

文章编号: 0253-2239(2008)07-1247-05

基于薄膜滤光片的新型可重构光分插复用器

俞 侃^{1,2} 刘 文^{1,3} 黄德修^{1,2} 常 进³

(¹ 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074; ² 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074

³ 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要 研制了一种基于窄带薄膜滤光片的可重构的光分插复用器(ROADM),它由三个单芯光纤准直器、一对三端口光环形器、一对全反射镜和一片特别设计的角度调谐窄带多腔薄膜滤光片组成。通过步进电机的推动调制角度调谐滤光片的倾斜入射角度,从而实现了可选择波长上下路。对该可重构的光分插复用器进行了实验研究,并对该器件的串扰特性进行了详细的分析与计算。实验中得到的上下路信道隔离度大于 34 dB,可调谐范围大于 26 nm,与理论计算结构相符。该种新型的 ROADM 具有结构简单、可调谐范围大、隔离度高、低偏振相关损耗、成本低等特点,可广泛应用于各种密集波分复用(DWDM)光网络。

关键词 光通信; 光分插复用器; 窄带薄膜滤光片; 串扰

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1247

A Novel Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer Based on Thin-Film Filter

Yu Kan^{1,2} Liu Wen^{1,3} Huang Dexiu^{1,2} Chang Jin³

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China

² School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

³ Wuhan Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A novel reconfigurable optical add-drop multiplexer (ROADM) based on narrowband thin-film filter is proposed. The ROADM consists of three single-fiber collimators, a pair of three-port optical circulators, a pair of mirrors and one particularly designed angle-tuned narrowband multiple cavities filter. By control a stepping motor to change the incident angle of the thin-film filter, the ROADM can add or drop a selective wavelength. The characteristics of the ROADM are studied experimentally, and especially the crosstalk is analyzed and calculated in detail. In the experiment, the channel isolation is more than 34 dB and its tunable range is over 26 nm, which coincide with the results of theoretical calculation. The ROADM has many advantages such as simple structure, wide tunable range, high isolation, low polarization-dependent loss, low cost and so on. It can be widely used in practical DWDM system.

Key words optical communication; optical add-drop multiplexer; narrowband thin-film filter; crosstalk

1 引 言

光分插复用器(OADM)是密集波分复用(DWDM)系统和全光网的关键器件之一,而选择性上下路可重构光分插复用器(ROADM),则是近几年的研究热点。目前已有多种 ROADM 方案,其中

复用器+解复用器+光开关阵列的 ROADM 结构简单,但光开关的时延和器件的损耗都较大^[1],且其体积大不利于集成;基于声光可调谐滤波器的 ROADM 成本高,串扰大,偏振敏感^[2];光纤光栅型 ROADM 可调谐范围小,受外界影响大^[3];基于法

收稿日期: 2007-11-15; 收到修改稿日期: 2007-12-21

作者简介: 俞 侃(1978-),男,博士研究生,主要从事光通信技术和器件等方面的研究。E-mail: onlyfish@126.com

导师简介: 黄德修(1937-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与传感方面的研究与教学工作。

E-mail: wnlo2@mail.hust.edu.cn

布里-珀罗(F-P)腔的 ROADM 其透射曲线的通带是一个尖峰,对上下路信号有损伤,而且相邻信道隔离度低,不适于 DWDM 系统;基于阵列波导光栅(AWG)型 ROADM 成本高,温度稳定性差^[4];基于衍射分光和微机电系统(MEMS)技术相结合的波长选择开关(WSS)能实现多波长的同时下载,但是这种方案不能升级且需要较多的光学元件,实现难度大^[5]。在 DWDM 系统中薄膜干涉滤光片具有通带窄、价格低、插入损耗低、温度稳定性好等诸多优

