

doi: 10.3788/LOP47.070602

# 基于复合型耦合器的新型透射式 GT 交错复用器及色散补偿

王秀琳<sup>1</sup> 张宇<sup>2</sup> 黄文财<sup>2</sup> 许惠英<sup>2</sup> 蔡志平<sup>2</sup>( <sup>1</sup>集美大学物理系, 福建 厦门 361021; <sup>2</sup>厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要** 提出了基于复合型耦合器的透射式 GT 腔, 并将其串入马赫曾德尔干涉仪(MZI)的两臂上, 得到了一种新型的交错复用器。推导了该器件的理论表达式, 并进行了数值模拟。模拟结果表明, 该交错复用器具有相当好的通带平坦性, 大的通带带宽、截止度和阻带带宽。对该交错复用器进行了优化分析, 发现腔数固定时, 纹波带宽比越大(频谱越接近矩形方波), 隔离度将越小。分析结果表明, 可以通过增加腔的数量来解决纹波带宽与隔离度的矛盾, 即交错复用器的频谱性能随着腔数的增加得以改善。相对于环形谐振腔辅助的交错复用器, 该交错复用器不需要添加额外的相移器就能获得近似矩形的频谱, 并且在整个工作波段范围具有很好的频谱均匀性。对于该器件的色散问题, 提出了采用级联环形腔作为色散补偿器的补偿方案。模拟结果表明, 级联环形腔能够很好地补偿该交错复用器的色散。

**关键词** 光通信; 交错复用器; 马赫曾德尔干涉仪; 透射式 GT 腔; 频谱优化; 色散补偿

中图分类号 TN253

OCIS 060.1810 230.2035

文献标识码 A

## Novel Transmissive Gires-Tournois Interleaver Based on Composite Coupler and Its Dispersion Compensation

Wang Xiulin<sup>1</sup> Zhang Yu<sup>2</sup> Huang Wencai<sup>2</sup> Xu Huiying<sup>2</sup> Cai Zhiping<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China

<sup>2</sup>Department Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

**Abstract** The transmissive Gires-Tournois etalon (GTE) is proposed based on composite couplers. By combining such GTEs with Mach-Zehnder interferometer (MZI), we obtain a new interleaver. The output expression is derived and numerical simulation is performed. The simulation indicates that it has good passband flatness (flat top), large isolation, wide passband and stopband bandwidths. By optimizing the spectrum it shows that when the sum of cavities of GTEs is fixed, the larger the passband bandwidth gets, the smaller the isolation will be, i. e., isolation and bandwidth are incompatible. However, this contradiction can be overcome by increasing the sum of cavities, i. e., interleaver's spectral performance can be enhanced by increasing cavities. Compared with the ring resonator assisted interleaver, the proposed interleaver can achieve rectangle spectrum without using the phase shifter and its spectrum is uniform in the whole wavelength band. Furthermore, a set of cascaded ring resonators is proposed as the dispersion compensator to overcome the dispersion of the interleaver. Dispersion compensation ability is very good and can be enhanced by increasing the number of ring resonators.

**Key words** optical communications; interleaver; Mach-Zehnder interferometer; transmissive Gires-Tournois etalon; spectrum optimization; dispersion compensation

## 1 引言

随着信息通信的迅速发展, 人们对宽带通信提出了更高的要求。密集型波分复用(DWDM)技术是扩大通信容量的最佳方案之一, 目前已广泛应用于长途干线、城域网, 并扩展至接入网中。研制密集型波分复用器所遇到的技术困难和成本在急剧上升, 然而在信道间隔缩小一倍的情况下, 只需增加一个波长交错复用器(Interleaver), 原来的复用/解复用器件还可以继续适用, 因此研究和制备性能良好的波长交错复用器对于

收稿日期: 2009-12-14; 收到修改稿日期: 2010-01-21

基金项目: 福建省新世纪优秀人才项目(X07204)和福建省教育厅科技项目(JA08138)资助课题。

作者简介: 王秀琳(1974-), 女, 博士, 副教授, 主要从事光纤通信器件与技术方面的研究。E-mail: wanxl@jmu.edu.cn

目前系统升级扩容十分有意义。目前实现交错复用器的技术有很多,如双折射<sup>[1]</sup>、薄膜<sup>[2]</sup>、阵列波导光栅<sup>[3]</sup>、光栅<sup>[4,5]</sup>、马赫-曾德尔干涉仪(MZI)<sup>[6-8]</sup>、环形谐振腔<sup>[9-11]</sup>、波片<sup>[12]</sup>、GT腔<sup>[13-16]</sup>等。近年来,人们利用GT腔的相位特性,将传统的迈克耳孙干涉仪的一个臂或两个臂的全反射镜用GT腔代替,得到了新型的迈克耳孙-GT型交错复用器(MGTI)。该交错复用器具有相当好的频谱性能,即很好的通带平坦性,大的通带带宽、截止度和阻带带宽,十分适合应用在密集波分复用系统中<sup>[13-16]</sup>。

