

文章编号: 0258-7025(2007)08-1106-04

双光栅耦合器型上下话路滤波器的设计和实验

董小伟, 许 鸥, 鲁韶华, 冯素春, 裴 丽, 简水生

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

摘要 利用两布拉格光栅反射作用的联合效应形成的双光栅耦合器, 具有结构紧凑、滤波效率显著加强的优点。通过详细分析光栅写入特性对器件性能的影响, 指出优化光栅在耦合区中的位置, 不仅可以使得满足布拉格匹配条件的信号最大效率地下话路输出, 还能有效消除背向回波干扰。在此基础上, 调节光栅写入长度和紫外折射率调制强度, 设计制作出一种结构平衡、上下话路滤波响应同时改善的新型双光栅耦合器。并且在实验中发现, 耦合区的非均匀是造成下话路响应平坦性恶化的主要因素, 为改进熔融拉锥工艺、进一步提高双光栅耦合器的滤波性能提供了依据。

关键词 光通信; 上下话路滤波器; 光纤耦合器; 光纤布拉格光栅; 熔融拉锥

中图分类号 TN 253; TN 929.11 **文献标识码** A

Design and Experiment of Add/Drop Filter Based on Double-Fiber-Bragg-Gratings Coupler

DONG Xiao-wei, XU Ou, LU Shao-hua, FENG Su-chun, PEI Li, JIAN Shui-sheng
(State Key Laboratory of All-optical Network & Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract Double-grating coupler based on two fiber-Bragg-gratings (FBGs) has the advantages of compact structure and enhanced filtering efficiency. The influences of gratings' characteristics were investigated thoroughly, and the result showed that maximum drop efficiency and minimum backreflected return wave could be achieved by choosing proper gratings' position in the coupler region. Furthermore, by adjusting the gratings' length and ultraviolet (UV) refractive modulation depth, a novel balanced configuration with the two Bragg gratings inscribed into the coupler waist's center was designed and fabricated, which showed simultaneously optimized add and drop filtering responses. The experimental measurement demonstrated that the uniformity of coupler waist should be responsible for the inequality in drop bandpass, and the filtering performance of double-gratings coupler can be enhanced by improving fused taper technique.

Key words optical communication; add/drop filter; fiber coupler; fiber Bragg grating; fused taper

1 引言

具有波长选择能力的上下话路滤波器是密集波分复用系统的关键器件之一, 也是降低成本、推广光纤到户光网络的突破口^[1]。光纤布拉格光栅(FBG)由于具有全光纤特性和优良的波长选择能力, 引起了人们的广泛关注^[2~6]。

光纤布拉格光栅与耦合器相结合, 可构成两类

主要的上下话路滤波器: 1) 单光栅型, 即只在一个耦合臂中写入光栅形成的光栅破坏耦合器^[4]和光栅辅助耦合器^[5], 对于这类器件, 如何只在一个纤芯中写入光栅, 而保持另一个光纤不受干扰是实际制作中的重要难题^[7]。2) 双光栅型^[8], 当构成耦合器的两光纤相匹配时, 紫外折射率调制将同时在两耦合臂上写入光栅, 不仅制作工艺极大简化, 而且由于信号下话路是两光栅反射作用的联合效应, 相比于单

收稿日期: 2007-01-05; 收到修改稿日期: 2007-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(60477017), 北京市自然科学基金(4052023)和北京交通大学人才基金(2007RC015)资助项目。

作者简介: 董小伟(1978—), 女, 天津人, 讲师, 主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: way7803@163.com

