

两平行长周期光栅耦合器型上下话路滤波器的研究*

董小伟 冯素春 鲁韶华 许 鸥 简水生

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

(2007 年 1 月 5 日收到,2007 年 5 月 24 日收到修改稿)

以两平行长周期光栅耦合器的通用模型为依据,全面分析了两光栅完全对准和存在纵向偏离时器件性能的稳定性和在此基础上深入研究光栅调制强度、环境折射率以及光纤包层厚度等因素的影响,确定出实现 100% 上下话路滤波效率的条件.初步的实验结果表明,不需要对光纤包层进行处理,利用两平行长周期光栅耦合器完全可以实现有效的上下话路.这为进一步简化制作工艺提供了依据.

关键词:长周期光纤光栅,光纤耦合器,上下话路滤波器

PACC:4281M,4280S,4281

1. 引 言

随着粗波分复用系统在城域光网络中的推广和光纤到户光接入网的兴起,迫切需要大量廉价器件的支持^[1,2].特别是利用具有波长选择能力的光上下话路滤波器,可以在网络节点下话路或插入本地用户信号的同时,并不影响其他信号的传输,为提高网络的灵活性和透明性提供了极大的方便^[3,4].近年来,一种两平行长周期光栅耦合器型上下话路滤波器,因其全光纤特性以及极低的背向反射和插入损耗而引起了人们的广泛关注^[5,6].与光纤布拉格光栅相比,长周期光栅不仅制作更加简单、成本更低,而且由于能够将信号功率从纤芯基模转换到包层模^[7],利用包层模较强的消逝场耦合作用,长周期光栅耦合器在提高上下话路滤波效率方面具有明显的优势.

本文首先对两平行长周期光栅耦合器的通用模型进行分析,然后深入研究光栅调制强度、环境折射率以及光纤包层厚度等结构参数的影响,以便确定实现 100% 上下话路滤波效率条件.

2. 器件模型及理论基础

两平行长周期光栅耦合器的通用结构^[8]如图 1

所示,其中光栅周期和长度分别为 Λ 和 L , d 为纤芯间距, L_1 表示两光栅纵向偏离.

输入信号在两平行长周期光栅耦合器中共发生以下三个耦合作用:(i)在长周期光栅 1 的作用下,满足谐振条件的光信号从光纤 1 纤芯基模转换到同向传输的包层模中;(ii)在消逝场作用下,光纤 1 包层模中的功率被耦合到光纤 2 包层模;(iii)在长周期光栅 2 的作用下,耦合到光纤 2 包层模的功率重新转换回纤芯基模.这样,当多波长复用光信号从光纤 1 输入时,将在光纤 1 输出端形成带阻式通路特性,而与之相对应,在光纤 2 输出端呈现带通式下话路滤波响应.

为确定器件性能的稳定性和下面对两长周期光栅完全对准和存在部分偏移的情况进行全面分析.

2.1. 两长周期光栅完全对准 ($L_1 = 0$)

假设构成耦合器的两长周期光栅相同,当它们完全对准时,上述三个耦合作用同时存在,通过将光纤 1 中的纤芯基模、包层模和光纤 2 中的纤芯基模、包层模模场表示为

$$A_1(z) = \bar{A}_1(z) \exp\left(j \frac{\delta}{2} z\right),$$

$$B_1(z) = \bar{B}_1(z) \exp\left(-j \frac{\delta}{2} z\right),$$

$$A_2(z) = \bar{A}_2(z) \exp\left(j \frac{\delta}{2} z\right),$$

*国家自然科学基金(批准号:60477017)、北京市自然科学基金(批准号:4052023)和北京交通大学人才基金(批准号:2007RC015)资助的课题.

