

三镜级联结构 Gires-Tournois 谐振腔的色散特性分析*

张娟,王昌,张志宏,黄肇明

(上海大学 通信与信息工程学院,上海 200072)

摘 要:系统分析了三镜级联结构 G-T 谐振腔的色散特性,表明三镜级联结构 G-T 谐振腔具有不同于两镜级联结构 G-T 谐振腔的特有色散特性. 利用该特性以三镜级联结构 G-T 谐振腔作为色散补偿元件可有效改善 MGTI 型 interleaver 的色散性能,并给出了以三镜级联结构 G-T 谐振腔为补偿元件的具体补偿实例. 模拟结果表明:对 50 GHz 的 MGTI 型光交错复用器,可实现中心波长附近 ± 0.08 nm、 ± 0.09 nm 和 ± 0.1 nm 范围内的色散绝对值分别小于 1 ps/nm、2.4 ps/nm 和 6.6 ps/nm 的良好补偿结果. 与文献报道的两镜级联结构 G-T 腔补偿结果相比,色散绝对值小于 1 ps/nm 的波长范围扩大了 60%;在中心波长附近 ± 0.09 nm 范围内的色散绝对值降低了 92%.

关键词:密集波分复用;光交错复用器;Gires-Tournois 谐振腔;色散

中图分类号:TN929.11

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2008)01-0120-5

0 引言

密集波分复用(DWDM)技术是为了提高通信容量而广泛采用的技术方案. 随着 DWDM 技术的迅速发展,信号频率间隔愈来愈小,需要采用更窄频率间隔的波分复用器件来扩容,这也就对复用/解复用器提出了更高的光谱分辨要求. 光交错复用器(interleaver)技术则是不增加现有复用/解复用器技术负担而实现更加密集波分复用的一种有效解决方法,且已成为 DWDM 系统中的关键器件之一^[1].

DWDM 系统对 interleaver 的基本特性要求为:平坦通带(和阻带)宽度大、信道隔离度高、色散小、插入损耗小及偏振无关等. 目前,interleaver 技术的实现方案多种多样^[2-10],典型方案之一是迈克尔逊 Gires-Tournois 干涉型(简称为 MGTI 型)interleaver 技术. 该方案具有输出透射率谱矩形化、带内抖动很小的优异性能,但其固有有色散较大. 随着 DWDM 系统传输速率的不断提高,系统所能容纳的色散值也将更小,因此很有必要对该方案进行色散补偿. 文献[11]以两镜级联构成的 G-T 谐振腔(以下简称两级 G-T 谐振腔)为色散补偿元件,实现了中心波长附近 ± 0.05 nm 范围内色散绝对值小于 1 ps/nm; ± 0.09 nm 范围内色散绝对值小于

30 ps/nm 的补偿结果. 本文从 N 镜级联结构的 G-T 谐振腔出发,系统分析了以三镜级联构成的 G-T 谐振腔(以下简称三级 G-T 谐振腔)的色散特性,在此基础上通过与两级 G-T 谐振腔色散特性进行比较,指出了三级 G-T 谐振腔具有不同于两级 G-T 谐振腔的特有色散特性,提出了利用该特性以三级 G-T 谐振腔对 MGTI 型 interleaver 进行色散补偿的补偿方案. 同时,给出了该补偿方案的具体补偿实例,可实现中心波长附近 ± 0.08 nm、 ± 0.09 nm 和 ± 0.1 nm 范围内的色散绝对值分别小于 1 ps/nm、2.4 ps/nm 和 6.6 ps/nm 的良好补偿结果. 与文献[11]的补偿效果相比,该方案的色散补偿性能明显提高.

