

文章编号:1004-4213(2010)02-0238-5

一种通道数可变的光纤光栅梳状滤波器*

董新永¹, 李岚¹, 沈平^{2a}, 陈志超^{2b}

(1 中国计量学院光电子技术研究所, 杭州 310018)

(2 a. 南洋理工大学网络技术研究中心; b. 南洋理工大学化学与生物医学工程学院, 新加坡 639798)

摘要:利用级联长周期光纤光栅与具有宽带反射功能的啁啾光纤光栅, 构成了一种反射型的光纤光栅梳状滤波器. 由于光在输出前经过两次干涉滤波作用, 所以该梳状滤波器的消光比与透射输出型(即反射前)相比, 增加了一倍. 而且, 通过调节啁啾光纤光栅的反射带宽, 可以改变滤波器输出信道的数目. 实验中利用弹性梁弯曲的方法, 获得了两个可调的光纤光栅梳状滤波器, 其信道数可分别在 1~5 和 3~9 之间的奇数间调谐(如果改变啁啾光纤光栅的初始中心波长, 也可以获得偶数信道间的调谐).

关键词:长周期光纤光栅; 梳状滤波器; 通道可调滤波器; 啁啾光纤光栅

中图分类号: TN25

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103902.0238

0 引言

光纤光栅具有优异的滤波性能、很低的插入损耗及与光纤网络兼容等许多优点, 因此在光纤通信和传感系统中获得大量应用^[1-3]. 近年来, 基于一对长周期光纤光栅结构的迈克尔逊干涉仪(LPG-MZI)成为研究的一个热点^[4-5]. 在 LPG-MZI 中, 光在经过第一个长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPG)时, 部分基模光被耦合到包层模(即高阶模式)中, 在光纤包层中传输一定距离后, 在经过第二个 LPG 时, 通过模式耦合回到基模, 与一直在纤芯中传输的基模光产生干涉作用, 两个 LPG 之间的光纤纤芯和包层分别充当干涉器的两臂, 光程差由光纤纤芯和包层的折射率差和两个 LPG 之间的距离决定. 通过精确控制两个 LPG 的包层模耦合强度, 使其在设计波长达到均匀分光的效果, 就可以得到高消光比的干涉滤波效果. 应用这种技术, 可以得到低插损的光纤波分复用滤波器^[4,6]. 通过改变应力、温度或利用非线性效应改变纤芯折射率等方法, 可以对该滤波器的信道波长可以进行调谐^[6-8], 其信道间隔则可以通过改变两个 LPG 之间的距离来实现^[5]. 因此, LPG-MZI 滤波器在光纤激光器和传感领域中都得到应用^[8-10]. 然而, 由于 LPG 模式耦合强度的波长依赖性, LPG-MZI 滤波器的消光比

有严重的波长依赖性, 只有在相对窄的带宽范围内(对应于 LPG 的 3-dB 分光区域)才具有较高的消光比, 在其余波段, 特别是在 LPG 耦合带的两个边缘, 消光比是非常低的. 这限制了 LPG-MZI 滤波器的有效带宽, 严重阻碍了其在带宽或消光比要求高的系统中的应用.

本文提出一种新方法, 将 LPG-MZI 滤波器与具有宽带反射功能的器件(如啁啾光纤光栅)结合, 构成了一种反射型的光纤光栅梳状滤波器. 由于光在输出前经过两次干涉滤波作用, 所以得到的消光比增加了一倍, 有效带宽(在相同消光比要求情况下的带宽)也得到了相应的扩展. 而且, 通过改变啁啾光纤光栅的反射带宽, 可以改变滤波器的信道数, 从而得到信道数可变的梳状滤波器. 实验中利用弹性梁弯曲的方法, 获得两个信道数分别在 1~5 和 3~9 之间可调的光纤光栅梳状滤波器.