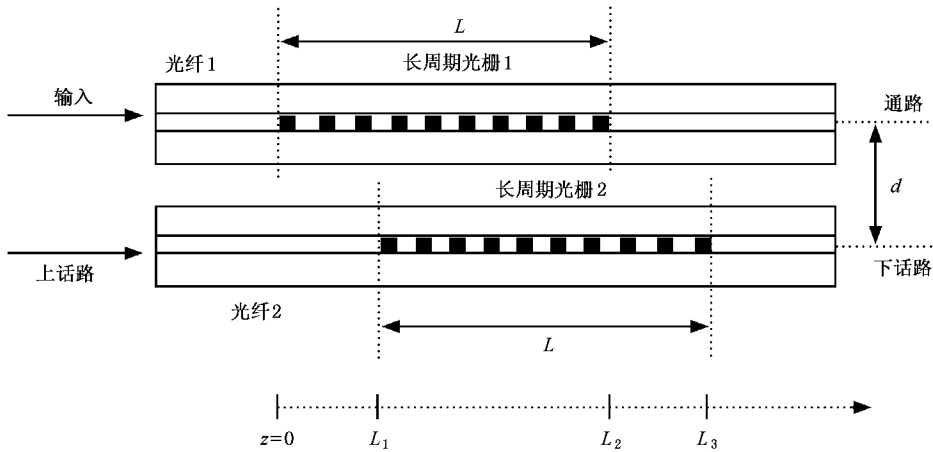


图 1 两平行长周期光栅耦合器型上下话路滤波器结构示意图

$$B_2(z) = \bar{B}_2(z) \exp\left(-j \frac{\delta}{2} z\right).$$

两平行长周期光栅耦合器的耦合方程可写为

$$\frac{dH_1}{dz} = jM_1 H_1, \tag{1}$$

式中

$$H_1 = [\bar{A}_1(z) \quad \bar{B}_1(z) \quad \bar{B}_2(z) \quad \bar{A}_2(z)]^T$$

$$M_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\delta}{2} & -k & 0 & 0 \\ -k & \frac{\delta}{2} & 0 & -C \\ 0 & -C & -k & \frac{\delta}{2} \\ 0 & 0 & -\frac{\delta}{2} & -k \end{bmatrix}.$$

这里 δ 为长周期光栅相位失谐因子, k 为光栅折射率调制 $\Delta n(z)$ 引起的纤芯基模与同向传输包层模间的耦合系数^[7], C 为两光纤包层模消逝场间的耦合系数^[9].

$$\delta = \frac{2\pi}{\Lambda} \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 \right), \tag{2}$$

$$k \approx \frac{\omega}{4} \iint_{\Omega} 2n_1 \Delta n(z) E_{01}^*(x, y) E_{0v}^*(x, y) dx dy \tag{3}$$

$$C = \frac{\sqrt{2\Delta} U^2 K_0 [W(2 + d/\rho)]}{\rho V^3 K_1^2(W)}, \tag{4}$$

式中 λ_0 为光栅的谐振波长, Δ 为相对折射率差, U 和 W 分别为纤芯横向传输常数和包层横向衰减常数, V 为光纤归一化频率, K_0 和 K_1 是零阶和一阶第二类修正 Bessel 函数, ρ 为光纤半径.

2.2. 两长周期光栅纵向偏离 ($0 < L_1 < L$)

当两长周期光栅纵向偏离时, 在区间 $[0, L_1]$ 由

于只有长周期光栅 1, 只发生 (i) (ii) 两个耦合作用, 此时耦合方程可表示为

$$\frac{dH_2}{dz} = jM_2 H_2, \tag{5}$$

式中

$$H_2 = [\bar{A}_1(z) \quad \bar{B}_1(z) \quad \bar{B}_2(z)]^T,$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} -\frac{\delta}{2} & -k & 0 \\ -k & \frac{\delta}{2} & -C \\ 0 & -C & \frac{\delta}{2} \end{bmatrix}.$$

在区间 $[L_1, L_2]$, 由于两个长周期光栅同时存在, 其耦合方程可用方程 (1) 描述.

在区间 $[L_2, L_3]$, 由于只有长周期光栅 2 起作用, 其耦合过程与 $[0, L_1]$ 区间的情况类似. 此时只涉及 (ii) (iii) 两个耦合作用, 如果将 H_3 表示为

$$H_3 = [\bar{A}_2(z) \quad \bar{B}_2(z) \quad \bar{B}_1(z)]^T,$$

则其耦合矩阵

$$M_3 = M_2.$$

3. 数值分析和优化

下面以氢载普通单模光纤 (纤芯折射率 $n_1 = 1.462$, 包层折射率 $n_2 = 1.457$, 纤芯半径 $a = 4 \mu\text{m}$, 包层半径 $\rho = 62.5 \mu\text{m}$) 紫外写入周期 $\Lambda = 480 \mu\text{m}$ 的长周期光栅为依据, 采用 Runge-Kutta 数值积分法对影响器件性能的因素进行详细分析.

