

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0241-04

多功能 DWDM 光学滤波器组合模块的系统化研究

孟义朝^{1,2}, 黄肇明², 王陆唐², 彭芬², 方捻²

(¹上海大学光纤研究所, 上海 201800; ²上海大学通信学院光波技术实验室, 上海 200072)

摘要 提出了一种新的多功能 DWDM 光学滤波器组合模块结构, 并对各组成模块进行了系统化研究, 给出较完整的设计模型和仿真结果, 讨论了 DWDM 系统对各组合模块的性能要求。重点研究了采用 3×3 宽带光纤耦合器和马赫-曾德尔光纤干涉仪构成的群组波长交错滤波器, 结构的改进有利于对研制过程的在线监测, 辅以多端口光环行器、法布里-帕罗干涉仪和光纤光栅等光学器件, 不仅能够对信道间隔不同、双向传输的 DWDM 信号实现群组波长交错滤波, 还具有信道监测和色散补偿功能。

关键词 光纤通信; 密集波分复用; 多功能光学滤波器; 波长交错器; 色散补偿; 信道监测

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

Systematic Study of Multi-Function DWDM Optical Filter Composite Module

MENG Yi-chao^{1,2}, HUANG Zhao-ming², WANG Lu-tang², PENG Fen², Fang Nian²

¹ Shanghai University, Institute of Fiber Optics, Shanghai 201800, China

² Shanghai University, School of Communication and Information Engineering, Shanghai 200072, China

Abstract A novel multi-function DWDM optical filter composite module is proposed and systematically studied, complete theoretical model and numerical simulation results are given. Performance demanded for them by DWDM optical network and fabrication techniques are discussed also. Much effort was devoted to the modeling, design and analysis of bi-directional finite impulse response (FIR) type de-interleaver based on cascaded asymmetric M-Z interferometer. Adoption of wideband 3×3 fiber coupler in the structure provides such advantage as in-line monitoring of the fabrication process conveniently, meanwhile, attached by other optical components like optical circulator, fiber grating dispersion compensator, F-P wavelength channel monitor and MZI-DWDM, its function is strengthened, which is important for intelligent DWDM all-optical network especially.

Key words optical fiber communication; DWDM; multi-function composite module; optical filter; bi-directional de-interleaver; dispersion compensation; channel monitoring

1 引言

光纤通信用光学滤波器按功能可以划分为: 信道选择光学滤波器, 色散补偿光学滤波器, 增益谱均衡光学滤波器, 光延迟线等。特殊的光学滤波器, 如中心波长和带宽独立调谐滤波器和本文要讨论的多功能光学滤波器^[1-3]。后者又可细分为组合器件(如调谐式多信道色散补偿薄膜光学滤波器和 DWDM 器件构成的组合模块)和真正意义上的多功能器件(如具有色散补偿功能的增益均衡光纤光栅)等。本文用 3×3 宽带光纤耦合器作为一个基本构件对传统结构加以改进。

2 组合模块的结构分析

多功能 DWDM 光学滤波器由群组波长交错滤

波器(De-Interleaver), 密集波分复用器(DWDM), 色散补偿器(多信道或调谐式单信道色散补偿, MC-DC, SC-DC)和波长信道监测模块(C-M)组成, 如图 1 所示。各组成模块具体说明如下。

2.1 有限冲击响应型(FIR)群组波长交错滤波模块

模块由两个二级串接马赫-曾德尔干涉仪组成, 左右两部分关于 3×3 宽带光纤耦合器 C_1 对称(左半部分已省略), 如图 2 所示。当 DWDM 信号从端口 1 注入, 经二级串接的非对称 M-Z 干涉仪后, 均匀分布的 DWDM 信号按照奇数和偶数分为两组, 实现群组波长交错滤波。如果 C_1 的幅度分光比写为 $y/(1-y)/y$, 且 $y \neq 1$, 则部分光信号从光环行器的端口 7 输出, 端口 7 后串接 Fabry-Perot 干涉仪, 可实现对 DWDM 信道的在线监测。端口 3 和 5 的输出经薄膜 Gires-Tournois 干涉仪或啁啾光纤

基金项目: 上海市教委青年基金(02AQ77)资助课题。

作者简介: 孟义朝(1970-), 男, 上海大学通信学院在职博士研究生, 主要从事光纤通信方面的研究。

Email: mengyichao@sh163.net.

