文章编号:1002-2082(2011)01-0096-05

波长可选择高双折射光纤干涉滤波器

钟宇光，张祖兴
(江西师范大学 物理与通信电子学院，江西省光电子与通信重点实验室，江西 南昌 330022)

摘　要：为了实现具有全光纤结构和波长可选择滤波器，设计并从理论上计算和分析了一种基于双折射光纤的干涉滤波器。该滤波器具有很好的选频特性，不同的偏振角自由组合使得该滤波器具有更灵活的调节性。该滤波器提高了双折射光纤的使用效率，用12 m高双折射光纤可以产生等同于在Sagnac环形腔中用16 m同样光纤时的滤波效果。这种高效波长可选择滤波器还具有较好的光频隔离效果，并很容易用光纤或光波导制作出来。

关键词：梳状滤波器；Sagnac干涉环；Y型触角波导
中图分类号：TN253　　**文献标志码**：A

High birefringence coherent fiber filter with selectable wavelengths

ZHONG Yu-guang, ZHANG Zu-xing
(College of Physics & Communication Electronics, Key Lab of Photoelectron and Communications of Jiangxi Province, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

Abstract: Filter is an indispensable component for optical fiber communication system, especially for filter with all-fiber structure and selectable wavelength spacing due to its unique characteristics. A novel periodic filter with interleaving wavelengths based on high birefringence fiber interferometer was proposed and theoretically analyzed. Simulation results indicate that this filter has unique features. By adjusting the combination of the polarization rotations in this comb filter, filtering channels can be chosen by suppressing interleaving channels. The efficiency of the birefringence fiber is enhanced, as using 12 m high birefringence fiber can obtain the same filtering results with using 16 m birefringence fiber in the Sagnac filter. This filter has potential applications for multi-wavelength fiber laser and other optical fiber communication system.

Key words: comb filter; Sagnac loop mirror; Y-waveguide

引言

滤波器作为光频选择器件早已得到广泛而深入的研究，时至今日，可以说滤波器件是非常之多。如主要应用于环形腔掺铒光纤激光器的法布里-珀罗(Fabry-Perot)滤波器[1]、光纤布拉格光栅、偏振器件[2]。由Frank等人报道的高双折射Sagnac干涉环形镜同样具有滤波特性，它是由一个耦合器和一段高双折射光纤连接而成的环状滤波器，相比其他滤波器件它具有结构简单、调节灵活、梳状滤波等特点[3-4]。正是由于Sagnac环状滤波器有着这些优点，基于它的基本结构和原理的滤波器被广泛研究，并取得了一定进展，如在Sagnac滤波器中增加高双折射光纤的长度或增大双折射率[5]、在Sagnac-Lyot环形镜中级联多段双折射光纤[6]、由3段高双折射光纤通过2个Sagnac级联[7]等。

本文设计了一种高效的波长可交错选择的双

收稿日期:2010-02-11；　**修回日期**:2010-07-29
基金项目:国家自然科学基金(60807014)；江西省自然科学基金(2008GQS0050)；江西省教育厅科技项目(GJJ09152)
作者简介:钟宇光(1982—)，男，广东高州人，硕士研究生，主要从事光纤激光方面的研究工作。E-mail:zhyg820@163.com

折射光纤滤波器。此滤波器与Sagnac环形滤波器的工作原理有着相同的地方,就是输入信号光经耦合器被分解后反向运行,最后返回到耦合器干涉输出。不同的是,本文所设计的不是环形腔状,而是入射信号光进入滤波器的最右端被全反射镜反射后回到耦合器,而不是像Sagnac滤波器那样中间过程没有出现反射的情况,光直接通过高双折射光纤后回到耦合器。通过对此滤波器中各偏振部分的合适调节可获得最大的透射功率为100%。另外,此滤波器是一个具有较大信道隔离的梳状滤波器,且通过调节偏振部分可以获得部分波长的透过振幅衰减到0的功效,实现信道交错选择功能。

