

文章编号: 0253-2239(2010)03-0644-06

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

江微微^{1,2} 李 坚^{1,2} 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)

摘要 通过在光纤倏逝场间的耦合作用中引入光栅折射率调制扰动, 推导出用于分析各种光纤光栅耦合器型滤波器响应特性的统一耦合模方程, 并给方程中涉及的参数赋予了明确的物理意义。在此基础上, 采用 Broyden 迭代结合打靶法数值分析了三种光纤光栅耦合器型滤波器的滤波响应特性。分析了相关参数对下话路滤波响应的影响, 通过优化参数, 可以使光栅辅助耦合器、光栅反射耦合器和光栅破坏耦合器分别达到 95%, 85% 和 99% 的下话路效率。并实验制作了反射峰值分别达到 15 和 18 dB 的光栅辅助耦合和光栅反射耦合器。

关键词 光纤光栅; 光纤光栅耦合器型滤波器; 熔融拉锥; 滤波响应

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0644

Analysis of Fiber Grating Filters Written in Fiber Coupler by Employing the Unified Coupled-Mode Theory

Jiang Weiwei^{1,2} Li Jian^{1,2} 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)

Abstract By introducing the grating refractive modulation into the evanescent field coupling, the unified coupled-mode equation for all kinds of fiber grating filters written in fiber coupler is obtained, which parameters have specific physical meaning. The filtering response of three kinds of fiber grating filters written in fiber coupler are analyzed by numerical method of Broyden and shooting. The influences of relative parameters on the filtering response characteristics are investigated theoretically. Drop channel efficiency of 95%, 85% and 99% can be obtained for grating assisted coupler, grating reflection coupler and grating frustrate coupler by optimizing parameters. Grating assisted coupler and grating reflection coupler are fabricated with reflectivity 15 and 18 dB.

Key words fiber grating; fiber grating filters written in fiber coupler; fused taper; filtering response

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。具有波长选择能力的信道上下话路滤波器是 DWDM 系统的关键器件之一。光纤光栅耦合器型滤波器综合了光纤

收稿日期: 2009-05-11; 收到修改稿日期: 2009-07-22

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、光纤网络等方面的研究。E-mail: ssjian@center.njtu.edu.cn

耦合器的多端口特性和光栅良好的波长选择性特点,形成了低成本的新型全光纤波分复用器件^[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三种:光栅辅助耦合器、光栅反射耦合器和光栅破坏耦合器。

目前对于光纤光栅耦合器型滤波器的理论分析主要有三种,分别是普通耦合模理论^[2]、耦合超模理论^[3]和统一耦合模理论^[4]。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;而文献^[4]提出的统一耦合模理论只是针对对称光纤耦合器的。本文从 Snyder^[5]提出的失配光纤耦合理论出发,推导出适用于分析各种光栅耦合器型滤波器响应特性的统一耦合模方程,方程中涉及的参数具有明确的物理意义。利用此方程分析了三种光栅耦合器型滤波器的滤波响应特性,并用实验验证了对光栅辅助耦合器及光栅反射耦合器的理论分析。

2 理论分析

为分析各种光栅耦合器型滤波器,假设在光纤耦合器耦合区的两个光纤上都写入光栅,结构如图 1(a)所示。在弱导条件下,场分布满足标量波动方程

$$[\nabla^2 + k^2 n^2(x, y)]E(x, y, z) = 0, \quad (1)$$

式中 $n(x, y)$ 为图 1 所示的复合双芯光纤折射率分

布。在弱耦合条件下,光纤光栅耦合器中的电场可以表为^[5]

$$E(x, y, z) = b_1(z)\psi_1(x, y) + b_2(z)\psi_2(x, y), \quad (2)$$

式中 $b_i(z) = g_i(z)\exp(i\beta_i z)$, $i = 1, 2$, $g_i(z)$ 为纤芯 i 中沿 z 方向变化的慢变振幅, β_i 为纤芯 i 中的传输常数, $\psi_i(x, y)$ 为纤芯 i 的基模场分布。将(2)式代入(1)式,同乘 $\psi_i(x, y)$ 后在无限大的截面上积分分别得到

$$\begin{cases} b_1'' + \bar{B}_1^2 b_1 + \bar{S}_{12} b_2 = 0, & (3) \\ b_2'' + \bar{B}_2^2 b_2 + \bar{S}_{21} b_1 = 0, & (4) \end{cases}$$