通常由反射元件,如薄膜<sup>[14-16]</sup>或光栅<sup>[13]</sup>构成的GT腔是反射式元件,因此其适用于迈克耳孙干涉仪中。MZI是目前制作波长交错滤波器最广泛采用的一种方案。但是,单级MZI的响应函数近似为正弦型,其传输效率对信号波长的偏移十分敏感。为提高其实用性,董小伟等<sup>[10]</sup>提出了采用多级级联来提高响应通带平坦性,以及环形谐振器辅助的MZI波长交错滤波器。本文提出一种新型的透射式GT腔,它由复合型耦合器构成。不同于反射式GT腔,透射式GT腔适合串在MZI的两臂上构成一种新型的透射式GT腔辅助的交错复用器,即马赫-曾德尔-GT型交错复用器(MZGTI)。研究了MZGTI的频谱性能与各结构参数的关系,获得接近矩形的频谱。理想状态下,环形谐振腔辅助的交错复用器与MZGTI性能是相似的。但环形谐振腔辅助的交错复用器需要添加额外的相移器才能获得近似矩形的频谱。当相移器不理想时,会造成频谱不均匀的问题。透射式GT腔辅助的交错复用器不需要添加额外的相移器就能获得近似矩形的频谱,并且在整个工作波段范围具有很好的频谱均匀性,从而解决了环形谐振腔辅助的交错复用器频谱不均匀的问题。与MGTI一样<sup>[16]</sup>,MZGTI也存在色散问题。讨论了MZGTI的色散特性并提出采用级联环形腔作为其色散补偿器。

## 2 多腔透射式GT标准具

多腔透射式GT标准具(MCT-GTE)的结构如图1所示。从图1可见,除了第一个环只有一个MZI以外,其余的每个环都包含两个MZI,而每个MZI由两个耦合器构成。因此称之为马赫-曾德尔干涉环(MZIL)。MCT-GTE<sub>n</sub>由n个MZIL级联而成,每个MZIL形成一个腔,故MCT-GTE<sub>n</sub>有n个腔。

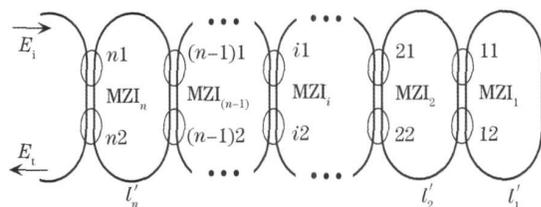


图1 MCT-GTE<sub>n</sub>结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of MCT-GTE<sub>n</sub>

基于 $2 \times 2$ 耦合器的传输矩阵,令图1中每个MZI的两臂等长,于是每个MZI退化成了一个复合型耦合器,也就是每个MZI等同于一个 $2 \times 2$ 耦合器。第*i*个复合型耦合器(MZIL<sub>i</sub>)的传输矩阵表示为

$$A = \exp(-j\beta l_{MZ}) \begin{bmatrix} z_i & jx_i \\ jx_i & z_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中

$$z_i = \sqrt{K_{i1}K_{i2}} - \sqrt{(1-K_{i1})(1-K_{i2})}, \quad x_i = \sqrt{(1-K_{i1})K_{i2}} + \sqrt{K_{i1}(1-K_{i2})}, \quad (2)$$

$\beta = n_{\text{eff}}k$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $n_{\text{eff}}$ 为有效折射率,  $\lambda$ 为真空中光波长,  $K_{i1}$ 和 $K_{i2}$ 分别为耦合器*i*1和*i*2直通臂的耦合系数,  $l_{MZ}$ 为第*i*个MZI的每个臂的长度(耦合器*i*1和*i*2的耦合区长度已经包含在内),把 $l_{MZ}$ 称为第*i*个复合型耦合器的耦合区长度。

通过迭代分析法<sup>[16]</sup>,图1中MCT-GTE<sub>n</sub>的透射系数 $t_n$ 可以写成

$$t_n = (-1)^n \exp(-j\beta l_{MZn}) \frac{r_n + \exp(-j2\delta) \exp(j2\phi_{n-1})}{1 + r_n \exp(-j2\delta) \exp(j2\phi_{n-1})} = (-1)^n \exp(-j\beta l_{MZn}) \exp(j2\phi_n), \quad (3)$$

式中

$$\phi_n = -\arctan[a_n \tan(\delta - \phi_{n-1})], \quad (4)$$

$r_n = |z_n|$ ,  $z_n$ 由(1), (2)式定义。当*n*为奇数,  $z_n$ 取负数;当*n*为偶数,  $z_n$ 为正数。 $2\phi_n$ 为MCT-GTE<sub>n</sub>的相位。 $a_n = (1 - r_n)/(1 + r_n)$ ,  $\delta = 0.5kL$ ,  $L = n_{\text{eff}}(l'_{i1} + l_{MZi}) = \dots = n_{\text{eff}}(l_{MZ(n-1)} + l'_{in} + l_{MZn})$ 为有效腔长。 $l'_i$ (标注在图1中)为第*i*个MZIL的环长(不包括MZIL<sub>i</sub>和MZIL<sub>(i-1)</sub>)。特别地,  $\phi_0 = 0$ 。(3), (4)式表明,图1中的结构是一个多腔透射式GT标准具,它是一个全通滤波器。必须指出,图1中的结构只有当 $z_i$ 合理取值时才能构成

MCT-GTE。当  $i$  为奇数时  $z_i$  必须为负; 当  $i$  为偶数时  $z_i$  必须为正。 $z_i$  的符号取决于 (2) 式中  $K_{i1}$  和  $K_{i2}$ 。这时, MCT-GTE 的相位和多腔 GT 标准具的一样。

### 3 马赫曾德尔-GT 型交错复用器

#### 3.1 结构与原理分析

图 2 为马赫曾德尔-GT 型交错复用器 ( $m\pi$  MZGTI)。  $m\pi$  MZGTI 是把 MZI 和 MCT-GTE 结合而成的新型交错复用器, 它和 MGTI 很相似, 是在 MZI 两臂各自串上一个 MCT-GTE 形成的。