1 三级 G-T 谐振腔的色散特性

假设 N 个部分透射、零厚度的平面平行镜子依次标记为 $i=1,2\cdots N$. 图 1 为 N 镜级联时镜子 i 和 $i+1$ 处的光场振幅. E_i^+ 为镜子 i 左手边向右传播波前的电场矢量振幅, E_i^- 为镜子 i 左手边向左传播

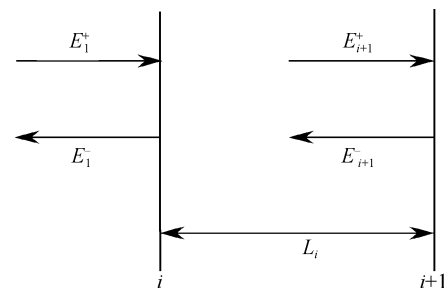


图 1 在镜子 i 和 $i+1$ 处的光场振幅

Fig.1 The amplitudes at mirrors i and $i+1$

*上海市重点学科建设项目(T0102),上海市教委发展基金(05ZA45)及上海市高校选拔培养优秀青年教师专项基金资助

Tel:021-56332285 Email:juanzhang-zj@hotmail.com

收稿日期:2006-08-12

波前的电场矢量振幅, r_i 和 t_i 为镜子 i 的振幅反射和透射系数, 从镜子 i 到镜子 $i+1$ 的距离为 L_i , 位相为 $\varphi_i = \frac{2\pi L_i}{\lambda}$.

对 N 个级联的平面平行、部分透射的镜子, 可得到如下一般性的结果^[8]

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1 t_2 \dots t_{N-1}} \begin{bmatrix} e^{-i\varphi_1} & -r_1 e^{i\varphi_1} \\ -r_1 e^{-i\varphi_1} & e^{i\varphi_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{-i\varphi_2} & -r_2 e^{i\varphi_2} \\ -r_2 e^{-i\varphi_2} & e^{i\varphi_2} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} e^{-i\varphi_{N-1}} & -r_{N-1} e^{i\varphi_{N-1}} \\ -r_{N-1} e^{-i\varphi_{N-1}} & e^{i\varphi_{N-1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix} \quad (1)$$

或

$$\begin{bmatrix} E_1^+ \\ E_1^- \end{bmatrix} = \frac{1}{t_1 t_2 \dots t_{N-1}} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_N^+ \\ E_N^- \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 A, B, C 和 D 为矩阵系数. 则 N 个级联部分透射镜的振幅反射系数为

$$r = \frac{E_1^-}{E_1^+} = \frac{C - Dr_N}{A - Br_N} \quad (3)$$

故多级 G-T 腔的相移可以表示为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(r)}{\text{Re}(r)}\right) \quad (4)$$

当 $N=3$, 可得三级 G-T 腔相位响应为

$$\Theta(r_1, r_2, d_1, d_2) = -\arctan\left(\frac{2r_2(1-r_1^2)}{2r_1(1+r_1^2)+4r_1r_2} \cdot \frac{\sin(\Delta+\delta) + (1-r_1^2)\sin(2\delta) + \cos(\Delta-\delta) + 2r_2(1+r_1^2)\cos(\delta+\Delta) + r_2^2(1-r_1^2)\sin(2\Delta)}{(1+r_1^2)\cos(2\delta)r_2^2(1+r_1^2)\cos(2\Delta)}\right) \quad (5)$$

式中, r_1, r_2, d_1, d_2 分别为前两镜的反射率及相邻两镜间的间距, $\Delta = 2\pi \frac{(d_1 - d_2)}{\lambda} = \frac{(d_1 - d_2)}{C} \omega$,

$\delta = 2\pi \frac{(d_1 + d_2)}{\lambda} = \frac{(d_1 + d_2)}{C} \omega$, C 为光速, λ 为波长, ω 为角频率. 当 $r_1 = 0, d_1 = 0$ 或 $r_2 = 0, d_2 = 0$ 时, 式(5)则对应于两级 G-T 腔相位响应.

不同波长的光经过谐振腔后, 群时延不同, 定义为 $\tau(\omega) = d\Theta/d\omega$, 则色散为: $D(\lambda) = d\tau/d\lambda$.