式中

$$\bar{B}_i^2 = \beta_i^2 + \frac{S_{ij} - N_{12} S_{ji}}{1 - N_{12}^2}, \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{S_{ij} - N_{12} S_{ji}}{1 - N_{12}^2}, \quad (6)$$

$$N_{12} = \int_{\infty} \psi_i \psi_j dA, \quad (7)$$

$$S_{ij} = 2kn_{co} C_{ji}. \quad (8)$$

式中 n_{co} 为光纤纤芯折射率, $C_{ji} = k \int_{A_{co}} [n(x, y) - n_j(x, y)]\psi_i \psi_j dA$ 。纤芯 1, 2 中写入光栅后折射率变为 $n_i + \Delta n_i$, $\Delta n_i = \delta n_i \cos\left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z)\right]$, $i = 1, 2$ ^[6]。这里为了简便起见,忽略了折射率调制的直流分量。定义光纤间倏逝场引起的耦合系数分别为

$$\begin{aligned} C_{11} &= k(n_2 - n_{cl}) \int_{A_2} \psi_1^2 dA, & C_{12} &= k(n_2 - n_{cl}) \int_{A_2} \psi_1 \psi_2 dA, \\ C_{21} &= k(n_1 - n_{cl}) \int_{A_1} \psi_1 \psi_2 dA, & C_{22} &= k(n_1 - n_{cl}) \int_{A_1} \psi_2^2 dA. \end{aligned} \quad (9)$$

定义由光栅的折射率调制引起的耦合系数分别为

$$\begin{aligned} K_{11} &= \frac{k}{2} \delta n_1 \int_{A_1} \psi_1^2 dA + \frac{k}{2} \delta n_2 \int_{A_2} \psi_1^2 dA, & K_{12} &= \frac{k}{2} \delta n_1 \int_{A_1} \psi_1 \psi_2 dA + \frac{k}{2} \delta n_2 \int_{A_2} \psi_1 \psi_2 dA, \\ K_{21} &= \frac{k}{2} \delta n_1 \int_{A_1} \psi_1 \psi_2 dA + \frac{k}{2} \delta n_2 \int_{A_2} \psi_1 \psi_2 dA, & K_{22} &= \frac{k}{2} \delta n_1 \int_{A_1} \psi_2^2 dA + \frac{k}{2} \delta n_2 \int_{A_2} \psi_2^2 dA. \end{aligned} \quad (10)$$

则 C_{ji} 各项可以由(9), (10)式中的各项组合表示。将(5), (6)式代入(3), (4)式,利用缓变条件 $g_{\pm}'' = 0$ 及同步驱动原理^[7]可以得到分析光栅耦合器型滤波器的统一耦合模方程

$$\frac{d\mathbf{V}}{dz} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{V}, \quad (11)$$

式中 $\mathbf{V} = [g_{1+}(z), g_{1-}(z), g_{2+}(z), g_{2-}(z)]^T$, $\mathbf{M} = \frac{1}{1 - N_{12}^2}$,

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

$$\delta_1 = 2\beta_1 - \frac{2\pi}{\Lambda}, \delta_2 = 2\beta_2 - \frac{2\pi}{\Lambda}, \delta_{12} = \beta_1 + \beta_2 - \frac{2\pi}{\Lambda}, \Delta\beta = \beta_1 - \beta_2.$$