1 设计与原理

LPG-MZI 设计原理见图 1, 图中 TLS 为可调激光光源; OSA 为光谱分析仪; LPG 为长周期光纤光栅, CFBG 为啁啾光纤光栅. LPG-MZI 是在一段除去涂覆层的单模光纤上级联写入两个周期及长度相同的 LPG 构成的. 第一个 LPG 将部分基模能量耦合到包层模中, 包层模的光传输到第二个 LPG 时, 与一直在纤芯中传输的剩余基模光通过模式耦合产生干涉. 光纤的纤芯和包层充当了干涉器的两臂, 光程差由纤芯和包层的折射率之差引入, 而干涉输出是从透射端输出的.

*国家自然科学基金(60807021)和浙江省自然科学基金(R1080087)资助

Tel: 0571-87676260

Email: xydong@cjlu.cn

收稿日期: 2009-04-09

修回日期: 2009-07-09

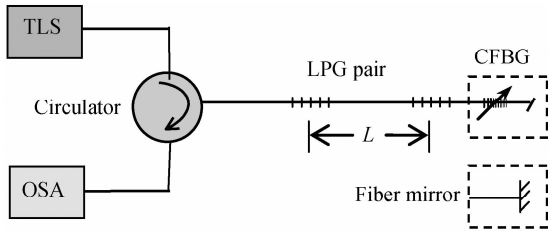


图1 滤波器设计与测量系统

Fig.1 Design and measurement system of the proposed optical comb filter based on an LPG pair and a bandwidth-tunable CFBG

LPG-MZI 的自由光谱范围 (Free Spectrum Rang, FSR) 可以表示为

$$S = \frac{2\pi\lambda}{(\beta_{\text{core}} - \beta_{\text{clad}})L} \quad (1)$$

式中 λ 是波长, L 是两个 LPG 之间的距离, β_{core} 和 β_{clad} 分别是纤芯和包层模的传播常数. 其最高和最低透射率取决于 LPG 在此波长的透射率 (T_s), 分别表示为

$$T^{\text{min}} = [T_s - \alpha(1 - T_s)]^2 \quad (2)$$

$$T^{\text{max}} = [T_s + \alpha(1 - T_s)]^2 \quad (3)$$

式中 $T_s = \cos^2 sd + (\Delta\beta/2s)^2 \sin^2 sd$ 是单个 LPG 的透射率, d 是光栅的长度, s 被定义为 $s^2 = \kappa\kappa^* + (\Delta\beta/2)$, κ 是光栅的耦合系数, $\Delta\beta = \beta_{\text{core}} - \beta_{\text{clad}} - 2\pi/\Lambda$ (Λ 是 LPG 的周期) 是光栅的失配参量, α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 为描述包层模传输的损耗系数. 如忽略包层模损耗, 即 $\alpha = 1$, 则 $T^{\text{max}} = 1$, 即传输的信道功率没有损耗.

如果将一个宽带反射镜(或 CFBG)串接在 LPG 对的输出端, 对输出的光信号进行反射, 使其再次通过 LPG 对(如图 1 中所示), 则反射回来的光谱的最低和最高反射率的表达式为

$$T_R^{\text{min}} = \gamma[T_s - \alpha(1 - T_s)]^4 \quad (4)$$

$$T_R^{\text{max}} = \gamma[T_s + \alpha(1 - T_s)]^4 \quad (5)$$

式中 $0 \leq \gamma \leq 1$ 是反射镜(或 CFBG)的反射率, 通常 α 和 γ 都接近 1, 即光在光纤包层传输和反射过程中几乎没有损耗. 从式(4)和(5)分析可知, 干涉滤波输出在经过反射以后, 消光比将大大提高. 例如, 假设 $T_s = 0.8$ (对应单个 LPG 传输损耗是 1 dB), 将得 $T^{\text{max}} = T_R^{\text{max}} = 1$, $T^{\text{min}} = 0.36$ 和 $T_R^{\text{min}} = 0.13$, 对应的理论消光比在没有反射和有反射的情况下分别是 4.43 和 8.86 dB. 即, 在没有引入损耗的理想情况下, 通过光束反射, LPG-MZI 滤波器的消光比将被加倍.

