

# 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\*

董小伟 裴 丽 简水生

(北京交通大学光波技术研究所,北京 100044)

(2005 年 12 月 21 日收到,2006 年 2 月 5 日收到修改稿)

通过在失配光纤消逝场间的耦合作用中引入光栅调制扰动效应,推导出用于解释光栅辅助耦合器响应特征的耦合模方程,在此基础上全面分析了两光纤间的失配度对上下话路滤波性能的影响.采用非对称熔融预拉锥工艺,调整光纤的结构参数,制成了性能良好的光栅辅助耦合器,实验测试结果与理论计算符合得很好.

关键词:光纤光栅,光纤耦合器,上下话路滤波器,熔融预拉锥

PACC:4281M,4280S,4281

## 1. 引 言

密集波分复用(DWDM)系统的推广和应用使得光纤带宽的利用率显著提高,通信容量不断增长.具有波长选择能力的信道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<sup>[1]</sup>.光纤布拉格光栅具有全光纤特性和优良的波长选择能力,已被广泛地用于光纤通信和光纤传感系统<sup>[2,3]</sup>.但因其为两端口器件并且工作于反射模式,必须与其他器件结合使用,导致成本的提高和插损的增加.近年来,通过将光栅写入光纤耦合器的耦合区形成的新型上下话路滤波器,结合了光栅优良的波长选择能力和耦合器的多端口特性,是结构紧凑、插损低、偏振不敏感的全光纤型器件.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<sup>[4]</sup>.目前,对于这类器件的制作主要采用研磨法<sup>[4]</sup>、熔融拉锥法<sup>[5]</sup>或双芯光纤法<sup>[6]</sup>.熔融拉锥法因工艺简单、技术成熟和重复性好等优势得到了广泛关注,特别是其易于控制的特征,使得人们能够灵活地设计拉锥过程,开发出性能优化的新型器件.

本文以 Snyder<sup>[7]</sup>提出的失配光纤的耦合理论为依据,将光栅调制效应包含到光纤间消逝场耦合作

用中,推导出用于描述光栅辅助耦合器响应特征的耦合模方程,在此基础上全面分析了两光纤间的失配度对上下话路滤波性能的影响.

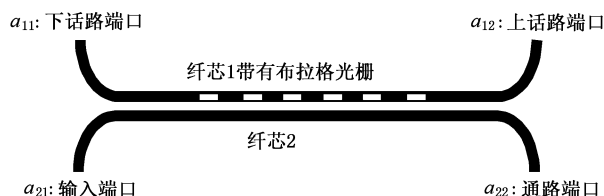


图 1 基于光纤布拉格光栅辅助耦合器的上下话路滤波器

## 2. 理论分析

假设在耦合区的纤芯 1 中写入布拉格光栅,此时光栅辅助耦合器型上下话路滤波器的结构如图 1 所示.由于布拉格光栅的存在,将同时存在前向传输模和反向传输模,在弱导近似条件下,光纤光栅耦合器中的电场可表示为<sup>[7]</sup>

$$E(x, y, z, t) = [g_{1+}(z) \exp(-j\beta_1 z) + g_{1-}(z) \exp(j\beta_1 z)] \cdot \psi_1(x, y) \exp(-j\omega t) + [g_{2+}(z) \exp(-j\beta_2 z) + g_{2-}(z) \exp(j\beta_2 z)] \cdot \psi_2(x, y) \exp(-j\omega t), \quad (1)$$

其中  $g_{u+}(z), g_{u-}(z)$  是纤芯  $u$  ( $u=1, 2$ ) 中前向和反向基模的慢变振幅;  $\psi_u(x, y)$  和  $\beta_u$  分别是各自的横向场分布和传输常数.