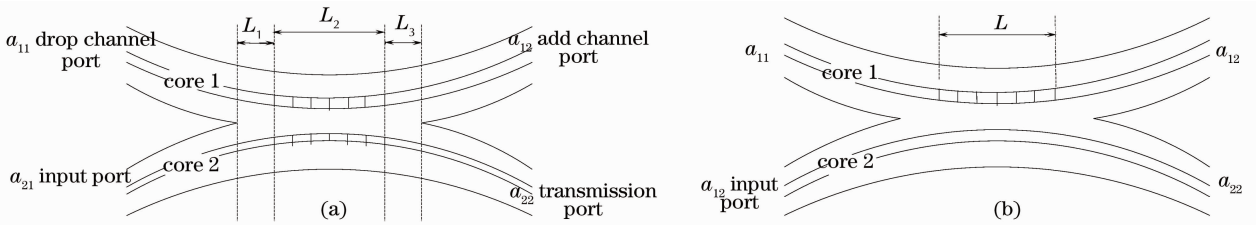


图 1 光纤光栅耦合器型滤波器结构示意图。(a) 双光栅结构；(b) 单光栅结构

Fig. 1 Schematic of fiber grating filters written in fiber coupler. (a) construction of double gratings; (b) construction of single grating

3 数值分析及实验验证

光栅耦合器型滤波器有两种结构,耦合区写入两个布拉格光栅的是光栅反射耦合器,如图 1(a)所示;耦合区写入一个布拉格光栅的是光栅辅助或光栅破坏耦合器,如图 1(b)所示。数值分析时以下话路特性为例,则多波长复用信号从 a_{21} 端口输入,耦合方程组的边值条件为 $g_{1+}(0) = 0, g_{1-}(L) = 0, g_{2+}(0) = 1, g_{2-}(L) = 0$ 。由于输入条件具有两点边值性,采用 Broyden 迭代结合打靶法求解统一耦合方程组,得到了耦合器各个端口的输出特性。在实验制作方面,熔融拉锥法是一种制作光纤耦合器较为普遍的方法^[8,9]。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,耦合区呈锥形,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。为了制作出具有一定长度和均匀性要求的耦合器,实验室自主设计出一套高精度熔融拉锥设备,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,通过调节拉锥速度并沿光纤纵向方向上缓慢移动具有宽均匀加热区的氢氧焰确保耦合区的均匀性,从而制作出耦合区长度和均匀性符合要求的光纤耦合器。然后使用相位掩模法在耦合器的中部均匀耦合区写入布拉格光栅,所使用的 Bragg-star 激光器输出的波长为 248 nm 的紫外光。

3.1 光栅辅助耦合器的分析

光栅辅助耦合器的结构如图 1(b)所示,即在构

成耦合器的两失配光纤中的一个纤芯上写入布拉格光栅。由于两光纤失配,功率不会从 a_{21} 端口耦合到 a_{12} 端口,但由于布拉格光栅的存在,当相位匹配条件 $\beta_1(\lambda_{12}) + \beta_2(\lambda_{12}) = 2\pi/\Lambda$ 满足时,将在 a_{11} 端口对波长 λ_{12} 的信号实现有效的下话路^[10]。由(10)式可知,交叉光栅耦合系数 K_{12} 及 K_{21} 均与两光纤光场的重叠积分有关。因此增加光栅折射率调制强度 δn_1 ,增加写入的光栅长度 L ,减小两光纤横向间隔 d 从而增大光场重叠积分,都可以增加下话路波长峰值反射率^[11]。图 2(a)给出了数值计算得到的光栅辅助耦合器 a_{11} 下话路光谱和 a_{22} 通路透射光谱,其中 $\delta n_1 = 0.001, L = 1.5 \text{ cm}, d = 10 \mu\text{m}$,此时即可达到 95% 的下话路效率;在实验制作中,使用一根 SMF-28 普通单模光纤和一根光敏光纤制作耦合器,这样紫外光只在光敏光纤上实现折射率调制。图 2(b)是制作的光栅辅助耦合器的下话路光谱,其中光栅写入长度 2 cm,掩膜板周期为 537 nm,反射峰达到 15 dB。实验中发现,若光栅写入耦合区以外,则会引起输入端口 a_{21} 到下话路透射端口 a_{12} 的交叉功率耦合^[11],必须将光栅区严格控制耦合区内。数值分析结果表明,光栅辅助耦合器对光栅在耦合区内的写入位置没有要求。但在光栅长度不变的情况下,随着耦合区长度的增加,下话路反射率逐渐增大,而会对光源造成影响的直通反射端口 a_{21} 光谱强度逐渐降低。

