

文章编号: 0253-2239(2004)09-1185-4

双折射光纤环形镜滤波器特性研究*

刘丽辉 赵启大 周 广 张 昊 陈少华 冯新焕 董孝义
(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 双折射光纤环形镜具有滤波特性, 将两个串联的双折射环形镜作为光学滤波器可以改善滤波特性, 使其更为灵活。提出了用两个双折射光纤环形镜相串联的简单方案改善环形镜滤波特性。分析了由双折射光纤和萨尼亚克环构成的环形滤波器的透射特性, 并讨论了用两个双折射光纤环形镜串联的滤波特性。从理论上模拟了双折射光纤长度比为 1:2 时的透射光谱形式, 给出了透射光的表达式。串联后光谱中主峰的 3 dB 带宽约为 7 nm, 与单个环形镜相比, 压缩了环形镜的 3 dB 带宽, 品质因数 Q 约为 4.5。实验结果与理论模拟相一致, 因此证实了该理论的正确性。

关键词: 导波与光纤光学; 滤波器; 光纤环形镜; 双折射光纤
中图分类号: TN253 文献标识码: A

Study on Characteristics of Two High-Birefringence Fiber Loops Mirror Filter

Liu Lihui Zhao Qida Zhou Guang Zhang Hao Chen Shaohua Feng Xinhuan Dong Xiaoyi
(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)
(Received 14 July 2003; revised 30 September 2003)

Abstract: Birefringence fiber loop mirror has filtering characteristics. By cascading two loops, the transmission performance can be improved and become more flexible compared with that of the single-stage one. Such a simple cascading scheme which can improve filtering characteristics of loop mirror, is proposed. The transmission characteristics of the loop mirror filter constituted by birefringence fiber and Sagnac loop have been analyzed in detail. The filtering characteristics of two cascaded birefringence fiber loop mirror are discussed. By numerical simulation, explicit expression of the transmission spectrum for the cascaded mirrors with the high-birefringence fiber (HBF) length ratio of 1:2 is obtained. Compared with its single-stage counterpart, the 3 dB bandwidth of the two-stage filter is compressed to approximately 7 nm and its quality factor reaches about 4.5. Experimental results conform well with the theoretical calculation, thus proving the validity of this theory.

Key words: guided wave and fiber optics; filter; fiber loop mirror; birefringence fiber

1 引 言

随着光通信及光纤传感技术的迅速发展, 光学滤波器已经得到了广泛的应用, 并成为重要的光学器件, 特别是波分复用(WDM)和密集波分复用

(DWDM)系统, 窄带通滤波器是关键器件之一^[1,2]。因此, 光学滤波器特性研究一直是光纤通信乃至光电子领域的一个研究热点。目前最常用的光学滤波器主要有法布里-珀罗干涉仪^[3]、布拉格光纤光栅^[4]、马赫-曾德尔干涉仪^[5]等器件, 虽然有许多元件可以制作各种滤波器, 但是很难收到理想的效果, 它们在系统或网络中应用时都或多或少地存在一些缺点, 如制备工艺复杂成本较高、安装灵活性连续特性差等^[6]。

对光纤环形镜滤波器人们已经有了多年的研

* 国家自然科学基金(69977006)、教育部博士点基金(20020055036)、天津市自然科学基金重点项目(013800511)资助课题。

E-mail: hdliluhui@eyou.com

收稿日期: 2003-07-14; 收到修改稿日期: 2003-09-30

究,并且应用于激光器、光开关等许多领域中^[7~9]。与其它滤波器相比光纤环形镜具有许多优点:光纤环形镜结构简单,成本很低,这是法布里-珀罗干涉仪难以达到的;它的滤波特性比马赫-曾德尔干涉仪更加稳定,马赫-曾德尔干涉仪很容易受外界环境因素的干扰,相比之下光纤环形镜不易受外界干扰;光纤环形镜还有具有调谐范围大,灵活等特点。但是很少有人对将两个双折射光纤环形镜串联在一起的滤波器进行详细的理论分析。两个串联的光纤环形镜滤波器比单个光纤环形镜滤波器有更加灵活的特点,与梳状滤波器特性相类似,减小了滤波器的带宽,使光纤环形镜具有了新的滤波特性,因此它有更加广阔的应用前景。

本文提出的用两个双折射光纤环形镜相串联的简单方案,提高了光纤环形镜的滤波特性,级联后光谱中主峰的3 dB带宽约为7 nm,与单个环形镜相比,压缩了环形镜的3 dB带宽,品质因数 Q 约为4.5。并且提出两个双折射光纤环形镜透射的余弦波形并非简单叠加。

