

# 基于 $3 \times 3$ 和 $2 \times 2$ 光纤耦合器的全光纤 不等带宽梳状滤波器的设计

鲁怀伟<sup>1</sup> 魏 贇<sup>1</sup> 鄢开俊<sup>1</sup> 章宝歌<sup>2</sup> 罗冠炜<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>兰州交通大学数理与软件工程学院, 甘肃 兰州 730070)

(<sup>2</sup>兰州交通大学电气与自动化学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要** 针对基于三个  $2 \times 2$  单模光纤耦合器的全光纤级联 Mach-Zehnder 干涉仪型 (CMZI) 不等带宽光学梳状滤波器在实际制作过程中存在的问题, 提出了由一个  $2 \times 2$  和两个  $3 \times 3$  单模光纤耦合器级联组成的全光纤不等带宽光学梳状滤波器, 并进行了详细的分析。通过对光纤耦合器分光比、干涉仪臂长差等结构参量的选择, 详细分析了其传输特性, 并选取了理论优化计算的一组数据进行实验。数值分析和实验结果表明: 该器件将 50 GHz 的输入信号分离成信道间隔为 100 GHz 的奇偶两路输出信号, 一路信道用于 10 Gb/s 传输, 另外一路信道用于 40 Gb/s 传输。与全光纤 CMZI 型不等带宽光学梳状滤波器相比, 其最大的优点是在实际制作时可以对每个光纤耦合器的分光比进行准确的监视和控制, 降低了全光纤不等带宽光学梳状滤波器的制作难度。最后进行了实验研究, 实验所得结果与理论结果相吻合。

**关键词** 不等带宽梳状滤波器; 滤波器; 波分复用; 马赫-曾德尔干涉仪; 不等带宽

**中图分类号** TN253; TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1106002

## Design of All-Fiber Asymmetric Interleaver with $2 \times 2$ and $3 \times 3$ Fiber Couplers

Lu Huaiwei<sup>1</sup> Wei Yun<sup>1</sup> Wu Kaijun<sup>1</sup> Zhang Baoge<sup>2</sup> Luo Guanwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mathematics, Physics and Software Engineering, Lanzhou Jiaotong University,  
Lanzhou, Gansu 730070, China

<sup>2</sup> School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University,  
Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract** An all-fiber asymmetric optical interleaver of cascaded Mach-Zehnder interferometer using a  $2 \times 2$  and two  $3 \times 3$  fiber couplers is developed. Influences on its transmission characteristics by such factors as splitting ratio of the directional fiber couplers and the physical length differences of the interferometer arms are numerically analyzed in detail. One set of optimized data is validated in the experimental result. The results of numerical simulation and experiments show that all-fiber optical interleaver with  $-3$  dB passband in odd channels and even channels can be obtained for transmission speed of 40 Gb/s and 10 Gb/s, respectively. Compared with all-fiber asymmetric optical interleaver of cascaded Mach-Zehnder interferometer using three  $2 \times 2$  fiber couplers, the most advantage of the present method is that the coupling ratio of couplers can be controlled in the fabricating process accurately. Finally, a novel structure of interleaver is fabricated using fused biconical taper technics in experiment. The experimental results agree with the analytical ones well.

**Key words** asymmetric bandwidth interleaver; filter; wavelength division multiplexing (WDM); Mach-Zehnder interferometer; asymmetrical bandwidth

**OCIS codes** 060.4510; 060.2310; 060.2330; 060.2340

收稿日期: 2011-04-20; 收到修改稿日期: 2011-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(11172119)和甘肃省自然科学基金(0803RJ ZA027)资助课题。

作者简介: 鲁怀伟(1959—), 男, 教授, 主要从事光纤通信以及光纤无源器件等方面的研究。E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn

## 1 引 言

光学梳状滤波器自在 2000 年的国际光纤通信会议(OFC2000)正式报道后,一直是国内外研究者的研究热点。近年来,不等带宽梳状滤波器成为该研究的主要研究方向,已见报道的主要有 Michelson-三面镜 Fabry-Pérot 型、Michelson Gires-Tournois 干涉型、耦合器级联型和双折射光纤环镜型等方案<sup>[1~5]</sup>。