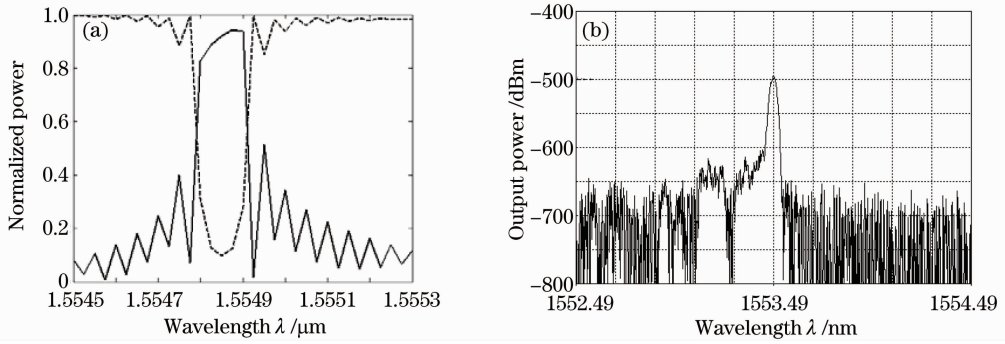


图 2 光栅辅助耦合器滤波光谱。(a) 数值计算结果；(b) 实验结果

Fig. 2 Filtering spectra of grating assisted coupler. (a) result of numerical computation; (b) experimental result

3.2 光栅反射耦合器的分析

光栅反射耦合器的结构如图 1(a) 所示,两个匹配光纤构成耦合长度为 $L_c = L_1 + L_2 + L_3$ 的光纤耦合器,两个完全相同的布拉格光栅写入耦合区中部的 L_2 区域。耦合区长度 $L_c = N\pi / (2K_f)$, K_f 是两光纤之间的倏逝场耦合系数,即耦合矩阵 \mathbf{P} 中的 P_{13} 或 P_{24} 。当多波长信号从端口 a_{21} 输入时,位于布拉格中心波长的信号被两光栅反射,在区域 L_1 的作用下发生相干干涉,相干加强信号从下话路端口 a_{11} 输出,其他信号穿过光栅区,经 L_3 的导向作用,在端口 a_{12} (N 为奇数) 或 a_{22} (N 为偶数) 输出^[12]。图 3(a) 是光栅反射耦合器下话路端口和通路透射端口滤波光谱的数值计算结果,其中 $d = 17.2 \mu\text{m}$, $L_1 =$

0.685 cm , $L_2 = 1.34 \text{ cm}$, $L_3 = 1.116 \text{ cm}$, $\delta n_1 = \delta n_2 = 0.00025$, 下话路效率达到 85%。注意到其下话路和透射端口光谱并不对称,短波长的旁瓣比较明显。这种不对称性是由不同光纤之间反向传输的模式耦合引起的^[4],而文献[2, 12]所使用的理论忽略了这种耦合作用,即忽略了耦合矩阵 \mathbf{P} 中的 P_{14} , P_{23} , P_{32} 和 P_{41} , 所以得到的下话路和透射端口的光谱是对称的。这种耦合作用在弱耦合情况下可以忽略,在强耦合作用时不能忽略^[2]。图 3(b) 是在强熔锥作用下制作的光栅反射耦合器,光栅写入长度 2 cm,掩模板周期 538 nm,反射峰达到 18 dB,下话路光谱在短波长处有比较明显的旁瓣,与图 3(a) 相比,使用此统一耦合模理论能较好地解释实验现象。

