

文章编号: 0253-2239(2004)03-341-5

多段双折射光纤构成环镜滤波器的滤波特性*

周 广 赵启大 刘艳格 开桂云 董孝义
(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 讨论了多段双折射光纤构成环镜滤波器的滤波特性。从理论上得到了 N 段双折射光纤构成环镜滤波器滤波特性的结果;具体给出了 N 为 1、2 和 3 时的具体表达式;分析了所构成的环镜滤波器的偏振无关特性;讨论了双折射光纤的长度、拍长、双折射光纤之间夹角等因素对滤波器滤波特性的影响;最后,做了相关的实验验证,所得到的实验结果和理论模拟结果非常吻合,证实了理论的正确性。基于多段双折射光纤构造的滤波器,稳定性优于一般的全光纤马赫-曾德尔干涉仪型滤波器,具有结构简单,灵活性强,偏振无关,插入损耗小和成本低等优点,在光纤传感解调,调谐光纤激光器和光纤通信滤波器等领域具有巨大的应用前景。

关键词: 导波与光纤光学; 滤波器; 偏振无关; 光纤环镜

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Filtering Characteristics of Fiber Loop Mirror Filter Composed of Multi-Stage High Birefringent Fibers

Zhou Guang Zhao Qida Liu Yan'ge Kai Guiyun Dong Xiaoyi
(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)
(Received 30 December 2002; revised 31 March 2003)

Abstract: The filtering characteristics of the fiber loop mirror filter, which is composed of multi-stage high birefringent fibers (HBF) is studied. The theoretic transfer function of the filter made of N -stage HBFs, and the expression are obtained when N is 1, 2 or 3; the polarization independence of the filter is analyzed, and the relation between the frequency response and the parameter of filter such as the length, beat length of HBFs and the angles between HBFs is studied; finally, some experiments are performed to check the theory, and the result shows to have good agreement with the theoretic result. The filter, which is based on N -stage HBFs loop mirror, has better stability than all-fiber Mach-Zehnder filter, is flexible in application, and has the advantages such as polarization independence, low insertion loss and low cost, so it has potential application in the fields of demodulation of fiber sensor, tunable filter laser and fiber filter of optic communication.

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

1 引 言

人们对光纤环镜滤波器[即萨尼亚克(Sagnac)环镜干涉仪]已有多年的研究^[1~3],对于它的基本滤波特性,已经有了深刻的认识,并且根据其滤波特点

将其应用于诸多领域^[4~8]。另一方面,人们对双折射光纤的传输特性也做了较为深刻的研究^[9,10]。与此同时,对于光纤环镜滤波器中考虑光纤的双折射效应和将双折射光纤加入环镜滤波器之中的情况也做了相应的研究。本文对于将多段双折射光纤加入环镜滤波器之中情况,做出了讨论,分析了所构成的环镜滤波器的滤波特性和偏振无关特性,并且做了实验验证。这种关于多段双折射光纤环镜滤波器的统一的计算方法和对其偏振无关特性的证明是首次

* 国家自然科学基金(69977006)、教育部博士点基金(20020055036)、天津自然科学基金(013800511)资助课题。

E-mail: zhouguang@rd-bta.com.cn

收稿日期:2002-12-30;收到修改稿日期:2003-03-31

提出的。新型的多段双折射光纤环滤波器与其它类型的滤波器相比较,具有诸多优点,例如:1) 作为梳状滤波器,对比马赫-曾德尔干涉仪型滤波器,滤波特性非常稳定;2) 与法布里-珀罗滤波器相比,成本低、灵活性强;3) 与光纤布拉格光栅或长周期光纤光栅相比,具有调制范围广、成本低等优势;4) 作为宽带平坦滤波器,具有滤波特性便于量化调节的优点等。

