

基于平板光波导任意带宽比的新型非对称交错滤波器

李金星 陈开鑫 郑燕琳

(电子科技大学通信与信息工程学院, 四川 成都 611731)

摘要 为了提高目前光纤通信系统的 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s 混合系统的传输效率,提出了一种新型的器件结构以实现基于平面光波导的不等带宽交错滤波器。该结构结合光学微环与马赫-曾德尔干涉仪结构,通过控制相关关键参数,实现了任意带宽比的光学交错滤波器,给出了带宽比为 1:2 的非对称交错滤波器设计实例。仿真结果表明,设计的交错滤波器在信道间隔为 100 GHz 的系统中给传输速率为 10 Gbit/s 和 40 Gbit/s 的两个信道分别分配了 32.85 GHz 和 67.15 GHz 的带宽,从而解决了传输速率为 40 Gbit/s 的信道带宽不足的问题。在此基础上通过分析器件中各双模干涉仪的光功率分配比对输出谱带宽比的影响,给出了在相同信道间隔条件下不同带宽比的非对称交错滤波器的设计实例。

关键词 光电子学;密集波分复用;光学交错滤波器;非对称输出谱;光学微环

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1105005

A Novel Asymmetric Interleaver with Arbitrary Bandwidth Ratio Based on Planar Optical Waveguide

Li Jinxing Chen Kaixin Zheng Yanlin

(School of Communication and Information Engineering, University of Electronics Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract In order to improve transmission efficiency of optical-fiber communication system for hybrid 10 Gbit/s and 40 Gbit/s system, a novel device configuration for realizing an asymmetrical optical interleaver based on planar optical waveguide is proposed, which is a clever combination of optical micro-ring and Mach-Zehnder interferometers. Theoretical results show that optical interleaver with arbitrary bandwidth ratio and with the proposed structure can be obtained by controlling some key parameters. As an example, an asymmetrical interleaver with 1:2 interleaving ratio is presented, which can apportion 32.85 GHz and 67.15 GHz passband bandwidth for the 10 Gbit/s and 40 Gbit/s channels over 100 GHz channel spacing respectively. Therefore, the bandwidth efficiency requirement of the 40 Gbit/s channel is relieved. Furthermore, by analyzing the effect of optical power splitting ratio of the three two-mode interferometers on the output spectrum bandwidth ratio, the design instances of asymmetrical interleaver with different bandwidth ratios at the same channel space are given.

Key words optoelectronics; dense wavelength-division multiplexing; optical interleaver; asymmetric output spectrum; optical micro-ring

OCIS codes 130.7408; 230.3120; 260.5740; 130.5460; 160.6840

1 引言

密集波分复用(DWDM)光纤通信系统是解决当前通信容量不断增长的一种经济有效的技术。然

而,随着信道间隔不断地减小,系统的解复用滤波器面临着相当高的性能要求,十分不利于控制系统成本和提高系统性能。降低这一要求的有效方法是采

收稿日期: 2012-06-13; 收到修改稿日期: 2012-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(61177054)资助课题。

作者简介: 李金星(1987—),男,硕士研究生,主要从事非对称交错滤波器理论方面的研究。

E-mail: jxl8786@foxmail.com

导师简介: 陈开鑫(1972—),男,博士,副教授,主要从事集成光学方面的研究。

E-mail: chenkaix@uestc.edu.cn(通信联系人)

用光学交错滤波器,因为它能够把一组波长间隔密集的光信号分成波长间隔加倍的两组光信号^[1]。另外,提高单信道的数据传输速率也是一种提高通信容量的有效方法,光载波 40 Gbit/s(OC-768)的数据传输速率已经投入使用,与此同时传统的10 Gbit/s传输速率依然有着相当的运用空间,因此10 Gbit/s和40 Gbit/s的混合传输是一种理想的传输方案。对于混合传输系统,由于数据传输速率和调制方式的不同,使得两个信道对带宽有不同的需求,而窄的带宽可能导致高速传输系统的码间串扰从而降低系统传输性能^[2]。因此,在混合传输系统中传统的具有固定带宽的对称型交错滤波器不能使带宽得到充分的利用。而具有非对称输出谱的非对称型交错滤波器则可以通过分配不同的带宽来满足不同信道对带宽的不同需求,从而解决这一问题。