2 实验原理及装置

2.1 单个环形镜的情况

光纤环形镜的原理是通过一束光分成两束反向光相干叠加而形成的。其结构如图1所示。

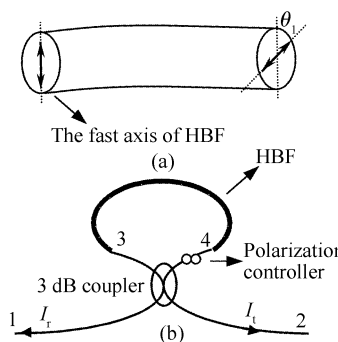


Fig. 1 The configuration of the HBF loop mirror

图1(a)是光纤环形镜中的一段高双折射光纤(High birefringence fiber, HBF),其中箭头方向表示双折射的快轴,由于光纤本身有一定的扭转,所以设入射时和出射时的快轴有一个夹角为 θ_1 。图1(b)是一个光纤环形镜,它是由一个3 dB耦合器、一段普通单模光纤、偏振控制器和一根双折射光纤组成。当信号光在普通单模光纤和偏振控制器中传播时偏振光也转过一个角度设为 θ_2 。如果有一束信号光从3 dB耦合器1端入射且耦合比为1:1,则在3,4端分别分出两束强度相等的相干光。若从3端出射经

过双折射光纤和偏振控制器到达4端并从2端出射为正向光,它经过双折射光纤时偏振光旋转了 θ_1 的角度,假设信号光分为 E_x 分量的光和 E_y 分量的光,它们有一个相位延迟,通过偏振控制器时信号光又旋转了 θ_2 的角度。当信号光从4端入射从2端出射时,信号光的偏转方向正好相反。从1端到4端和3端到2端出射时,信号光产生相位滞后。总之,在3 dB耦合器的2端会产生透射光 I_t ;同样在1端会产生反射光 I_r 。

如果用矩阵形式表示光学传输,则称每一次坐标系旋转过程为 \mathbf{R} ,信号光 E_x 分量和 E_y 分量的相位延迟矩阵为 \mathbf{Y} 。用矩阵表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i2\pi L\Delta n/\lambda) \end{bmatrix}$$

其中 θ 为坐标系转过的角度; $\Delta n = |n_e - n_o|$ 即两个折射率分量的差值;其中 L 为双折射光纤的长度, λ 是光波长。由于3 dB耦合器的耦合比为1:1,所以其2端的透射光场为

$$\mathbf{P} = (\mathbf{R}_2\mathbf{Y}\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{Y}\mathbf{R}_2^{-1})\mathbf{P}_0 = t \begin{bmatrix} E_{y0} \\ -E_{x0} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} E_{x0} \\ E_{y0} \end{bmatrix}$ 为入射光场,

$$t = \frac{1}{2}[1 + \exp(i2\pi L\Delta n/\lambda)]\sin(\theta_1 + \theta_2)$$

是一系数。经过计算可以得到3 dB耦合器2端的透射光强 I_t 为

$$I_t = \mathbf{P}\mathbf{P}^* = |t|^2 I_0,$$

I_0 是入射光强,因此透过率函数为

$$|t|^2 = \frac{I_t}{I_0} = \left[\cos\left(\frac{\beta\lambda}{2}\right)\sin(\theta_1 + \theta_2) \right]^2, \quad (2)$$

其中 $\beta = 2\pi L\Delta n/\lambda_0^2$ 。同理,反射率函数为

$$|r|^2 = \frac{I_r}{I_0} = 1 - |t|^2 =$$

$$1 - \left[\cos\left(\frac{\beta\lambda}{2}\right)\sin(\theta_1 + \theta_2) \right]^2, \quad (3)$$

因此可以得出单环形镜的透射光强和反射光强,从(2)式、(3)式看出透射光强和反射光强与波长有关。

2.2 双环串联的情况

装置如图2所示。左边接入宽带光源(BBS)作为入射光,经过一个光隔离器连接两个环形镜。将环形镜的输出端与光谱仪(OSA)相连,所有设备之间用普通单模光纤连接。设在环形镜1处的反射光和透射光分别为 I_{r1} 和 I_{t1} ,在环形镜2处产生的反