将 (1) 式代入完整的标量波动方程

$$[\nabla^2 + k^2 n^2(x, y)]E(x, y, z, t) = \mu \frac{\partial^2}{\partial t^2}[P(x, y, z, t)], \quad (2)$$

式中  $n(x, y)$  是光栅耦合器复合结构的折射率,  $P(x, y, z, t) = \Delta\epsilon \cdot E(x, y, z, t)$  为外部扰动引起的极化强度. 与普通光纤耦合器不同, 由于一个纤芯中写入布拉格光栅,  $\Delta\epsilon$  将不仅由两光纤消逝场间的相互作用引起, 还应该包含光栅折射率的调制扰动.

在 (2) 式两边同乘上  $\psi_u(x, y)$  ( $u=1, 2$ ) 并在无限大横截面上进行积分, 定义光纤间消逝场耦合系

$$M = \frac{1}{1 - N_{12}^2} \times \begin{bmatrix} -(C_{11} - N_{12}C_{12}) & -\left(\frac{K_{11} - N_{12}K_{12}}{2}\right)\exp(j\delta_1 z) & -(C_{21} - N_{12}C_{22})\exp(j\Delta\beta z) & -\left(\frac{K_{12} - N_{12}K_{22}}{2}\right)\exp(j\delta_{12} z) \\ \left(\frac{K_{11} - N_{12}K_{12}}{2}\right)\exp(-j\delta_1 z) & (C_{11} - N_{12}C_{12}) & \left(\frac{K_{12} - N_{12}K_{22}}{2}\right)\exp(-j\delta_{12} z) & (C_{21} - N_{12}C_{22})\exp(-j\Delta\beta z) \\ -(C_{12} - N_{12}C_{11})\exp(-j\Delta\beta z) & -\left(\frac{K_{21} - N_{12}K_{11}}{2}\right)\exp(j\delta_{12} z) & -(C_{22} - N_{12}C_{21}) & -\left(\frac{K_{22} - N_{12}K_{21}}{2}\right)\exp(j\delta_2 z) \\ \left(\frac{K_{21} - N_{12}K_{11}}{2}\right)\exp(-j\delta_{12} z) & (C_{12} - N_{12}C_{11})\exp(j\Delta\beta z) & \left(\frac{K_{22} - N_{12}K_{21}}{2}\right)\exp(-j\delta_2 z) & (C_{22} - N_{12}C_{21}) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中  $N_{12} = \int_{A\infty} \psi_1 \psi_2 dA$ , 当耦合过程为缓变、绝热时,  $N_{12} = 0$  表示两光纤中场的正交性<sup>[8]</sup>.  $\delta_1 = 2\beta_1 - \frac{2\pi}{\Lambda}$ ,  $\delta_2 = 2\beta_2 - \frac{2\pi}{\Lambda}$  和  $\delta_{12} = \beta_1 + \beta_2 - \frac{2\pi}{\Lambda}$  分别为光纤 1, 2 在光栅作用下的自相位失谐和上下话路间的交叉相位失谐.  $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$  为代表两光纤传输常数的失配度. 因此耦合方程中共有 4 个功率耦合过程, 分别由系数  $\exp(\pm j\delta_1 z)$ ,  $\exp(\pm j\delta_2 z)$ ,  $\exp(\pm j\delta_{12} z)$  和  $\exp(\pm j\Delta\beta z)$  决定. 当相位条件  $\delta_{12} = \beta_1(\lambda_{12}) + \beta_2(\lambda_{12}) - \frac{2\pi}{\Lambda} \approx 0$  时, 将对波长为  $\lambda_{12}$  的信号实现有效的上下话路; 与此同时, 如果两光纤间的失配度  $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$  较低, 其他三项的作用也不可忽略, 并将在上下话路波长区产生干扰. 为提高滤波效率, 改善上下话路的光谱响应, 我们采用非对称熔融预拉锥工艺来增强两光纤间的失配度.