目前,研究的交错滤波器大多属于对称型^[3~6],而非对称交错滤波器的研究相对较少。实现非对称交错滤波器的方法主要包括迈克尔孙 Gires-Tournois 干涉仪(MGTI)型^[7~9]、马赫-曾德尔(MZ)级联型^[10,11]、环形辅助马赫-曾德尔干涉仪型^[12]、双折射光纤环型镜型^[13]和双折射晶体型^[14]等。本文提出了一种具有任意带宽比输出的,基于平面光波导的新型结构非对称交错滤波器。它具有结构紧凑、性能稳定以及易于与其他集成光波导器件集成等优点,更为重要的是它的输出谱具有平坦的通带,高的

信道隔离度,且工作波长能够覆盖整个C波段。对于目前的10 Gbit/s-40 Gbit/s混合系统,可以对信道间隔为100 GHz的系统进行1:2的带宽分配,使得两个端口的带宽分别达到32.85 GHz和67.15 GHz,从而解决了40 Gbit/s的信号远距离传输带宽不足的问题。另外,随着将来网络的进一步升级以及调制格式的变化,在混合传输系统中需要不同的带宽来满足系统的需求。因此,任意带宽比的交错滤波器对网络的升级具有很大的优势。本文主要通过数值仿真详细讨论带宽比为1:2的非对称交错滤波器。最后给出带宽比为1:3和1:4的非对称交错滤波器设计实例。

2 结构设计与理论分析

2.1 器件的结构设计

基于平板光波导的新型非对称交错滤波器结构如图1(a)所示。其结构主要包括:1)光波导微环;2)2个波导臂,其中一个直通,另一个弯曲的;3)3个双模干涉仪(TMI)。这里,为了降低微环的损耗,器件需要使用高折射率差的材料来制作,对于这种情形,使用TMI取代定向耦合器作为分光部件在器件的设计、工艺制作及工作性能等方面更具优点^[15]。图1(b)和(c)给出了设计时所选择的光波导材料及单模波导与双模波导的设计尺寸。因为SiON在通信窗口具有较低的损耗且折射率可通过

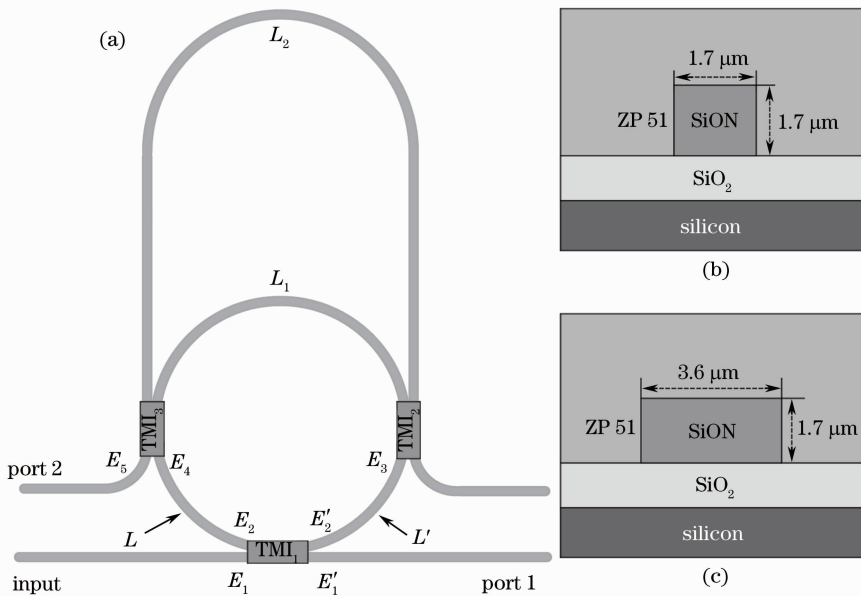


图1 (a)基于平板光波导任意带宽比的非对称交错滤波器结构示意图;(b)波导单模区的横截面视图;
(c)波导双模区的横截面视图

Fig. 1 (a) Structure diagram of an arbitrary bandwidth ratio asymmetric interleaver based on planar lightwave circuit;
(b) cross-sectional view at single-mode region; (c) cross-sectional view at two-mode region

薄膜制作时控制氮的含量来调整,因此十分适合于制作各种光波导器件,已经实现了以 SiON 为波导芯、以聚合物 ZP51 为包层的微环滤波器^[16]。聚合物材料 ZP51 具有较低的损耗和较大的热光系数,这有利于利用其热光效应对器件的工艺误差进行微调,其中主要是调整 TMI 的功率分束比。