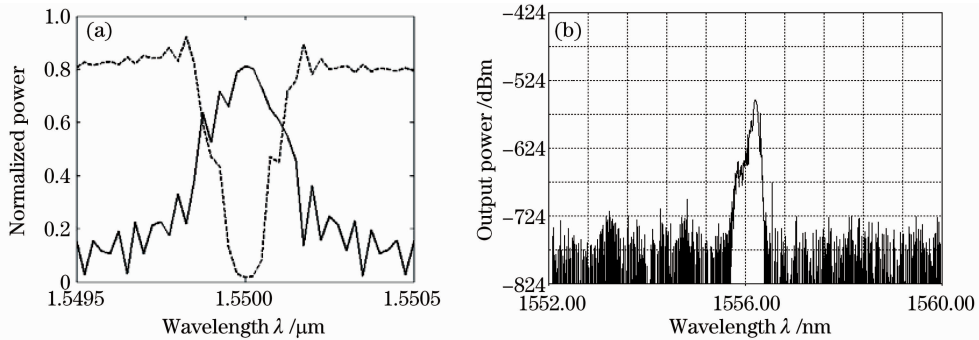


图 3 光栅反射耦合器滤波光谱。(a) 数值计算结果；(b) 实验结果

Fig. 3 Filtering spectra of grating reflection coupler. (a) result of numerical computation; (b) experimental result

3.3 光栅破坏耦合器的分析

光栅破坏耦合器的结构如图 1(b) 所示,其中构成耦合器的两光纤是匹配的。耦合区长度为 $L_c = N\pi / (2K_f)$ 。当没有写入光栅时,从端口 a_{21} 输入的多波长信号将 100% 耦合到端口 a_{12} 输出 (N 为奇数) 或零耦合从端口 a_{22} 输出 (N 为偶数)。当在其中的一个纤芯上写入光栅时,光栅的色散作用使耦合器在以布拉格波长为中心的光栅阻带内失配,光栅阻带内的波长不再进行功率耦合,而是直接从端口 a_{22} (N 为奇数时) 或 a_{12} (N 为偶数) 透射形成下话路输出,其它波长

信号仍在倏逝场耦合作用下发生功率交换,从端口 a_{12} 或 a_{22} 输出,实现通路功能^[13~15]。

光栅破坏耦合器是基于光栅色散对其阻带内波长耦合的破坏作用,因此应在增大光栅作用的同时减小光纤倏逝场之间的耦合作用。图 4, 5 分别数值计算了光纤间隔 $d = 15 \mu\text{m}$ 时光栅折射率调制 Δn 和长度 L 对滤波特性的影响。图 4 中光栅长度为一个功率完全耦合长度 $\pi / (2K_f) = 0.6382 \text{ cm}$, 折射率调制 Δn 分别为 0.0006, 0.0008 和 0.001, 可以看出,随着 Δn 的增加,下话路端口透射带宽和透射深

度增加,即下话路滤波带宽和峰值增大,当 $\Delta n = 0.001$ 时,即可达到99%的下话路效率;图5中 $\Delta n = 0.001$, L 分别为 $0.6\pi/(2K_f)$, $0.75\pi/(2K_f)$, $\pi/(2K_f)$,随着 L 增大,下话路峰值略有增加,下话路光谱两边的裙带降低,并且由于色散作用增强,光栅

阻带内色散特性不均匀,下话路光谱在滤波带宽内的凹陷逐渐明显。总之, Δn 和 L 都会影响滤波效果,但 Δn 主要影响滤波光谱的带宽特性,而 L 主要影响下话路光谱滤波带宽内的平坦性和滤波带宽以外的裙带特性。

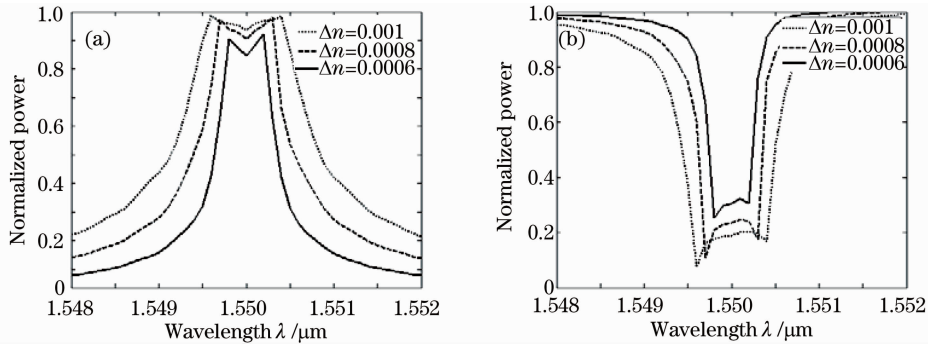


图4 不同 Δn 时光栅破坏耦合器滤波光谱。(a)下话路光谱;(b)透射光谱

Fig. 4 Filtering spectra of grating frustrate coupler with different Δn . (a) drop channel filtering spectra; (b) transmission filtering spectra