根据传输常数对光纤结构的依赖性, 在保持纤芯和包层的折射率不变的条件下, 将纤芯半径从  $\rho$

数和光栅扰动引起的耦合系数分别为  $C_{uv}$  和  $K_{uv}$ :

$$C_{uv} = k_0 \int_{A\infty} [n(x, y) - n_u(x, y)]\psi_u \psi_v dA = k_0(n_{cv} - n_{cd}) \int_{A\infty} \psi_u \psi_v dA, \quad (3)$$

$$K_{uv} = k_0 \Delta n \int_{A1} \psi_u \psi_v dA, \quad u, v = 1, 2, \quad (4)$$

式中  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为波矢量;  $n_u$  为第  $u$  个光纤单独存在时的折射率分布, 其中纤芯为  $n_{cu}$ , 包层为  $n_{cl}$ ;  $\Delta n = \delta n \cos(2\pi z/\Lambda)$  为光栅的折射率调制,  $\Lambda$  为光栅的调制周期.

这样, 布拉格光栅耦合器的耦合模方程可表示成

$$\frac{dV}{dz} = jM \cdot V, \quad (5)$$

其中  $V = [g_{1+}(z), g_{1-}(z), g_{2+}(z), g_{2-}(z)]^T$

降到  $\rho - \delta\rho$ , 其纵向传输常数将变为<sup>[9]</sup>

$$\bar{\beta} = \beta - (2\Delta)^{1/2} \frac{\delta\rho}{\rho} \frac{U^2}{V} \frac{K_0^2(W)}{K_1^2(W)}. \quad (7)$$

其中  $U$  是纤芯横向传出常数,  $W$  是包层横向衰减常数,  $V$  是归一化频率,  $K_0, K_1$  是零阶和一阶第二类修正 Bessel 函数.

如果采用非对称工艺, 保持光纤 1 不变而预拉伸光纤 2, 则两光纤的失配度将增加为

$$\Delta\bar{\beta} = \beta_1 - \bar{\beta}_2 = \Delta\beta + (2\Delta)^{1/2} \frac{\delta\rho}{\rho} \frac{U^2}{V} \frac{K_0^2(W)}{K_1^2(W)}. \quad (8)$$

这样在上下话路波长  $\lambda_{12}$  范围内, 由于含有系数  $\exp(\pm j\delta_1 z)$ ,  $\exp(\pm j\delta_2 z)$  和  $\exp(\pm j\Delta\beta z)$  的作用项沿  $z$  方向的振荡加剧, 在耦合过程中其平均效果近似为零.

### 3. 数值分析与实验结果

对于布拉格光栅辅助耦合器, 由于其输入条件

的两点边值性,我们需要首先采用 Broyden 迭代和打靶法将输入的两点边值转换成同一侧初值条件,才能利用 Runge-Kutta 法对耦合方程进行数值积分<sup>[10]</sup>,得到各个端口的输出特性。

### 3.1. 布拉格光栅辅助耦合器的下话路特性

在对器件的下话路特性进行分析时,假设信号从  $a_{21}$  端口输入,光栅长度为  $L$ ,此时输入条件为  $g_{1+}(0)=0, r_{g1-}(L)=0, r_{g2+}(0)=1, r_{g2-}(L)=0$ 。

图 2 数值计算了两光纤间失配度分别为  $\Delta\beta = 5.81 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$ 、 $\Delta\beta = 1.23 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$  时,下话路和通路的滤波光谱。对比发现,增加失配度可有效地改善滤波光谱响应的非对称和通带强度的不均匀,避免了信号下话路时的失真。