1　模型与理论计算

本文设计的滤波器结构如图1所示,它是由一个3 dB的定向耦合器、3段等长的高双折射光纤(HBF)、3个偏振调节器、一个Y形触角波导(1∶1)和一个全反射镜连接而成,在每根光纤前放置一个偏振调节器。假设耦合器和波导在x-z平面内,输入光经过耦合器将被平分成两路不同方向的光3和4。光3经过偏振调节器R1→HBF1→Y形波导→R3→HBF3到达全反射镜被反射回来,反射光经HBF3→R3→Y形触角波导时光将再次被平分,其

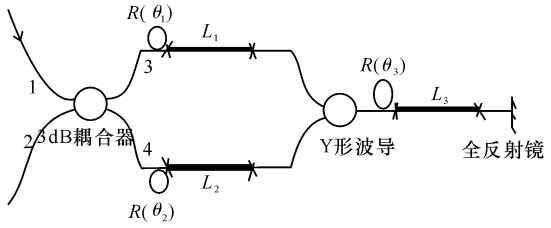

图1　滤波器结构图

Fig. 1　Structure of the filter

中一路反射光从Y→HBF1→R1回到耦合器;另一路则从Y→HBF2→R2回到耦合器。同样,光4也是经历这样一个过程回到耦合器,然后它们干涉输出。忽略各种器件的损耗(其中Y形波导最小损耗1.0 dB[8]),则每一个过程的传输矩阵关系式可以写为

$$T_1=K_1*R(\theta_1)*L*R(\theta_3)*L*W*L*R(-\theta_3)*K_3*L*R(-\theta_1)*K_2$$

$$T_2=K_1*R(\theta_1)*L*R(\theta_3)*L*W*L*R(-\theta_3)*K_3*L*R(\theta_2)*K_1$$

$$T_3=K_2*R(-\theta_2)*L*R(-\theta_3)*L*W*L*R(\theta_3)*K_3*L*R(-\theta_1)*K_2$$

$$T_4=K_2*R(-\theta_2)*L*R(-\theta_3)*L*W*L*R(\theta_3)*K_3*L*R(\theta_2)*K_1$$

总的传输矩阵关系式为

$$T=T_1+T_2+T_3+T_4$$

式中:K_1和K_2为3 dB耦合器定向传输琼斯矩阵,且$K_1=\frac{\sqrt{2}}{2}\begin{pmatrix}1&0\\0&1\end{pmatrix}$,$K_2=\frac{\sqrt{2}}{2}\begin{pmatrix}i&0\\0&i\end{pmatrix}$;$K_3=\frac{\sqrt{2}}{2}\begin{pmatrix}1&0\\0&1\end{pmatrix}$,是Y形触角波导的琼斯矩阵;3个偏振调节器可以用下面矩阵表示:

$$R(\theta_i)=\begin{pmatrix}\cos(\theta_i)&-\sin(\theta_i)\\\sin(\theta_i)&\cos(\theta_i)\end{pmatrix},(i=1,2,3)$$

L是高双折射光纤的琼斯矩阵为

$$L_i=\begin{pmatrix}\exp(\frac{\mathrm{i}\Gamma}{2})&0\\0&\exp(-\frac{\mathrm{i}\Gamma}{2})\end{pmatrix}$$

其中$\Gamma=2\pi\Delta nL_j/\lambda$,$\Delta n$是双折射率,$\lambda$是光波长,$L_j$是高双折射光纤的长度;$W$是当光被全反射镜反射回来时对于第3段保偏光纤$L_3$的变换矩阵,其值为$W=\begin{pmatrix}-1&0\\0&1\end{pmatrix}$,其意义是光波相对$x$轴旋转了π弧度。