图 2 为单根长周期光栅自身初始的透射光谱响

应. 当外界环境为空气, 即 $n_3 = 1$ 时, 计算得到 LP_{03} 模谐振波长 $\lambda_3 = 1358.54 \text{ nm}$ 和 LP_{07} 模谐振波长 $\lambda_7 = 1548.35 \text{ nm}$ 处的光栅耦合系数以及两包层模消逝场间的耦合系数分别为 $k = 10.81 \text{ m}^{-1}$, $C = 0.1720 \text{ m}^{-1}$ 和 $k = 19.537 \text{ m}^{-1}$, $C = 0.9927 \text{ m}^{-1}$. 由此可见, 随着包层模阶数的增加, 由光栅调制引起的纤芯基模与包层模间的耦合以及两包层模消逝场间的耦合效率都明显加强.

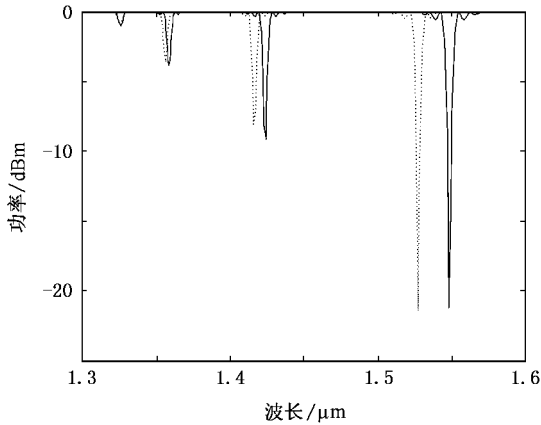


图2 单个长周期光栅自身初始的透射光谱 实线为 $n_3 = 1$, 点线为 $n_3 = 1.452$

当两长周期光栅完全对准构成耦合器时, 图3给出了各模场功率随耦合长度的变化. 从图3可见, 即使对于较高阶 LP_{07} 模, 要将输入到光纤1的信号100%转换到光纤2下话路输出, 也需要光栅长达3054 mm. 这已远远超出了实际制作的可能(采用幅度掩模法, 紫外调制长周期光栅一般最长为200 mm), 因此必须加强消逝场耦合作用, 以降低器件尺寸.

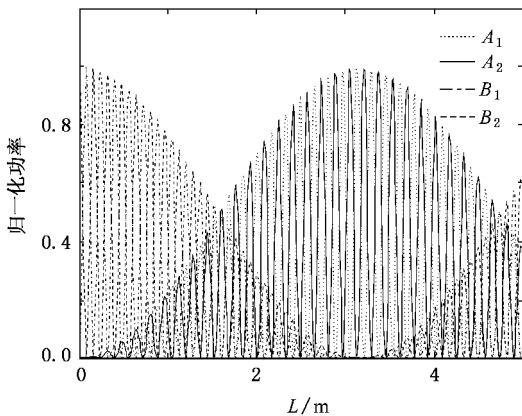


图3 当 $n_3 = 1$ 并且两光栅完全对准时, 各模场功率随器件长度 L 的变化

3.1. 调节外界环境折射率加强消逝场耦合作用

当外界环境折射率接近光纤包层折射率时, 包层模向外扩展程度加大, 可以有效提高消逝场间的耦合作用. 使用三氯甲烷 ($n_3 = 1.452$) 调节外界环境时, LP_{07} 模的谐振波长移到较短处 ($\lambda_7' = 1527.135 \text{ nm}$) (图2), 此时计算得到 $k = 18.7 \text{ m}^{-1}$, $C = 21.7 \text{ m}^{-1}$ 与 $n_3 = 1$ 时相比, 光栅耦合系数 k 几乎不变, 但消逝场耦合系数 C 却大大加强. 从图4(a)可见, 耦合长度 L 仅为145 mm 就可实现100%功率转换, 且从图4(b)可以看出, 下话路滤波响应具有良好的边瓣抑制.