2 构造和原理

如图 1(a)所示,环滤波器由一个耦合器、 N 段高双折射光纤和连在其间的普通单模光纤及偏振控制器构成。初始的信号光进入耦合器被分为两束:将其中沿顺时针传播的光称为正向波,将其中沿逆时针传播的光称为反向波。它们经过环路的传播,返回耦合器,最后相干输出,由此方法实现对信号光的滤波。图 1(a)中的 F_i ,即粗线部分为高双折射光纤,它们之间的联接由图 1(b)所示:结构是高双折射光纤联接普通单模光纤,再联接高双折射光纤,单模光纤中加入偏振控制器。双折射光纤是截面为圆形的“熊猫型”光纤,和普通单模光纤内外径一致,可以直接焊接,联接损耗小于 0.1 dB。角度 θ

表示:当两段双折射光纤的快慢轴平行时,信号光在经过两段高双折射光纤之间的单模光纤和偏振控制器时,偏振态转过的角度;如果两段双折射光纤的快慢轴不平行,角度 θ 等效于平行时的角度。可以看到:信号光在单模光纤和偏振控制器中传播时,各个偏振方向上光的传播速度是一样的,只是偏振方向转过了一定角度,所以可以认为是做了一次旋转变换;信号光在高双折射光纤中传播时,可以认为信号光分解成为快、慢轴上的两个分量,这两个分量的偏振方向始终沿着快轴和慢轴,而光波的传播速度是不一样的。假定初始的信号光为 E_x 和 E_y 两分量,它由 3 dB 耦合器的 1 端口进入滤波器。正向波由 3 端口出来,在进入双折射光纤 F_1 前,做一次坐标系的旋转变换,使坐标轴 x 轴和 y 轴的方向分别沿 F_1 的快轴和慢轴。经过在 F_1 中的传播,两个偏振方向上产生相位差。进入双折射光纤 F_2 前,再做一次坐标系的旋转变换,使坐标轴 x 轴和 y 轴的方向分别沿 F_2 的快轴和慢轴。就这样,一直到耦合器的 4 端口。最后,它从端口 2 输出。反向光与之类似,区别在于:1) 坐标系的旋转变换角度的方向相反;2) 从 1 端到 4 端与从 3 端到 2 端口时,要各有一次半波损失。

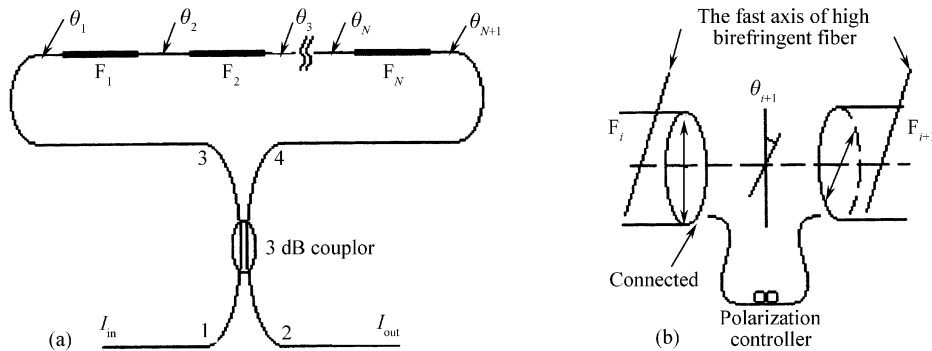


Fig. 1 (a) Fabrication of multi high birefringent fiber loop, (b) schematic diagram of joints of high birefringent fibers

我们称每一次坐标系旋转变换的过程为旋转变换 R ,称在双折射光纤中传播引入两个偏振方向间相位差的过程为传输变换 T 。如此,

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

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left(i \frac{2\pi L \Delta n}{\lambda}\right) \end{bmatrix},$$

其中 θ 为坐标系旋转的角度, $\Delta n = |n_e - n_o|$ 即为两个传播方向上的等效折射率差, L 为双折射光纤的长度, λ 为光波长。由于正反两方向传播的光最后要