利用熔融拉锥技术,基于  $2 \times 2$  光纤耦合器的全光纤级联 Mach-Zehnder 干涉仪(CMZI)型光学梳状滤波器,具有结构简单、制作成本低、插入损耗低、与光纤系统兼容性强、良好的信道均匀性、偏振相关性和色散特性以及具有梳状滤波特性等优点而在光纤通信系统和光纤传感系统中有着重要的应用<sup>[6~10]</sup>。但在实际制作全光纤 CMZI 型不等带宽光学梳状滤波器中发现<sup>[10]</sup>,由于光的干涉效应,除第一个光纤耦合器的分光比可以准确控制外,其余光纤耦合器的分光比无法实时监视,只能凭经验来拉伸,难以做到准确控制。

针对上述问题,本文提出了由一个  $2 \times 2$  光纤耦合器和两个一字型的  $3 \times 3$  光纤耦合器构成全光纤不等带宽光学梳状滤波器的设计方法,通过理论计算和实验验证,选取适当的结构参数,实现了两路不等带宽输出,其两路输出信道的 3 dB 带宽分别超过 20 GHz 和 60 GHz。该结构的全光纤不等带宽光学梳状滤波器不仅具有传统全光纤 CMZI 型不等带宽光学

梳状滤波器一样的功能,而且在实际制作过程中,避开了光的干涉效应,可以对每个光纤耦合器的分光比进行准确控制,克服了传统全光纤 CMZI 型不等带宽光学梳状滤波器在制作时凭经验融拉的不足。

## 2 结构分析

全光纤不等带宽光学梳状滤波器的结构如图 1 所示。其中  $DC_1$  和  $DC_2$  是一字型  $3 \times 3$  光纤耦合器, $DC_0$  是  $2 \times 2$  光纤耦合器。光纤干涉臂  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  和  $l_4$  将  $DC_0$ 、 $DC_1$  和  $DC_2$  联接在一起,形成一个 CMZI。

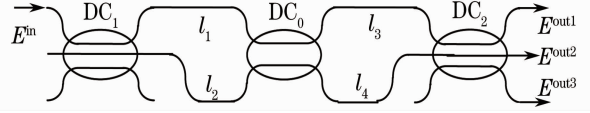


图 1 全光纤不等带宽交错梳状滤波器结构示意图

Fig. 1 Structure of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver

假设两个干涉臂长差  $(l_2 - l_1)$  和  $(l_4 - l_3)$  相等,输入光场  $E^in$  从耦合器  $DC_1$  上端端口输入。根据光纤耦合器的传输矩阵及光纤传输矩阵得出归一化输出光强  $T_i(\theta)$  ( $i = 1 \sim 3$ ) 的表达式为<sup>[11~14]</sup>

$$\begin{cases} T_1(\theta) = a_0 + a_1 \cos \theta + a_2 \cos 2\theta \\ T_2(\theta) = b_0 + b_1 \cos \theta + b_2 \cos 2\theta, \\ T_3(\theta) = c_0 + c_1 \cos \theta + c_2 \cos 2\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中  $A = 2 \cos k \cos^2(2^{-1} k_{11})$ ,  $B = \sqrt{2} \sin k \sin k_{11}$ ,  $C = 2 \sin k \cos^2(2^{-1} k_{11})$ ,  $D = \sqrt{2} \cos k \sin k_{11}$ ,  $a_0 = 4^{-1}(A^2 + B^2) \cos^4(2^{-1} k_{12}) + 8^{-1}(C^2 + D^2) \sin^2 k_{12} - 2\sqrt{2}BC \cos^2(2^{-1} k_{12}) \sin k_{12}$ ,  $a_1 = 4AB \cos^4(2^{-1} k_{12}) - 2CD \sin^2 k_{12} - 2\sqrt{2}(AC - BD) \sin k_{12} \cos^2(2^{-1} k_{12})$ ,  $a_2 = 2\sqrt{2}AD \cos^2(2^{-1} k_{12}) \sin k_{12}$ ,  $b_0 = 4^{-1}(C^2 + D^2) \cos^2 k_{12} + 8^{-1}(A^2 + B^2) \sin^2 k_{12} + 2\sqrt{2}BC \sin 2k_{12}$ ,  $b_1 = 4CD \cos^2 k_{12} - 2AB \sin^2 k_{12} - \sqrt{2}(AC - BD) \sin 2k_{12}$ ,  $b_2 = 2\sqrt{2}AD \sin 2k_{12}$ ,  $c_0 = 4^{-1}(A^2 + B^2) \sin^4(2^{-1} k_{12}) + 8^{-1}(C^2 + D^2) \sin^2 k_{12} + 8\sqrt{2}BC \sin^2(2^{-1} k_{12}) \sin k_{12}$ ,  $c_1 = -8AB \sin^4(2^{-1} k_{12}) + 4CD \sin^2 k_{12} - 4\sqrt{2}(AC - BD) \sin^2(2^{-1} k_{12}) \sin k_{12}$ ,  $c_2 = -8\sqrt{2}AD \sin^2(2^{-1} k_{12}) \sin k_{12}$ ,  $\theta = \beta(l_2 - l_1)/2 = \beta(l_4 - l_3)/2 = \beta \Delta l$ ,  $\beta$  是光纤传播常数,  $k_{11}$ 、 $k$  和  $k_{12}$  分别是光纤耦合器  $DC_1$ 、 $DC_0$  和  $DC_2$  的耦合角,一般情况下耦合器的耦合角是传输波长的函数。 $\theta$  决定输出光的波分复用间隔,  $a_0 \sim a_2$ 、 $b_0 \sim b_2$  和  $c_0 \sim c_2$  共同决定输出波形。