2 实验和讨论

实验中, 用一个可调激光源 (Tunable Laser Source, TLS) 和一个光谱分析仪 (Optical Spectrum Analyzer, OSA) 结合光纤环形器来测量长周期光栅

的光谱图及其形成的滤波器的图谱. 长周期光纤光栅对和啁啾光纤光栅都是用一台波长在 244 nm 的倍频氩离子激光器刻写载氢的单模光纤实现的, 写好后在 100 °C 温度下经过 15 h 煏火. LPG-MZI 的两个 LPG 的周期和长度分别是 475 μm 和 12 mm, 其模式耦合强度可以通过改变紫外激光器的光功率和/或光栅长度来调整. 经过测量, 在 1 560 nm 波长附近观测到基模与某个包层模较强的耦合, 基模与其它阶次的包层模之间的耦合产生的滤波作用由于不在实验检测范围之内, 所以无法检测到. 实验制得的两各 LPG-MZI 中的 LPG 的耦合峰值均在 4.5 dB 左右, 超过了平均分光所对应的 3 dB, 因此, 得到 MZI 的最高消光比出现在中心波长的两侧(对应于单个 LPG 的 3 dB 耦合强度的波长). 实验中改变两个 LPG 之间的距离得到了从 1.1 nm 到 4.35 nm 的不同信道间隔. 而用于反射的 CFBG 的中心波长是 1 555 nm, 反射率超过 20 dB, 通过文献 [11] 中报道的悬臂梁弯曲的方法来改变啁啾率和反射带宽.

实验采用两个不同的 LPG-MZI 滤波器, 它们的 LPG 中心间隔分别是 12 cm 和 49 cm, 对应的信道间距分别为 4.35 nm 和 1.1 nm. 测量得到了有无反射镜两种情况下的输出光谱, 如图 2. 图中虚线和实线分别代表反射前和反射后两种情况. 由图可见,

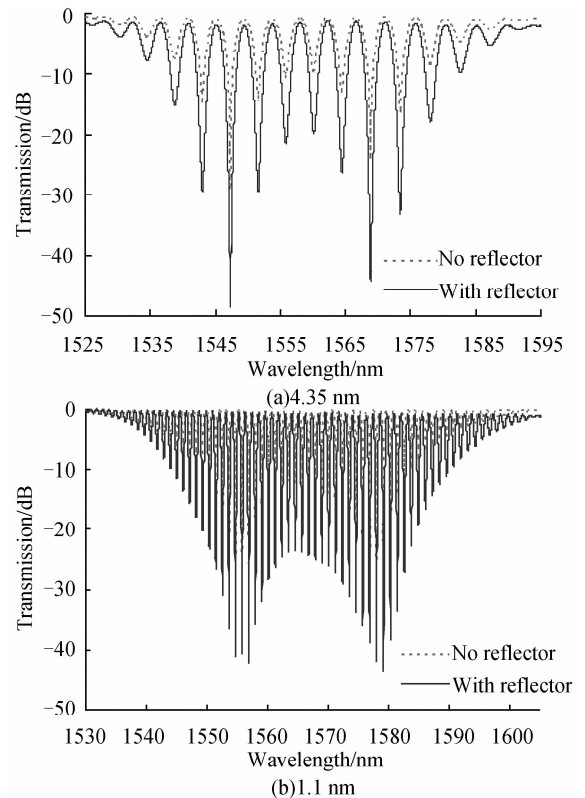


图2 两个 LPG-MZI 在有反射和没有反射情况下的输出光谱
Fig.2 Output spectra of two LPG pair-based MZIs with and without incorporating with a fiber mirror reflector

反射型 LPG-MZI 滤波器的消光比明显增大了:分别从无反射情况下的 29 dB 和 22 dB 增大到 49 dB 和 43 dB. 消光比没有象理论分析得到的那样达到翻倍的效果,主要是由于光谱仪测量精度不够高和取样间隔不够小的缘故. 由于消光比的增加,达到既定消光比(譬如 10 dB)的有效信道数目也增多了. 如果将 10 dB 设为阈值,两个滤波器的信道数目分别从 8 和 34 增加到了 10 和 42. 由此可见反射型 LPG-MZI 滤波器的优点.