异的特性^[6],所以应用十分广泛。本文提出了一种新型的基于多腔窄带薄膜滤光片的 ROADM,可实现节点处任意波长的上下路功能。

2 ROADM 结构原理

根据倾斜入射时窄带滤光片的透射通带和峰值会因间隔层等效折射率的变小向短波方向移动的特点,设计了一种角度调谐滤光片^[7]。该设计是一个四腔结构的多层膜系,膜系结构如下所示:

$$G \left/ \left[\begin{array}{l} (\text{HL})^7 2\text{L3H4L3H2L}(\text{LH})^7 \text{L}(\text{HL})^8 2\text{L3H4L3H2L}(\text{LH})^8 \text{L} \\ (\text{HL})^8 2\text{L3H4L3H2L}(\text{LH})^8 \text{L}(\text{HL})^7 2\text{L3H4L3H2L}(\text{LH})^7 \end{array} \right] \right/ A, \quad (1)$$

其通过对间隔层的优化调整消除了偏振光中心波长的分离等现象,在角度调谐时能具有稳定的透射特性。该角度调谐滤光片可以作为这种新型 ROADM 的核心部件。

该膜系使用的高、低折射率膜料分别为 Ta_2O_5 和 SiO_2 ^[8],其正入射时的中心波长为 1563 nm。其中:空气折射率 $n_A = 1$,基板折射率 $n_G = 1.5$,高折射率材料的折射率 $n_H = 2.05$,低折射率材料的折射率为 $n_L = 1.46$ 。膜系结构中 H 和 L 分别表示光学厚度为四分之一参考波长的高低折射率膜层^[9]。在入射角度为 20° 时,滤光片的透射中心波长能从正入射时的 1563 nm 移至 1535 nm 左右。滤光片在整个调制范围内的带宽等指标均满足 100 GHz DWDM 系统的要求并且具有很低的偏振相关损耗。

基于薄膜滤光片的 ROADM 结构如图 1 所示,它由一个角度调谐滤光片,一对置于滤光片前后且在同一光路上的光准直器和光环形器,以及两个全反射镜组成。滤光片的法线倾斜于光路放置,反射镜 A 和滤光片始终保持平行放置,反射镜 B 垂直于反射光路放置。

该型 ROADM 的调谐功能是通过控制角度调

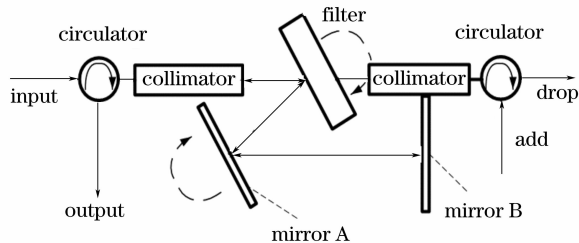


图 1 ROADM 的基本结构

Fig. 1 Structure of ROADM

谐滤光片的入射角度实现的。当外部多路复用光信号经由光环形器和光准直器后到达倾斜放置的滤光片后,滤光片滤出波长为 λ_i 的光信号经由另一个对称放置的准直器输出,输出端由一个光环形器实现该波长光信号的上下路选择。同时滤光片反射剩余波长的光信号到与其始终平行放置的反射镜 A,剩余波长的光信号经过反射后就能到达垂直于反射光路放置的反射镜 B。光信号经过反射镜组的再次反射后按同样的光路被滤光片反射后回输入端光准直器和光环形器,后经由另一根光纤输出,这样就完成了一路波长光信号的分离。需要滤出另一路波长的光信号时,改变保持平行放置的滤光片和反射镜 A 的倾斜角度,即改变滤光片的入射光角度,这样就可以滤出另一路光信号。在整个角度调制过程中,透射和反射光的光路没有位移,所以光准直器和反射镜 B 能够固定放置,降低了接收和耦合的难度,可以充分利用角度调谐滤光片的调谐性能。通过步进电机的调制转动两个平行的滤光片和反射镜 A,不断改变入射光的角度就可以实现 ROADM 的分波过程。而对光信号的上路是其逆过程,将单波长的光信号,经由右端光环形器输入准直器后,通过调整两个平行放置的滤光片和反射镜 A 的入射角度就可实现对不同波长光信号的复用过程。

该器件的结构简单,易于实现。由步进电机决定每一路波长光信号的上下路,可以动态调节和选通上下的光路,使用很灵活。在上/下载端使用光环形器,使得单波长光信号上下路在同一组滤波器件中就能实现,简化了结构。系统采用的低成本薄膜滤光片技术成熟、性能稳定、插入损耗低,因此整个系统的损耗也较低。光路传输简单,由于使用了全

