

文章编号: 0258-7025(2008)08-1191-04

一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分析

李卫彬^{1,2} 孙军强¹

(¹ 华中科技大学光电子科学与工程学院武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)
² 河南理工大学物理化学系, 河南 焦作 454000)

摘要 为改善常规马赫-曾德尔(MZ)干涉仪型滤波器的输出特性,提出了一种由双耦合器和单模光纤构成的谐振环加入非平衡马赫-曾德尔干涉仪一臂中构成的新型梳状滤波器。推导了该器件的输出表达式,并进行了数值模拟。模拟结果表明,改进后的滤波器同时具有更宽的0.5 dB透过带宽和25 dB截止带宽,具有近似方波的输出谱,降低了系统对光源波长稳定性的要求,相对于常规的非平衡马赫-曾德尔干涉型滤波器来说,具有更好的滤波效果。最后分析了双耦合器谐振环上耦合器的耦合比以及环长度对该器件滤波性能的影响,给出了满足通信实用要求的各个参数的范围。

关键词 光通信;梳状滤波器;马赫-曾德尔干涉仪;耦合器;谐振环

中图分类号 TN 253;TN 929.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083508.1191

Analysis of Characteristics of the Interleaver Based on a Double-Coupler Resonator

Li Weibin^{1,2} Sun Junqiang¹

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
² Department of Physics and Chemistry, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract In order to improve the transmission performance of the conventional Mach-Zehnder (MZ) interferometer, a novel interleaver based on MZ interferometer with a double-coupler and single mode fiber resonator in one arm is presented. The output expression is derived and numerical simulation is performed. The simulation indicates that the bandwidth of 0.5 dB passband and 25 dB stopband of proposed interleaver are simultaneously improved remarkably, which are much wider than those of the conventional MZ interferometer. The filtering performance of this proposed interleaver, which achieves a nearly square spectrum response, is much better than that of the conventional MZ. Influence on its transmission characteristics by the parameters caused by double-coupler resonator, coupling ratio and length of resonator, is also discussed, and the variations ranges of the parameters are also given for the communication requirements.

Key words optical communication; interleaver; Mach-Zehnder interferometer; coupler; resonator

1 引言

随着人们对通信容量需求的不断增加,减小信道间隔和增加信道数成为密集波分复用技术进一步发展的必然趋势。然而随着信道间隔的减小,研制密集型波分复用器所遇到的技术困难和成本却在急剧上升。在这种情况下,一种新型的滤波器器件——

梳状滤波器应运而生^[1],该器件能够把均匀分布的信道按照奇数和偶数分为两组,从而使信道间隔翻倍。这样,在信道间隔缩小1倍的情况下,只需增加一个梳状滤波器,原来的复用和解复用器件还可以继续适用。目前梳状滤波器的主要类型有晶体双折射型^[2]、马赫-曾德尔(MZ)干涉仪型^[3]、光纤光栅组

收稿日期:2007-10-22;收到修改稿日期:2008-01-28

基金项目:国家自然科学基金(60678020)资助项目。

作者简介:李卫彬(1975—),男,河南人,博士研究生,主要从事光纤通信中光有源、无源器件方面的研究。

E-mail:lwbliweib@126.com

导师简介:孙军强(1965—),男,浙江人,教授,博士生导师,目前主要从事非线性光学、光通信技术以及激光技术与器件方面的研究。E-mail:jqsun@mail.hust.edu.cn

合型^[4]、法布里-珀罗干涉滤光片型^[5]和光子晶体型^[6]等。其中MZ型梳状滤波器具有结构简单、制作成本低、信道均匀性好、与系统的兼容性强、插入损耗低等优点,成为人们研究的热点之一。但是常规MZ型滤波器的通带形状为余弦型,其峰值特性和通带宽度还不能满足实际需要,实用时容易产生较大的插损和串扰。为满足实用需要,采用多次熔锥的方法,形成多级MZ串联结构^[7~9],或者利用 2×2 和 3×3 光纤耦合器制成的新型MZ滤波器^[10,11],以及加上环形谐振腔的MZ干涉仪^[12],通过合理的优化,都可以得到平顶带通的输出谱。本文提出了另一种改进方案——将双光纤耦合器组成的谐振环加入MZ干涉仪的一臂中,构成全光纤型梳状滤波器。