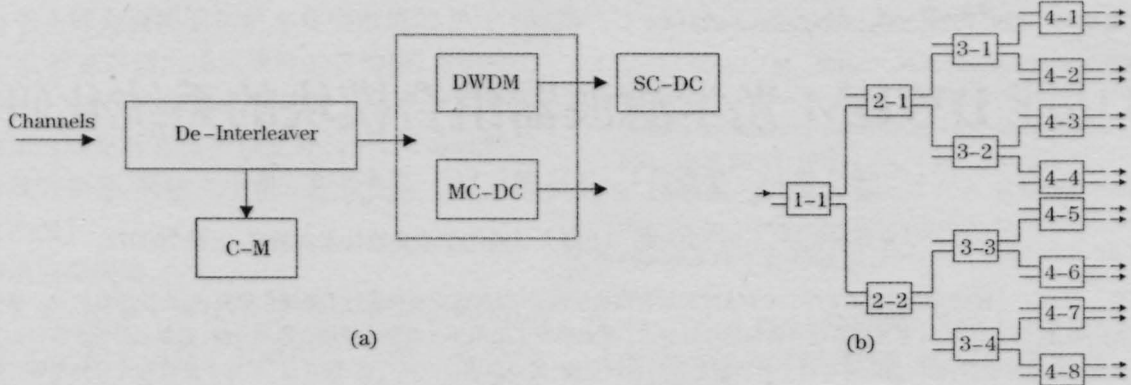


图 1 多功能 DWDM 光学滤波器的结构简图(a),4 级 M-Z 串接密集波分复用器单元(b)

Fig.1 Structure of multi-function DWDM optical filter (a), 4-stage cascaded M-Z interferometer DWDM unit module (b)

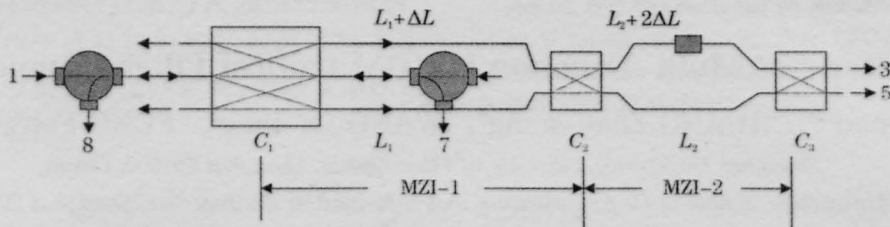


图 2 采用 3x3 光纤耦合器的双向 FIR 型波长交错滤波器的结构

Fig.2 Structure of bi-directional finite impulse response (FIR) type interleaver based on cascaded M-Z interferometers with 3x3 fiber coupler

光栅,可同时对多个 DWDM 信道进行色散补偿。采用 3x3 光纤耦合器有以下好处:多功能器件小型化;研制过程的在线监测等。

并行排列 3x3 光纤耦合器的传输矩阵

$$M = \begin{bmatrix} 0.5(1+m) & x & 0.5(m-1) \\ x & m & x \\ 0.5(m-1) & x & 0.5(1+m) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $m=(1-k_r^2)^{1/2}$, $x=jk_r/\sqrt{2}$, $k_r=\sin\sqrt{2}\theta$, $\theta=kz$, k

和 z 分别表示耦合系数和耦合长度。宽带光纤耦合器可以采用预熔锥技术研制。

2x2 光纤耦合器 C_2 和 C_3 的传输矩阵

$$N = \begin{bmatrix} \sqrt{1-k_i} & j\sqrt{k_i} \\ j\sqrt{k_i} & \sqrt{1-k_i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中角标 $i=2,3$ 分别对应耦合器 C_2 和 C_3 , k_i 表示光纤耦合器的功率耦合系数。如果端口 1 为单位输入 $a_1=1$,则端口 3 和 5 的幅度输出

$$\begin{bmatrix} a_3 \\ a_5 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \sqrt{1-k_3} & j\sqrt{k_3} \\ j\sqrt{k_3} & \sqrt{1-k_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_3 e^{-j\beta(L_2+2\Delta L)+\Delta\varphi} & 0 \\ 0 & t_4 e^{-j\beta L_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-k_2} & j\sqrt{k_2} \\ j\sqrt{k_2} & \sqrt{1-k_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 e^{-j\beta(L_1+\Delta L)} & 0 \\ 0 & t_2 e^{-j\beta L_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Q_{11}=t_1 e^{-j\beta(L_1+L_2+\Delta L)} [t_3 \sqrt{(1-k_2)(1-k_3)} e^{-j2\beta\Delta L+\Delta\varphi} - t_4 \sqrt{k_2 k_3}] \\ Q_{12}=j t_2 e^{-j\beta(L_1+L_2)} [t_3 \sqrt{k_2(1-k_3)} e^{-j2\beta\Delta L+\Delta\varphi} + t_4 \sqrt{(1-k_2)k_3}] \\ Q_{21}=j t_1 e^{-j\beta(L_1+L_2+\Delta L)} [t_3 \sqrt{(1-k_2)k_3} e^{-j2\beta\Delta L+\Delta\varphi} + t_4 \sqrt{k_2(1-k_3)}] \\ Q_{22}=t_2 e^{-j\beta(L_1+L_2)} [-t_3 \sqrt{k_2 k_3} e^{-j2\beta\Delta L+\Delta\varphi} + t_4 \sqrt{(1-k_2)(1-k_3)}] \end{cases} \quad (4)$$