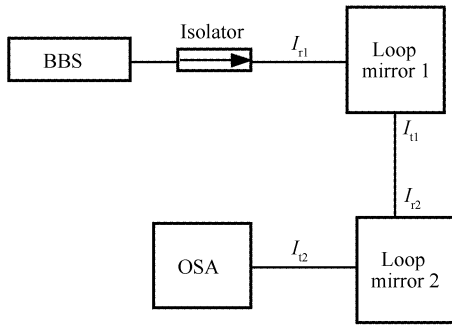


Fig. 2 Schematic configuration of the two-loop mirrors filter
射光和透射光为 I_{t2} 和 I_{t2} , 入射光强 $I_0 = 1$ 。由于环形镜之间有不断的反射, 所以在环形镜 2 有一部分光透射, 另一部分光被反射回, 经过环形镜 1 又有部分光被反射到环形镜 2, 其中一部分光再次透射, 另一部分光反射, 往返下去。可以表示成

$$I_{out} = I_{t1} I_{t2} + I_{r1} I_{t2} I_{r1} I_{t2} + I_{r1} I_{r2} I_{r1} I_{t2} I_{r1} I_{t2} + \dots, \quad (4)$$

由于(4) 式为无穷等比数列之和, 且公因数 $I_{r2} I_{r1} \ll 1$ 是收敛的, 所以上式可以写成

$$I_{out} = \frac{I_{t1} I_{t2}}{1 - I_{r2} I_{r1}}, \quad (5)$$

其中环形镜 1 和环形镜 2 的透射光强分别为

$$I_{t2} = |t_2|^2 I_0, \quad I_{t1} = |t_1|^2 I_0;$$

它们的反射光强为

$$I_{r2} = |r_2|^2 I_0, \quad I_{r1} = |r_1|^2 I_0.$$

对于单一环形镜来说, 相对透射光强为,

$$I_t = \left[\cos\left(\frac{\beta\lambda}{2}\right) \sin(\theta_1 + \theta_2) \right]^2,$$

其中 $I_0 = 1, \sin(\theta_1 + \theta_2)$ 为常量, 此透射光强是以 $2\pi/\beta$ 为周期的余弦函数。对于两个环形镜串联的情况, 由(5) 式可知出射光强并非两个余弦函数简单叠加, 而是无穷级数相叠加。

3 实验结果与讨论

我们采用在波长 1550 nm 处的拍长为 3.1 mm 的双折射光纤其长度分别为 15 cm 和 30 cm 制作两个环形镜, 将其串联构成双环形镜滤波器。用宽带光源作信号光, 光谱仪为 ADANTEST Q8383 型光谱仪。图 3 是根据(5) 式理论计算的结果。由以上双折射光纤参量可得 β_1 和 β_2 分别为 0.196 nm^{-1} 和 0.392 nm^{-1} , 并假设两个单个环形镜的透射强度相等。在图 3 中可以看出两个环形镜周期比为 1:2 时串联的情况, 它并不是简单的两个余弦函数的叠加。图中每一个周期有一个主峰和两个次峰相互交替出

现, 两个次峰的强度一样, 我们定义品质因数 $Q = \lambda_T/\lambda_S$, 来衡量级联后的效果, 其中 λ_T 为总透过光谱的周期, λ_S 为总透过光谱单峰的 3 dB 带宽, 对于梳状滤波器, 品质因数 Q 表示了梳齿间距和单个梳齿宽度的比例。可以得到, 对于光谱周期 1:2 的两个滤波器的串联时 Q 约为 4.2。边模抑制比约为 6.8。级联后的效果更加类似于法布里-珀罗腔滤波器。

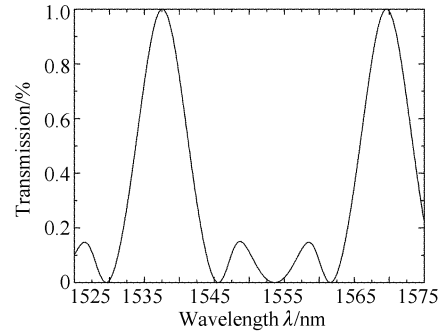


Fig. 3 Numerical simulation of the two-loop mirrors filter

图 4 是两个单环形镜直接接入光谱仪所采集到的谱线, 其为余弦形式。两个双折射光纤环形镜的光谱周期分别为 34 nm 和 17 nm, 与理论计算的相接近。两个光纤环形镜的透射光谱的 3 dB 带宽分别约为 17 nm 和 10 nm。