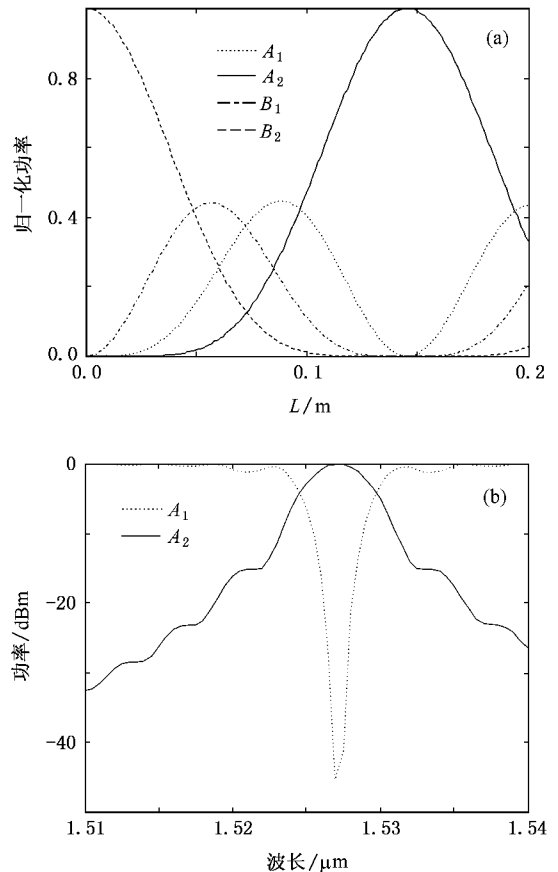


图4 调节外界环境折射率后长周期光栅耦合器的响应特性 (a) 各模场功率随作用长度的变化, (b) 通路和下话路滤波响应

3.2. 光栅折射率调制强度的影响

从(3)式可以看出, 光栅耦合系数与折射率调制强度 Δn 成正比. 如果在调节外界环境增大消逝场间耦合作用的同时提高光栅调制强度, 光栅耦合系数 k 将增大. 例如对于 LP_{07} 模, 当光栅折射率调制从 $\Delta n = 5 \times 10^{-5}$ 变为 $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$ 时, 光栅耦合系

数 k 将增强到 187 m^{-1} . 图 5 为两光栅完全对准, 实现 100% 功率转换所需的器件长度以及对应的通路和下话路滤波响应. 与图 4(b) 比较后可以看出, 图 5(b) 近似方形的下话路滤波特性对提高信号质量非常有利.

