

不等带宽光学梳状滤波器*

张佳宁¹, 赵海发^{1,“}, 郑嘉敏²

(1 哈尔滨工业大学 物理系, 哈尔滨 150001)

(2 哈尔滨诺方光通讯技术有限公司, 哈尔滨 150078)

摘要: 分析了马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型 50GHz 不等带宽光学梳状滤波器(interleaver)的设计原理, 给出一种新型系统结构及设计中所需要的实验参数。利用 Gires-Tournois 谐振腔(G-T 腔)反射光相位的非线性性质, 对其特性进行改善。改进后的光学梳状滤波器具有较好的平顶特性。

关键词: 不等带宽梳状滤波器; Gires-Tournois 谐振腔; 马赫-曾德尔干涉仪

中图分类号: TN25

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)11-2046-3

0 引言

由于信息技术的迅猛发展, 密集波分复用已成为发展高速大容量全光通信网的主流技术之一。为提高光纤带宽的利用率, 相应出现了一种新型光无源器件——光学梳状滤波器。它的作用是将光纤中一组信道间隔较窄的多个波长光信号分成两组信道间隔较宽的信号, 由此可以有效地增加光纤上复用的信道数。

现有的光学梳状滤波器的实现方案有: 阵列波导光栅型, 利用偏振光干涉的晶体双折射型, 液晶型, 光纤熔锥非平衡 MZI 型等^[1-2]。由这些技术实现的光学梳状滤波器均为等带宽器件, 而在目前实用的系统中, 最佳带宽 Δf 和传输速率 v 存在近似关系: $\Delta f \geq 1.5 v$ 。对传输速率 v 为 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的系统, 信道带宽应分别达到 15 GHz 和 60 GHz。因此 40 Gb/s 的系统中, 不等带宽器件存在更大的灵活性。已见报道的不等宽光学梳状滤波器有级联 Fabry-Pero(F-P)型, 迈克耳逊干涉仪——三面镜 F-P 型^[3]。

本文提出一种全新的 MZI 型不等带宽光学梳状滤波器, 同时利用 G-T 腔反射光相位的非线性性质对其做出改善, 使器件满足密集波分复用所需截止度和平坦度。与上文提到的两种不等带宽光学梳状滤波器相比较具有结构简单, 成本低和 3 dB 带宽大以及隔离度更高等优点。

1 原理与实验模拟

利用二级马赫-曾德尔干涉仪, 即三个光纤定向耦合器 C_1, C_2, C_3 级联构成光学梳状滤波器, 如图 1。

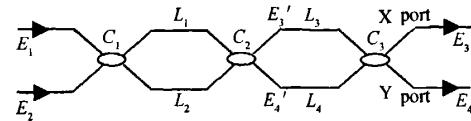


图 1 二级马赫-曾德尔干涉仪
Fig. 1 Two-cascaded flat-top MZI

根据光纤定向耦合器的传输矩阵及光纤段的传输矩阵可知其输入输出关系为^[4]

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-C_3} & i\sqrt{C_3} \\ i\sqrt{C_3} & \sqrt{1-C_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(ik\Delta L_2) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-C_2} & i\sqrt{C_2} \\ i\sqrt{C_2} & \sqrt{1-C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(ik\Delta L_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-C_1} & i\sqrt{C_1} \\ i\sqrt{C_1} & \sqrt{1-C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $C_n, n=1, 2, 3$, 为耦合器的耦合系数, k 为光波在光纤中的传播常量, $L_n, n=1, 2, 3, 4$ 为光纤段的长度, $\Delta L_1 = L_2 - L_1$, $\Delta L_2 = L_3 - L_4$ 。输出端光强 $P_3 = |E_3|^2$, $P_4 = |E_4|^2$ 。

当输入光只经过前两个耦合器时, 令 $E_2 = 0$, $\sqrt{1-C_n} = s_n$, $\sqrt{C_n} = c_n$, 则输出光强为^[5]
 $|E'_3|^2 = |E_1|^2 [s_1^2 s_2^2 + c_1^2 c_2^2 - 2s_1 s_2 c_1 c_2 \cos(k\Delta L_1)]$ (2)
 $|E'_4|^2 = |E_1|^2 [c_1^2 s_2^2 + s_1^2 c_2^2 - 2s_1 s_2 c_1 c_2 \cos(k\Delta L_1)]$ (3)