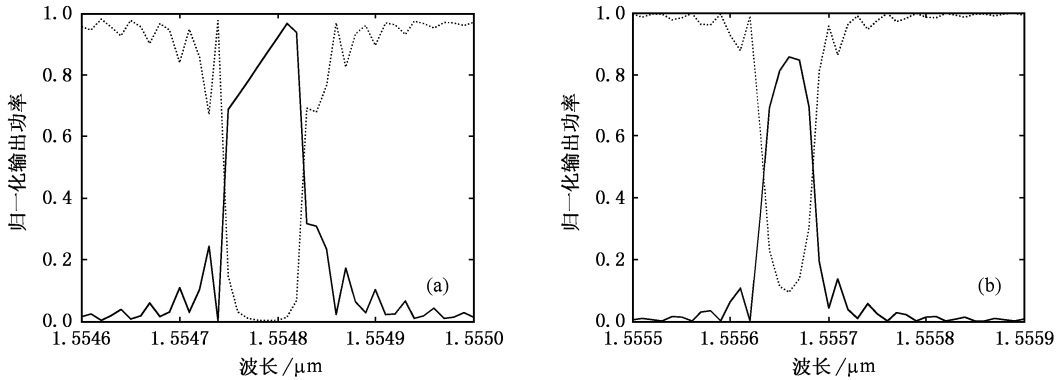


图 2 两光纤间的失配度对滤波光谱的影响 (a)  $\Delta\beta = 5.81 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$  (b)  $\Delta\beta = 1.23 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$

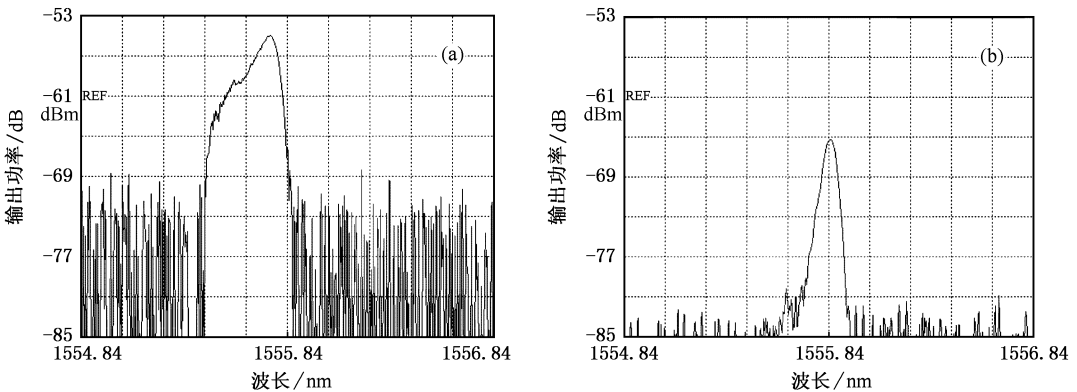


图 3 非对称熔融拉伸工艺制作的光栅辅助耦合器的下话路滤波光谱响应 (a) 没有预拉伸的情况 (b) 对光纤 2 实施预拉伸, 拉伸比  $\delta\rho/\rho = 0.22$  时的情况

为模拟所制作的器件在多波长输入信号时的下话路情况,将 8164B 可调谐激光器输出的波长间隔为 1.6nm 的两路信号从器件的  $a_{21}$  端口输入,然后采

为验证上面方案的可行性,我们制作了高性能的光栅辅助耦合器型上下话路滤波器。首先采用高精度程控设备对熔融拉锥耦合过程进行监控,并通过缓变非对称预拉伸技术,调整光纤的结构参数,来改变光纤间的失配度,然后利用相位掩膜法在所制作的失配耦合器的耦合区写入布拉格光栅,由于构成耦合器的两根光纤中光纤 1 为光敏光纤,而光纤 2 为 SMF-28 普通单模光纤,因此从 Bragg-star 激光器中输出的波长为 248nm 的紫外激光只能在纤芯 1 中实现折射率调制,其中掩膜版的周期为 537nm,光栅的长度为 30mm。图 3(a) 为没有预拉伸时,光栅辅助耦合器的下话路光谱,图 3(b) 为对光纤 2 实施预拉伸,拉伸比  $\delta\rho/\rho = 0.22$  时所测得的光谱响应。实验结果与上面的理论计算相当符合。

用分辨率为 0.01nm 的 ANDO AQ6317C 光谱分析仪在端口  $a_{11}$  和  $a_{22}$  进行测量,得到的结果如图 4 所示。由于波长为 1555.825nm 的信号 2 正好位于下话路

滤波响应的中心, 将从端口  $a_{11}$  输出, 而对于偏离下话路通带的波长为 1554.225nm 的信号 1, 将穿越器件到达端口  $a_{22}$  继续传输. 下话路和通路的插损分别为 6.6dB 和 2.7dB.