2 结构原理

结构如图1所示,它与原来的非平衡马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器的区别在于在干涉仪的一臂中加入了由耦合器 k_1, k_2 和光纤 L_1, L_2 组成的光纤环谐振腔,产生类似于多光束干涉的效果,使得干涉仪的两臂相位差有了新的变化。

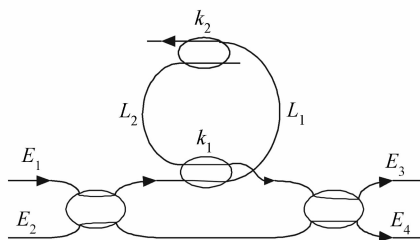


图1 双耦合器谐振腔型MZ干涉仪的结构图

Fig.1 Configuration of double-coupler resonator MZ interferometric interleaver

假定器件的初始注入条件为 $E_1 = 1, E_2 = 0$,原MZ干涉仪的耦合器为3 dB耦合器,忽略光纤及耦合器损耗,根据MZ干涉仪和谐振腔的传输特性,从 E_3 端和 E_4 端输出的光可写作

$$\begin{cases} P_3 = |E_3|^2 = \frac{1}{2} \cdot [1 - \cos(\beta\Delta L - \phi)] \\ P_4 = |E_4|^2 = \frac{1}{2} \cdot [1 + \cos(\beta\Delta L - \phi)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 β 为光纤中基模的传输常数, ΔL 为原MZ干涉仪两臂的几何长度差, ϕ 为双耦合器谐振腔引入的相位

$$\phi = \arg \left[\frac{i\sqrt{k_1} + i\sqrt{k_2} \exp(i\beta L)}{1 + \sqrt{k_1 k_2} \exp(i\beta L)} \right], \quad (2)$$

式中 $L = L_1 + L_2$ 。当满足共振条件时, $L = 2 \cdot \Delta L -$

$\frac{\lambda_0}{2n}$, λ_0 为中心波长, n 为光纤有效折射率。

图2为双耦合器谐振腔型MZ干涉仪透射率($T = P_3/P_1$)随信号光频率变化的曲线。其中中心频率为193.4 THz,对应中心波长 λ_0 为1550 nm,谐振环长度为 $L \approx 4.09$ mm,两个耦合器的耦合比分别为: $k_1 = 0.25, k_2 = 0.8, \Delta L \approx 2.05$ mm,有效折射率 $n = 1.47$ 。从图中可以看出,通过双耦合器谐振腔的相位调制,输出曲线 T 产生陡峭边缘,形成近似于方波的曲线,相对于常规MZ干涉仪的余弦输出有了较大的改善。