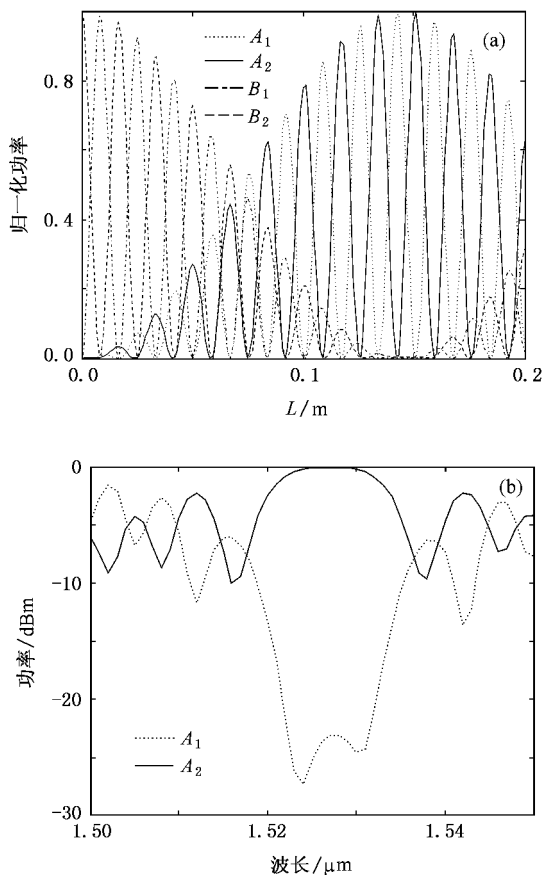


图 5 增强光栅调制深度后长周期光栅耦合器的响应特性 (a) 各模场功率随作用长度 L 的变化 (b) 通路和下话路滤波响应

为了研究器件性能的稳定性, 我们还对两长周期光栅并未完全对准的情况进行了研究. 从图 6 可以看出, 对于长度一定 ($L = 120 \text{ mm}$) 的光栅, 通过调节它们之间的纵向偏移距离 L_1 为 5 mm 时, 不仅仍然可将信号 100% 转换到光纤 2, 而且与两光栅完全对准相比, 所需光栅长度和整个器件的尺寸都将减小 (存在纵向偏移时, 光栅长度 $L = 120 \text{ mm}$, 器件总长度 $L + L_1 = 125 \text{ mm}$; 完全对准时, 光栅长度等于器件总长度 145 mm), 器件结构更加简洁.

3.3. 光纤包层厚度的影响

虽然制作光纤耦合器大都需要采用研磨或氢氟酸腐蚀等方法来降低光纤包层厚度, 以便加强消逝

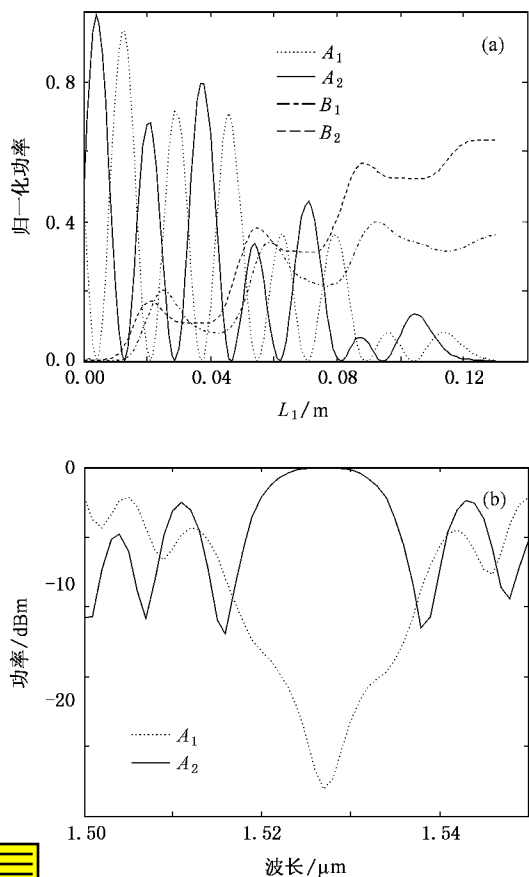


图 6 长周期光栅耦合器的稳定性 (a) 长度为 120 mm 的两长周期光栅存在部分偏移时各模场功率随偏移距离 L_1 的变化 (b) 调节偏移距离 $L_1 = 5 \text{ mm}$ 实现 100% 功率转换时通路和下话路的滤波响应

场耦合作用, 但是包层厚度降低时, 长周期光栅的谐振光谱将极大地向长波长方向移动^[10]. 例如, 当包层半径从 $\rho = 62.5 \mu\text{m}$ 减小到 $\rho = 30 \mu\text{m}$ 时, 原 $\lambda_3 = 1556.1 \text{ nm}$ ($n_3 = 1.452$) 附近的谐振波长将移到 $\lambda'_3 = 1583.8 \text{ nm}$ ($n_3 = 1.452$). 这就导致在光栅实际制作长度范围 ($L = 200 \text{ mm}$) 内, 不仅最大功率转换效率仅为 95.8% , 而且下话路滤波特性严重恶化 (见图 7).

4. 实验结果

为验证上述数值分析的可信性, 我们实验制作两平行长周期光栅耦合器. 先是调节 Bragg-Star 激光器使其输出频率为 30 Hz , 能量为 9 mJ 的紫外激光, 在氢载单模光纤上写入周期 $\Lambda = 480 \mu\text{m}$ 的长周期光栅. 为避免两次写入的长周期光栅非一致造成器件性能恶化, 在制作中需要进行应力微调. 然后