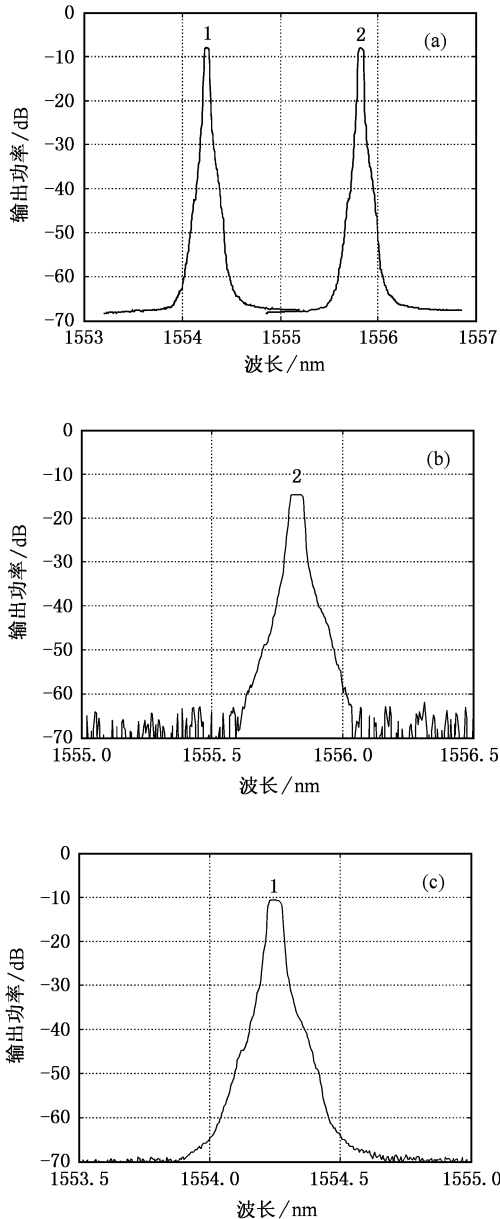


图 4 信号下话路实验 (a) 可调谐激光器输出的两路信号 (b) 从端口  $a_{11}$  测得的下话路输出 (c) 从端口  $a_{22}$  测得的通路信号

### 3.2. 影响信号上话路的因素

尽管根据互易性, 器件的上话路滤波光谱与下

话路的滤波光谱相一致, 但是, 在进行上话路滤波时, 光信号从写有布拉格光栅的光纤端口  $a_{12}$  输入, 由于光栅自身的耦合远大于光栅辅助引起的交叉耦合, 从而将产生带宽很宽、强度很大的光栅自身的反射光谱. 如果上话路波长落入光栅自身的反射光谱内, 则大部分信号将被反射, 不仅导致信号的损失, 还可能对光源造成影响<sup>[11]</sup>. 因此, 为实现有效的上话路滤波响应, 必须调整光栅自身的反射, 使其光谱远离上话路滤波响应的通带. 这也可以通过增强两光纤间的失配度, 增大滤波响应中心波长  $\lambda_{12}$  与光栅自身反射的中心波长  $\lambda_1$  (由  $\delta_1 = 2\beta_1(\lambda_1) - \frac{2\pi}{\Lambda} \approx 0$  确定) 的间距来实现.