从(1)式可以看出,器件的输出光强  $T_i(\theta)$  是以  $2\pi$  为周期的周期函数,  $T_i(\theta)$  的各项正好构成了傅里叶级数的基波项与谐波项。根据傅里叶级数的理论,适当选取耦合器的耦合系数和干涉臂的臂长差可以实现不等带宽传输。

对  $T_i(\theta)$  分别进行求导后,再通过简单的数学运算,可以得出:  $\theta = 0 \pm 2n\pi$  ( $n$  为正整数) 分别对应

信道  $T_2(\theta)$  通带的中心和  $T_1(\theta)$  阻带中心;而  $\theta = n\pi$  则分别对应信道  $T_1(\theta)$  通带的中心和  $T_2(\theta)$  阻带中心。

衡量光学梳状滤波器的一个重要指标是信道串扰,串扰越小信道隔离度越高,也就是要求的信道间的功率旁瓣峰值最小。通过求  $\max\{|T_i(0) - T_i(\pi)|\}$  选取适当的  $k_{11}$ 、 $k$  和  $k_{12}$  得到最大的信道隔

离度<sup>[10]</sup>。以信道  $T_2(\theta)$  为例，

$$|T_2(0) - T_2(\pi)| = \frac{\sqrt{2}}{4} \sin(2k) \cos^2\left(\frac{k_{11}}{2}\right) \times \left[3\sin(k_{11} + 2k_{12}) - 2\sin^2\left(k_{11} - \frac{k_{12}}{2}\right)\right], \quad (2)$$

由于  $k_{11}$ 、 $k$  和  $k_{12}$  的取值范围在  $(0, \pi/2)$  之间，根据(2)式， $k_{11}$ 、 $k$  和  $k_{12}$  在满足  $k_{11} + 2k_{12} = \pi/2$ 、 $k = \pi/2$  和  $k_{11} - k_{12}/2 = 0$  时， $\max\{|T_i(0) - T_i(\pi)|\}$  有最大值存在。

取  $k$ 、 $k_{11}$  和  $k_{12}$  分别为  $\pi/4$ 、 $\pi/4$  和  $\pi/8$ ，光纤的纤芯折射率  $n = 1.457$ ，中心波长  $\lambda_0 = 1550$  nm，光纤干涉臂长差  $\Delta l = 2.04$  mm。将上述参数代入到(1)

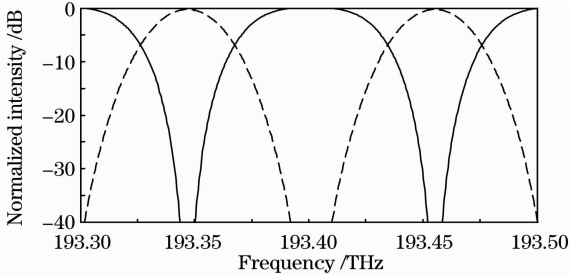


图2 取  $k_{11} = k = \pi/4$  和  $k_{12} = \pi/8$  时，全光纤不等带宽光学 Interleaver 的输出光谱图

Fig. 2 Calculated output spectra of the all-fiber unequal bandwidth interleaver using these parameters  $k_{11} = k = \pi/4$  and  $k_{12} = \pi/8$