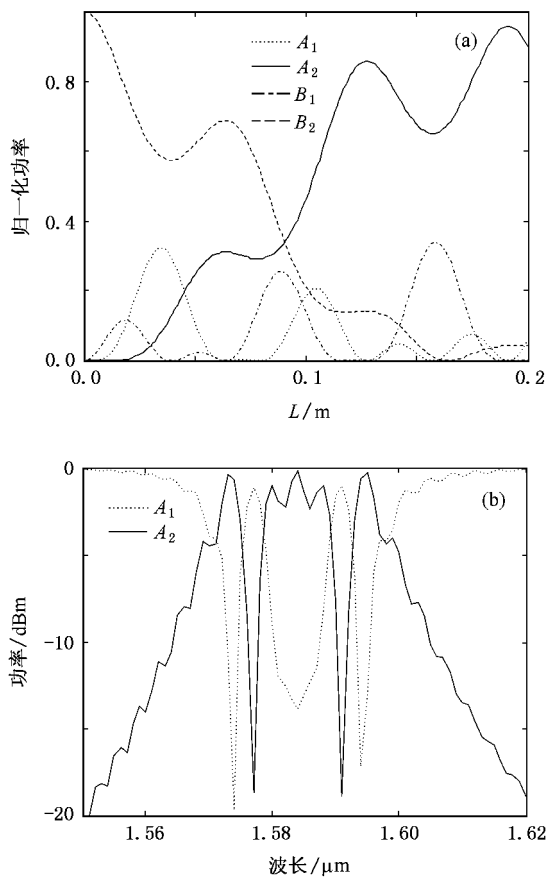


图7 包层厚度降低为 $\rho = 30 \mu\text{m}$ 时长周期光栅耦合器的响应特性 (a) 各模场功率随作用长度 L 的变化 (b) 最大功率转换(仅为 95.8%) 处通路和下话路的滤波响应

将两平行长周期光栅紧密靠近, 并通过调节光栅所处环境, 加强所构成耦合器的功率转换效率。

首先, 为全面研究两平行长周期光栅耦合器形成的多个谐振响应, 我们采用宽带发光二极管光源作为输入, 并利用 ANDO 6317C 型光谱分析仪在两输出端口进行监测, 获得的通路和下话路滤波光谱如图 8 所示。从图 8 可以看出, 高阶谐振的下话路(中心波长为 1630 nm)功率相比于低阶谐振功率提高近 5 dB, 因此增加包层模阶数对改善滤波效率非常有利。

其次, 为研究调制强度对耦合效率的影响, 我们提高激光器输出能量并重新写入两根长周期光栅。由于过调制 ($kL > \pi/2$) 效应, 此时 1630 nm 附近高阶谐振的深度已从最大值恢复到较小值(图 9), 因此当将两长周期光栅紧密相靠构成耦合器后, 滤波响应主要由 1515 nm 处的谐振实现。图 10 为测试得到的两平行长周期光栅耦合器的通路和下话路滤波响应。从图 10(a) 可以看出, 加强光栅折射率调制强度