基于 (3), (4) 式, 使用  $2\phi_m$  和  $2\theta_n$  分别表示 MCT-GTE $m$ (a 臂) 和 MCT-GTE $n$ (b 臂) 的相位。当  $m$  和  $n$  奇偶性不同时, 图 2 中  $m\pi$  MZGTI 的归一化输出光强由

$$I_{\text{bar}} = [1 + \cos(2\phi_m - 2\theta_n + \delta)]/2, \quad I_{\text{cross}} = [1 - \cos(2\phi_m - 2\theta_n + \delta)]/2 \quad (5)$$

给出。但是当它们的奇偶性相同时,  $I_{\text{bar}}$  和  $I_{\text{cross}}$  必须交换。两个输出端口 ( $I_{\text{bar}}$  和  $I_{\text{cross}}$ ) 是互补的, 这使得 MZGTI 是一个适用于 DWDM 系统的交错复用器。其中两臂上所有 MCT-GTEs 的有效腔长必须相等。此外, MZGTI 的相位匹配条件为  $\Delta L = 0.5L$ , 其中  $\Delta L = n_{\text{eff}} [(L^b + l_{\text{MZn}}^b) - (L^a + l_{\text{MZm}}^a)]$ ,  $L^a$  和  $L^b$  分别为 MZGTI 两臂的长度。这些长度条件和 MGTI 是相同的<sup>[16]</sup>。

#### 3.2 频谱特性

##### 3.2.1 特殊点

特别地, 当  $m, n$  均为 0 时,  $m\pi$  MZGTI 就变成了普通的 MZI。由 (3) ~ (5) 式可以得出  $I_{\text{bar}}$  和  $I_{\text{cross}}$  波形均是周期性的,  $I_{\text{bar}} + I_{\text{cross}} = 1$ 。此外, 不论  $m, n$  为何值, 由 (3) ~ (5) 式所决定的归一化光强, 其 3 dB (也即半最大值光强) 均由  $\delta = \pi/2 + p\pi$  ( $p$  为整数) 确定。也就是说, 所有的  $m\pi$  MZGTI, 它们归一化光强谱中的 3 dB 点均重合, 3 dB 带宽均相等。图 3 绘出了  $\Delta L = 3 \text{ mm}$  时 0, 10, 11, 21- MZGTI 的归一化光强。

同样, 由 (3) ~ (5) 式可以得出,  $I_{\text{bar}}$  的通带中心 ( $I_{\text{bar}} = 1$ ) 和阻带中心 ( $I_{\text{bar}} = 0$ ) 分别由  $\delta = 2q\pi$  和  $\delta = \pi + 2q\pi$  ( $q$  为整数) 确定,  $I_{\text{cross}}$  则相反。图 3 中通带中心为 1549.5868 nm ( $q = 1936$ ), 1550.3876 nm ( $q = 1935$ ); 阻带中心为 1549.9871 nm ( $q = 1935$ )。考虑到交错复用器是双通道的, 并且  $q$  一般都很大, 用近似公式  $\Delta\lambda = 0.5\lambda / \Delta L$  来计算频谱间距, 其中  $\lambda$  为中心波长, 比如在 1550 nm 附近可以取  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 。

##### 3.2.2 纹波带宽

3.2.1 节分析得到一些特殊点的分布, 但是  $m\pi$  MZGTI 的传输谱性能与耦合器的耦合比密切相关, 反映在参数  $r_i$  上。当调节  $r_i$ , 使得  $m\pi$  MZGTI 在通带中心的两侧分别出现  $m+n$  个峰和  $m+n$  个谷时, 此时便

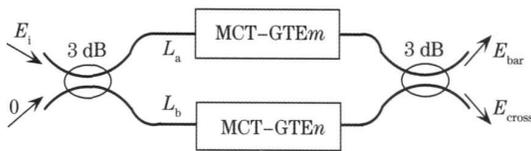


图 2  $m\pi$  MZGTI 结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of  $m\pi$  MZGTI

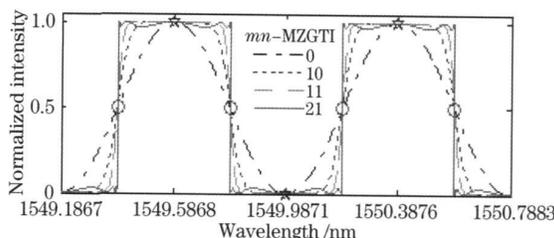


图 3  $m\pi$  MZGTI 归一化光强频谱。圆圈为 3 dB 位置, 五角星为通带中心和阻带中心

Fig. 3 Normalized intensity spectrum of  $m\pi$  MZGTI. Circles are 3 dB points, and pentagrams are passband centers and stopband centers

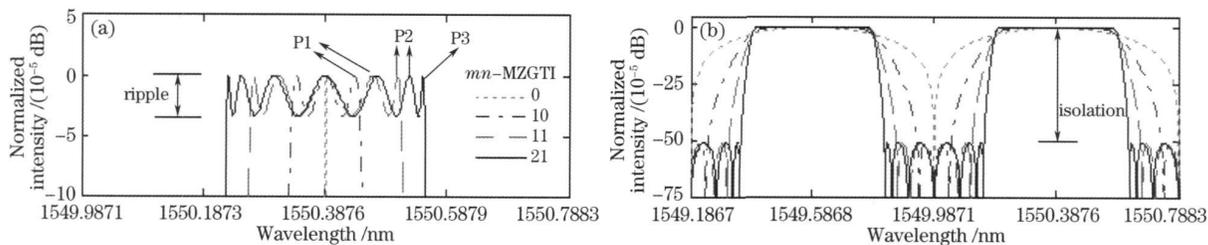


图 4 隔离度为 45 dB 时  $m\pi$  MZGTI 频谱。(a) 通带纹波细节, (b) 两周期

Fig. 4 Spectrum of  $m\pi$  MZGTI when isolation is 45 dB. (a) detailed passband, (b) two periods