从输入端1到输出端2的光场变化关系可以由公式表示:$E_{\mathrm{out}}=T*E_{\mathrm{in}}$,则输出光功率比是$T_{\mathrm{out}}=|T^2|=|E_{\mathrm{out}}^2|/|E_{\mathrm{in}}^2|$。由这个公式可以计算该滤波器的输出功率比值随偏振转角和光波长的变化关系。经过相关的运算和一定的数学化简运算,得到该滤波器的输出方程:

$$T_{\mathrm{out}}=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin^2(\theta_1-\theta_2)-\sin^2(\theta_1-\theta_2)\cdot(4\cos^2(\theta_3)\sin^2(\frac{2\pi\Delta nL}{\lambda})-4\cos^4(\theta_3)\sin^4(\frac{2\pi\Delta nL}{\lambda}))\tag{1}$$

此方程的右边第二项是关于偏振旋转角θ_1,θ_2的函数,它和第一项共同决定该滤波器的最大透射功率。第三项中的含θ_1,θ_2正弦平方项总体上决定了在调节$R(\theta_3)$下,振幅输出的大小。调节第三项中的$R(\theta_3)$可看到该滤波器独特的明显的信道隔离功能,而且输出光场并不依赖于输入光的偏振。本文中采用双折射率为$\Delta n=4.8\times10^{-4}$和长为$L_1=L_2=L_3=L=4$ m的高双折射光纤进行数值仿真,研究在波长范围内(1 545 nm～1 555 nm)的输出变化。

2　数值模拟仿真与讨论

由滤波器的输出方程可知:当输入光在高双折

射光纤 L_1 和 L_2 中传输的偏振态相同时,例如 $\theta_1=\theta_2$,输出方程将变成 $T_{out}=\frac{1}{2}$,该滤波器的输出将不受 $R(\theta_3)$ 调节的影响。当 $R(\theta_3)$ 处于 $\theta_3=\frac{\pi}{2}$ 时,对于任何不同偏振态的光波在光纤 L_1 和 L_2 中传输 $\theta_1\neq\theta_2$ 时,其传输方程写为 $T_{out}=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\sin^2(\theta_1-\theta_2)$。由此式可见,在这种情况下输出 T_{out} 完全由 θ_1 和 θ_2 决定。当 $|\theta_1-\theta_2|=\frac{\pi}{2}$ 时,$T_{out}=1$,输出变化如图 2 所示。

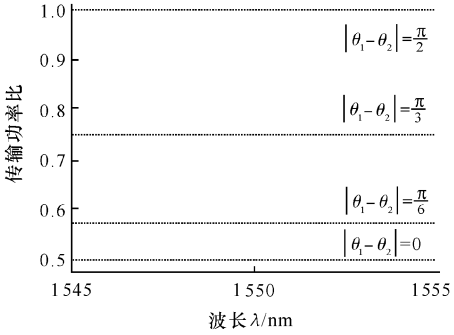

图 2　$\theta_3=\frac{\pi}{2}$ 时,滤波特性随 $|\theta_1-\theta_2|$ 取值的变化

Fig. 2　Transmission as a function of $|\theta_1-\theta_2|$, when $\theta_3=\frac{\pi}{2}$

当 $\theta_3\neq\frac{\pi}{2}$,而 $|\theta_1-\theta_2|=\frac{\pi}{2}$ 时,该滤波器的输出方程为

$$T_{out}=1-\left(4\cos^2(\theta_3)\sin^2(\frac{2\pi\Delta nL}{\lambda})-4\cos^4(\theta_3)\sin^4(\frac{2\pi\Delta nL}{\lambda})\right) \tag{2}$$

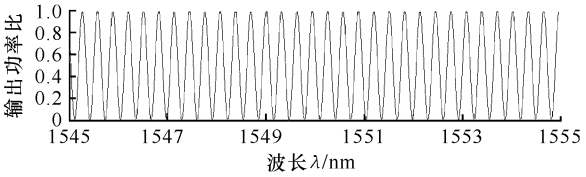

图 3　$|\theta_1-\theta_2|=\frac{\pi}{2}$,$\theta_3=0$ 时的梳状滤波图

Fig. 3　The comb filter diagram when $|\theta_1-\theta_2|=\frac{\pi}{2}$, $\theta_3=0$