反射镜使得滤波后的光信号能按照原路径返回到输入端,这样就使得两个准直器都能够固定放置,不需要有移动和追踪光信号的过程,使得光路的稳定性较高,降低了光路调试的难度,也使得工艺上更加容易实现。

3 串扰分析

除了可以灵活选通上下路波长外,该种新型的ROADM还具有串扰很小的特点。串扰主要包括同频串扰和异频串扰。异频串扰主要来自于相邻信道间的串扰,它可以用相邻信道间的隔离度来度量。计算相邻信道隔离度,可先求某下载波长峰值相邻信道处的相对光强 $1/m$ 及其对应的相位差 $\Delta\delta$ 。对于多腔窄带滤光片,其多层薄膜可以等效为两个有效界面 a 和 b 来表示。由干涉理论可知其透射特性为

$$\frac{T}{T_0} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\Delta\delta/4)}, \quad (2)$$

式中 $T_0 = \frac{T_a T_b}{1 - \sqrt{R_a R_b}}$, $F = 1 + \frac{4\sqrt{R_a R_b}}{[1 - \sqrt{R_a R_b}]^2}$, R_a, R_b 为两个等效面的反射率, T_a, T_b 为其透射率, $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n d \cos\theta$ 为其有效相位厚度^[9], d 为薄膜厚度, n 为多层薄膜的等效折射率。令(2)式 $T/T_0 = 1/m$, 有

$$\Delta\delta = \frac{4\sqrt{m-1}}{\sqrt{F}} = \sqrt{m-1} \frac{2(1-R)}{\sqrt{R}}, \quad (3)$$

同时 $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1 = 2\pi n d \cos\theta \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) = 2\pi n d \cos\theta \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$, (4)

式中 λ_1, λ_2 分别为 δ_1, δ_2 对应的波长, $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ 为波长差, $\lambda \approx (\lambda_1 + \lambda_2)/2$ 。由(3)式、(4)式可得

$$\frac{1}{m} = \frac{1}{(\Delta\lambda/\Delta\lambda_{3dB})^2 + 1}, \quad (5)$$

式中 $\Delta\lambda_{3dB} = \frac{\lambda^2}{2\pi n d \cos\theta} \cdot \frac{1-R}{\sqrt{R}}$ 。定义相邻信道隔离度为 $N = -10\lg \frac{P(\lambda_i + 1)}{P(\lambda_i)}$, 式中 $P(\lambda_i)$ 是下载信道在下载端口的输出功率, $P(\lambda_i + 1)$ 是相邻信道在下载端口的输出功率。由 $\frac{P(\lambda_i + 1)}{P(\lambda_i)} = \frac{1}{m} = \frac{1}{(\Delta\lambda/\Delta\lambda_{3dB})^2 + 1}$ 可得

$$N = -10 \lg \frac{P(\lambda_i + 1)}{P(\lambda_i)} = 10 \lg \left[(\Delta\lambda \cdot \frac{2\pi n d \cos\theta}{\lambda^2} \cdot \frac{\sqrt{R}}{1-R})^2 + 1 \right], \quad (6)$$

此处 $\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm} \times 2 = 1.6 \text{ nm}$, 多层薄膜的等效折射率 $n = 1.645$, (6)式反映了相邻信道隔离度 N 与反射率 R 的关系, 模拟得到的关系曲线如图 2 所示。实际中 R 取 99.5% 时, 得到的理论相邻信道隔离度为 41 dB。