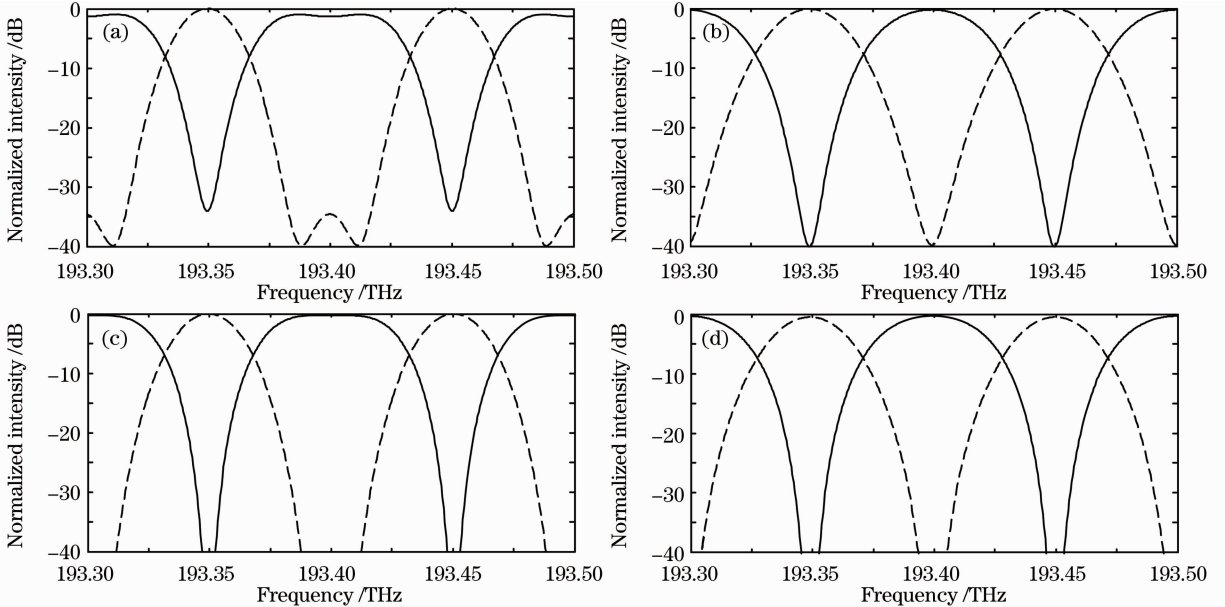


图3  $k = \pi/4$  和 (a)  $k_{11} = \pi/4 + \Delta k$ ,  $k_{12} = \pi/8 + \Delta k$ ; (b)  $k_{11} = \pi/4 - \Delta k$ ,  $k_{12} = \pi/8 - \Delta k$ ; (c)  $k_{11} = \pi/4 - \Delta k$ ,  $k_{12} = \pi/8 + \Delta k$  和 (d)  $k_{11} = \pi/4 + \Delta k$ ,  $k_{12} = \pi/8 - \Delta k$  时，全光纤不等带宽光学梳状滤波器的输出光谱图

Fig. 3 Calculated output spectra of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver with the parameters  $k = \pi/4$  and (a)  $k_{11} = \pi/4 + \Delta k$ ,  $k_{12} = \pi/8 + \Delta k$ ; (b)  $k_{11} = \pi/4 - \Delta k$ ,  $k_{12} = \pi/8 + \Delta k$ ; (c)  $k_{11} = \pi/4 - \Delta k$ ,  $k_{12} = \pi/8 + \Delta k$ ; (d)  $k_{11} = \pi/4 + \Delta k$ ,  $k_{12} = \pi/8 - \Delta k$

式中进行数值计算，结果如图2所示。图中实线和虚线分别代表归一化输出光强  $T_1(\theta)$  和  $T_2(\theta)$  (在下列所有计算图中， $T_1(\theta)$  和  $T_2(\theta)$  均分别用实线和虚线表示。另外，由于  $T_3(\theta)$  非常微弱，在下面的计算图中均不再画出)。