实验使用一个反射带宽可调谐的 CFBG 方案,图 3 给出了 LPG-MZI 滤波器的输出光谱图,信道

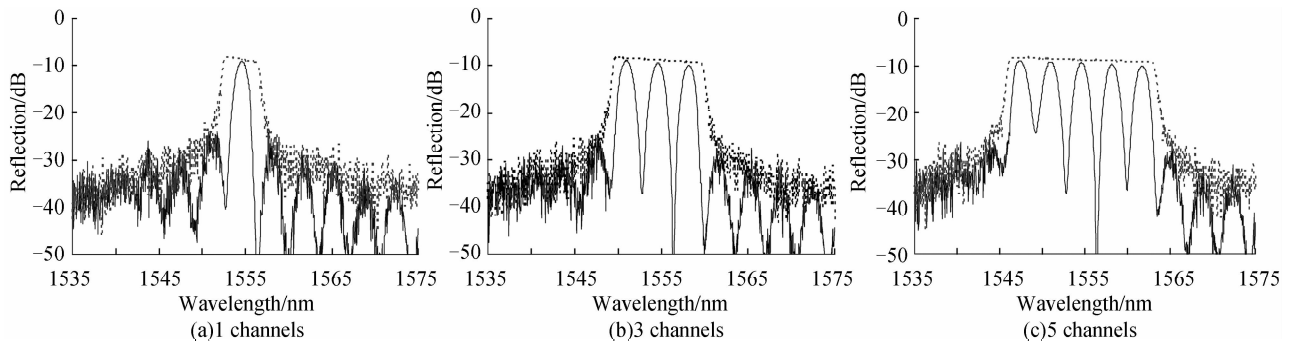


图 3 基于反射带宽调谐的 CFBG 的光纤光栅梳状滤波器的输出光谱
Fig. 3 Output spectra of the hybrid fiber grating-based comb filter

如图 4. 由于实验中采用的 CFBG 反射镜的初始反射率较高,当反射带宽被展宽数倍时,反射率并没有明显的衰减,因此,在提高消光比方面,CFBG 与光纤反射镜具有几乎同样的效果,而信道数目可变却是基于 CFBG 的 LPG-MZI(梳状)滤波器所独具

间隔为 4.35 nm,虚线为 CFBG 的反射谱. 由于 CFBG 的反射带宽有限,形成了一种全光纤光栅组成的梳状滤波器反射后的输出变成了标准的梳状滤波,而且通过改变 CFBG 的反射带宽,该光纤光栅梳状滤波器输出的信道数目可调. 实验中采用了文献[11]中报道的悬臂梁弯曲的方法,来改变 CFBG 的啁啾率和反射带宽. 由图 3 可见,随着 CFBG 的带宽从 5 nm 增加到 20 nm,信道间隔为 4.35 nm 的梳状滤波器的信道数可以从 1 增加到 5 个. 利用同样的技术,在另一个实验中,信道间隔为 2.4 nm 的 LPG-MZI 的信道数目被从 3 改变到了 9,测量结果

的优点. 另外,实验测得信道数目均为奇数,是因为 CFBG 的中心波长与干涉级次的输出峰值一致造成的,如果改变啁啾光纤光栅的初始中心波长,也可以获得偶数信道间的调谐.