是  $m\pi$  MZGTI 的最佳性能<sup>[16]</sup>。由于  $I_{cross}$  与  $I_{bar}$  的互补性, 因此最佳状态时, 阻带中心两侧也会分别出现  $m + n$  个峰, 如图 4 所示。峰的数目越多, 则通带纹波带宽越大。显然地, 对于普通 MZI ( $m = n = 0$ ), 纹波带宽为 0。 $m\pi$  MZGTI 的隔离度与纹波(Ripple)的关系由  $-10\lg(1 - 10^{-ISO/10})$  给出, 隔离度越大, 纹波越小。

将波纹与隔离度交换位置也成立, 说明纹波带宽与隔离度带宽相等。这里, 纹波带宽定义为通带内最大衰减为波纹的带宽; 隔离度带宽定义为阻带内最小衰减为隔离度的带宽。

通常, 希望交错复用器的纹波带宽尽量大, 隔离度尽量大(即纹波尽量小)。但实际上, 纹波带宽与隔离度是矛盾的, 纹波带宽越大, 则隔离度越小。所以在设计交错复用器的时候, 必须综合考虑纹波带宽和隔离度。因此, 研究了环形腔数目对谱性能的影响, 图 5 给出了 10, 11, 21-MZGTI 纹波带宽比例(纹波带宽与 3 dB 带宽的比值)与隔离度的关系。当隔离度增大时, 纹波带宽比例变小。然而, 图 5 结果表明随着环形腔的数目增多, 交错复用器的性能越好, 表现为在更高的隔离度条件下能获得更大的纹波带宽比。实际上, 当增加环形腔的数目, 通带中心两侧的峰将增加, 因此通带纹波带宽越大, 即梳状滤波器的谱性能越好, 如图 4 所示。峰或谷的数目正好为  $m\pi$  MZGTI 腔的数目, 比如 21-MZGTI 滤波器的频谱通带中心的两侧分别有 3 个峰或 3 个谷。当纹波带宽比达到 99% 时, 21, 11, 10 MZGTI 的隔离度分别为 21, 13.5 和 6.7 dB。表 1 给出了 3 种复用器在 3 组固定隔离度上的性能比较, 表明 21-MZGTI 的谱性能最佳, 11-MZGTI 次之, 而 10-MZGTI 的谱性能最差, 说明这种  $m\pi$  MZGTI 交错复用器的谱性能随着腔数的增加得以改善。

表 1 不同结构的带宽比

Table 1 Bandwidth ratio for  $m\pi$  MZGTI

Isolation / dB	Ripple / dB	Bandwidth ratio		
		10-MZGTI / %	11-MZGTI / %	21-MZGTI / %
20	0.04365	78.77	95.90	99.20
30	0.004345	58.84	87.06	96.05
40	0.0004343	41.91	75.50	90.26

通过优化选择合适的耦合器耦合比, 即选择合适的参数  $r_i$ , 从而可以得到谱性能优化的波长交错复用器。图 6 给出不同结构在性能最优时隔离度随  $r_1^a$  的变化图。从图 6 可以看出,  $r_1^a$  增大, 隔离度减小, 结合图 5 可见, 纹波带宽比增大。也就是说,  $r_1^a$  越大则可获得更大的纹波带宽比。因此, 从图 6 也反映出在相同隔离度下, 21-MZGTI 能获得更大的纹波带宽比, 与表 1 给出的结论相一致。图 7 给出不同结构在性能最优时其他的  $r_i$  参数随  $r_1^a$  的变化图, 结果显示  $r_1^b, r_2^a$  均随  $r_1^a$  的增大而增大。