相干,可以不考虑双折射光纤之间光纤的光程;同时,对于双折射光纤只考虑两个方向上的光程差。为了计算的简便,认为耦合器对于任何波长耦合比均为 1 : 1。可得

$$\begin{cases} P_c = R_{N+1} T_N R_N \cdots T_2 R_2 T_1 R_1 P_0 = \\ \quad (R_{N+1} \prod_{i=1}^N T_i R_i) P_0, \\ P_a = H R_1^{-1} T_1 T_2^{-1} \cdots R_N^{-1} T_N R_{N+1}^{-1} H P_0 = \\ \quad (-R_1^{-1} \prod_{i=N}^1 T_i R_{i+1}^{-1}) P_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} H_{xc} \\ E_{yc} \end{bmatrix}$ 表示正向传播的光, $\mathbf{P}_a = \begin{bmatrix} H_{xa} \\ E_{ya} \end{bmatrix}$ 表示反向传播的光, $\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} H_{x0} \\ E_{y0} \end{bmatrix}$ 表示入射光, $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \exp(i\pi/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/2) \end{bmatrix} = iI$ 表示半波损失。

由 1 式可以得到最后出射的光 $\mathbf{P} = \mathbf{P}_c + \mathbf{P}_a = \mathbf{K}\mathbf{P}_0$, 其中 \mathbf{K} 为自定义的二阶方阵, 它表示了滤波器的传输特性。最后得到 N 段双折射光纤所构成环境的传输特性矩阵 \mathbf{K} 为

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}_{N+1} \prod_{i=1}^N \mathbf{T}_i \mathbf{R}_i - \mathbf{R}_{N+1}^{-1} \prod_{i=1}^N \mathbf{T}_i \mathbf{R}_i^{-1}. \quad (2)$$

对(2)式经过计算表明, 传输特性矩阵 \mathbf{K} 具有高的对称性, 总是可以表示成为 $\mathbf{K} = k\mathbf{S}$ 的形式, 其中 k 为固定的系数, $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ 。正是因为传输特性矩阵 \mathbf{K} 具有这样的对称性, 可以得到

$$\begin{aligned} \mathbf{P}^T \cdot \mathbf{P} &= (k\mathbf{S}\mathbf{P}_0)^T \cdot (k\mathbf{S}\mathbf{P}_0) = \\ &k^2 \begin{bmatrix} E_{y0} \\ -E_{x0} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} E_{y0} \\ -E_{x0} \end{bmatrix} = \\ &k^2 (E_{x0}^2 + E_{y0}^2) = k^2 \mathbf{P}_0^T \cdot \mathbf{P}_0 \end{aligned}$$

$$\text{即} \quad \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \frac{|E_x^2 + E_y^2|}{|E_{x0}^2 + E_{y0}^2|} = |k|^2.$$

所以, 滤波器的特性不需要用传输特性矩阵 \mathbf{K} 来表征, 而可以简单的用 $|k|^2$ 来表征。因此定义 $|k|^2$ 为滤波器的透过率函数。这种性质的物理含义是: 由 N 段高双折射光纤所构成环境滤波器是偏振无关的, 对于变化的偏振状态, 透过率函数 $|k|^2$ 是不变的, 滤波器适用于包括自然光在内的任何形式的光。

为了计算和表示的简单, 可以做出一定的简化。传输变换 \mathbf{T} 中的 $\exp\left(i \frac{2\pi L \Delta n}{\lambda}\right)$ 项, 对于一般的物理情形, 可以对它的幅角 $\frac{2\pi L \Delta n}{\lambda}$ 做一阶近似; 令

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\beta\lambda) \end{bmatrix},$$

其中 $\beta = \frac{2\pi L \Delta n}{\lambda_0^2}$, 可以认为不随 λ 的变化而变化。

下面对 N 为 1, 2 和 3 时, 给出透过率函数的具体结果。当环境中只有一段高双折射光纤时,

$$k = \frac{[1 + \exp(i\beta_1\lambda)] \sin(\theta_1 + \theta_2)}{2},$$

滤波器的透过率函数为

$$|k|^2 = \left| \frac{[1 + \exp(i\beta_1\lambda)] \sin(\theta_1 + \theta_2)}{2} \right|^2 = \left[\cos \frac{\beta_1\lambda}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \right]^2, \quad (3)$$