当 $\theta_3=0$ 时,其滤波特性如图3 所示。在图3 中,可以清楚地看出,与单个 Sagnac 环形滤波器一样,它是 0～1 的梳状滤波,而且可以很容易数出这里面有 32 个波峰。另外,对于单段高双折射光纤的 Sagnac 滤波器,其透射光强公式为 $T_{out}=\frac{1}{2}(1+\cos(\frac{2\pi\Delta nL_0}{\lambda}))$。在本文中滤波器所使用的高双折射光纤总长度是 $3\cdot L=12$ m。若在 Sagnac 滤波器中用长度为 $L_0=12$ m 的光纤,其滤波特性如图 4 所示。

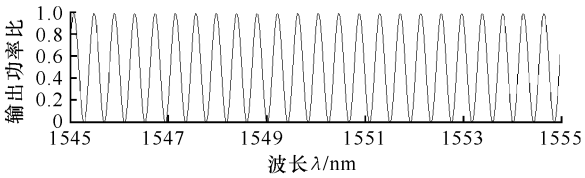

图 4　Sagnac 中双折射光纤为 12 m 时的滤波图

Fig. 4　The comb filter diagram of Sagnac when $L_0=12$ m

很明显,在相同的波长范围内(1 545 nm～1 555 nm),图4 只有24 个波峰,比图3 少了8 个,因此它的相邻波长间隔也就不同了。对于图4,可以用公式 $\Delta\lambda=\frac{\lambda_0^2}{\Delta nl}$(其中 λ_0 是中心波长,l 是双折射光纤有效长度)来计算它的相邻波峰间隔,有 $\Delta\lambda_4\approx0.417$ nm。而对于图3 为什么会有32 个波峰呢?因为,从光经过的光纤长度来看(入射光→L_1→L_3 $\xrightarrow{反射}$$L_3$→$L_2$→输出光),每一束入射光出来前都经过的双折射光纤总长为 $4\cdot L=16$ m。所以双折射光纤有效长度 $l=16$ m,代入数据计算得图 3 中相邻波长间隔是 $\Delta\lambda_3\approx0.312$ nm。如果在Sagnac 环形滤波器中的双折射光纤总长为 16 m,则其滤波特性如图 5 所示。

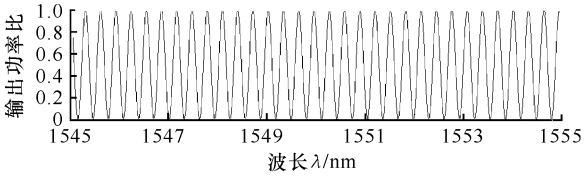

图 5　Sagnac 中 16 m 双折射光纤时滤波图

Fig. 5　The comb filter diagram of Sagnac when $L_0=16$ m

图 5 与图 3 完全一样,具有 32 个波峰,相邻波峰间隔也是 $\Delta\lambda_5\approx0.312$ nm。由此可知,使用相同双折射率和相等长度的高双折射光纤时,该滤波器比 Sagnac 环形滤波器的高双折射光纤使用效率要高,它们的相邻波峰间隔差是 $\Delta(\Delta\lambda)=\lambda_4-\lambda_3\approx0.105$ nm,$\frac{\Delta\lambda_3}{\Delta\lambda_4}=\frac{3}{4}$,高双折射光纤使用效率提高了 $\frac{1}{3}$。

另外,该滤波器还具有很好的信道交错选择功能。当 $|\theta_1-\theta_2|=\frac{\pi}{2}$ 时,调节 $R(\theta_3)$,得到如图6 所示

的滤波效果变化图。调节$R(\theta_3)$,当$\theta_3=0$时,有32个波峰。随着θ_3的增大,当$\theta_3=\frac{\pi}{8}$时,32个波峰中有一半的相间波峰的振幅衰减了50%,到$\theta_3=\frac{\pi}{4}$时,就只剩下16个波峰,即有一半的波峰被滤掉了。由此可见,该滤波器具有信道交错选择功能。