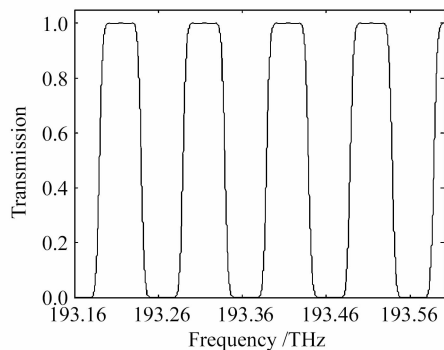


图2 透射率随频率变化的曲线图

Fig.2 Plot of transmission versus frequency

图3是常规MZ型干涉仪、双耦合器谐振腔型MZ干涉仪两种梳状滤波器的0.5 dB透过带宽度的比较图,其中点线、实线分别表示常规MZ型干涉仪、双耦合器谐振腔型MZ干涉仪两种梳状滤波器的输出谱。经过计算可以得到两种梳状滤波器的0.5 dB透过带宽度分别为21.3 GHz和41.9 GHz。加入双耦合器谐振腔的MZ型滤波器的0.5 dB透过带宽度约占50 GHz频率间隔的83.8%,与常规MZ型滤波器的0.5 dB透过带宽度约占50 GHz频率间隔的42.6%相比,明显提高了。图4是常规MZ干涉仪型(点线)、双耦合器谐振腔型MZ干涉仪(实线)两种梳状滤波器的25 dB截止带宽度的比较图,两种滤波器的25 dB截止带宽度分别为3.6 GHz和32.2 GHz。加入双耦合器谐振腔的MZ型滤波器的25 dB截止带宽度约占50 GHz频率间隔的64.44%,与常规MZ干涉仪型滤波器的25 dB截止带宽度约占50 GHz频率间隔的7.2%相比,也大大提高了。这些都说明了加入双耦合器谐振腔的MZ型滤波器的输出谱具有良好的方波特性。另外,文献[10]设计的结构中,0.5 dB透过带宽和25 dB截止带宽分别为26 GHz和24 GHz,占50 GHz的52%和48%;文献[11]中利用 2×2 和 3×3 光纤耦合器制成的级联

MZ 梳状滤波器中, 0.5 dB 透过带宽和 25 dB 截止带宽分别为 33 GHz 和 31 GHz, 占 50 GHz 的 66% 和 62%。从这里可以看出, 和文献[10, 11]比较, 本文设计的新结构具有更宽的 0.5 dB 透过带宽和 25 dB 截止带宽。

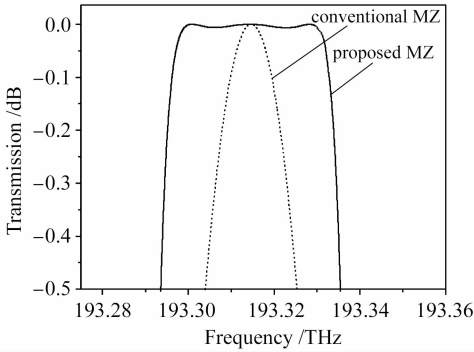


图 3 两种滤波器的 0.5 dB 透过带宽度比较图
Fig. 3 Width of 0.5 dB passband for proposed MZ and conventional MZ interleaver

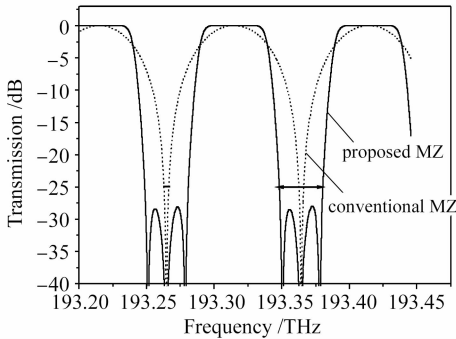


图 4 两种滤波器的 25 dB 截止带宽度比较图
Fig. 4 Width of 25 dB stopband for proposed MZ and conventional MZ interleaver

3 耦合比对输出光谱的影响

对于双耦合器谐振腔 MZ 型滤波器, 新增参数的变化是影响其滤波性能的关键因素。两个耦合器的耦合比 k_1 和 k_2 的选取决定了输出谱的形状和信道隔离度的大小。

图 1 中, 当 $k_1 = 0$ 和 $k_1 = 1$ 时, 双耦合器谐振腔没有起到多光束干涉的作用, 只是相当于常规 MZ 干涉仪的一臂长改变, 因此其输出谱和常规 MZ 干涉仪的一样。经过计算得知, 当 $0.1 \leq k_1 \leq 0.3$ 时, 输出谱具有较好的平顶、低谷的方形谱。同样对于 $k_2 = 0$ 时, 由于 L_1 中的光没有耦合进 L_2 中, 双耦合器谐振腔也没有起到多光束干涉的作用, 此时的输出谱也和常规 MZ 干涉仪的一样。经计算, 当 $k_2 \geq 0.2$ 时, 输出谱具有良好的方波形状。图 5 是双耦合