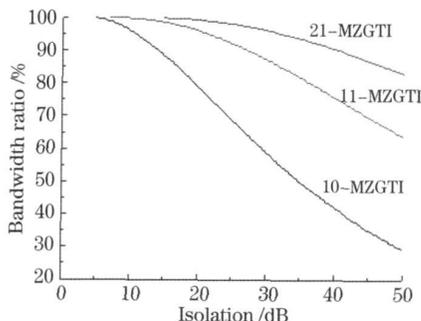


图 5 纹波带宽率随隔离度变化曲线

Fig. 5 Bandwidth ratio versus isolation

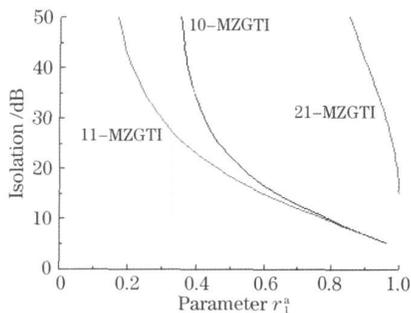


图 6 不同结构在性能最优时隔离度随  $r_1^a$  的变化图

Fig. 6 Isolation versus  $r_1^a$  with optimized performance

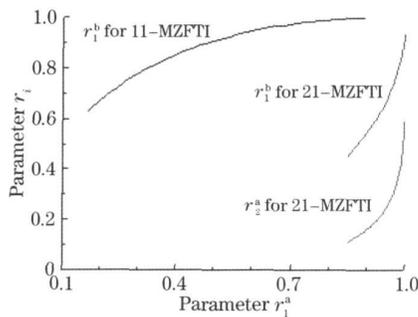


图 7 不同结构在性能最优时其他  $r_i$  参数随  $r_1^a$  的变化图

Fig. 7 Parameters  $r_i$  versus  $r_1^a$  with optimized performance

### 3.2.3 复合耦合器与单耦合器比较

当不使用复合型耦合器, 而使用单耦合器时, MZIL 退化成了环形腔<sup>[9, 10]</sup>。虽然环形腔辅助的 MZI 的频谱与 MZGTI 或 MGTI<sup>[13~16]</sup> 相似, 但是环形腔并非 GT 腔。因此, 将其用于 MZI 中, 除了要满足与 MZGTI 或 MGTI<sup>[13~16]</sup> 相同的相位匹配条件外, 还必须添加额外的相移器  $\pi/2$ <sup>[9]</sup> 或  $\pi$ <sup>[10]</sup> 才能让 MZI 获得近似矩形的频谱。通常采用长度固定的波导来替代相移器, 其有效光程为  $\lambda/4$  或  $\lambda/2$ ,  $\lambda$  为中心波长, C 波段取 1550 nm。但是这种相移器只对  $\lambda$  产生准确的相移量, 对于远离  $\lambda$  的波长, 相移量有所偏差, 这将导致频谱不均匀, 如图 8 所示。可以看出, 在很宽的波段范围内 MZGTI 频谱是均匀的, 阻带平坦, 如图 8(a) 所示; 而环形腔辅助的 MZI 的频谱不均匀, 阻带不平坦, 如图 8(b) 所示。从图 8(b) 可以看出, 离中心波长越远, 频谱越差。1550 nm 附近光谱隔离度约 50 dB, 而在 1540 nm 或 1560 nm 附近, 隔离度只有 41 dB。

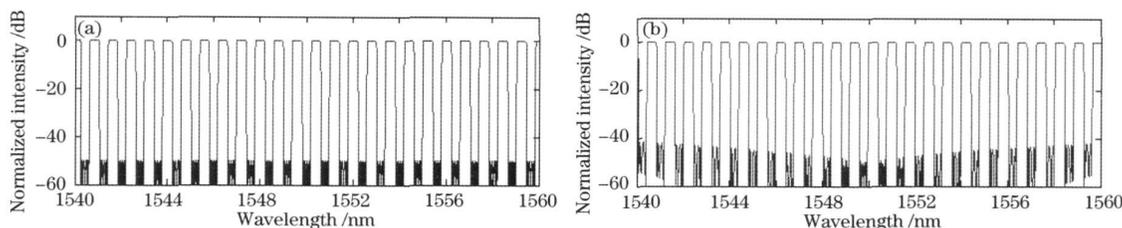


图 8 (a) 2F MZGTI 频谱, (b) 相同环数环形腔辅助 MZI 频谱图

Fig. 8 (a) Spectrum of 2F MZGTI, (b) periodic spectrum of the ring resonator assisted MZI

### 3.3 色散特性

由(3), (4) 式得到 MCT-GTE<sub>n</sub> 的相位为  $\Theta_n = 2\phi_n - \beta L_{Mzn}$ 。忽略色散无关项, 得到跟 MCT-GTE<sub>n</sub> 色散有关的相位  $\Phi_n = 2\phi_n$ 。结合群时延<sup>[16]</sup>, 得到具有递推特点的 MCT-GTE<sub>n</sub> 的群时延公式和色散公式分别为

$$GD_n = c_n(\tau + GD_{n-1}), \quad n \geq 1 \tag{6}$$

$$D_n = \nabla_h \left[ g_n \left( \frac{GD_n}{\tau c_n} \right)^2 + c_n \left( \frac{D_{n-1}}{\nabla_h} \right) \right], \quad n \geq 1 \tag{7}$$

式中  $\tau = L/c$ ,  $c$  为真空中光速,  $c_n = a_n/[1 + (a_n^2 - 1)\sin^2(\delta - \phi_{n-1})]$ ,  $\phi_0 = 0$ ,  $GD_0 = 0$ ,  $h = \pi L/\lambda^2$ ,  $g_n = a_n(a_n^2 - 1)\sin 2(\delta - \phi_{n-1})/[1 + (a_n^2 - 1)\sin^2(\delta - \phi_{n-1})]^2$ 。

$m\pi$  MZGTI 色散有关的相位是  $\Phi = \phi_m + \theta_n$ , 其总群延时、色散为两臂的平均值。分析(6), (7) 式发现, 群时延正比于  $L$ , 而色散正比于  $L^2$ 。群时延和色散均是周期性的, 因此色散斜率也是周期性的, 它们的周期与交错复用器的周期相同。进一步分析可得两通道的通带中心以及 3 dB 点处色散均为 0。

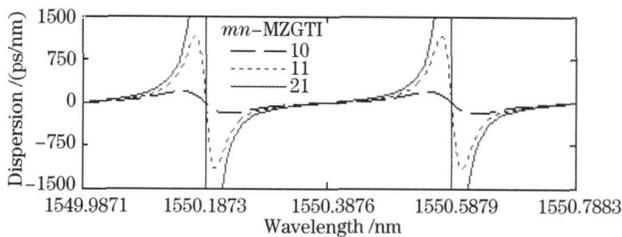


图 9  $m\pi$  MZGTI 色散谱

Fig. 9 Dispersion responses for  $m\pi$  MZGTI

图 9 给出  $m\pi$  MZGTI 隔离度为 45 dB 的色散。可以看出随着环形镜的数目增多, 色散增大。通带中心附近色散最平坦, 3 dB 附近的色散最差。因此, 虽然频谱特性随环形镜增多而改善, 但通带中心附近色散平坦性将随环形镜数目的增多而变差。

## 4 交错复用器的色散补偿

根据  $m\pi$  MZGTI 的色散特性, 即 MCT-GTE 的色散特性, 我们提出采用级联环形腔(MC-RR) 作为色散补偿器来补偿交错复用器的色散, MC-RR<sub>n</sub> 的结构如图 10 所示。