可以看出, 无论怎样选取 C_1, C_2 , 输出的光强只与 $\cos(k\Delta L_1)$ 有关, 而光纤段的臂长差正是决定传输带宽的主要因素, 因此单级的 MZI 是不能实现不等带宽传输的, 由此考虑加入第三个耦合器。二级 MZI 的输出光强为

$$|E_3|^2 = |E_1|^2 \{ (s_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3 \cos(k\Delta L_1) - s_1 c_2 c_3 \cos(k\Delta L_2) - c_1 s_2 c_3 \cos(k\Delta L_1 - \Delta L_2)) \}^2 + \{ c_1 c_2 s_3 \sin(k\Delta L_1) - s_1 c_2 c_3 \sin(k\Delta L_2) + c_1 s_2 c_3 \sin(k(\Delta L_1 - \Delta L_2)) \}^2 \quad (4)$$

$$|E_4|^2 = |E_1|^2 \{ (s_1 s_2 c_3 - c_1 c_2 c_3 \cos(k\Delta L_1) +$$

* 哈尔滨工业大学 985 专业物理实验建设经费资助

** Tel: 0451-86418214 Email: mariehit@sina.com

收稿日期: 2006-06-27

$$\begin{aligned}
 & s_1 c_2 s_3 \cos(k\Delta L_2) + c_1 s_2 s_3 \cos[k(\Delta L_1 - \\
 & \Delta L_2)]\}^2 + \{c_1 c_2 c_3 \sin(k\Delta L_1) + \\
 & s_1 c_2 s_3 \sin(k\Delta L_2) - c_1 s_2 s_3 \\
 & \sin[k(\Delta L_1 - \Delta L_2)]\}^2
 \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)、(5)的展开式中都只包含 $\cos(k\Delta L_1)$ 、 $\cos(k\Delta L_2)$ 、 $\cos(2k\Delta L_1)$ 、 $\cos(2k\Delta L_2)$ 、 $\cos[2k \cdot (\Delta L_1 - \Delta L_2)]$ 和 $\cos[k(\Delta L_1 - \Delta L_2)]$ ，这些与带宽相关的项，因此，适当选取三个耦合系数和两组光纤段的臂长差可以实现不等带宽传输。

通过 Matlab 程序分析，选取了 $\Delta L_1 = \Delta L_2 = 2.04$ mm，同时只在第二个耦合器处采用常规的 3 dB 耦合器，而耦合器 1,3 的分束比为 0.146 4:0.853 6。根据这些参数设计得到信道间隔为 50 GHz，即波长复用间隔为 0.4 nm 的不等带宽光学梳状滤波器。图 2 为信号从 E_1 输入时，归一化输出强度随频率变化曲线。实线所表示的 X port 信道 3 dB 带宽为 37.5 GHz，Y port 信道 3 dB 带宽为 62.5 GHz，可以分别用于传输速率为 10 Gb/s 和 40 Gb/s，即实现了不等带宽的光学梳状滤波器。

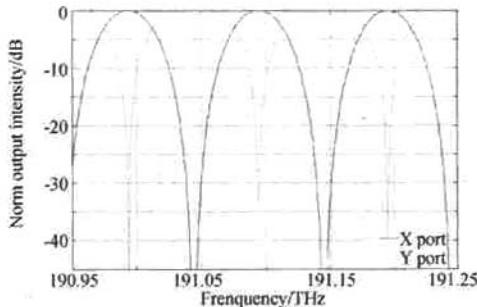


图 2 归一化输出强度随频率变化曲线

Fig. 2 The normalized output intensity of the interleaver as a function of frequency

为提高器件在工作频带内的一致性，在两组光纤段干涉臂中嵌入 G-T 腔，结构如图 3。

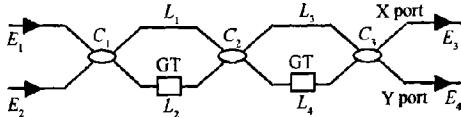


图 3 平顶不等带宽梳状滤波器结构

Fig. 3 The structure of flat-top asymmetric interleaver

入射光在腔的两个平板之间发生多光束干涉，平板内侧镀有部分透射的反射膜。当两块平板的反射率不同时，反射光的电矢量振幅和强度为^[6]

$$A_r = \frac{r_1 + r_1 r_2 \exp(i\delta)}{1 + r_1 r_2 \exp(i\delta)} A_i \quad (6)$$

$$I_r = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos\delta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos\delta} \quad (7)$$

相位 Φ 为

$$\tan\Phi = \frac{-r_2(1-r_1^2)\sin\delta}{r_1(1+r_1^2)+r_2(1+r_1^2)\cos\delta} \quad (8)$$

r_1, r_2 为两块平板的反射系数， $\delta = (4\pi/\lambda_0)nh\cos\theta$ ， h 为两板间的厚度， λ_0 为真空中的波长， n 为两板间介质的折射率， θ 为入射光在介质中的折射角。选择 $r_1 = 10\%$ ， $r_2 = 100\%$ ， $h = 1.48$ mm， $\theta = 3.375^\circ$ 以空气为介质时可以得到 G-T 腔对反射光相位的非线性且不等周期调制，如图 4。当 $r_2 = 1$ 时，G-T 腔对输入光强没有影响，仅引入相位项 $\exp(-i\Phi)$ 。