图2的计算结果显示，适当选取三个光纤耦合器的分光比和两组光纤干涉臂的臂长差就可以实现不等带宽光学梳状滤波器。

### 3 最佳分光比的确定

光纤耦合器是组成全光纤不等带宽光学梳状滤波器的主要元件，其分光比决定了全光纤不等带宽光学梳状滤波器的输出光谱形状，是决定其输出特性的关键因素。同时，由于制作工艺以及实验条件等原因的限制，光纤耦合器分光比的实际值与期望值之间往往有一定的偏差。因此，研究光纤耦合器分光比对器件输出的影响是十分必要的。

设  $\Delta k$  代表耦合角的偏差值，取  $\Delta k = \pi/4 \times 20\%$ ，将  $k_{11} = \pi/4 \pm \Delta k$ 、 $k_{12} = \pi/8 \pm \Delta k$  和  $k = \pi/4 \pm \Delta k$  分别代入(1)式进行数值计算。图3(a)和(b)是分别取  $k_{11} = \pi/4 + \Delta k$ 、 $k_{12} = \pi/8 + \Delta k$  和  $k_{11} = \pi/4 - \Delta k$ 、 $k_{12} = \pi/8 - \Delta k$  的计算结果。由于  $k_{11} + 2k_{12} \neq \pi/2$ ，其信道隔离度和输出波形明显劣化，这和前面的分析结果一致。

图 3(c)和(d)是分别取  $k_{11} = \pi/4 - \Delta k, k_{12} = \pi/8 + \Delta k$  和  $k_{11} = \pi/4 + \Delta k, k_{12} = \pi/8 - \Delta k$  的计算结果;图 4 是分别取  $k_{11} = \pi/4, k_{12} = \pi/8$  和  $k = \pi/4 \pm \Delta k$  的计算结果。可以看出,当  $k_{11} > \pi/4, k_{12} < \pi/8$  或  $k > \pi/4$  时,输出光谱的波形不是十分理想,如图 3(d)和图 4(b)所示。相反,则  $T_1(\theta)$  输出光谱具有比较理想的顶端

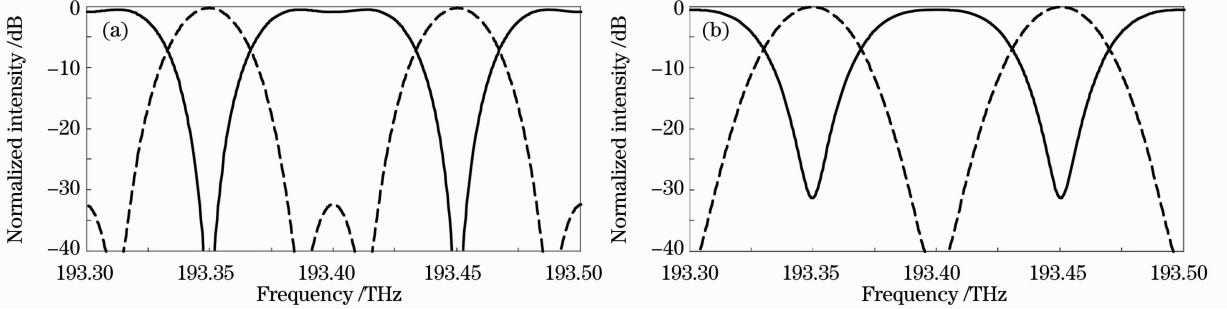


图 4  $k_{11} = \pi/4, k_{12} = \pi/8$  和 (a)  $k = \pi/4 - \Delta k$ ; (b)  $k = \pi/4 + \Delta k$  时,全光纤不等带宽光学梳状滤波器的输出光谱图  
Fig. 4 Calculated output spectra of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver with the parameters  $k_{11} = \pi/4, k_{12} = \pi/8$  and (a)  $k = \pi/4 - \Delta k$ ; (b)  $k = \pi/4 + \Delta k$