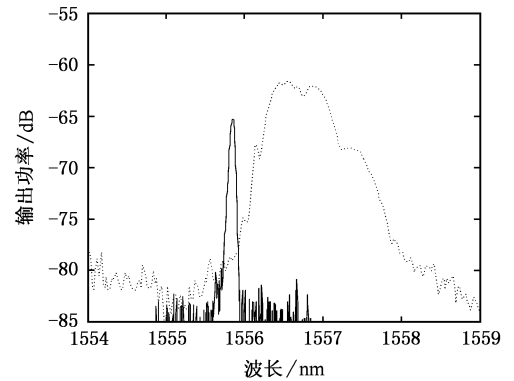


图 5 光纤失配度  $\Delta\beta = 1.23 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$  时, 光栅自身反射谱(点线)与上/下话路滤波响应光谱(实线)的相对位置

图 5 给出了两光纤失配度为  $\Delta\beta = 1.23 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$  时, 光栅自身反射谱(点线)与上下话路滤波响应光谱(实线)的相对位置. 可见上下滤波响应完全偏离了光栅自身的反射, 极大地降低了信号损失, 改善了上话路的滤波效率.

## 4. 结 论

采用非对称熔融预拉伸工艺, 制作了基于光纤光栅辅助耦合器型的上下话路滤波器. 通过调整两光纤间的失配, 极大地增强了滤波响应光谱的对称性和波长选择能力, 同时降低了光栅自身反射对上话路信号造成的影响. 这种低插损、高效率的上下话路滤波器必将对未来光通信的发展起到重要的推动作用.



- [ 1 ] Tsai T Y , Lee Z C , Gau C S *et al* 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 2251
- [ 2 ] Cao H , Sun J Q , Zhang X L *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3077 ( in Chinese ) [ 曹 辉、孙军强、张新亮等 2004 物理学报 **53** 3077 ]
- [ 3 ] Pei L , Ning T G , Li T J *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1630 ( in Chinese ) [ 裴 丽、宁提纲、李唐军等 2005 物理学报 **54** 1630 ]
- [ 4 ] Dong L , Hua P , Birks T A *et al* 1996 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** 1656
- [ 5 ] Luo A P , Marin E , Meunier J P *et al* 2004 *Chinese J. Lasers* **31** 1491 ( in Chinese ) [ 罗爱平、Emmanuel Marin、Jean-Pierre Meunier 等 2004 中国激光 **31** 1491 ]
- [ 6 ] An H L , Ashton B , Fleming S 2004 *Opt. Lett.* **29** 343
- [ 7 ] Snyder A W , Ankiewicz A 1988 *J. Lightwave Technol.* **6** 463
- [ 8 ] Riziotis C , Zervas M N 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 92
- [ 9 ] Zhang R F , Ge C F , Wang S H *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 390 ( in Chinese ) [ 张瑞峰、葛春风、王书慧等 2003 物理学报 **52** 390 ]
- [ 10 ] Liu G J , Li Q , Jin G L *et al* 2004 *Opt. Commun.* **235** 319
- [ 11 ] Erdogan T 1998 *Opt. Commun.* **157** 249

## Add/drop channel filter based on fiber-Bragg-grating-assisted coupler fabricated by asymmetric fused taper technology<sup>\*</sup>

Dong Xiao-Wei Pei-Li Jian Shui-Sheng

( Institute of Lightwave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China )

( Received 21 December 2005 ; revised manuscript received 5 February 2006 )

### Abstract

All-fiber add/drop filter based on fiber-Bragg-grating ( FBG ) assisted coupler is compact and non-interferometric , which reduces the device 's sensitivity to the grating position. By introducing the grating refractive modulation into the evanescent field coupling , the coupled-mode equation of FBG-assisted coupler is obtained and the influences of fiber mismatch on the filter spectra is investigated thoroughly. And a high-quality FBG-assisted filter is achieved by adjusting fiber structure parameters using asymmetric fused taper technology. The experimentally measured results are in good agreement with the numerical calculations.

**Keywords** : fiber bragg grating ( FBG ) , fiber coupler , add/drop channel filter , pre-drawing fused taper

**PACC** : 4281M , 4280S , 4281

<sup>\*</sup> Project supported by the National " 863 " Project ( Grant No.2001AA312230 ) , the National Natural Science Foundation of China ( Grant No.60337010 ) and the Huo Yingdong Foundation ( Grant No.91062 ).