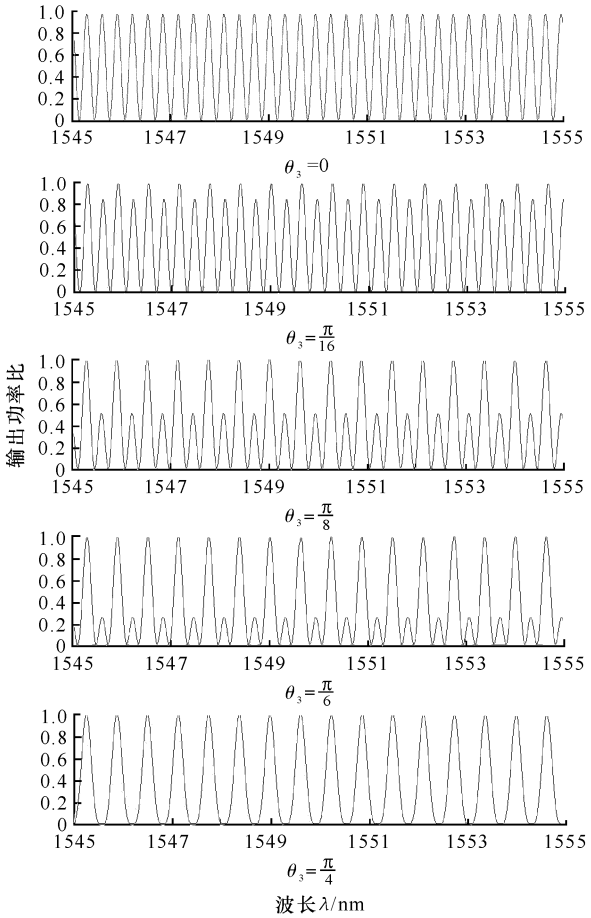

图6　$|\theta_1-\theta_2|=\frac{\pi}{2}$,$\theta_3=0,\frac{\pi}{16},\frac{\pi}{8},\frac{\pi}{6},\frac{\pi}{4}$时的滤波演化图

Fig. 6　Transmission as a function of θ_3, when $|\theta_1-\theta_2|=\frac{\pi}{2}$

图7是在$\theta_3=\frac{\pi}{4}$时,滤波器输出输入功率比值随$|\theta_1-\theta_2|$的变化曲线。它反映了不同偏振态的光波在L_1和L_2中传输会对该滤波器的输出特性产生不同的影响。当$|\theta_1-\theta_2|=0$时,此时滤波器相当于一个半反射镜。当$|\theta_1-\theta_2|=\frac{\pi}{2}$时,该滤波器的滤波幅值最高。