根据式(5)及色散的定义, 可得到三级 G-T 腔色散. 考虑到三面镜 G-T 腔相位响应表达式的复杂性, 为方便起见, 只对较简单的 $d_1 = d_2$ 情况进行分析. 当 $d_1 = d_2$ 时, 三级 G-T 腔色散可表达为

$$D = \frac{D_7 [D_1 - D_2 (D_3 + D_4)]}{D_5 D_6} \quad (6)$$

式中

$$D_1 = -2[a + 2c \cos(j/\lambda)][2ae + 4ch + (2ad + 3ce + 3ah) \cos(j/\lambda) + 4cd \cos(2j/\lambda) +$$

$$(ce - ah) \cos(3j/\lambda)]^2 \quad (7)$$

$$D_2 = a^2 + c^2 + 2d^2 + e^2 + h^2 + 2[ac + e(2d + h)] \cos(j/\lambda) + (-a^2 + e^2 + 4dh) \cos(2j/\lambda) - 2(ac - eh) \cos(3j/\lambda) - (c^2 - h^2) \cos(4j/\lambda) \quad (8)$$

$$D_3 = 2ad^2 + 14cde - 4ae^2 - 8adh - 17ceh - 15ah^2 + [-ae(2d + 25h) + c(16d^2 + 3e^2 - 8dh - 32h^2)] \cos(j/\lambda) \quad (9)$$

$$D_4 = 2[ce(3d - 5h) - 2ah(3d + 2h)] \cos(2j/\lambda) + (ce^2 - 8cdh - aeh) \cos(3j/\lambda) - (ceh - ah^2) \cos(4j/\lambda) \quad (10)$$

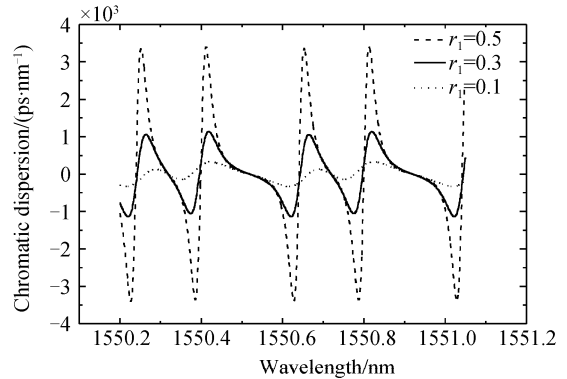
$$D_5 = 2C\lambda^2 [d + e \cos(j/\lambda) + h \cos(2j/\lambda)]^5 \quad (11)$$

$$D_6 = \{1 + [a \sin(j/\lambda) + c \sin(2j/\lambda)]^2 / [d + e \cos(j/\lambda) + h \cos(2j/\lambda)]^2\}^2 \quad (12)$$

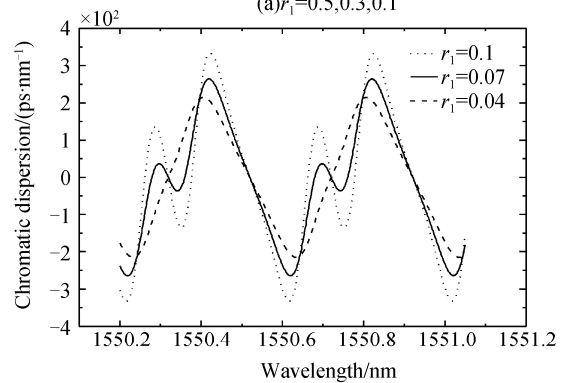
$$D_7 = \pi L^2 \sin(j/\lambda) \quad (13)$$

式(7)~(13)中, $a = 2r_2^2(1 - r_1^2)$; $c = 1 - r_1^2$; $d = 2r_1(1 + r_2^2) + r_2^2(1 + r_1^2)$; $e = 4r_1r_2 + 2r_2(1 + r_1^2)$; $h = 1 + r_1^2$; $j = 2\pi(d_1 + d_2)$; $L = d_1 + d_2$.