当环境中两段高双折射光纤时

$$k = \frac{[\exp(i\beta_1\lambda) + \exp(i\beta_2\lambda)] \cos(\theta_1 + \theta_3) \sin \theta_2 + \{1 + \exp[i(\beta_1 + \beta_2)\lambda]\} \sin(\theta_1 + \theta_3) \cos \theta_2}{2},$$

滤波器的透过率函数为

$$|k|^2 = \left[\cos \frac{(\beta_1 + \beta_2)\lambda}{2} \sin(\theta_1 + \theta_3) \cos \theta_2 + \cos \frac{(\beta_1 - \beta_2)\lambda}{2} \cos(\theta_1 + \theta_3) \sin \theta_2 \right]^2, \quad (4)$$

当环境中三段高双折射光纤时, $k = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$, 其中:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{2} [\exp(i\beta_1\lambda) - \exp(i\beta_2\lambda)] [1 - \exp(i\beta_3\lambda)] \cos(\theta_1 + \theta_4 - \theta_3) \sin \theta_2, \\ A_2 = \frac{1}{2} [\exp(i\beta_1\lambda) + \exp(i\beta_2\lambda)] [1 + \exp(i\beta_3\lambda)] \cos(\theta_1 + \theta_4 + \theta_3) \sin \theta_2, \\ A_3 = \{ \exp[i(\beta_1 + \beta_2)\lambda] + \exp(i\beta_3\lambda) \} \cos(\theta_1 + \theta_4) \cos \theta_2 \sin \theta_3, \\ A_4 = \{ 1 + \exp[i(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)\lambda] \} \sin(\theta_1 + \theta_4) \cos \theta_2 \cos \theta_3, \end{cases}$$

$|k|^2 = (B_1 + B_2 + B_3 + B_4)^2$, 其中

$$\begin{cases} B_1 = \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)\lambda}{2} \sin(\theta_1 + \theta_4) \cos \theta_2 \cos \theta_3, \\ B_2 = \cos \frac{(-\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)\lambda}{2} \cos(\theta_1 + \theta_4) \sin \theta_2 \cos \theta_3, \\ B_3 = \cos \frac{(\beta_1 + \beta_2 - \beta_3)\lambda}{2} \sin(\theta_1 + \theta_4) \cos \theta_2 \sin \theta_3, \\ B_4 = -\cos \frac{(\beta_1 - \beta_2 + \beta_3)\lambda}{2} \sin(\theta_1 + \theta_4) \sin \theta_2 \sin \theta_3, \end{cases}$$

对于 N 为更大值的结果,环境的滤波特性可以通过(2)式求出.通过对透过率函数 $|k|^2$ 的计算表明,它具有如下特点:1) 只是波长的函数,与入射光的偏振态无关;2) 均为一系列余弦函数和的平方,例如 N 为 1,2 和 3 时,分别有 1,2 和 4 项;3) 每一项余弦函数中,幅度由 θ 决定,即由偏振控制器和高双折射光纤之间的位置关系决定;4) 每一项余弦函数中,频率由 β 决定,即由高双折射光纤拍长和长度决定;5) 排除了一些频率分量出现的可能,例如,当两段双折射光纤时,没有 β_1 或 β_2 频率分量,当三段双折射光纤时,没有 $\beta_1 + \beta_2$ 等频率分量.