光栅情况,效率可明显提高^[9]。

本文在耦合模方程的基础上,详细分析布拉格光栅写入位置和写入长度对双光栅耦合器滤波性能的影响,以便实现器件结构的平衡和上下话路滤波响应的同时优化。

2 器件结构和理论基础

图 1 为双光栅耦合器型上下话路滤波器的典型结构^[10],区域 I, III 为普通耦合区,其特性可用普通对称耦合器的耦合模方程来描述;对于区域 II,除了两光纤消逝场间的耦合作用外,由于光栅的写入,还能实现对信号的选择。 L_1, L_2, L_3 分别为耦合区 I, II, III 的长度, $L_c = L_1 + L_2 + L_3$ 。当多波长复用信号从端口 1 输入时,位于布拉格中心波长的信号被两光栅反射后,将在端口 2 相干加强下话路输出,而其他波长信号穿越器件,在端口 3 或 4 形成通路响应。

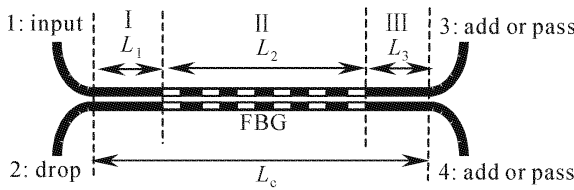


图 1 双光栅耦合器型上下话路滤波器

Fig. 1 Add-drop channel filter based on double-FBGs coupler

通过在光纤消逝场耦合作用中引入光栅折射率调制效应,可以推导出区域 II 的耦合模方程为

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} \bar{A}_1(z) \\ \bar{B}_1(z) \\ \bar{A}_2(z) \\ \bar{B}_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i\Delta\beta & -iK_g & -iK & 0 \\ iK_g & i\Delta\beta & 0 & iK \\ -iK & 0 & -i\Delta\beta & -iK_g \\ 0 & iK & iK_g & i\Delta\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{A}_1(z) \\ \bar{B}_1(z) \\ \bar{A}_2(z) \\ \bar{B}_2(z) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$\bar{A}_u(z), \bar{B}_u(z)$ 分别为第 u ($u=1,2$) 个纤芯中正、反向基模的慢变振幅, K_g 为光栅耦合系数, $\Delta\beta$ 为相位失配因子, K 为两光纤消逝场的耦合系数,可近似表示为^[11]

$$K = \frac{\sqrt{2\Delta} U^2 K_0 [W(2+d/\rho)]}{\rho V^3 K_1^2(W)}, \quad (2)$$

式中 K_0, K_1 为零阶和一阶第二类修正贝塞耳函数; Δ 为相对折射率差; U, W 分别为纤芯和包层横向传

输常数; V 为归一化频率; d 为纤芯间距; ρ 为光纤半径。

根据文献[9],当光栅折射率调制表示为 $n_{\text{eff}}(z) = n_0 + \Delta n \left\{ 1 + \nu \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right\}$ 时, K_g 和 $\Delta\beta$ 可分别写为

$$\Delta\beta = 2\pi n_0 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_d} \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}, \quad (3)$$

$$K_g = \frac{\pi}{\lambda} \nu \Delta n, \quad (4)$$

式中 n_0 为光纤芯区折射率, $\Delta n, \nu$ 分别为光致折射率调制的“直流”和“交流”成分; $\Lambda, \varphi(z)$ 分别为光栅周期和轴向的相位变化; λ, λ_d 分别为入射光波长和光栅的谐振波长。

由于基于布拉格光栅的双光栅耦合器的输入条件: $\bar{A}_1(0) = 1, \bar{B}_1(L) = 0, \bar{A}_2(0) = 0, \bar{B}_2(L) = 0$ 具有两点边值性,为研究器件的滤波特性,首先需要采用 Broyden 迭代和打靶法将输入的两点边值转换成同侧初值条件,才能利用龙格-库塔(Runge-Kutta)数值积分对耦合模方程进行求解^[9],从而得到各个端口的归一化输出响应

$$S_{xy} = \frac{|x_{\text{out}}|^2}{|y_{\text{in}}|^2} \Big|_{\text{all other input}=0}, \quad (5)$$