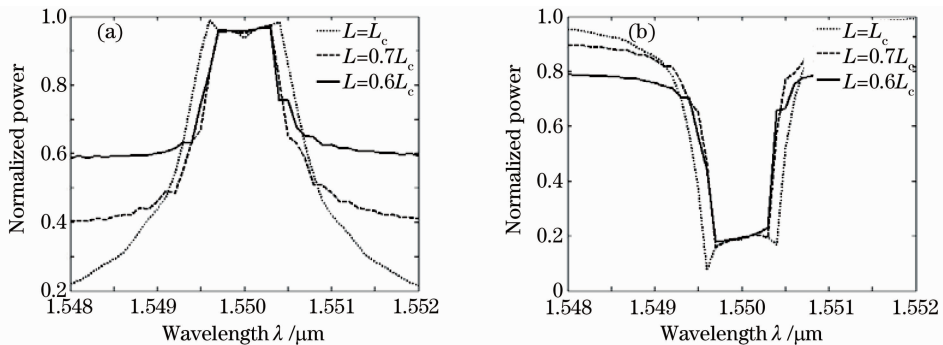


图5 不同 L 时光栅破坏耦合器滤波光谱。(a)下话路光谱;(b)透射光谱

Fig. 5 Filtering spectra of grating frustrate coupler with different L . (a) drop channel filtering spectra; (b) transmission filtering spectra

4 结 论

采用自行推导的统一耦合模理论数值分析了光栅辅助耦合器、光栅反射耦合器和光栅破坏耦合器的滤波响应特性,由于考虑了不同光纤之间反向传输的模式耦合而较好地解释了实验中观察到的光栅反射耦合器旁瓣不对称现象。实验中使用实验室自行设计出的熔融拉锥设备制造具有均匀耦合区的耦合器,并使用相位掩膜法在耦合区写入光栅,制成下话路滤波特性较好的光栅辅助耦合器和光栅反射耦合器。但由于使用的是实验室自行制作的硼、锗共掺光敏光纤,而硼元素在长波长上有较强的吸收,因而光敏光纤的损耗很大;另外拉锥过程中硼、锗元素的扩散也会导致光纤光敏性降低。这两个原因导致所制作的器件的插入损耗较大,实验中测得的通路不很理想。后续工作将通过尝试不同的光敏光纤、改进耦合器制作工艺等方法降低器件插损,以

期为其走向实用化奠定基础。

参 考 文 献

- 1 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]. *光电子·激光*, 2002, **13**(9): 979~982
- 2 Sergei S, 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
- 3 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
- 4 Zhu Songlin, Zhang Xianmin, Chi Hao *et al.*. Analysis of Bragg grating assisted optical fiber symmetric couplers employing the unified coupled-mode theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 990~995
朱松林,章献民,池 灏等. 用统一耦合模理论分析含布拉格光栅的对称光纤耦合器的传输特性[J]. *光学学报*, 2001, **21**(8): 990~995
- 5 Allan W Snyder, Adrian Ankiewicz. Optical fiber couplers-

- optimum solution for unequal cores[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(3): 463~474
- 6 Turan Erdogan. Fiber Grating Spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 7 Liao Bangquan, Zhao Qida, Feng Dejun *et al.*. Coupled-mode theory for optical fiber and its application to fiber Bragg gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11): 1340~1344
廖帮全, 赵启大, 冯德军等. 光纤耦合模理论及其在光纤布拉格光栅上的应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11): 1340~1344
- 8 Liu Chunyu, Ye Hongan, 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
- 9 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
- 10 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
- 11 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
- 12 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
- 13 Dong Xiaowei. Design and fabrication of all-fiber add/drop filter [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006, **36**
董小伟. 全光纤型上下话路滤波器的研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2006, **36**
- 14 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
- 15 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