3　结论

本文设计了一种利用高双折射光纤波长可选的高效滤波器。它是由3段相同的高双折射光纤、

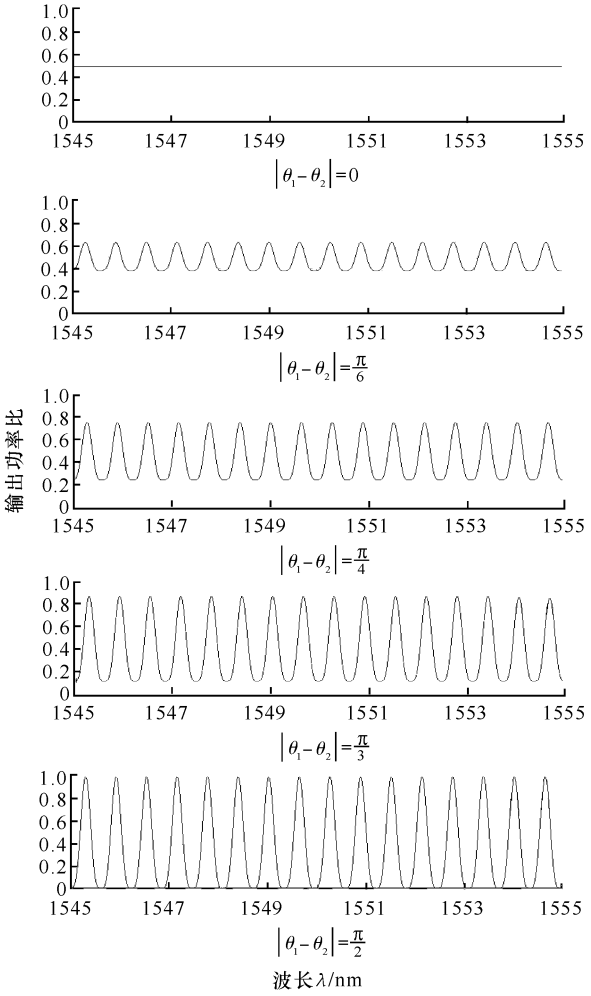

图7　$\theta_3=\frac{\pi}{4}$,$|\theta_1-\theta_2|=0,\frac{\pi}{6},\frac{\pi}{4},\frac{\pi}{3},\frac{\pi}{2}$时的滤波演化图

Fig. 7　Transmission as a function of $|\theta_1-\theta_2|$, when $\theta_3=\frac{\pi}{4}$

1个3 dB耦合器、3个偏振调节器、1个Y形触角波导和1个全反射镜构成。理论上用传输矩阵计算并模拟了该滤波器的滤波特性,通过合适调节3个偏振调节器,可获得很好的信道交错选择效果,将1 545 nm～1 555 nm范围内原有的32个波峰滤变为16个。在使用相同光纤长度下,将该滤波器与Sagnac环形滤波器进行了对比,结果发现该滤波器提高了双折射光纤的使用效率。这种滤波器可以应用到很多光电子领域,如波分复用(WDM)光通信系统、光纤激光器或其他多波长光源。

参考文献:

[1]　STONE J, STULZ L W, SALEH A A M. Three-mirror fiber Fabry-Perot filters of optimal design [J]. Electronics Letters, 1990,26(14):1073-1074.

[2]　贺虎成,杨玲珍,王云才.偏振控制C波段波长可调谐

掺铒光纤激光器[J]. 中国激光,2006,33(12):1597-1600.

HE Hu-cheng, YANG Ling-zhen, WANG Yun-cai. C-band wavelength tunable erbium doped fiber laser with polarization control [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006,33(12):1597-1600. (in Chinese with an English abstract)

[3] MIRZA M A, STEWART G. Theory and design of a simple tunable Sagnac loop filter for multi-wavelength fiber lasers[J]. Applied Optics, 2008,47(29):5242-5252.

[4] 武建芬,陈根祥. 高双折射光纤 Sagnac 环反射特性的 JONES 矩阵分析[J]. 激光与光电子学进展, 2006,43(9):63-66.

WU Jian-fen, CHEN Gen-xiang. Analysis on reflection characteristic of HiBi fiber Sagnac rings by JONES matrix [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006,43(9):63-66. (in Chinese with an English abstract)

[5] HAN Y, LI Q, LIU X, et al. Architecture of high-order all-fiber birefringent filters by the user of the Sagnac interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999,11(1):90-92.

[6] SOVA R M, KIM C S, KANG J U. Tunable dual-segmented fiber ring laser based on 2nd order Sagnac-Lyot fiber filter [C]. Long Beach, CA: CLEO/QELS 2002, 2002.

[7] KIM S, KANG J U. Polarization-independent "figure-eight" birefringent Sagnac variable comb-filter/attenuator [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004,16(2):494-496.

[8] HANAIZUMI O, MIYAGI M, MINAKATA M, et al. Antenna coupled Y junctions in 3-dimensional dielectric waveguide[C]. Venice: European Conference on Optical Communications, 1985.