光信号从 input 端口耦合进入器件,假设其电场分量的振幅为 E_1 。当光信号传输通过 TMI₁ 后,一部分振幅为 E'_1 的光信号从端口 port1 输出,另一部分振幅为 E'_2 的光信号进入微环。进入微环的光信号经过长为 L' 的波导后到达 TMI₂ 并经其作用后一部分被耦合进入长度为 L_2 的波导中,剩下的光信号继续在微环中传输。之后 TMI₃ 处两束光相遇并发生干涉,其结果是一部分振幅为 E_5 的光信号从端口 port2 输出,另一部分振幅为 E_4 的光信号传输经过长为 L 的波导臂后反馈回输入端并与输入光信号发生干涉。其他参数如图 1(a) 中标注所示。

2.2 理论分析

为了简化分析,忽略波导的材料损耗以及弯曲损耗,并将器件传输特性分为 4 个部分进行分析,每一部分的传输特性如下。

第一部分,TMI₁ 处的输入输出关系可表示为

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & -jk \\ -jk & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $t = \cos(\Delta\beta_1 Z_1/2)$, $k = \sin(\Delta\beta_1 Z_1/2)$, $\Delta\beta_1$ 为 TMI₁ 的基模与一阶模的传播常数之差, Z_1 则为

TMI₁ 双模区的有效长度。

第二部分,TMI₁ 到 TMI₂ 的传输方程可表示为

$$E_3 = E'_2 \exp(-j\varphi'), \quad (2)$$

式中相位 $\varphi' = \beta L'$, 其中 $\beta = 2\pi N_{\text{eff}}/\lambda$, N_{eff} 为单模波导的有效折射率, β 为单模波导的传播常数, L' 为从 TMI₁ 到 TMI₂ 的弧长。

第三部分,光信号传输通过 TMI₂ 及 TMI₃ 的传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_3 & -js_3 \\ -js_3 & c_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi_1) & 0 \\ 0 & \exp(-j\varphi_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 & -js_2 \\ -js_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中相位 φ_1, φ_2 分别等于 $\beta L_1, \beta L_2$, $c_i = \cos(\Delta\beta_i Z_i/2)$, $s_i = \sin(\Delta\beta_i Z_i/2)$, ($i = 2, 3$)。其中 $\Delta\beta_2$ 和 $\Delta\beta_3$ 分别表示 TMI₂ 和 TMI₃ 的基模与一阶模的传播常数之差, Z_2 和 Z_3 分别表示 TMI₂ 和 TMI₃ 双模区的有效长度。

第四部分,TMI₃ 到输入端 TMI₁ 的传输方程可表示为

$$E_2 = E_4 \exp(-j\varphi), \quad (4)$$

式中相位 $\varphi = \beta L$, 其中 L 为从 TMI₃ 到 TMI₁ 的弧长。

根据四部分的传输特性,利用(1)~(4)式可推导出该器件的两个输出端口的振幅的归一化表达式为

$$\frac{E'_1}{E_1} = \frac{\{c_2 c_3 \exp[-j(\varphi_1 + \varphi')] - s_2 s_3 \exp[-j(\varphi_2 + \varphi')]\} \exp(-j\varphi) - t}{t \{c_2 c_3 \exp[-j(\varphi_1 + \varphi')] - s_2 s_3 \exp[-j(\varphi_2 + \varphi')]\} \exp(-j\varphi) - 1}, \quad (5)$$

$$\frac{E_5}{E_1} = \frac{k \{c_2 s_3 \exp[-j(\varphi_1 + \varphi')] + s_2 c_3 \exp[-j(\varphi_2 + \varphi')]\}}{t \{c_2 c_3 \exp[-j(\varphi_1 + \varphi')] - s_2 s_3 \exp[-j(\varphi_2 + \varphi')]\} \exp(-j\varphi) - 1}. \quad (6)$$

对应的归一化输出功率为

$$P_1 = \left| \frac{E'_1}{E_1} \right|^2, \quad (7)$$

$$P_2 = \left| \frac{E_5}{E_1} \right|^2. \quad (8)$$

根据两个端口的归一化输出功率 P_1, P_2 的表达式可以看出 P_1, P_2 是关于 L, L', L_1, L_2 以及 3 个 TMI 功率分配比的函数。于是,通过选择合适的参数便可以得到任意带宽比的输出谱。考虑到波导材料的双折射,对于 TE 模式与 TM 模式,以上参数的选取略有差别,而 TE 模式和 TM 模式的传输谱的形状是相似的,因此以下只对 TE 模式的光信号的传输特性进行分析。