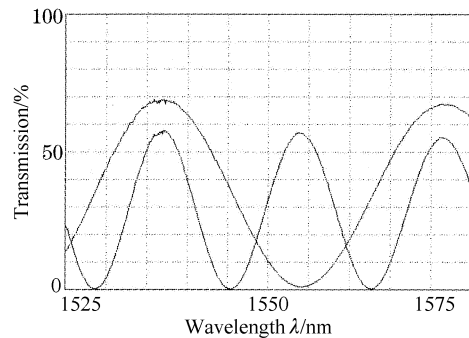


Fig. 4 Output optical spectrum of two-loop mirrors

当将两个光纤环形镜串联后接入光谱仪, 得到如图 5 所示的结果, 其谱线形状和理论曲线相一致,

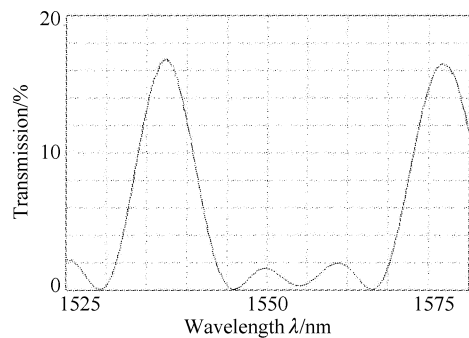


Fig. 5 Output optical spectrum of two cascaded loop mirrors

可以看出其谱线在一个周期内也有两个次峰和一个主峰。级联后光谱中主峰的 3 dB 带宽约为 7 nm, 与单个环形镜相比, 压缩了环形镜的 3 dB 带宽, 改变了滤波器的选频范围, 这对于多波长激光器选频以及激光线宽的压缩等方面有重要的意义。主峰之间的间距为 34 nm, 可得品质因数 Q 约为 4.5, 与理论符合得较好; 边模抑制比约为 8, 也与理论值相近。由于在实验中, 两个单环型镜的透射光的幅度和相位有一定的偏差, 并且两根双折射光纤的长度不能严格的 1:2, 因此在图中的两个次峰的强度不相同。在理论计算中没有考虑光纤环境的插入损耗问题, 所以实验和理论有所不同。但是, 实验结果完全可以验证级联理论的正确。

结论 本文讨论了两个单环形镜相串联的滤波特性, 对其进行了分析, 得出了理论表达式并进行模拟, 通过实验证明了理论的正确性。通过实验和模拟发现: 两个单环形镜相串联, 其波形并非简单叠加, 而是以等比数列叠加的。当两段双折射光纤长度为 1:2 时, 透射光谱呈周期性分布, 有一个主峰和两个次峰。两个次峰强度相等, Q 值约为 4.5。

采用两个单个环形镜相串联的方法, 增加了滤波特性的复杂度, 因此提高了环形镜滤波器滤波的灵活性, 并且这种滤波器的成本低, 结构简单易于实现。通过串联, 可以使滤波器具有类似法布里-珀罗腔滤波器的滤波效果, 可以在解调和滤波等光纤传感和通信领域中获得更加广泛的应用。本文对环形镜滤波器的设计有一定的指导作用。

参 考 文 献

- 1 Liu Ning, Liu Songhao, Liao Changjun *et al.*. Transmission characteristics of Sagnac loop with fiber Bragg gratings inserted. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(4): 476~479 (in Chinese)
- 2 Zhou Guang, Zhao Chunliu, Huang Yonglin *et al.*. Improvement of the capability of nonsymmetrical Mach-Zehnder interferometric interleaver using fiber loop. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(6): 702~705 (in Chinese)
- 3 Chung W H, Tam H Y, Demokan M S *et al.*. Wavelength and power monitoring of DWDM systems using scanning F-P filter calibrated with a F-P laser. *Opt. Commun.*, 2002, **210**(3~6): 219~224
- 4 Qian Jingren, Liang Ming. Analysis of the fiber Bragg grating Sagnac loops and the optical envelope bandpass filter. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(2): 159~162 (in Chinese)
- 5 Ahn Joon Tae, Lee Hak Kyu, Jeon Min-Yong *et al.*. Continuously tunable multi-wavelength transmission filter based on a stabilized fibre-optic interferometer. *Opt. Commun.*, 1999, **165**(1~5): 33~37
- 6 Nathaniel J C, Libatique, Ravinder K Jain. A broadly tunable wavelength-selectable WDM source using a fiber Sagnac loop filter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12): 1283~1285
- 7 Zhao Hao, Qu Ronghui, Fang Zujie. A wavelength-selective switch based on fiber Bragg grating and fiber loop mirror. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(10): 1425~1428 (in Chinese)
- 8 Dong P, Li Shenping, Chang K S *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fiber laser based on a high-birefringence fiber loop mirror. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(19): 1609~1610
- 9 Lee K S, Shu C. Optical loop mirror multiplexer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(12): 1444~1446