图 2(a) 为反射率 $r_2 = 0.3, r_1$ 分别为 0.5, 0.3, 0.1 时的三级 G-T 腔色散. 由图 2(a) 可知, 三级 G-T 腔具有不同幅值和斜率变化规律的两个相邻色散带; 当 r_1 变化时, 通带中心附近和通带沿出色散的变化趋势相同, 零色散点位置不变, 且色散随 r_1 的



(a) $r_1=0.5, 0.3, 0.1$



(b) $r_1=0.1, 0.07, 0.04$

图 2 反射率 $r_2 = 0.3$, 不同 r_1 时的三级 G-T 腔色散

Fig. 2 Chromatic dispersion of a three-mirror G-T resonator with $r_2 = 0.3$ and different r_1 respectively

减小而减小,而相邻两色散带的色散差值随 r_1 的减小而增大. 特别是,当 r_1 减小到一定值时,色散值减小的色散带消失,此时两色散带的色散差值最大. 图 2(b)为反射率 $r_2 = 0.3$, r_1 分别为 0.1、0.07、0.04 时的三级 G-T 腔色散. 由图 2(b)可见,对图 2(a)中的点线($r_1 = 0.1$)所示的曲线来说,当 r_1 减小到 0.04 时,左侧的色散带基本消失.

图 3(a)为反射率 $r_1 = 0.3$, r_2 分别为 0.7、0.5、0.3 时的三级 G-T 腔色散. 由图 3(a)可知,具有不同幅值和斜率变化规律的两个相邻色散带,当 r_2 变化时,通带中心附近和通带沿处色散的变化趋势相同,零色散点位置不变,且色散随 r_2 的减小而增大,相邻两色散带的色散差值也随 r_2 的减小而减小. 特别是,当 r_2 减小到一定值时,两色散带成为完全相同的两个色散带,此时色散差为最小值零. 图 3(b)为反射率 $r_1 = 0.3$, r_2 分别为 0.3、0.1、0.01 时的三级 G-T 腔色散. 由图 3(b)可见,对图 3(a)中的点线($r_2 = 0.3$)所示的曲线来说,当 r_2 减小到 0.01 时,两色散带基本相同,此时色散周期变为原来的一半.

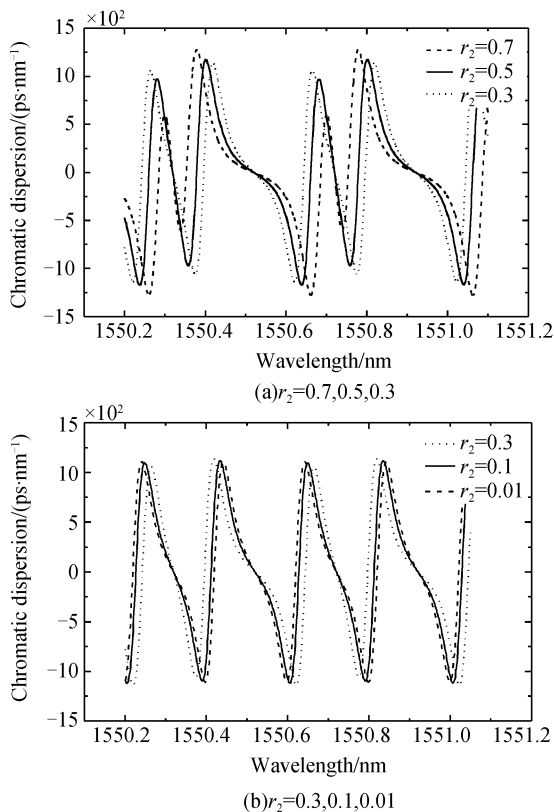


图 3 反射率 $r_1 = 0.3$, 不同 r_2 时的三级 G-T 腔色散
Fig. 3 Chromatic dispersion of a three-mirror G-T resonator with $r_1 = 0.3$ and different r_2 respectively

2 色散补偿性能的提高

根据 G-T 腔的相位响应及色散的定义,可以比较三级和两级 G-T 腔色散特性. 图 4 为部分反射

率镜的反射率分别为 0.2、0.4 及 0.6 时的两级 G-T 腔色散.