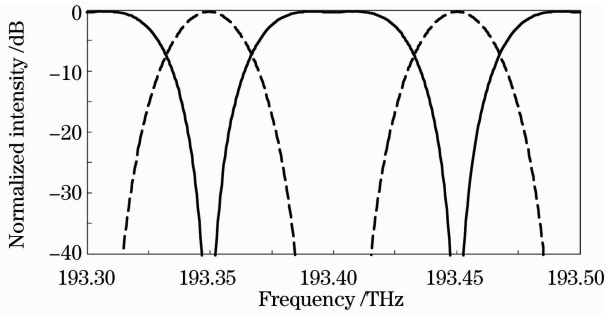


图 5  $k = \pi/4 - \Delta k, k_{11} = \pi/4 - \Delta k$  和  $k_{12} = \pi/8 + \Delta k$  时,全光纤不等带宽光学梳状滤波器的输出光谱图

Fig. 5 Calculated output spectra of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver with the parameters  $k = \pi/4 - \Delta k, k_{11} = \pi/4 - \Delta k$  and  $k_{12} = \pi/8 + \Delta k$

根据传输带宽  $\Delta f$  和传输速率  $v$  之间的最佳关系:  $\Delta f \geq 1.5v$ , 对传输速率  $v$  为 10 Gb/s 和 40 Gb/s 的系统,其信道带宽应分别达到 15 GHz 和 60 GHz。与图 2~4 的计算结果相比,图 5 中的  $T_1(\theta)$  输出光谱的顶端平坦宽度有所加宽,3 dB 带宽展宽到 61.6 GHz;虽然  $T_2(\theta)$  的输出光谱仍为近似正弦型,但其 3 dB 带宽远远高于 15 GHz,约为 22.9 GHz,超出所要求的 15 GHz 近 53%,而且  $T_1(\theta)$  和  $T_2(\theta)$  的信道隔离度均大于 40 dB。

综上所述,当  $k$  和  $k_{11}$  略小于  $\pi/4, k_{12}$  略大于  $\pi/8$ ,光学梳状滤波器均可以得到比较理想的输出光谱和带宽。由于  $k$  和  $k_{11}$  小于  $\pi/4$  以及  $k_{12}$  大于  $\pi/8$  的范围在  $\Delta k = \pi/4 \times 20\%$ ,也说明该结构的全光

平坦度, -30 dB 阻带宽度也有所加宽,更符合光学梳状滤波器的基本要求,如图 3(c)和图 4(a)所示。因此,综合考虑图 3(c)和图 4(a)两种情况,将  $k = \pi/4 - \Delta k, k_{11} = \pi/4 - \Delta k$  和  $k_{12} = \pi/8 + \Delta k$  代入(1)式计算,其结果如图 5 所示。

纤不等带宽光学梳状滤波器具有较强的抗偏差能力,在一定程度上减小了实际制作的难度。

#### 4 设计实例

由于光纤熔接会引入波导不连续性,对光纤插损和光波偏振态产生不可预期的影响,因此在制作全光纤 MZI 型光学梳状滤波器时,必须对光纤耦合器采用连续熔融拉锥的方法。传统全光纤 CMZI 型光学梳状滤波器一般由  $2 \times 2$  光纤耦合器级联而成,在实际制作过程中,其第一个耦合器的分光比容易控制,但在熔拉第二个和第三个耦合器时,由于通过第一个耦合器的光已经是相干光,该光经光纤干涉臂传输到第二个和第三个耦合器时,在第二个和第三个耦合器中就会产生干涉。因此,在熔拉第二个和第三个耦合器时已不能用一般的监测光功率来控制其耦合角,而只能凭经验熔拉。本文提出的基于  $2 \times 2$  光纤耦合器和  $3 \times 3$  光纤耦合器构成的全光纤不等带宽光学梳状滤波器可以解决这个难题。

在融拉过程中,耦合器的分光比是周期性变化的<sup>[14]</sup>,利用和计算机连接的检测系统检测其变化,由融拉自动控制系统准确控制拉伸速度、加热宽度等,当分光比在第一个功率变化周期达到预定值时立即停止熔拉。

控制耦合器的顺序是:首先采用常规熔融拉锥技术控制耦合器  $DC_0$ ,其次再控制  $DC_1$  或  $DC_2$ 。由于  $DC_1$  和  $DC_2$  均为一字型  $3 \times 3$  光纤耦合器,具有一定的对称性。从图 1 和图 6 中可以看出  $DC_1$  和