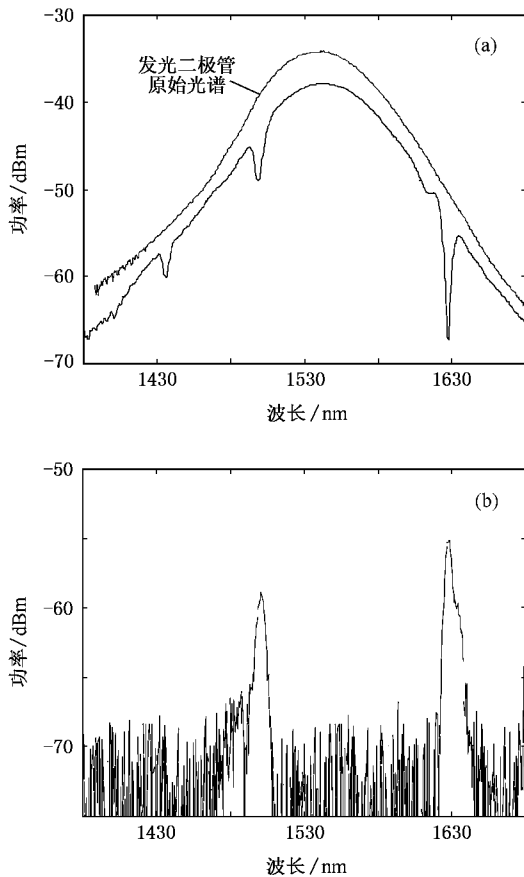


图8 长周期光栅耦合器的实验测试结果 (a) 通路滤波响应, (b) 下话路滤波响应

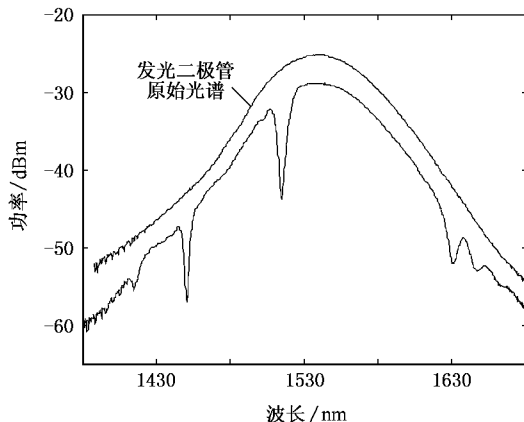


图9 光栅调制加强后单个长周期光栅的透射光谱

可以明显改善下话路响应形状, 使其更接近于方形。这就有效地验证了图 5(b) 数值分析的结果。

最后, 为研究包层厚度对下话路滤波特性的作用, 我们将上述两根光栅在氢氟酸溶液中浸泡 15 min, 当光纤直径降低到 $90 \mu\text{m}$ 时, 长周期光栅的谐振波长从原 1515 nm 移动到 1570 nm, 此时测得的通