采用递归方法得到 MC-RR<sub>n</sub> 的透射系数为

$$t_{cn} = \exp(-i\beta l_{cn}) \frac{r_{cn} - \exp(-i2\delta_c)\exp(i2\phi_{c(n-1)})}{1 - r_{cn}\exp(-i2\delta_c)\exp(i2\phi_{c(n-1)})} = \exp(-i\beta l_{cn})\exp(i2\phi_{cn}), \tag{8}$$

$$\phi_{cn} = \arctan[f_n \cot(\delta_c - \phi_{c(n-1)})], \tag{9}$$

式中  $l_{cn}$  为耦合器  $n$  的耦合区长度, 下标  $c$  为补偿器,  $r_{cn} = \sqrt{K_{cn}}$ ,  $K_{cn}$  为耦合器  $n$  直通臂耦合比,  $f_n = (1 - r_{cn}) / (1 + r_{cn})$ ,  $\delta_c = 0.5kl_c$ ,  $L_c = n_{\text{eff}}(l_{c1} + l'_{1}) = \dots = n_{\text{eff}}(l_{c(n-1)} + l'_{n-1} + l_{cn})$ 。特别地  $\phi_0 = 0$ 。

### 4.1 MGRRn 群延时和色散

由(8)式得到 MGRRn 相位为  $\Theta_c = 2\phi_{cn} - \beta l_{cn}$ 。同理, 得到 MGRRn 与色散有关的相位为  $\Phi_c = 2\phi_{cn}$ 。于是得到具有递推特点的 MGRRn 的群时延公式和色散公式分别为

$$GD_{cn} = c_{cn}(\tau_c + GD_{c(n-1)}), \quad n \geq 1 \quad (10)$$

$$D_{cn} = \tau_{chc} \left[ g_{cn} \left( \frac{GD_{c(n-1)}}{\tau_{chc}} \right)^2 + 1 \right] h_c \left( \frac{D_{c(n-1)}}{\tau_{chc}} \right), \quad n \geq 1$$

式中  $\tau_c = \frac{L_c}{c}$ ,  $c_{cn} = \frac{f_n}{1 + (f_n^2 - 1) \cos^2[\delta_c - \phi_{c(n-1)}]}$ ,  $h_c = \frac{\pi L_c}{\lambda^2}$ ,  $g_{cn} = -\frac{f_n(f_n^2 - 1) \sin 2(\delta_c - \phi_{c(n-1)})}{[1 + (f_n^2 - 1) \cos^2(\delta_c - \phi_{c(n-1)})]^2}$ 。

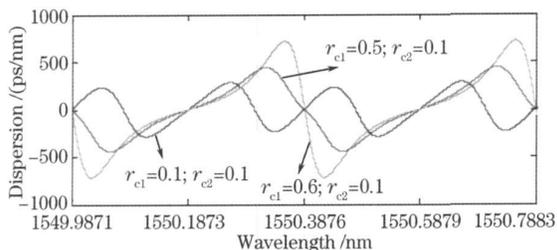


图 11 MGRR2 在不同参数条件下的色散图  
Fig. 11 Dispersion of MGRR2 under different parameters

可调带恰好落在  $m \times MZGTI$  的通带中心上。通过调节参数  $r_{ci}$  改变 MGRRn 的色散, 参数  $r_{ci}$  越大(即级联的环形腔越多), 则可调节性就越强, 色散补偿能力就越大。

### 4.2 MGRRn 色散补偿器

调节参数  $r_{ci}$ , 使得 MGRRn 在通带中心附近的色散斜率与交错复用器的相反, 当 MGRRn 与交错复用器的色散互为相反数时, 则补偿效果最好。实际上色散只能在个别点被补偿到 0。对于有限环数的色散补偿器 MGRRn, 类似于交错复用器频谱的优化结果, 即经过补偿后的总色散曲线应该是一种纹波曲线, 纹波图中出现的峰(或谷)的数目应和 MGRRn 的环的数目相同。

图 12 给出了纹波色散限定为  $\pm 1$  ps/nm 时 2FMZGTI 的补偿结果, 使用了 1~4 个环形腔。图 12(a) 中补偿后的曲线由对应色散补偿器(相同线型)的色散与 21-MZGTI 的色散相加得到。可以看出环数增多, 色散补偿效果增强。图 12(b) 看出, 纹波图的峰、谷数目与 MGRRn 的环数相等。随着峰、谷数目的增加, 色散

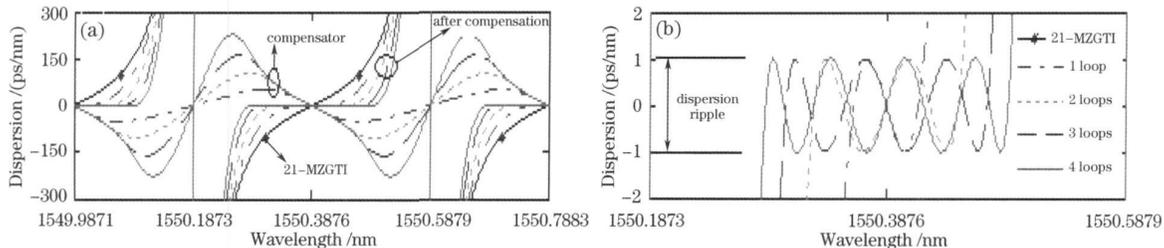


图 12 色散纹波为  $\pm 1$  ps/nm 时 2FMZGTI 的色散补偿结果。(a) 色散补偿器 MGRRn ( $n = 1 \sim 4$ ) 色散, (b) 准色散平坦区域  
Fig. 12 Dispersion compensated results of 2FMZGTI when dispersion ripple is set as  $\pm 1$  ps/nm. (a) dispersion of the compensators MGRRn ( $n = 1 \sim 4$ ), (b) details of the quasi flat dispersion