$$a_3 = Ax(Q_{11}+Q_{12}), \quad a_5 = Ax(Q_{21}+Q_{22}) \quad (5)$$

式中 $A=\eta_1\eta_2\eta_3$, $\eta_i=(1-\alpha_i)^{1/2}$, η_i 和 α_i 分别表示耦合器的幅度传输系数和引入的附加损耗, t_i 表示考虑传输损耗时 M-Z 干涉仪中各干涉臂的传输系数, L_1 和 $L_1+\Delta L$ 是 MZI-1 的双干涉臂的长度, L_2 和 $L_2+2\Delta L$ 是 MZI-2 的双干涉臂的长度, $\Delta\varphi$ 是为了有效实现信道的解复用而引入的附加相移。 n_{eff} 表示单模

光纤中导模的有效折射率,弱导光纤的 n_{eff} 可用纤芯折射率近似。理想情况下 $t_1=t_2=t_3=t_4=1$, $\eta_1=\eta_2=\eta_3=1$,容易验证功率守恒。功率传输谱如图 3(a)所示。

2.2 密集波分复用模块

群组波长交错滤波器的输出端可直接串接多信道色散补偿器,也可串接密集波分解复用器,信

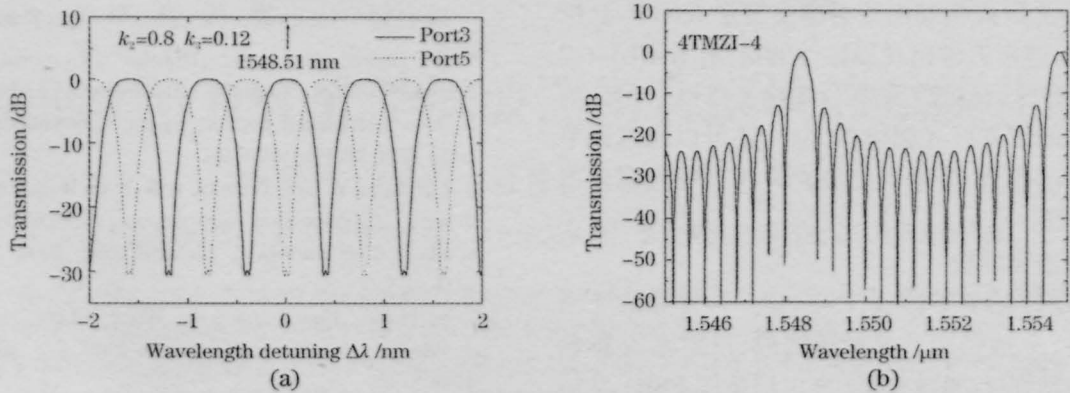


图3 群组波长交错滤波器的功率传输谱(a)和4-MZI解复用器的功率传输谱(b)

Fig.3 Power transmission spectra of flat passband interleaver (a) and power transmission spectrum of 4-stage cascaded M-Z demultiplexer (b)

道分离后再进行单信道色散补偿。DWDM有多种实现方式：阵列波导光栅 (AWG)，多个薄膜滤光片 (edge filter)的串接结构，衍射光栅，二维平面光子晶体，光纤光栅，多级 M-Z 光纤干涉仪串接^[4]等。以 M-Z 光纤干涉仪为例，功率传输谱如图 3(b)所示。

2.3 色散补偿模块

光纤光栅^[4]和薄膜 G-T 干涉仪是两种性能较好的色散补偿器件。要实现多信道色散补偿，需要设计并研制取样非线性啁啾光纤光栅，研制过程较为复杂。也可以在单根光纤上连续光刻多个光纤光

栅模拟分布反馈型 G-T 干涉仪。与薄膜光学器件相比，光纤光栅插入损耗小，可供选择的调谐方案较多；不足之处是可用带宽有限，只能对有限 DWDM 波长信道进行色散补偿。尽管紫外掩模光刻技术的突破奠定了良好的工艺基础，光纤光栅器件的真正实用化还有赖于工艺技术和相关研究的更大突破。另外，采用光纤光栅和薄膜构成的复合光学器件的抗扰动特性能得到一定程度的改善。采用常见的分段均匀的传输矩阵法，以升余弦切趾啁啾光纤光栅为例，数值研究了反射谱和群延迟谱，参量见图 4