DC<sub>2</sub> 的端口 3 和 3\* 为空闲端口。因此,分别利用 DC<sub>1</sub> 和 DC<sub>2</sub> 的空闲端口 3 和 3\* 作为监视光源的输入,可以避免监视光的干涉效应。参照图 6,在控制 DC<sub>1</sub> 或 DC<sub>2</sub> 时,其端口 3\* 作为输入光源,端口 1、2 和 3 分别接监视光功率计;监视光从右向左传输,仅通过 DC<sub>1</sub> 或 DC<sub>2</sub>,不会产生干涉效应。监测光源是中心波长为 1525 nm 的半导体激光器,在熔融拉锥前,用剪断法准确确定输入光的功率,接收端口的光信号与计算机控制系统连接,整个融拉过程采用计算机进行智能控制。

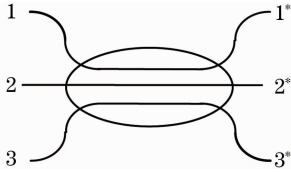


图 6 一字型的  $3 \times 3$  光纤耦合器结构示意图

Fig. 6 Structure of a planar  $3 \times 3$  fiber coupler

参照文献[15]的方法,对干涉臂长差进行粗略的设置。待三个耦合器全部控制完成以后,再参照文献[10,14,16]的方法,对光纤干涉臂进行精密微调。控制过程中,对光在光纤干涉臂传输时偏振态变化的控制,采取的措施与文献[10,14,16]提供的方法基本类似。

对试验样品进行了性能测试,光源采用 Santec 公司生产的 TSL 2210 型波长可调谐激光器,调谐波长为 1500~1580 nm,从 DC<sub>1</sub> 端口 1 输入 1 mW 的线偏振光,在 DC<sub>2</sub> 的输出端口 1 和 2 分别对输出光谱进行测量,图 7 是试验样品输出光谱的测量值。由图 7 可以看出,中心波长符合 ITU 规定,3 dB 带宽分别为 60.26 GHz 和 20.56 GHz,整个器件的信道隔离度大于 30 dB,附加损耗小于 0.6 dB,产生附加损耗的主要原因是偏振相关损耗,试验样品的输出光谱和理论分析比较接近。

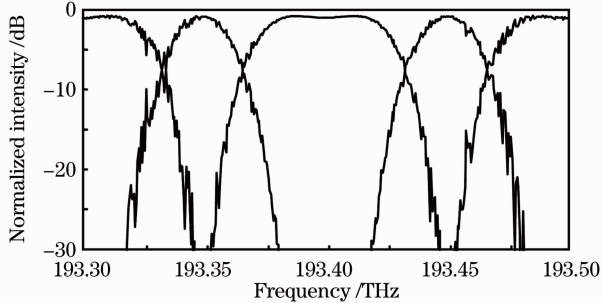


图 7 全光纤不等带宽光学梳状滤波器输出光谱的测量值

Fig. 7 Measured experimental spectrum of the designed unequal bandwidth interleaver with 50 GHz channel spacing

基于  $2 \times 2$  光纤耦合器和  $3 \times 3$  光纤耦合器构成全光纤不等带宽光学梳状滤波器和文献[10]设计的全光纤 CMZI 型不等带宽光学梳状滤波器相比,虽然 3 dB 带宽略有下降,但仍大于或等于传输速率的 1.5 倍,完全可以应用于 10 Gb/s 和 40 Gb/s 同时传输的系统。另外,阻带宽度和边缘陡峭度也有明显改善。阻带宽度的变宽,提高了相邻信号的隔离度,减少了信道间的串扰。更为重要的是在熔融器件的过程中,可以利用 DC<sub>1</sub> 和 DC<sub>2</sub> 的空闲输出端口作为控制光纤耦合器分光比的监控端口,提高了制作精度。

将试验样品的干涉臂剪断,参照图 6,输入光从耦合器端口 1 输入,端口 1\*、2\* 和 3\* 作为输出端口,分别对 DC<sub>0</sub>、DC<sub>1</sub> 和 DC<sub>2</sub> 的分光比进行了测量,DC<sub>1</sub> 和 DC<sub>2</sub> 分光比的测量结果分别约等于 77:21:2 和 89:10:1,DC<sub>0</sub> 的分光比约等于 65:35。