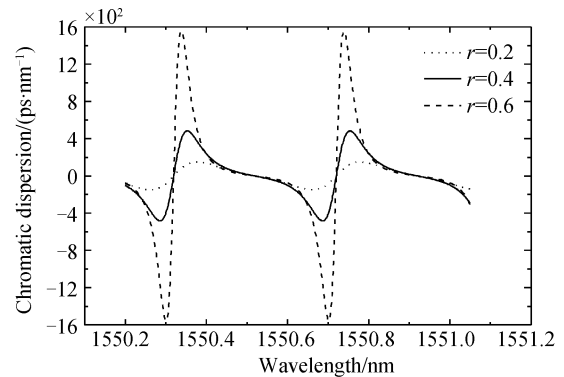


图 4 反射率发生变化时的两级 G-T 腔色散
Fig. 4 Chromatic dispersion of a two-mirror G-T resonator with different r

由图 3(a)可知,对两级 G-T 腔而言,其只有一个色散带,且随部分反射镜反射率的增加,在通带中心附近的色散减少,在通带沿处色散急剧增加,零色散点位置不变.

众所周知,进行色散补偿时,要求在中心波长附近补偿器色散曲线与系统色散曲线尽可能的互补,即应满足两个基本条件:1)补偿器和系统的色散零点重合于中心波长处,且色散曲线斜率相反;2)在中心波长两侧尽可能宽的范围内使补偿器和系统的色散幅值相近但符号相反.

由分析知,三级 G-T 腔具有不同于两级 G-T 腔的特有的色散特性(色散带的幅值和斜率变化规律不同),因而可以利用该特性进行色散补偿,使在中心波长附近的更宽范围内无论色散幅值和斜率都与系统色散曲线互补得更好,从而达到了更好的补偿效果.

3 色散补偿实例

对 50 GHz 的 MGTI 型 interleaver, G-T 腔前镜反射率为 $r_1 = 0.34$, 腔长 $d_1 = 2.99793$ mm^[5]. 这里仍考虑三级 G-T 腔腔长相等的情况. 要对该系统进行色散补偿,首先为满足补偿条件 1,可确定三级 G-T 腔的腔长 $d_1 = d_2 = 2.99793$ mm. 在确定了腔长的条件下,利用 Matlab 编程寻找部分反射率 r_1, r_2 的最佳值使色散补偿范围最大化. 编程求得的最佳值为 $r_1 = 0.02, r_2 = 0.81$. 图 5 为补偿后的系统色散曲线. 由图 5 可知,补偿后系统色散绝对值小于 1 ps/nm 时的波长范围大于中心波长 (1550.52 nm)附近 ± 0.08 nm,且在中心波长附近 ± 0.09 nm 和 ± 0.1 nm 范围内的色散绝对值分别小于 2.4 ps/nm 和 6.6 ps/nm. 图 6 比较了系统、两级 G-T 补偿器、三级 G-T 补偿器、采用两级 G-T 腔

补偿后的系统及采用三级 G-T 腔补偿后的系统色散特性. 由图 6 可见,最优化参量的三级 G-T 补偿器较最优化参量的两级 G-T 补偿器在更大的波长范围内色散幅值和斜率都与系统色散曲线互补得更好.