3 仿真结果与讨论

仿真分析表明,当满足 ΔL ($\Delta L = L_2 - L_1$) 是 L 的 n 倍 (n 为不小于 2 的整数) 并且 ΔL 与环的周长相等时,可通过调节 3 个 TMI 的功率分配比得到不同带宽比的输出谱,并且交错滤波器的自由光谱范围 (FSR) 满足:

$$\Delta f_{\text{FSR}} = \frac{c}{N_{\text{eff}} \Delta L}, \quad (9)$$

式中 c 为光在真空中的速率。对于 TE 模式的光信号,选择波导材料的包层及芯层的折射率如表 1 所示,从而设计单模波导和双模波导的尺寸如图 1(b)

和(c)所示,对应的 $N_{\text{eff}} = 1.5462$ 。选择 $\Delta L = 1.94 \text{ mm}$,由于微环的周长与 ΔL 相等,则可以求得微环的半径约为 $309 \mu\text{m}$ 。根据(9)式可得器件的自由光谱范围约为 100 GHz 。另外,为使得器件易于制作且损耗较小,选择 $n=4$,这样可以得到器件各段长度的分配为 $L=L'=\frac{\Delta L}{4}, L_1=\frac{\Delta L}{2}$ 。

表 1 波导材料的折射率(TE 模式)

Table 1 Refractive indexes of waveguide materials (TE mode)

Layers	Materials	Refractive index
Cladding	ZP 51	1.5100
Core	SiON	1.5969
Substrate	SiO ₂	1.4440

3.1 交错滤波器的设计实例

根据(7)式和(8)式,当器件各段长度满足上述关系时,若选择 3 个 TMI 的有效长度分别为 $Z_1 =$

$18.6 \mu\text{m}, Z_2=Z_3=9.4 \mu\text{m}$,对应的功率分配比分别为 $k=0.78, c_2=c_3=0.90$,可以得到通带带宽比为 1:2 的非对称输出谱,如图 2(a)所示。

图 2(a)中 port1 端口的 3 dB 带宽为 67.15 GHz , port2 端口的 3 dB 带宽为 32.85 GHz ,并且两个端口的信道隔离度都大于 45 dB 。因此可以将 3 dB 带宽大于 30 GHz 的一路用于传输速率为 10 Gbit/s 的信号,而 3 dB 带宽大于 60 GHz 的一路用于传输速率为 40 Gbit/s 的信号,这样就解决了速率为 40 Gbit/s 信号带宽不足的问题,从而提高了信道带宽的利用率。

另外,基于以上的设计参数,若将 3 个 TMI 双模区的有效长度分别设计为 $Z_1 = 26.0 \mu\text{m}, Z_2 = Z_3 = 13.0 \mu\text{m}$,此时 3 个 TMI 的功率分配比分别为 $k=0.95, c_2=c_3=0.81$ 。在此参数下可得到对称的输出谱如图 2(b)所示。

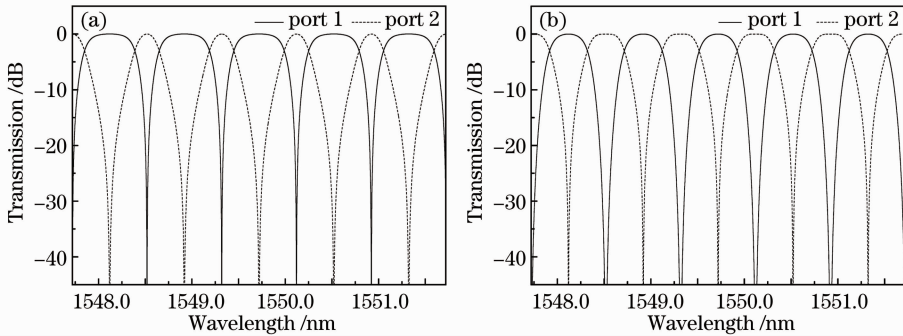


图 2 (a)带宽比为 1:2 的非对称输出谱;(b)带宽比为 1:1 的对称输出谱

Fig. 2 (a) Asymmetrical output spectra with bandwidth ratio 1:2; (b) symmetrical output spectra with bandwidth ratio 1:1