式中 y_{in} 和 x_{out} 分别表征信号的输入/输出端口。

3 平衡结构的设计

对于双光栅耦合器,为提高下话路滤波效率,同时有效抑制背向回波损耗,位于布拉格中心波长的信号被两光栅反射后,应在端口 2 形成相干加强,并在端口 1 实现相干抵消。但从图 2 可以看出,当光栅直接写在耦合区边缘 ($L_1 = 0$) 时,大部分信号将返回输入端口 1,除非采取有效的隔离,否则不仅造成下话路效率降低,还可能造成对光源的损伤;而通过调节光栅的初始写入位置,预留出适当的长度(如 $L_1 = 6.85 \text{ mm}, 22.50 \text{ mm}$ 等)作为耦合区 I,就可以使下话路滤波效率达到最大,实现器件性能的改善。

同时,耦合区 III 长度的选择,应根据通路信号所需引导到的输出端口来设定

$$L_3 = L_c - (L_1 + L_2) = \frac{n\pi}{2K} - (L_1 + L_2). \quad (6)$$

若通路信号需要从端口 3 输出, n 取偶数;反之取奇数;而且在保证器件性能的情况下,结构参数的选择还应综合考虑器件尺寸的最小化。根据图 2 设

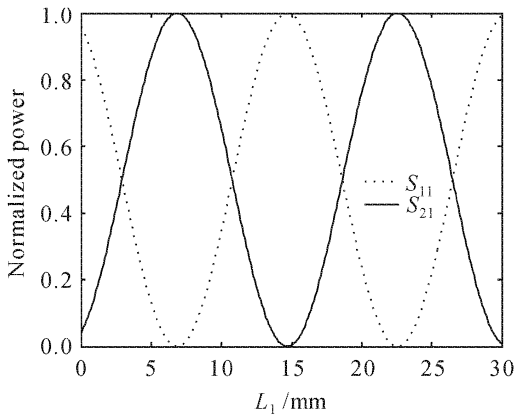


图 2 光栅初始写入位置对下话路和背向回波信号功率的影响

Fig. 2 Influence of gratings' position on drop and backreflect power

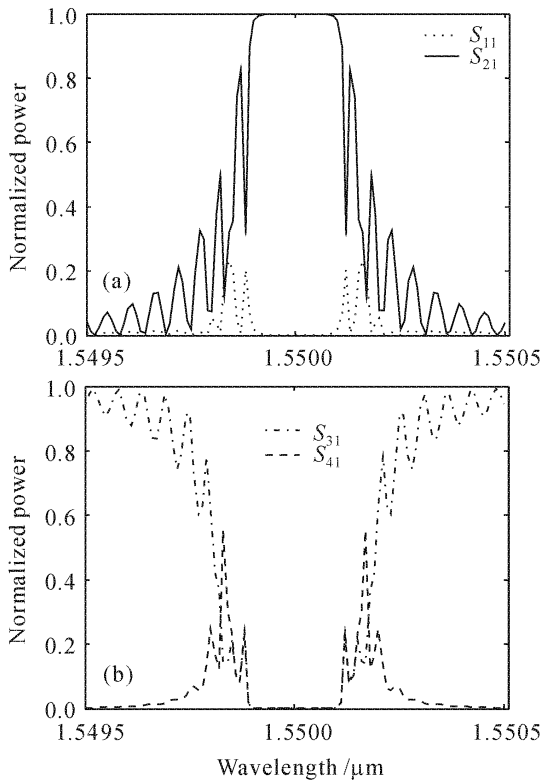


图 3 各端口的滤波响应

(a) 下话路和背向回波反射特性; (b) 通路特性

Fig. 3 Responses for different output ports

(a) drop and backreflect; (b) transmission

定耦合区 I 的长度 $L_1 = 6.85 \text{ mm}$, 这样当 $n = 2$ 时得到耦合区 III 的最小长度 $L_3 = 11.16 \text{ mm}$, 此时双光栅耦合器各端口的滤波响应如图 3 所示。

但是, 上面所设计的双光栅耦合器区域 I 和区域 III 的长度并不相等, 这种结构的不平衡必将造成上话路滤波特性恶化(见图 4), 因此必须对器件结构进行调整, 通过优化光栅初始写入位置和终止位置, 使其正好位于耦合区的中心, 以便上下话路滤波