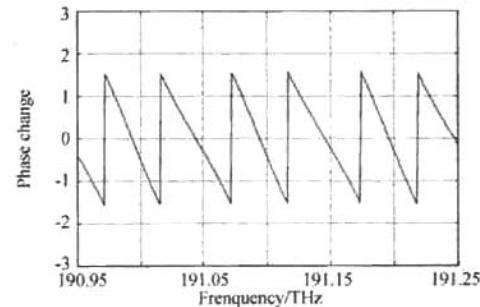


图 4 G-T 腔反射光相位曲线

Fig. 4 F-P resonator's reflective phase curve

加入 G-T 腔的不等带宽光学梳状滤波器，在透过频率附近相位变化相对较小，而在离开透过频率区域的相位变化较大。因此经过调制后的干涉光谱曲线将在所需透过频率处有一个透过带，而在相邻频率处有一个截止带，即具有较好的平顶特性。通过调整入射角度，使得 G-T 腔反射光相位与入射光波的相位互相匹配，即使得透过频率中心与 G-T 腔反射光相位的零值点对应^[7]。输出光的归一化强度表示如图 5。不仅使 3 dB 带宽大大增加，同时获得了较高的隔离度，两个信道的 ± 3 GHz 隔离度分别为 24 dB 和 58 dB， ± 10 GHz 隔离度为 19 dB 和 46 dB。

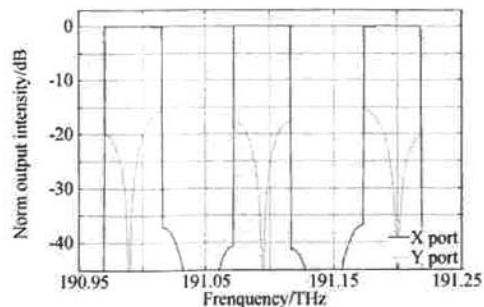


图 5 平顶不等带宽光学梳状滤波器输出谱线

Fig. 5 The output spectrum of flat-top asymmetric interleaver

2 结论

本文提出了一种利用 MZI 设计的不等带宽光学梳状滤波器，说明引入第三个耦合器的原因。具体

模拟了输出信道间隔为 50 GHz 的滤波器,并利用 G-T 腔对其输出一致性做出改善,使其具有高信道隔离度和良好的平顶特性,充分利用了有效带宽资源。

参考文献

- [1] YE Xiao-hua, ZHANG Min, YE Pei-da. Flat-top interleavers with chromatic dispersion compensator based on phase dispersive free space Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2006, **257**: 255-260.
- [2] ZHANG Ting, ZHAO Shuai, CHEN Kai, et al. A flat-top interleaver based on a M-Z interferometer with two ring cavities[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1053-1056.
张婷,赵帅,陈凯,等.一种基于双光纤环形腔的 M-Z 型交错复用器[J].光子学报,2005,34(7):1053-1056.
- [3] SHAO Yong-hong, MIAO Tong-qun, JIANG Yao-liang. A novel interleaver with different output spectrum bandwidth[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 948-950.
邵永红,缪同群,姜耀亮.一种不等带宽光学梳状滤波器[J].光子学报,2003,32(8):948-950.
- [4] KOK S W, ZHANG Ying, WEN Chang-yun, et al. Design of all-fiber optical interleavers with a given specification on passband ripples[J]. *Optics Communications*, 2003, **226**: 241-248.
- [5] KUMAR N, SHENOY M R, PAL B P. An all-fiber interferometric technique for identification of the coupled-and throughput ports of a fused fiberdirectional coupler[J]. *Optics Communications*, 2005, **253**: 301-307.
- [6] HSIEH C H, LEE C W, HUANG S Y, et al. Flat-top and low-dispersion interleavers using gires-tournois etalons as phase dispersive mirrors in a michelson interferometer[J]. *Optics Communications*, 2004, **237**: 285-293.
- [7] SHAO Yong-hong, ZHAO Zhen-ming, JIANG Yao-liang. Dispersion research of MGTI interleaver[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8): 942-944.
邵永红,赵振明,姜耀亮. 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.

A Novel Asymmetric Interleaver

ZHANG Jia-ning, ZHAO Hai-fa, ZHENG Jia-min

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Received date: 2006-06-27

Abstract: The design principle of asymmetric interleaver with 50 GHz spacer is analysed. A novel structure based on Mach-Zehnder interferometer was proposed. With theoretical analysis and simulation, the choosing of parameters is suggested. The nonlinear phase feature of the reflective beam from Gires-Tournois resonator is used to abate the ripple and increase the flat-top passband.

Key words: Asymmetric interleaver; Gires-Tournois resonator; Mach-Zehnder interferometer

ZHANG Jia-ning was born in 1982. She received the B. S. degree from Department of Physics, Harbin Institute of Technology. Her research interests are modern optical communication and surface plasmon resonance sensors.



微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

微波滤波器设计培训专题视频课程



高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>