3 实验验证

为了验证理论的正确性和系统的稳定性,我们做了相关实验.在验证实验中,选取了两段双折射光纤长度相等这种有代表性的情形.实验中,信号光由宽带光源出射,经过两段双折射光纤构成的光纤环境滤波器,由光谱仪测出滤波器的透射谱.两段双折射光纤均为 1.5 m,环境的光纤环总长约为 6 m,双折射光纤之间的单模光纤约为 1.2 m.实验中的高双折射光纤由天津 46 所提供,其拍长在 1550 nm 处为 3.1 mm,光谱仪为 ADANTEST Q8383 光谱仪.图 2 为对于不同角度 θ 滤波器的频率响应理论计算结果图,它的理论公式为(4)式,其中 $\beta_1 = \beta_2 = 1.96 \text{ nm}^{-1}$.在图 2 中,A 曲线为 $\theta_1 + \theta_3 = 0^\circ, \theta_2 = 45^\circ$ 时的情形,与图 3(a)的实验曲线相对应;B 曲线为 $\theta_1 + \theta_3 = 45^\circ, \theta_2 = 45^\circ$ 时的情形,与图 3(b)

的实验曲线相对应;C 曲线为 $\theta_1 + \theta_3 = 90^\circ, \theta_2 = 45^\circ$ 时的情形,与图 3(c)的实验曲线相对应;D 曲线为 $\theta_1 + \theta_3 = 40^\circ, \theta_2 = 45^\circ$ 时的情形,与图 3(d)的实验曲线相对应;E 曲线为 $\theta_1 + \theta_3 = 50^\circ, \theta_2 = 45^\circ$ 时的情形,与图 3(e)的实验曲线相对应.实验中的曲线 B 随着角度 $\theta_1 + \theta_3$ 减少和增加,曲线形状分别经过曲线 D 和曲线 E 的过渡,最终变为曲线 A 和曲线 C.实验中发现当两段双折射光纤之间的角度 $\theta_2 = 45^\circ$ 时,曲线的状态最为丰富,表现出所有的形态,我们对其它角度也做了实验,所有的实验结果都和相应的理论曲线吻合的很好.对于两段双折射光纤不等长的情形、一段和三段双折射光纤构成环境的情形,我们亦做了相应的实验,实验结果也都和相应的理论曲线吻合的很好.我们分析了实验结果,认为两段等长双折射光纤构成环境的情形,既有代表性和复杂度,又相对简单明确,比较适合作为理论正确与否的判决性实验.