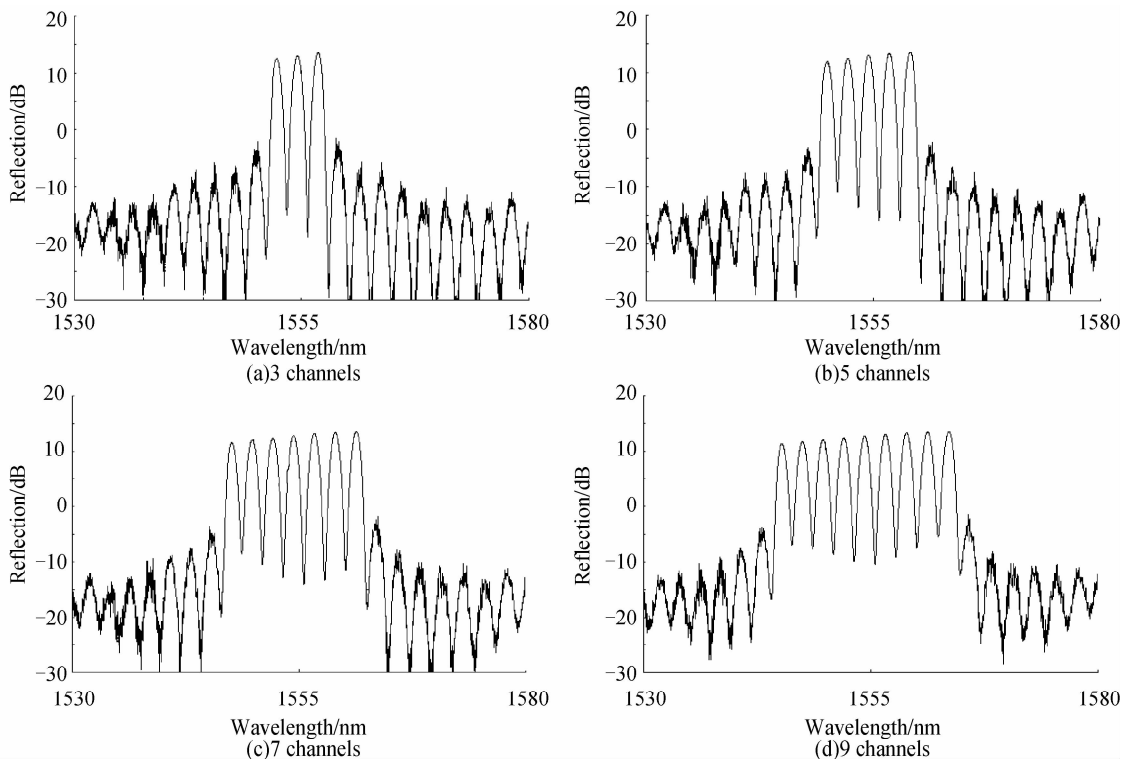


图 4 基于反射带宽调谐的 CFBG 的光纤光栅梳状滤波器的输出光谱
Fig. 4 Output spectra of the hybrid fiber grating-based comb filter

基于对 CFBG 啁啾率调谐的研究^[12],反射率高于 90% 情况下,CFBG 的反射带宽在 1.8~37.8 nm 范围内变化是可以实现的.因此,本文提出的这种基于 CFBG 的全光纤光栅梳状滤波器的信道数目的变化范围应该可以更大.此外,该滤波器的信道波长间隔可以通过改变 LPG 对之间的距离来调节,而信道波长则可以通过改变 LPG-MZI 的应变或温度来进行调谐.这些光纤光栅器件所具有的多参量可调谐优点,使得此种全光纤光栅梳状滤波器成为一种非常灵活、有应用前景和开发潜力的光纤器件.

虽然为得到适中的信道间隔,LPG 对的间距较大,限制了这种光纤光栅梳状滤波器的尺寸,不利于集成,但是利用最新发展起来的光子晶体光纤,可以对该不足进行有效的弥补,因为光子晶体光纤的空气孔包层结构大大降低光纤包层的有效折射率,增大芯和包层之间的有效折射率差.另外,光纤光栅的耦合波长对外界温度变化敏感,对该滤波器的时间稳定性造成不利影响,可采用适当的温度补偿机制来获得改善.

3 结论

本文提出并实验演示了一种基于级联长周期光纤光栅和啁啾光纤光栅的反射型光纤光栅梳状滤波器.由于光在输出前经过两次干涉滤波作用,所以该梳状滤波器的消光比与透射输出型(即反射前)相比,增加了一倍.而且,通过调节啁啾光纤光栅的反射带宽,可以改变滤波器输出信道的数目.实验中利用弹性梁弯曲的方法,获得两个信道数分别在 1~5 和 3~9 之间可调的、具有较高消光比的光纤光栅梳状滤波器.