图 2(b)中两个端口的 3 dB 带宽约为 50 GHz , 1 dB 带宽约为 36 GHz ,而自由光谱范围为 100 GHz 单极马赫-曾德尔干涉仪结构的对称型交错滤波器的 1 dB 带宽约为 30 GHz 。由此可以看出本文设计的结构比单极马赫-曾德尔干涉仪结构的交错滤波器具有更好的通带平坦度,并且从图中可以看出两个端口输出谱的信道隔离度在 45 dB 以上。

3.2 参数分析

由仿真结果可知,3 个 TMI 的功率分配比对输出谱的影响很大,所以有必要对其影响进行详细的讨论。以输出谱带宽比为 1:2 的设计参数为例,在固定其中两个 TMI 的功率分配比,改变其中一个 TMI 的功率分配比的情况下讨论输出谱的变化趋势。图 3 为不同参数下输出谱的变化趋势,表 2 为图 3 中不同参数下两个端口输出谱的 3 dB 带宽,其中 Δf 代表 3 dB 带宽。

图 3(a)和(b)是在保持 $c_2=c_3=0.90$ 不变,改变 k 的大小时,输出谱的变化趋势。从图 3(a)和(b)以及表 2 中只有 k 变化时 Δf 的变化情况可以看出,宽带宽端口的 Δf 随 k 的变大而变小;而窄带宽端口的 Δf 随 k 的变大而变大。并且宽带宽端口的信道隔离度下降到 25 dB 左右,而窄带宽端口的信道隔离度变化不明显。

图 3(c)和(d)表示在保持 $k=0.78, c_2=0.90$ 不变,改变 c_3 的大小时,输出谱的变化趋势;图 3(e)和(f)则为保持 $k=0.78, c_3=0.90$ 不变,改变 c_2 的大小时,输出谱的变化趋势。从表 2 可以看出随着 c_2 和 c_3 的增大,宽带宽端口的 Δf 呈现变大的趋势,而窄带宽端口的 Δf 则变小。从图中可以看出两个端口的信道隔离度都呈下降的趋势,且宽带宽端口的信道隔离度的下降幅度比窄带宽端口的信道隔离度的下降幅度更加明显。