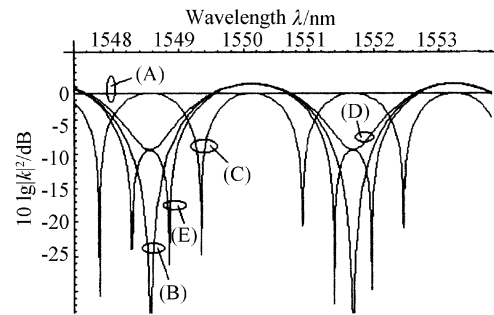


Fig. 2 Theoretical frequency response of filter with different angle θ

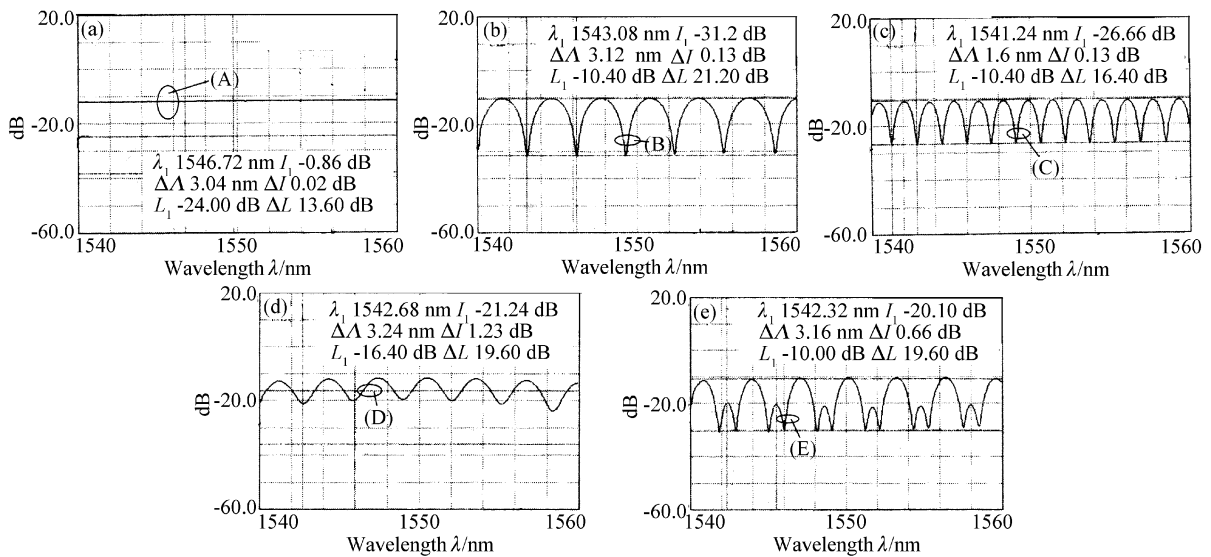


Fig. 3 Frequency response of filter when (a) $\theta_1 + \theta_3 = 0^\circ, \theta_2 = 45^\circ$, (b) $\theta_1 + \theta_3 = 45^\circ, \theta_2 = 45^\circ$, (c) $\theta_1 + \theta_3 = 90^\circ, \theta_2 = 45^\circ$, (d) $\theta_1 + \theta_3 = 40^\circ, \theta_2 = 45^\circ$, (e) $\theta_1 + \theta_3 = 50^\circ, \theta_2 = 45^\circ$

结论 本文讨论了多段双折射光纤构成环镜滤波器的滤波特性,证明了所构成的环镜滤波器的偏振无关特性。通过理论模拟和实验结果比较,证实了理论的正确性。

新型的多段双折射光纤环镜滤波器,在理论的指导下,通过对每一段双折射光纤长度或拍长的调节,通过对双折射光纤之间夹角的调节,可以获得各异的滤波特性。以此为基础构造的滤波器,具有结构简单,灵活性强,偏振无关,性能稳定,易于调制,插入损耗小和成本低等优点,可以广泛的应用于光纤传感解调,调谐光纤激光器,光纤通信滤波器等领域。

参 考 文 献

- 1 Mortimore D B. Fiber loop reflectors. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(7):1217~1224
- 2 Lee K S, Shu C. Optical loop mirror multiplexer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(12):1444~1446
- 3 Ja Y H. Optical fiber filter comprising a sagnac-coupler fiber ring (or loop) and a double-coupler fiber mirror. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(8):1504~1509
- 4 Dong X P, Li Shenping, Chiang K S *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fibre laser based on a high-birefringence fibre loop mirror. *Electron. Lett.*, 2000, **31**(19):1609~1610
- 5 Li Shenping, Chiang K S, Gambling W A. Generation of wavelength-tunable single-mode picosecond pulses from a self-seeded gain-switched Fabry-Perot laser diode with a high-birefringence fiber loop mirror. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(25):3676~3678
- 6 Chew Y H, Tjeng-Thiang, Mendis C F V. An optical filter of adjustable finesse using an amplified fiber ring resonator. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(2):364~370
- 7 Fu Libin, An Honglin, Xu Wanjin *et al.*. All-fiber Morrow-band grating assisted Sagnac transmission filter. *Chin. J. Lasers*, 2000, **B9**(4):308~312 (in Chinese)
- 8 Jinno M, Matsumoto T. Nonlinear Sagnac interferometer switch and its applications. *IEEE J Quant. Electron.*, 1992, **28**(3):875~878
- 9 Vengsarkar A M, Coben L G. Theoretical analysis of highly elliptical core optical fibers with arbitrary refractive-index profiles. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(23):1656~1660
- 10 Kumar A, Varshney R K. Propagation characteristics of dual-mode elliptical-core optical fibers. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(15):817~819