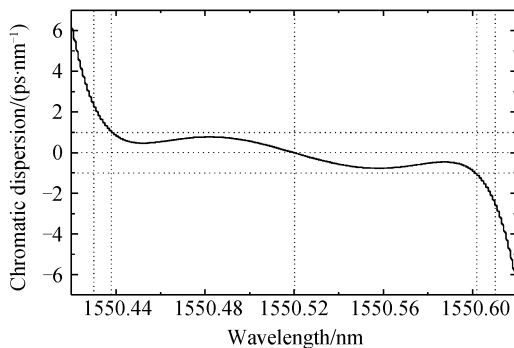


图 5 补偿后的系统色散

Fig. 5 The interleaver chromatic dispersion with a three-mirror G-T compensator

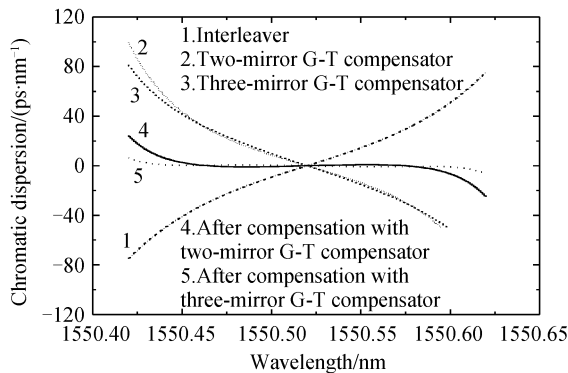


图 6 系统、两级和三级 G-T 补偿器及分别采用两级和三级 G-T 腔补偿后的系统色散曲线

Fig. 6 The chromatic dispersion of interleaver, two-mirror and three-mirror compensator, and interleaver with two-mirror and three-mirror compensator respectively

为便于对比,表 1 给出了该三级 G-T 腔和文献[11]的两级 G-T 腔的取值条件及补偿结果. 从表 1 可知,采用该三级 G-T 腔可使色散补偿范围更大,色散值也越小(色散绝对值小于 1 ps/nm 的波长范围扩大了 60%;在中心波长附近 ± 0.09 nm 范围内

表 1 三级 G-T 腔和两级 G-T 腔的取值条件及补偿结果

	二级 G-T 腔	三级 G-T 腔
结构	$d = 6.000\ 39$ mm;	$d_1 = d_2 = 2.997\ 93$ mm;
参量	$r_1 = 0.1; r_2 = 1$	$r_1 = 0.02; r_2 = 0.81; r_3 = 1$
色散	中心波长 ± 0.05 nm 范围, 色散绝对值 < 1 ps/nm	中心波长 ± 0.08 nm 范围, 色散绝对值 < 1 ps/nm
	中心波长 ± 0.09 nm 范围, 色散绝对值 < 30 ps/nm	中心波长 ± 0.09 nm 范围, 色散绝对值 < 2.4 ps/nm

的色散绝对值降低了 92%). 表明通过增加 G-T 腔补偿器级数,优化结构参量后可以得到更好的补偿效果.

4 结论

本文系统分析了三级 G-T 腔的色散特性,发现其具有不同于两级 G-T 腔的特有的色散特性. 利用该特性,在此基础上,提出了采用三级 G-T 腔作为 MGTI 型 interleaver 色散补偿元件的补偿思想. 文中具体采用了一相等腔长的三级 G-T 腔实现了中心波长附近 ± 0.08 nm、 ± 0.09 nm 及 ± 0.1 nm 范围内色散绝对值分别小于 1 ps/nm、2.4 ps/nm 及 6.6 ps/nm 的系统色散. 该补偿结果与文献报道的两级 G-T 腔相比,色散补偿效果显著提高.