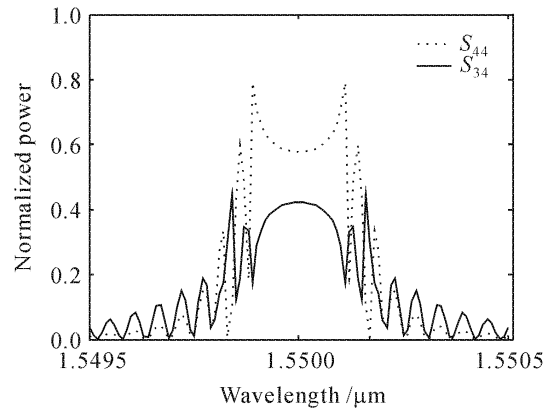


图 4 失衡结构下, 恶化的上话路滤波响应及其背向回波

Fig. 4 Deteriorated spectra of add and backreflect ports for unbalanced structure

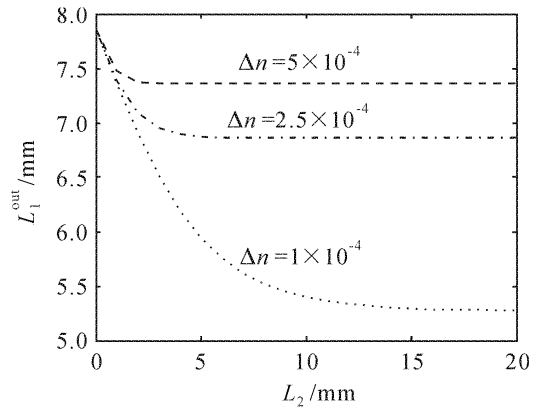


图 5 光栅长度与区域 I 最佳长度的关系

Fig. 5 Relation between gratings' length and optimum length of region I

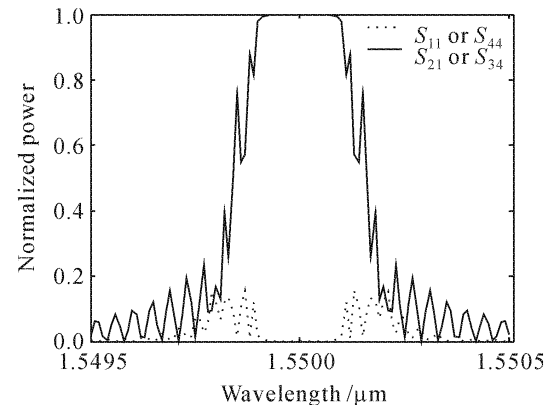


图 6 平衡结构的上/下滤波响应及其背向回波

Fig. 6 Add/drop and backreflect characteristics for balanced structure

响应同时达到最佳。为此, 研究了光栅长度与光栅写入位置之间的关系, 从图 5 可以看出, 虽然随着 L_2 的增加, 使下话路效率最大的最佳耦合区 I 长度 L_1^{opt} 开始时降低, 但是对于调制强度 Δn 一定的光栅, 当 L_2 超过某一阈值 $L_{2\text{th}}$ 后, L_1^{opt} 将不再改变, 因此设定区域 I, III 的长度为这些稳定值, 然后调节光

栅长度使方程(6)得到满足,此时所设计的平衡结构,就可实现上下话路滤波响应的同时优化(见图6)。

4 实验结果

为验证上面方案的可行性,首先采用高精度程控设备熔融拉制出光纤耦合器,然后利用相位掩膜法在耦合区写入周期为537 nm,长度为40 mm的布拉格光栅,并且通过对光栅写入位置的监控和调节,制作出性能良好的双光栅耦合器。图7为使用分辨率0.01 nm的 ANDO6319 光谱仪在端口2和端口1测试得到的下话路和背向回波响应,与上面的数值计算相吻合。