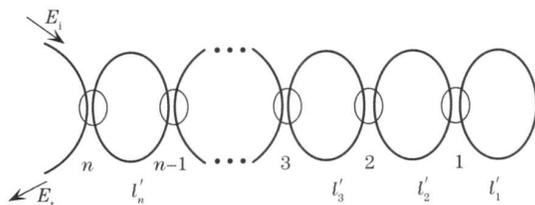


图 10 色散补偿器 MGRRn 结构示意图  
Fig. 10 Schematic diagram of the proposed chromatic compensator MGRRn

对比(6), (7)和(10), (11)式, 发现 MCT-GTE $n$  和 MGRRn 群时延和色散的数学形式一致, 只是  $c_{cn}$  和  $g_{cn}$  的表达式略有差别, 这归功于  $\pi/2$  的相移。MGRRn 具有周期性, 也存在一些特殊点。为了让色散补偿器和  $m \times MZGTI$  周期相匹配, 应使  $L_c = L$ 。通过分析可得, 3 dB点和通带中心均为 MGRRn 的零色散点。和 MCT-GTE $n$  一样, MGRRn 的色散与参数  $r_{ci}$  的选择密切相关, 其色散斜率是可调的。图 11 给出了 MGRR2 在不同参数条件下的色散图。注意到通带中心 1550.3876 nm 附近的斜率可以从正调到负, 这说明 MGRR 的色散

纹波带宽也在增加。

必须指出, 此处定义色散带宽为色散纹波所覆盖的带宽。色散补偿率为色散带宽占 3 dB 通带的比例。图 13 给出了 2F-MZGTI 色散补偿率随色散纹波的变化。结果表明, 允许的色散纹波越大, 获得的色散补偿率就越大。同样, 随着环的增多, 色散补偿能力在提高。

## 5 讨 论

从对  $m$  环 MZGTI 及其色散补偿器 MG-RR $n$  的模拟研究, 可以看出该交错复用器具有非常好的性能。但是为了让该交错复用器有良好的性能, 相位匹配条件至关重要。

对于  $m$  环 MZGTI, 要求每个环的长度均相等, MZGTI 的两臂长度差必须为环长的一半, 并且 MZIL 中 MZI 的两臂长必须相等。这种对长度精确控制的目的是让相应的相位延迟精确匹配。环长相等是为了让每个环的相位延迟相等, 而 MZGTI 的两臂长度差为环长的一半则是为了使 MZGTI 两臂的相位延迟差为单个环的相位延迟的一半。实际上, 长度精确匹配是很困难的。如果实际长度偏差为  $\delta_L$ , 则实际长度失配量为  $\delta_L = n_{eff} \delta_L$ , 于是相位失配量  $\delta\phi = 2\pi\delta_L/\lambda$ 。MZGTI 的性能对相位失配十分敏感。对于工作在 C 波段的 MZGTI ( $\lambda = 1550$  nm), 如果要求相位失配量很小(不大于 0.087 rad 或  $5^\circ$ ), 那么有效长度失配量就要限制在 21.5 nm 以内。要使得有效长度误差限制在纳米级, 本质上说是由于器件工作在 C 波段(即工作波长很短)造成的。如果  $\lambda = 10 \mu\text{m}$ , 则  $\delta_L$  可以稍宽些, 即  $\delta_L \leq 138.5$  nm。文献[17]指出长度误差必须控制在 21 nm 以内。通常, 长度误差将劣化频谱, 破坏频谱的对称性、通带的平坦性以及减小隔离度<sup>[17]</sup>。长度控制问题是实现该滤波器的最关键的问题。从以上分析可得, 起作用的并非实际物理长度, 而是考虑了折射率的有效光程。虽然条件严格, 但是基于平面波导技术(PLC), 有效光程控制是可以通过温控技术来实现的<sup>[17]</sup>。这种温控方法实际上调节的是折射率, 进而调节有效光程。除此之外, MG-RR $n$  的环长要求与  $m$  环 MZGTI 的环长相等。长度误差也将导致色散补偿效果变差<sup>[18]</sup>。这些长度控制的精确与否将严重影响着交错复用器整体的性能。必须指出, 即使是环形谐振腔辅助的交错复用器也有同样的长度精确性要求<sup>[17]</sup>。为了克服频谱不均匀性, MZGTI 相比于环形谐振腔辅助的 MZI, 使用了复合型耦合器, 因此在长度上还要求 MZIL 中的两臂长必须相等。然而, 两种方案对器件长度精度控制要求仅此点不同, 而对长度精度控制的技术和要求是相同的。

理论上, 结构越复杂, 则滤波器的性能就越好。例如, 在 2F, 1F, 10F MZGTI 中, 2F MZGTI 频谱性能是最好的, 而 10F MZGTI 的性能是最差的。同样, MG-RR4, MG-RR3, MG-RR2 和 MG-RR1 中 MG-RR4 的色散补偿能力最强而 MG-RR1 的最弱。而实际上, 由分析可知, 结构越复杂, 则所需要精确匹配的长度就越多, 工艺实现就越困难。若长度控制不当, 复杂的结构反而得不到预期的优良特性。因此结构简单, 例如 10F MZGTI 或 1F MZGTI, 以及色散补偿器 MG-RR1 更具有实际应用意义。