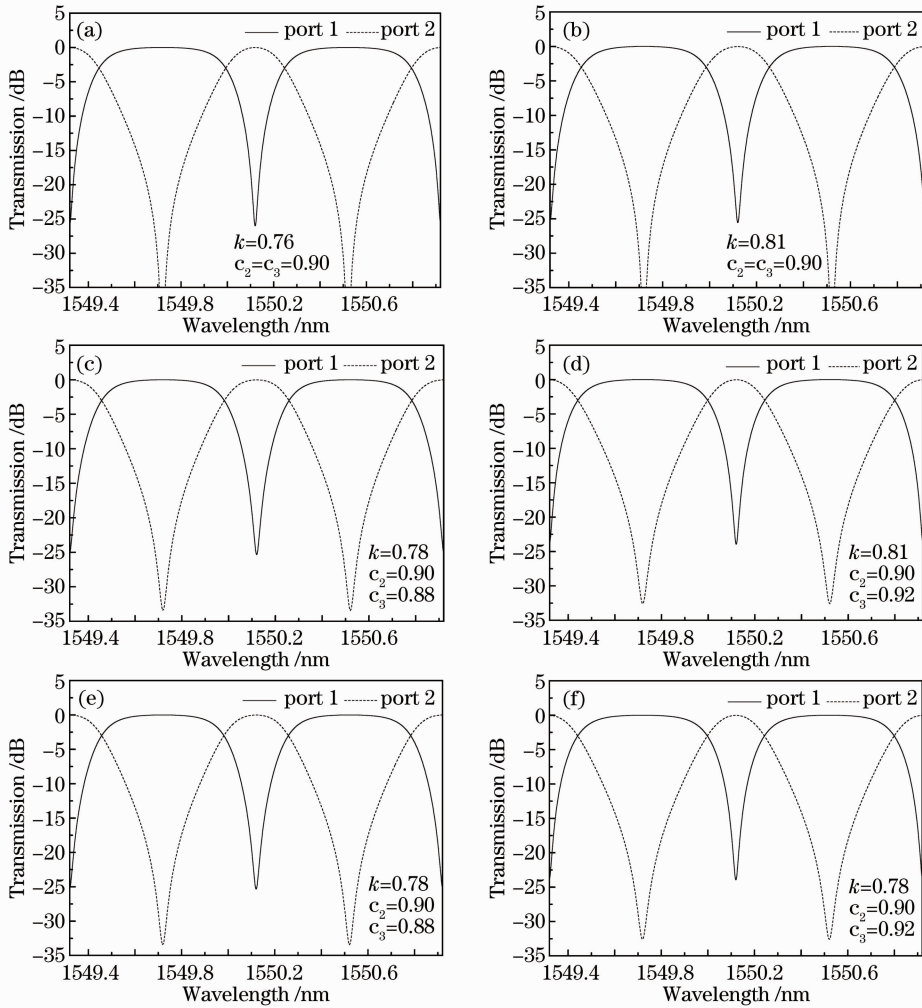


图 3 不同参数下的输出谱

Fig. 3 Output spectra for different parameters

表 2 参数变化对两个端口带宽的影响

Table 2 Impact of parameters variation on the two-port bandwidth

Parameters			Wide port Δf /GHz	Narrow port Δf /GHz
$c_2=0.90$	$c_3=0.90$	$k=0.76$	68.14	31.75
$c_2=0.90$	$c_3=0.90$	$k=0.81$	66.34	33.65
$k=0.78$	$c_2=0.90$	$c_3=0.88$	65.26	34.61
$k=0.78$	$c_2=0.90$	$c_3=0.92$	68.85	31.35
$k=0.78$	$c_3=0.90$	$c_2=0.88$	65.18	34.38
$k=0.78$	$c_3=0.90$	$c_2=0.92$	68.24	31.10

比较图 2 和图 3 可知,当取 $c_2=c_3$ 时,通过选择合适的 k 值,可以得到信道隔离度较高的输出谱。而且两个端口输出谱的通带带宽比只与 3 个 TMI 的功率分配比有关,因此通过调整 k, c_2 和 c_3 的大小可以得到不同通带带宽比的输出谱。器件的制作过程中不可避免会出现误差,经分析主要由 3 个 TMI

功率分配比以及臂长差引起,使得输出谱的信道隔离度、带宽比及中心波长的对准不能达到设计的要求,为此可通过选择具有较大热光系数的材料,并通过热光效应来对 3 个 TMI 的功率分配比和臂长差引起的误差进行微调,使其达到较好的性能。

3.3 不同参数下任意带宽比的设计实例

通过分析,发现随着 k 的减小, c_2 和 c_3 的变大,宽带宽端口与窄带宽端口的带宽比会逐渐变大。根据以上结论,通过调整 3 个双模干涉仪功率分配比的大小,得到两个端口通带带宽比为 1:3 以及 1:4 的输出谱如图 4 所示。

表 3 为不同带宽比的输出谱的设计参数。从图 4 可以看出这两种设计实例都具有高的信道隔离度。基于以上的设计思想,还可以设计出其他不同带宽比的非对称交错滤波器。

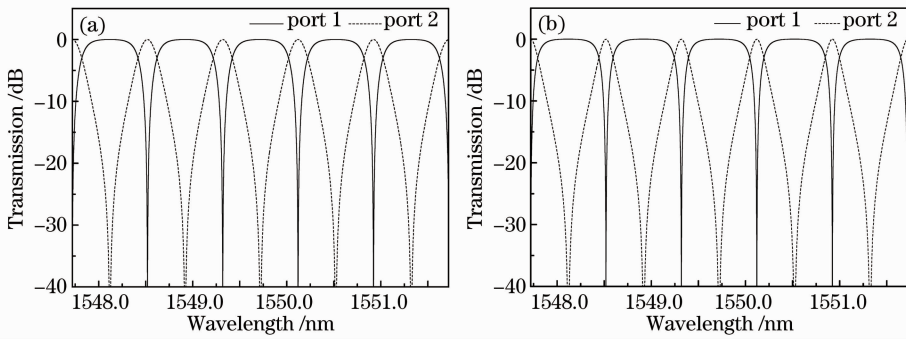


图 4 (a)带宽比为 1:3 的非对称输出谱;(b)带宽比为 1:4 的非对称输出谱

Fig. 4 (a) Asymmetrical output spectra with bandwidth ratio 1:3; (b) asymmetrical output spectra with bandwidth ratio 1:4