参考文献

- [1] WANG X W, SHEN Q Q. Sidelobe suppression of mechanically-induced long-period fiber gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(11): 2198-2202.
王新伟,盛秋琴.应力长周期光纤光栅透射谱中旁瓣的抑制

- [J]. *光子学报*, 2008, **37**(11): 2198-2202.
- [2] ZENG C M, KONG M, ZHANG J. Fiber sagnac loop filter with a symmetrical chirped fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 652-656.
曾春红,孔梅,张健.带有对称啁啾光纤光栅的 Sagnac 环滤波器[J]. *光子学报*, 2008, **37**(4): 652-656.
- [3] GE J, CHEN X F, XIE S Z. Novel etalon based on strongly chirped sampled fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(3): 425-427.
葛荆,陈向飞,谢世钟.基于光纤光栅的标准具[J]. *光子学报*, 2006, **35**(3): 425-427.
- [4] GU X J. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings[J]. *Opt Lett*, 1998, **23**(7): 509-510.
- [5] LEE B H, NISHII J. Dependence of fringe spacing on the grating separation in a long-period fiber grating pair[J]. *Appl Opt*, 1999, **38**(16): 3450-3459.
- [6] JEONG Y, BAEK S, LEE B. All-optical signal gating in cascaded long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2000, **12**(9): 1216-1218.
- [7] HAN Y G, KIM S H, LEE S B. Flexibly tunable multichannel filter and bandpass filter based on long-period fiber gratings [J]. *Opt Express*, 2004, **12**(9): 1902-1907.
- [8] DONG X, YANG X, SHUM P, et al. Tunable WDM filter with 0.8-nm channel spacing using a pair of long-period fiber gratings[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(4): 795-797.
- [9] HAN Y G, KIM C S, KANG J U, et al. Multiwavelength Raman Fiber-ring Laser based on Tunable Cascaded Long-Period Fiber Gratings[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2003, **15**(3): 383-385.
- [10] DING J F, ZHANG A P, SHAO L Y, et al. Fiber-taper seeded long-period grating pair as a highly sensitive refractive-index sensor[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(6): 1247-1249.
- [11] DONG X, SHUM P, NGO N Q, et al. Largely tunable CFBG-based dispersion compensator with fixed center wavelength [J]. *Opt Express*, 2003, **11**(22): 2970-2974.
- [12] DONG X, SHUM P, YANG X, et al. Bandwidth-tunable filter and spacing-tunable comb filter based on chirp tuning of CFBGs[J]. *Opt Commun*, 2006, **259**(2): 645-648.

Hybrid Fiber Grating-based Optical Comb Filters with Changeable Channel Numbers

DONG Xin-yong¹, LI Lan¹, SHUM Ping^{2a}, CHAN Chi-chiu^{2b}

(1 *Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, 310018, China,*

2 a. Network Technology Research Centre; b. School of Chemical & Biomedical Engineering,

Nanyang Technological University 639798, Singapore)

Abstract: An in-fiber Mach-Zehnder interferometer filter based on a pair of long-period fiber gratings (LPGs) had been operated in the reflection mode by incorporating a broadband chirped-fiber Bragg grating (CFBG) or an optical fiber mirror reflector. As a result, the extinction ratio has been nearly doubled and, by tuning chirp rate, i. e. reflection bandwidth of the CFBG using a beam-bending method, channel number of the formed optical comb filter can be easily changed. In our experiment, two comb filters with channel numbers being changed among odd ones from 1 to 5 and 3 to 9 have been achieved, respectively. Even channel filtering can also be achieved if the center wavelength of the chirped fiber grating is changeable.

Key words: Long-period gratings; Comb filters; Tunable filters; Chirped fiber Bragg gratings



DONG Xin-yong was born in 1975. He received his Ph. D. degree in Optics from Nankai University. Now, he is a professor and director of the Institute of Optoelectronic Technology. His research interests focus on fiber-optic sensors, optical fiber gratings, fiber amplifiers and lasers.