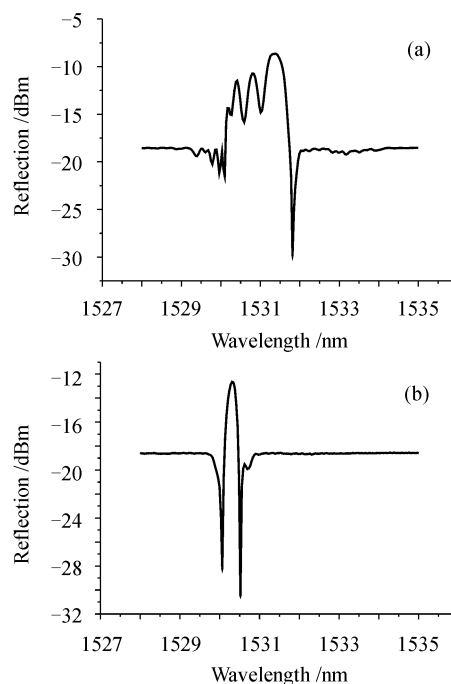


图 3 光栅偏离耦合器中心 ~ 0.5 mm,周期 0.529 μm ,长度 4 mm,平移台速度 0.01 mm/s 时(a) 端口 1 为入射端口,端口 2 输出的反射谱;(b) 端口 3 为入射端口,端口 4 输出的反射谱

Fig. 3 (a) Reflection spectrum from port 2, port 1 is the injected port; (b) that from port 4, port 3 is the injected port. Grating offset the center of the coupler is ~ 0.5 mm, grating period and length are 0.529 μm and 4 mm respectively. The speed of the step motor is 0.01 mm/s

实验结果表明,利用普通的熔锥耦合器同样可以实现多端口波长选择滤波器。下一步实验将改善光谱的特性,以期获得平滑的光谱。这可以从两个方面来改进,一是写入变迹光栅^[10],设计适当的变迹函数和变迹曲线,如高斯变迹等,这可以通过控制平移台的移动方式实现。二是写入非线性啁啾光栅,即光栅的周期 Δ 随超模的有效折射率 n_{eff} 相应地变化,使 $2n_{\text{eff}}(z)\Delta(z) = \lambda_d$ (λ_d 为所需下载波长),从

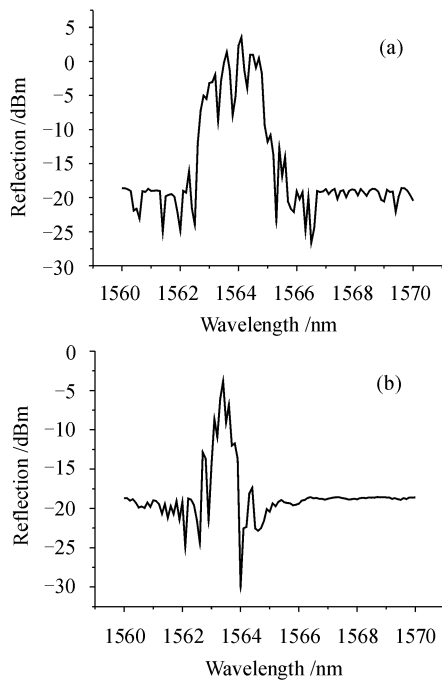


图 4 光栅偏离耦合器中心 ~ 1 mm,周期 $0.54 \mu\text{m}$,长度 4 mm,平移速度 0.001 mm/s 时(a) 端口 1 为入射端口,端口 2 输出的反射谱;(b) 端口 3 为入射端口,端口 4 输出的反射谱

Fig. 4 (a) Reflection spectrum from port 2, port 1 is the injected port; (b) that from port 4, port 3 is the injected port. Grating offset the center of the coupler is ~ 1 mm, grating period and length are $0.54 \mu\text{m}$ and 4 mm respectively. The speed of the step motor is 0.001 mm/s

而补偿由耦合器的形状所引起的反射谱的变化。同时,需要考虑写入光栅的最佳位置和最佳长度,以及在不同类型的耦合器上写光栅作比较,以实现光分插复用器的功能。

4 结 论

实验表明在普通 2×2 熔锥耦合器上写入布拉格光栅可以实现多端口波长选择滤波器。实验中获

得了最大反射率约为 20 dB,线宽大于 1 nm 的滤波器,但要获得高的反射率,必须仔细控制写入光栅的位置和平移台的移动速度。由于耦合器的形状引起了其模式的有效折射率的变化,从而导致了下载端口的反射谱具有类似于高斯变迹光栅谱的特性,所以需要写入变迹光栅,以获得平滑的反射谱。

参 考 文 献

- Huang Yonglin, Xiang Yang, Li Jie *et al.*. Homodyne crosstalk performance of optical add-drop multiplexer based on fiber gratings and circulators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 438~440
黄勇林,项 阳,李 杰 等. 光纤光栅和环形器组成的光分插复用器同频串扰特性研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(4): 438~440
- L. Dong, P. Hua, T. A. Birks *et al.*. Novel add/drop filters for wavelength-division-multiplexing optical fiber systems using a Bragg grating assisted mismatched coupler [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(12):1656~1658
- J.-L. Archambault, P. St. J. Russell, S. Barcelos *et al.*. Grating-frustrated coupler: a novel channel-dropping filter in single-mode optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3):180~182
- I. Baumann, J. Seifert, W. Nowak *et al.*. Compact all-fiber add-drop-multiplexer using fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(10):1331~1333
- F. Bakhti, P. Sansonetti, C. Sinet *et al.*. Optical add/drop multiplexer based on UV-written Bragg grating in a fused 100% coupler [J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(9):803~804
- A. S. Kewitsch, G. A. Rakuljic, P. A. Willems *et al.*. All-fiber zero-insertion-loss add-drop filter for wavelength-division multiplexing [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(2):106~108
- H. Yokota, T. Hasegawa, Y. Satoda *et al.*. Characteristics of fused optical fiber grating couplers with tapered shapes [J]. *Opt. Rev.*, 1999, **6**(3):173~179
- S. Lacroix, F. Gonthier, J. Bures. Modeling of symmetric 2×2 fused-fiber couplers [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(36):8361~8369
- 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
- Bao Jilong, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng *et al.*. Dual overwritten fiber gratings characteristics with nonlinear modulation of refractive index [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(9):813~816
鲍吉龙,章献民,陈抗生 等. 折射率非线性调制的双重光纤光栅特性[J]. 中国激光, 2001, **A28**(9):813~816