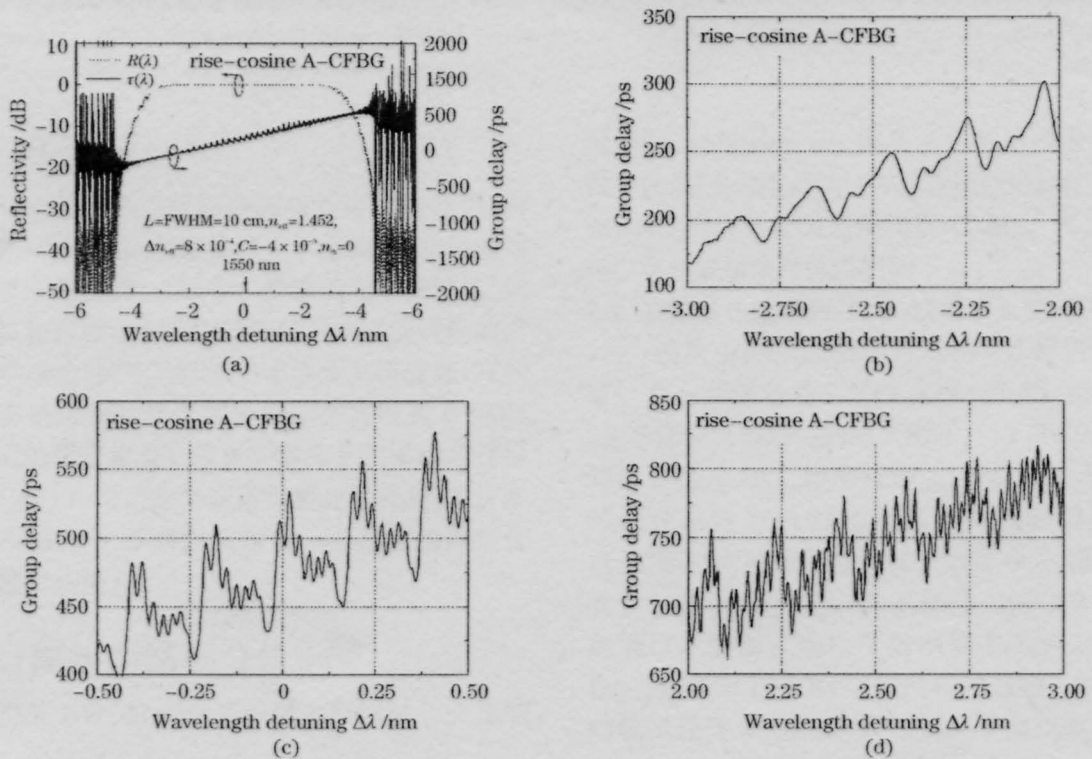


图4 升余弦切趾啁啾光纤布拉格光栅的反射谱和群延迟谱(a)，群延迟谱的局部放大(b)-(d)

Fig.4 Power reflective spectra and group delay spectra of rise-cosine apodized chirped fiber Bragg grating (a) and local amplification of group delay ripples (b)-(d)

(a)。由于光纤光栅端面折射率突变形成的 F-P 标准具效应,群延迟谱出现规律性的抖动[图 4(b)~(d)局部放大],这意味着薄膜 GTI 除了可以采用分离的或叠加的双光纤光栅模拟之外,还可以通过调节切趾函数的参量,啁啾大小和光纤长度等实现多信道色散补偿。

2.4 信道监测模块

法布里-帕罗干涉仪(F-P)是一种常见的光谱分析器件,一般采用双反射镜构成,反射率 R 影响传输谱的精细度(通带宽度/自由谱范围 FSR), R 越大,透射峰的带宽越窄,干涉条纹的可见度越大。实用的 F-P 信道监测器往往采用 R 偏小的反射镜,使 DWDM 信道位于线性度较好的透射峰的下降沿,从而可以减小温度变化的影响,通过反馈控制实现智能化信道监测。

参 考 文 献

- 1 B. B. Dingel, M. Izutsu. Multifunction optical filter with a Michelson-Gires-Tournois interferometer for wavelength-division multiplexed network system applications [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(14):1099-1101
- 2 M. J. N. Lima, A. L. J. Teixeira, J. R. F. da Rocha. Simultaneous filtering and dispersion compensation in WDM systems using apodised fiber gratings[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16):1412-1414
- 3 Meng Yichao, Huang Zhaoming, Wang Lutang. Multi-function double-ring resonant optical comb filter [C]. *SPIE*, 2002, **4906**:81-89
- 4 Huang Chi-hung, Luo Huali, Xu Senlu *et al.*. Ultra-low loss, temperature-insensitive 16 channel 100 GHz dense wavelength division multiplexers based on cascaded all-fiber unbalanced Mach-Zehnder structure[C]. *Proc. OFC'98*, TuH2
- 5 Turan Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277-1294