参考文献

- [1] SHINE B, BAUTISTA J. Interleavers make high-channel-count system economical[J]. *J Lightwave Technol*, 2000, **18**(8):140-144.
- [2] OKAMOTO K, YAMADA H. Arrayed-waveguide grating multiplexer with flat spectral response[J]. *Opt Lett*, 1995, **20**(1):43-45.
- [3] OGUMA M, JINGUJI K, KITOH T, et al. Flat-passband interleaver filter with 200 GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure[J]. *Electron Lett*, 2000, **36**(15):1299-130.
- [4] CAI Yan-min, WANG Xin-ge, ZHAO Ling, et al. Principle of birefringence crystal type interleaver applied in DWDM fiber system[J]. *Chinese J of Lasers*, 2001, **28**(11):1017-1020. 蔡燕民, 王昕歌, 赵岭, 等. 用于 DWDM 系统的双折射型 interleaver 原理分析[J]. *中国激光*, 2001, **28**(11):1017-1020.
- [5] DINGEL B B, ARUGA T. Properties of a novel noncascaded type, easy-to-design, ripple-free optical bandpass filter[J]. *J Lightwave Technol*, 1999, **17**(8):1461-1469.
- [6] HSIEH C H, WANG R B, WEN Z Q J, et al. Flat-top interleavers using two Gires-Tournois etalons as phase-dispersion mirrors in a Michelson interferometer[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, **15**(2):242-244.
- [7] LIANG F. Bulk optical interleaver with flat passband using cascaded Mach-Zehnder interferometers [C]. *SPIE*, 2002, **4906**:442-452.
- [8] STADT H V, MULLER J M. Multimirror Fabry-Perot interferometers[J]. *J Opt Soc Am A*, 1985, **2**(8):1363-1370.
- [9] SHAO Yong-hong, FENG Jin-liang, JIANG Yao-liang, et al. A novel design of interleaver independent to polarization[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):533-535. 邵永红, 冯进良, 姜耀亮, 等. 一种新型偏振无关光交错复用器的设计[J]. *光子学报*, 2004, **33**(5):533-535.
- [10] LU Huai-wei, PU Hui-lan, MA Li, et al. Analysis of a comb-filter with non-symmetrical framework[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **33**(3):314-317. 鲁怀伟, 蒲会兰, 马莉, 等. 一种非对称结构光纤梳状滤波器的分析[J]. *光子学报*, 2003, **32**(3):314-317.

- [11] SHAO Yong-hong, ZHAO Zhen-ming, JIANG Yao-liang, *et al.* Dispersion research of MGTI interleaver [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):942-944.

邵永红, 赵振明, 姜耀亮, 等. MGTI 型光交错复用器的色散特性分析[J]. 光子学报, 2004, **33**(8):942-944.

Study on Chromatic Dispersion of Three-Mirror Gires-Tournois Resonators

ZHANG Juan, WANG Chang, ZHANG Zhi-hong, HUANG Zhao-ming

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Received date: 2006-08-12

Abstract: Chromatic dispersion properties are investigated for three-mirror Gires-Tournois resonators. The dispersion properties peculiar to the three-mirror Gires-Tournois resonator are demonstrated. The idea which the dispersion of MGTI interleaver can effectively improved with three-mirror Gires-Tournois compensator is pointed out and a compensation example with three-mirror Gires-Tournois resonator as compensator is given. The numerical simulation results indicate that for a 50 GHz MGTI interleaver, the chromatic dispersion can be respectively within ± 1 ps/nm, ± 2.4 ps/nm and ± 6.6 ps/nm in the range of ± 0.08 nm, ± 0.09 nm and ± 0.1 nm center-wavelength. Compared with the result of a two-mirror Gires-Tournois resonator, the compensation range with dispersion within ± 1 ps/nm is broaden 60% and the absolute value of dispersion in the range of ± 0.09 nm center-wavelength is reduced 92%.

Keywords: Dense wavelength-division multiplexing; Interleaver; Gires-Tournois resonator; Chromatic dispersion



ZHANG Juan was born in 1976. She received her B. S. degree in Physics from Northwest University, China, in 1999, and the Ph. D. degree in Optics Engineering from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China, in 2004. And then she joined the School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, China. Her current research interests include passive devices in optical communications, optical signal processing and crystal optics.