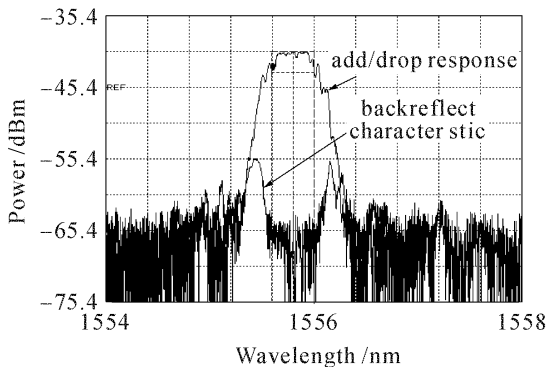


图7 双光栅耦合器型上/下话路滤波器的实验结果

Fig.7 Experimental results for add/drop filter based on double-FBGs coupler

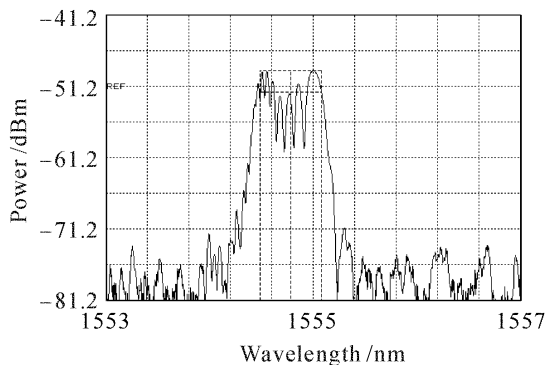


图8 耦合区非均匀使下话路滤波特性恶化

Fig.8 Coupler waist's uniformity deteriorates filter's drop response

除了光栅对器件性能的影响外,光纤耦合器的耦合区特性也将直接决定下话路滤波特性。从图8的测试结果可以看出,当耦合区非均匀时,下话路光谱出现了近似周期性的波动效应,通带平坦性严重恶化。认为这是由于熔融拉锥程度的非均匀,导致不同区域反射信号间产生了相互干扰,因此改进熔融拉锥技术,提高耦合区的均匀性是制作高质量双

光栅耦合器型上下话路滤波器的关键。

5 结论

在耦合模方程的基础上,优化布拉格光栅的写入位置和写入长度,设计制作出一种结构平衡、上下话路滤波响应同时优化的新型双光栅耦合器,并且在熔融拉锥法制作器件的过程中,深入研究了耦合区非均匀的影响,为进一步提高器件性能提供了依据。

参 考 文 献

- 1 Tzong-Yow Tsai, Zhi-Cheng Lee, Chi-Shiun Gau. A novel wavelength-division multiplexer using grating-assisted two-mode interference [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10):2251~2253
- 2 Zhongwei Tan, Yan Liu, Yong Chen *et al.*. 8×10 Gb/s transmission system over 1500 km on G. 652 fiber dispersion compensated by chirped fiber gratings [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8):441~443
- 3 Yun Bin Feng Chen Na, Cui Yiping. Refractive index sensing characteristics of fiber Bragg grating based on cladding mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1013~1015
恽斌峰,陈娜,崔一平. 基于包层模的光纤布拉格光栅折射率传感特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1013~1015
- 4 Ararat Yesayan, Reak Vallee. Optimized grating-frustrated coupler [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(17):1329~1331
- 5 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
- 6 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Narrow bandwidth add-drop channel filter based on fiber-Bragg-grating-coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):621~625
董小伟,裴丽,简水生. 光纤布拉格光栅耦合器型窄带上下话路滤波器的数值分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):621~625
- 7 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):4739~4743
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):4739~4743
- 8 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
- 9 Gangjun Liu, Qu Li, Guoliang Jin *et al.*. Transfer matrix method analysis of apodized grating couplers [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **235**:319~324
- 10 Jose Capmany, Pascual Munoz, Daniel Pastor. Optimum design and performance evaluation of an all-fiber add-drop multiplexer based on a grating coupler [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(5):1392~1399
- 11 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