表 3 不同带宽比的参数

Table 3 Parameters for different bandwidth ratios

Bandwidth ratio	$Z_1/\mu\text{m}$	$Z_2/\mu\text{m}$	$Z_3/\mu\text{m}$
1:3	24.3	16.2	16.2
1:4	25.4	18.2	18.2

4 结 论

通过光学微环与马赫-曾德尔干涉仪结构的巧妙结合,提出了一种平面光波导非对称交错滤波器的新型结构。该结构具有结构紧凑、性能稳定,并且易于与其他集成光波导器件集成的优点。通过调整 3 个 TMI 的功率分配比,该结构可以实现任意带宽比的输出谱,并且每一种设计实例都具有高的信道隔离度。对于带宽比为 1:2 的设计实例,能够满足目前 10 Gbit/s 与 40 Gbit/s 混合系统对带宽的需求,从而有效地提高了系统的带宽利用率。

参 考 文 献

- 1 B. Shine, J. Bautista. Interleavers make high-channel-count system economical[J]. *Lightwave*, 2000, **17**(8): 140~144
- 2 Peter J. Winzer, Renè-Jean Essiambre. Advanced modeling formats for high-capacity optical transport networks[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(12): 4711~4728
- 3 Juan Zhang, Liren Liu, Yu Zhou. Novel and simple approach for designing lattice for interleaver filter[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(8): 2217~2224
- 4 Li Weibin, Sun Junqiang. 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
- 5 W. Y. Chan, K. X. Chen, H. P. Chan *et al.*. A flattop PIC polymer waveguide interleaver base on folded two-stage-cascaded Y-junction Mach-Zehnder interferometers[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(5): 883~886
- 6 Meng Yichao, Huang Zhaoming, Wang Lutang. Transmission characteristics of interleaver based on Mach-Zehnder interferometer with optical all pass filter inserted[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **25**(5): 575~580
孟义朝, 黄肇明, 王陆唐. 马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 575~580

- 7 Chihao Cheng. Asymmetrical interleaver structure based on the modified Michelson interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(11): 115003
- 8 Zhang Juan, Yang Xiaowei, Yu Shuai. Design of asymmetrical optical interleavers with arbitrary duty cycles based on Michelson Gires-Tournois interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 155~161
张娟, 杨小伟, 于帅. 任意占空比不等带宽迈克尔逊 Gires-Tournois 干涉型交错复用器的设计方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 155~161
- 9 Shao Yonghong, Miao Tongqun, Jiang Yaoliang *et al.*. A novel interleaver with different output spectrum bandwidths[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 948~950
邵永红, 缪同群, 蒋耀亮等. 一种不等带宽光学梳状滤波器[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8): 948~950
- 10 Lu Huaiwei, Zhang Baoge, Wu Kaijun *et al.*. Design of all-fiber interleaver with unequal passband based on cascaded Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2406~2411
鲁怀伟, 章宝歌, 邬开俊等. 级联马赫-曾德尔干涉仪型不等带宽交错滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2406~2411
- 11 Lu Huaiwei, Wei Yun, Wu Kaijun *et al.*. Design of all-fiber asymmetric interleaver with 2×2 and 3×3 fiber couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1106002
鲁怀伟, 魏赞, 邬开俊等. 基于 3×3 和 2×2 光纤耦合器的全光纤不等带宽梳状滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1106002
- 12 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
- 13 Zhang Ting, Chen Kai, Zhao Shuai *et al.*. A novel unequal passband interleaver employing high birefringence fiber Sagnac loop mirror[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(4): 436~440
张婷, 陈凯, 赵帅等. 双折射光纤环镜不等带宽交错复用器的研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4): 436~440
- 14 Yang Xiaowei, Zhang Juan. Application of finite impulse response theory in the design of optical interleaver[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 224~228
杨小伟, 张娟. 有限脉冲响应理论在交错滤波器设计中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 224~228
- 15 Kaixin Chen, Hauping Chan, Fushen Chen *et al.*. An accurate analysis for two-mode interferometer based Mach-Zehnder interferometers interleaver[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(23): 4639~4644
- 16 Kaixin Chen, Hauping Chan. Silicon oxynitride optical waveguide ring resonator utilizing a two-mode interferometer structure[J]. *Int. J. Photoenergy*, 2012, (2012): ID496267

栏目编辑:王晓球