器谐振腔的耦合比单独发生变化时输出谱波形的变化图。其中图 5(a) 为 k_1 单独变化时对输出谱的影响, 图 5(b) 为 k_2 单独变化时对输出谱的影响。从图中可以看出, k_1 和 k_2 的变化对输出谱线有很大的影响。在图 5(a) 中, 当 k_1 增加时, 输出谱通带宽度减小, 旁瓣电平迅速升高, 信道隔离度减小。在图 5(b) 中, 当 k_2 增加时, 输出谱通带宽度增加, 旁瓣电平迅速降低, 信道隔离度增加。经过计算得知, 如果要满足相邻信道的隔离度大于 25 dB 的要求, k_1 应该满足: $k_1 \leq 0.22$, k_2 应该满足: $k_2 \geq 0.35$ 。因此, 综合考虑, 满足实用通信需要的耦合比变化范围应该为: $0.1 \leq k_1 \leq 0.22$, $k_2 \geq 0.35$ 。从此可以看出对同一方波而言, 耦合比 k_1 需要更精确地控制, 这也说明了耦合器 k_1 比耦合器 k_2 对输出谱的影响大。这是由于在双耦合器谐振腔 MZ 干涉仪的结构中, 耦合器 k_1 在整个系统中起产生多光束干涉作用, 而 k_2 只起到了光功率在 L_1 和 L_2 中的分配作用。

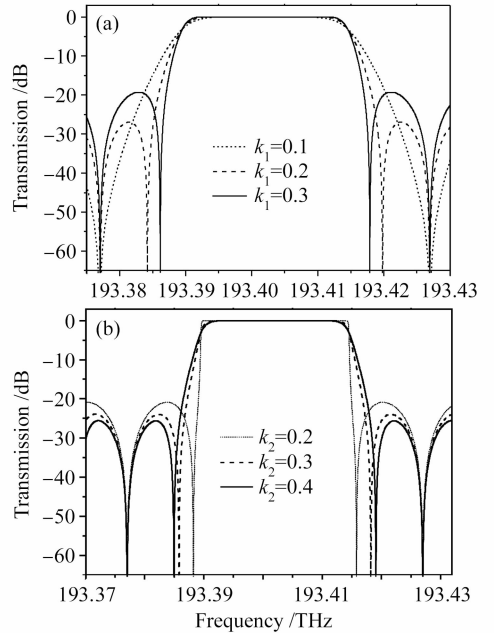


图 5 耦合比 k_1 (a) 和 k_2 (b) 对滤波性能的影响
Fig. 5 Plot of transmission versus frequency for different coupler ratios k_1 (a) and k_2 (b)

4 光纤环长度对输出光谱的影响

计算中, 发现双耦合器谐振腔型 MZ 滤波器的输出谱对谐振腔的长度变化非常敏感, 这主要是由于当谐振腔的长度产生微小变化时, 破坏了条件式 $L = 2 \cdot \Delta L - \frac{\lambda_0}{2n}$ 的匹配要求, 为使匹配条件重新成立, 将使得输出谱中心波长发生漂移。因此为满足

系统稳定性的要求,谐振腔的长度变化应该受到严格的限制。图6是双耦合器谐振腔型MZ滤波器透射率 T 在不同谐振腔长度 L 下随信号光波长 λ 变化的曲线。参数选取如下:中心波长1550 nm, $k_1 = 0.19$, $k_2 = 1$, $L \approx 4.1$ mm,有效折射率 $n = 1.47$,信道间隔 $\Delta\lambda = 0.8$ nm。当干涉仪主臂长度差 ΔL 不变时,图6中点线、短横线和实线分别表示 L 不变, L 变化100 nm和200 nm时的透射率曲线。从图中可以看出,虽然输出谱的信道隔离度和平坦度没有变化,但是其中心波长却发生了漂移,这同理论预言是一致的。当 $L = 200$ nm时,中心波长将溢出通带。因此, L 的变化不能大于200 nm,即 L 的变化不能大于自身的十万分之五。由此可以看出,该器件对外界环境的变化非常敏感,但是也可以利用这一特点,将该器件用于温度、压力等传感。