另外,器件的窄口信道输出光谱近似为正弦型,其输出波形通带平坦度不是十分理想,这些有待于以后进一步研究完善。

## 5 结 论

通过理论分析和模拟计算得到了实现全光纤型不等带宽光学梳状滤波器的结构参数,并系统分析了这些结构参量对输出光谱特性的影响。选取理论优化计算的一组数据进行了实验,实验结果与模拟分析的结果表明,提出的基于  $2 \times 2$  和一字型的  $3 \times 3$  光纤耦合器构成的全光纤不等带宽光学梳状滤波器系统的设计方案是可行的,尤其是在实际制作这种结构的不等带宽光学梳状滤波器时,避开了监视光的干涉效应,使得每个光纤耦合器的分光比可以被精确控制,为设计全光纤不等带宽光学梳状滤波器提出了一种新的思路。

## 参 考 文 献

- 1 Shao Yonghong, Miao Tongqun, Jiang Yaoliang *et al.*. A novel interleaver with different output spectrum bandwidth[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 948~950  
邵永红, 缪同群, 姜耀亮等. 一种不等带宽光学梳状滤波器[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8): 948~950
- 2 Wang Chang, Zhang Juan. Output spectrum characteristics of MGTI-type asymmetrical optical interleavers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 321~324  
王 昌, 张 娟. MGTI 型不等带宽 interleaver 的输出光谱特性分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 321~324
- 3 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耳孙 Gires-Tournois 干涉型光交错复用器的设计方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 155~161
- 4 Zhang Ruifeng, Wang Shuhui, Ge Chunfeng *et al.*. Design of different bandwidth interleaver[J]. *J. Tianjin University*, 2006, **39**(3): 365~368  
张瑞峰, 王书慧, 葛春风 等. 不等带宽奇偶交错滤波器设计[J]. 天津大学学报, 2006, **39**(3): 365~368
- 5 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. 双折射光纤环境不等带宽交错复用器的研究[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(4): 436~440
- 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, **23**(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器研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(5): 575~580
- 7 Feng Dejun, Kai Guiyun, Liu Zhiguo *et al.*. Study of all-fiber reflected Mach-Zehnder interferometric multi-wavelength filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 332~335  
冯德军, 开桂云, 刘志国 等. 全光纤反射式马赫-曾德尔干涉型多波长滤波器的研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(3): 332~335
- 8 Cai Haiwen, Huang Rui, Qu Ronghui *et al.*. All-fiber interleave filter using Mach-Zehnder-based sampled fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3): 243~246  
蔡海文, 黄 锐, 瞿荣辉 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪和取样光纤光栅的全光纤梳状滤波器[J]. 中国激光, 2003, **30**(3): 243~246
- 9 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
- 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, 邹开俊 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 S. W. Kok, Y. Zhang, C. Y. Wen *et al.*. Design of all-fiber optical interleavers with a given specification on passband ripples [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**: 241~248
- 12 Meng Yichao, Tan Weihai, Huang Zhaoming. General solutions to directional couplers with coupling between neighbored waveguides only[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(8): 964~969  
孟义朝, 谭维翰, 黄肇明. 仅有相邻波导耦合的定向耦合器的一般解法[J]. 光学学报, 2003, **23**(8): 964~969
- 13 He Na, Wu Chongqing, Wei Yan *et al.*. Fused planar 3×3 single mode fiber coupler [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3): 323~327  
何 娜, 吴重庆, 卫 炎 等. 熔锥平行排列 3×3 单模光纤耦合器的研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(3): 323~327
- 14 Q. J. Wang, Y. Zhang, Y. S. Chai. All-fiber 3×3 interleaver design with flat-top passband[J]. *IEEE Photon Technol. Lett.*, 2004, **16**(1): 168~170
- 15 Yao Shouquan, Chen Kaixuan. A 8-channel fiber Mach-Zehnder interferometric super narrow spacing wavelength-division-multiplexer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 1113~1118  
姚寿铨, 陈凯旋. 光纤马赫-曾德尔干涉型 8 波分超窄波分复用器的研制[J]. 光学学报, 1998, **18**(8): 1113~1118
- 16 H. W. Lu, Y. E. Zhang, G. W. 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

栏目编辑: 谢 婧