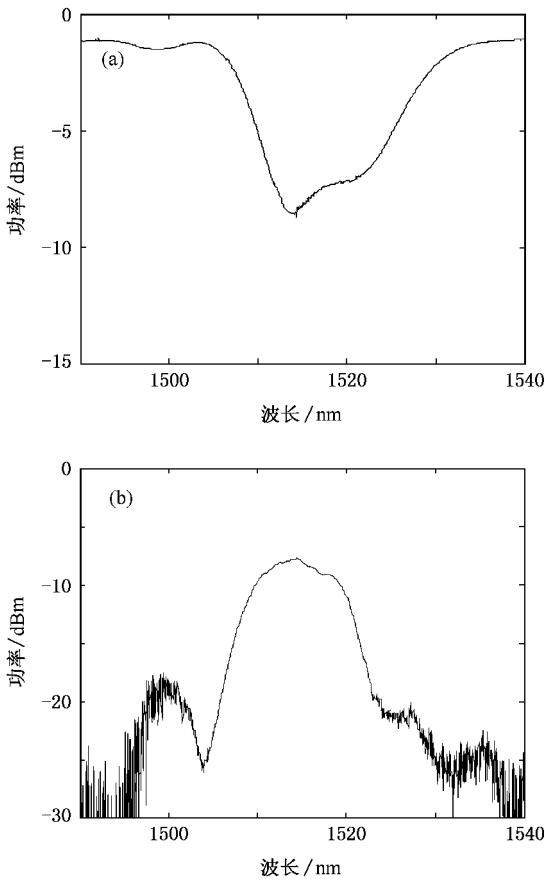


图 10 光栅折射率调制加强后长周期光栅耦合器的测试结果 (a) 通路滤波响应 (b) 下话路滤波响应

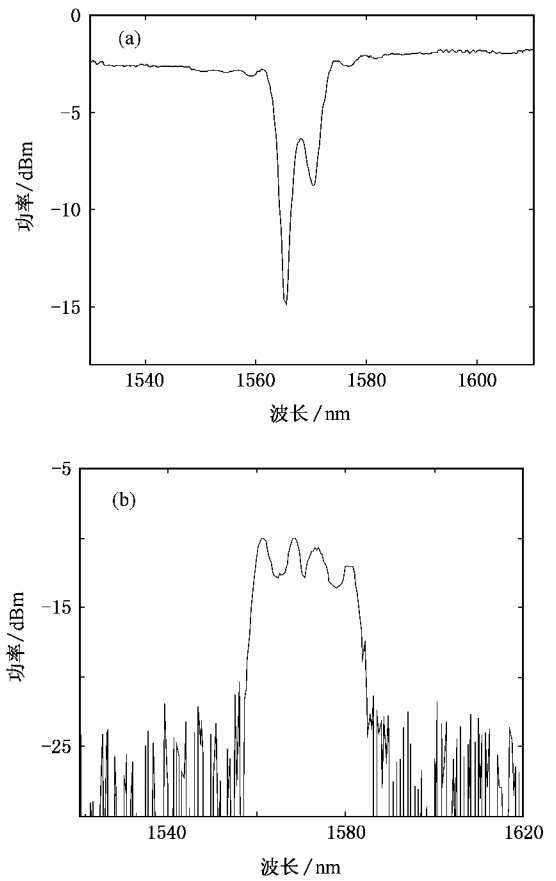



图 11 氢氟酸腐蚀后长周期光栅耦合器的测试结果 (a) 通路滤波响应 (b) 下话路滤波响应

路和 下话路滤波响应如图 11 所示. 将图 11 与图 10 比较后可以看出: 一方面, 通路响应的消光特性得到一定程度的改善, 这是由于光栅耦合系数对波长的依赖性以及消逝场间耦合作用随包层厚度减小而加强. 另一方面, 包层厚度的减小却造成下话路响应平坦性严重恶化. 因此, 兼顾通路和下话路的滤波特性, 我们认为不对长周期光栅包层进行处理对提高器件性能将更加有利.

5. 结 论

深入分析了两平行长周期光栅耦合器的上下话路滤波特性. 结果表明, 提高光栅调制强度、调节环境折射率可明显加强下话路滤波效率, 而且不需要对光纤包层进行处理, 完全可以实现良好的下话路滤波效果. 这为进一步简化制作工艺提供了依据.

- [1] Park S, Leavitt R, Enck R, Luciani V, Hu Y, Heim P J S, Bowler D, Dagenais M 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 980
- [2] Zhu T, Rao Y J, Mo Q J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 249 (in Chinese) [朱 涛、饶云江、莫秋菊 2006 物理学报 **55** 249]
- [3] Rotolo S, Tanzi A, Brunazzi S, Dimola D, Cibinetto L, Lenzi M, Bona G L, Offrein B J, Horst F, Germann R, Salemnik H W M, Baechtold P H 2000 *J. Lightwave Technol.* **18** 569
- [4] Dong X W, Pei L, Jian S S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4739 (in Chinese) [董小伟、裴 丽、简水生 2006 物理学报 **55** 4739]
- [5] Lam P K, Stevenson A J, Lo  2000 *Electron. Lett.* **36** 967

- [6] Chiang K S, Liu Y Q, Ng M N, Li S P 2000 *Electron. Lett.* **36** 1408
- [7] Erdogan T 1997 *J. Opt. Soc. Am.* **14** 1760
- [8] Chiang K S, Chan F Y M, Ng M N 2004 *J. Lightwave Technol.* **22** 1358
- [9] Zhang R F, Ge C F, Wang S H, Hu Z Y, Li S C 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 390 (in Chinese) [张瑞峰、葛春风、王书慧、胡智勇、李世忱 2003 物理学报 **52** 390]
- [10] Zhou K M, Liu H T, Hu X W 2001 *Opt. Commun.* **197** 295

Add-drop channel filter based on two parallel long-period grating coupler^{*}

Dong Xiao-Wei Feng Su-Chun Lu Shao-Hua Xu Ou Jian Shui-Sheng

(Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education , Institute of Lightwave Technology , Beijing Jiaotong University , Beijing 100044 , China)

(Received 5 January 2007 ; revised manuscript received 24 May 2007)

Abstract

Based on the general model of two parallel long-period grating coupler , the device stability was investigated by studying the grating longitudinal offset. Influences of modulation depth , surrounding refractive index and fiber cladding thickness were analyzed and the conditions for achieving 100% add-drop filtering was obtained. The measured experimental results demonstrated that efficient add-drop channel filter could be achieved even if the claddings were not reduced , which provided a method to simplify device fabrication in the further.

Keywords : long-period fiber grating , fiber coupler , add-drop channel filter

PACC : 4281M , 4280S , 4281

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60477017) , the Natural Science Foundation of Beijing , China (Grant No. 4052023) and the Foundation of Excellent Talents of Beijing Jiaotong University , China (Grant No. 2007RC015) .