## 6 结 论

提出并从理论分析了基于复合型耦合器构成的新型透射式马赫-曾德尔-GT 型交错复用器。模拟结果表明该交错复用器具有相当好的通带平坦性, 大的通带带宽、截止度和阻带带宽。在合理的参数下, 该交错复用器可以获得近似矩形的方波频谱, 并且在整个工作波段范围具有很好的频谱均匀性。另外, 分析了腔数目对器件的影响, 研究表明通过增加腔数可以获得更大的纹波带宽比。对于该器件的色散问题, 提出了色散补偿方案, 即采用级联环形腔作为色散补偿器。通过模拟, 发现该色散补偿器的补偿能力随着级联环数的增加而加强。必须指出, MZGTI 与环形谐振腔辅助的 MZI 在频谱性能上是相似的, 但后者需要理想的相移器, 若相移器不理想会造成频谱不均匀的问题。MZGTI 不需要相移器, 解决了频谱不均匀的问题。由于使用了复合型耦合器, 因此要求复合型耦合器中两个耦合器构成的 MZI 的两臂长要相等, 在长度精确性上也增加了这点要求。虽然在实际器件和系统中要求非常严格的制作和封装工艺, 以满足各参数的需要, 但相信这种基于光耦合器制作的波长交错复用器适合集成在平面波导光子器件中, 可能在密集波分复用全光网络中得以应用。

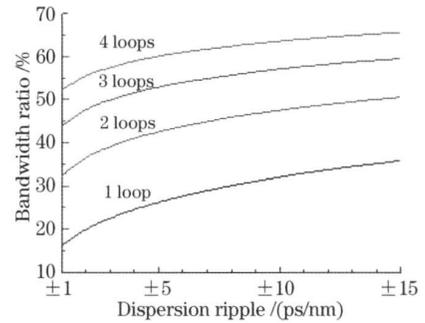


图 13 色散补偿率随色散纹波的变化

Fig. 13 Bandwidth ratio versus dispersion ripple

## 参 考 文 献

- 1 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1424~ 1428  
张 娟, 刘立人, 周 煜 等. 一种新型光交错复用器的设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1424~ 1428
- 2 Haixing Chen, Peifu Gu, Yueguang Zhang *et al.*. Analysis on the match of the reflectivity of the multi cavity thin film interleaver[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **236**: 335~ 341
- 3 Ding wei Huang, Tsung hsuang Chiu, Yindieh Lai. Arrayed waveguide grating DWDM interleaver[C]. OFC, 2001, Page WDD80, Anaheim, California
- 4 J. J. Pan, Y. Shi. Dense WDM multiplexer and demultiplexer with 0.4 nm channel spacing[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(1): 74~ 75
- 5 F. Bilodeau, D. C. Johnson, S. Theriault *et al.*. An all fiber dense wavelength division multiplexer/demultiplexer using photoimprinted Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4): 388~ 390
- 6 M. Kuznetsov. Cascaded coupler Mach Zehnder channel dropping filters for wavelength division multiplexed optical systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(2): 226~ 230
- 7 Manabu Oguma, Tsutomu Kitoh, Yasuyuki Inoue *et al.*. Compact and low-loss interleave filter employing lattice form structure and silica based waveguide[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(3): 895~ 902
- 8 Lu Huaiwei, Zhang Yu'e, Luo Guanwei. Flat top interleaver of cascaded MZ interferometer with  $2 \times 2$  and  $3 \times 3$  fiber couplers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(7): 1021~ 1025  
鲁怀伟, 张玉娥, 罗冠伟. 基于  $2 \times 2$  和  $3 \times 3$  耦合器的级联马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(7): 1021~ 1025
- 9 Zhou Guang, Zhao Chunliu, Huang Yonglin *et al.*. Improvement of the capability of nonsymmetrical Mach Zehnder interferometric interleaver using fiber loop[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(6): 702~ 705  
周 广, 赵春柳, 黄勇林等. 光纤环对非平衡马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器性能的改善[J]. *光学学报*, 2002, **22**(6): 702~ 705
- 10 Dong Xiaowei, Pei Li, Xu Ou *et al.*. Study of interleaver based on ring resonator assisted Mach Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 638~ 642  
董小伟, 裴 丽, 许 鸥 等. 环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 638~ 642
- 11 Li Weibin, Sun Juanqiang. Analysis of characteristics of the interleaver based on a double-coupler resonator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1191~ 1194  
李卫彬, 孙军强. 一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1191~ 1194
- 12 Wu Shudong, Chen Lian, Fan Jianqiang *et al.*. Asymmetric optical interleavers filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 31~ 35  
伍树东, 陈 莲, 范建强 等. 非对称型光学交错梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 31~ 35
- 13 Xuewen Shu, Kate Sugden, Ian Bennion. All fiber Michelson Gires Tournois interferometer as multi passband filter [C]. IEEE LTIMC, 2004, New York, USA, 144~ 147
- 14 G. Xu, C. Li, Y. Qin. 25 GHz interleavers made by Michelson interferometer with a Gires Tournois etalon[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2006, **38**: 23~ 27
- 15 C. Hsieh, R. Wang, Z. J. Wen *et al.*. Flat top interleavers using two Gires Tournois etalons as phase dispersive mirrors in a Michelson interferometer[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(2): 242~ 244
- 16 L. Wei, J. W. Y. Lit. Design optimization of flattop interleaver and its dispersion compensation[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 6439~ 6457
- 17 Kazuhiro Oda, Norio Takato, Hiromu Toba *et al.*. A wide band guided wave periodic multi/demultiplexer with a ring resonator for optical FDM transmission systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1988, **6**(6): 1016~ 1023
- 18 Y. Zhang, W. Huang, X. Wang *et al.*. Design of flat top interleaver and tunable dispersion compensator using cascaded Sagnac loop mirrors and ring resonators[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(32): 6213~ 6222