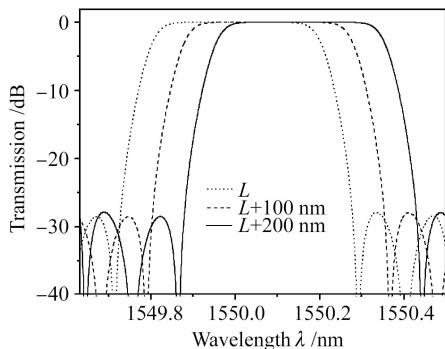


图6 透射率在不同谐振腔长度下随信号光波长的变化曲线

Fig.6 Plot of transmission T versus wavelength λ for different shifts of L

5 结 论

理论分析了加入双耦合器谐振环后的非平衡马赫-曾德尔干涉型滤波器的滤波特性。模拟分析结果表明改进后的滤波器具有更好的滤波效果,在合理参数的情况下,可以得到平顶、低谷的方波梳状滤波器。同时,该滤波器具有更宽的0.5 dB透过带宽和25 dB截止带宽,降低了对入射信号光的要求。另外,分析了耦合器的耦合比对滤波性能的影响,给出了满足通信实用要求的耦合比范围。最后研究了

谐振腔长度对滤波性能的影响,指出该器件对外界环境变化非常敏感,可以用做传感器件,但同时也说明了该系统要求更加严格的制作和封装工艺,以满足各参数间的需要。

参 考 文 献

- 1 M. Oguma, K. Jinguji, T. Kitoh *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):1299~1300
- 2 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu. A tunable interleaver filter based on analog birefringent units [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **227**:283~294
- 3 Xu Ou, Lu Shaohua, Dong Xiaowei *et al.*. Properties analysis for reflection-type filter composed of microring resonator array and Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8):1443~1446
许 鸥,鲁韶华,董小伟等. 基于微环谐振器阵列与马赫-曾德尔干涉仪的反射型滤波器性能分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8):1443~1446
- 4 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Narrow bandwidth add-drop channel filter based on fiber-Bragg-grating-coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):621~625
董小伟,裴 丽,简水生. 光纤布拉格光栅耦合器型窄带上下通路滤波器的数值分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):621~625
- 5 Qing Ye, Ronghui Qu, Zujie Fang. Generation of millimeter-wave sub-carrier optical pulse by using a Fabry-Perot interferometer [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(1):8~10
- 6 Zhang Wenfu, Fang Qiang, Cheng Yihua *et al.*. Narrow band interleaver based on one-dimensional photonic crystal with positive-negative index alternant multilayer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9):1695~1699
张文富,方 强,程益华等. 正负折射率交替一维光子晶体窄带梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9):1695~1699
- 7 M. Kuznetsov. Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filters for wavelength division multiplexed optical systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(2):226~230
- 8 R. J. Orazi, T. T. Vu, M. N. McLandrich *et al.*. Cascaded narrow channel fused fiber wavelength division multiplexers [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(4):368~370
- 9 Qian Wang, Sailing He. Optimal design of a flat-top interleaver based on cascaded MZ interferometers by using a genetic algorithm [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **224**:229~236
- 10 Lu Huawei, Zhang Baoge, Li Zhimin *et al.*. A novel all-fiber optical interleaver with flat-top passband [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**:1469~1471
- 11 Huaiwei Lu, Yu'e Zhang, Guanwei Luo. Study of all-fiber flat-top passband interleaver based on 2×2 and 3×3 fiber couplers [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **276**:116~121
- 12 M. Kohtoku, S. Oku, Y. Kadota *et al.*. 200 GHz FSR periodic multi/demultiplexer with flattened transmission and rejection band by using a Mach-Zehnder interferometer with a ring resonator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(9):1174~1176