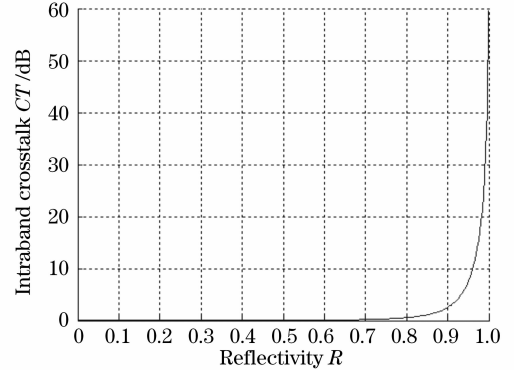


图 2 隔离度 N 与反射率 R 的关系曲线

Fig. 2 Isolation degree N versus reflectivity R

同频串扰主要来自于同一信道间的串扰,是由于系统的反射率不为 1 导致上下路信号互相渗透引起的串扰。同频串扰 CT 可定义为

$$CT = -10 \lg \frac{T(\lambda_i)}{R(\lambda_i)} = 10 \lg \left[\frac{R(\lambda_i)}{1 - R(\lambda_i)} \right], \quad (7)$$

该器件结构中由于反射镜组的作用,每次滤波时光信号都两次经过薄膜滤光片,所以两次滤波后对单波长的光信号滤除更为彻底,这样在同一波长光信号再次上载复用到多路光信号中时,在系统中所引起的同频串扰将大为降低,使得信道隔离度大大提高。同频串扰与反射率的关系曲线如图 3 所示,实际中 R 取 99.5% 时,得到的同频串扰为 60 dB。

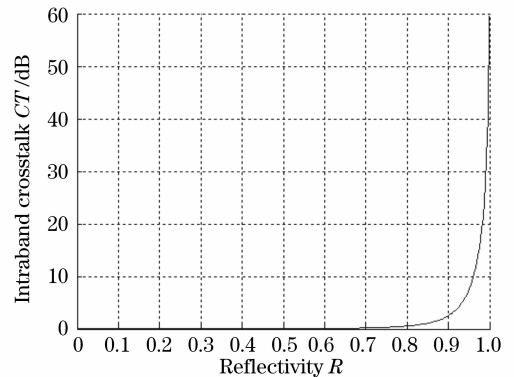


图 3 同频串扰 CT 与反射率 R 的关系曲线

Fig. 3 Inband crosstalk (CT) versus reflectivity R

4 实验结果

实验用的角度调谐滤光片是按照设计的膜系(1)在 Veeco 设备上制备的,ROADM 的测试平台

在武汉光迅公司搭建并调试。实验中使用光源是 Agilent 83438A ASE 宽带可调谐激光测试系统,所用的单芯光准直器和光环形器是光迅公司生产的,损耗分别小于 0.15 dB 和 1 dB,装置通过控制步进电机的推拉步数来实现对滤光片的角度调谐。起始入射角度为 4.8° ,对应中心透射波长 1561 nm;最大入射角度为 20° ,对应中心透射波长 1535 nm。由于该滤光片设计的最大调制角度为 20° ,所以分别测试了滤光片在正入射和 20° 倾斜入射时上路信号在光谱仪上的测量曲线,结果如图 4 所示。经测试,透射峰值的插入损耗小于 2 dB。从测试结果看峰值

平坦,带宽稳定没有变化,透射曲线 3 dB 带宽大于 0.55 nm,透射峰值的通带大于 0.35 nm,截止带宽小于 1.2 nm,矩形度较高,偏振相关损耗小于 0.2 dB,完全符合 100 GHz DWDM 系统的性能指标要求。

从图 4 中可以看出,当 ROADM 核心调谐滤光片从初始角度 4.8° 调谐到 20° 时,透射峰值从 1561 nm 偏移到 1535 nm,透射光谱和带宽稳定。可见器件的有效调谐量大于 26 nm,基本覆盖了整个 C 波段,完全能应用于信道间隔为 0.8 nm 的 100 GHz DWDM 的 32 信道系统。

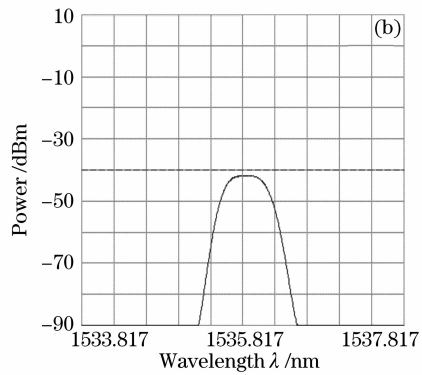
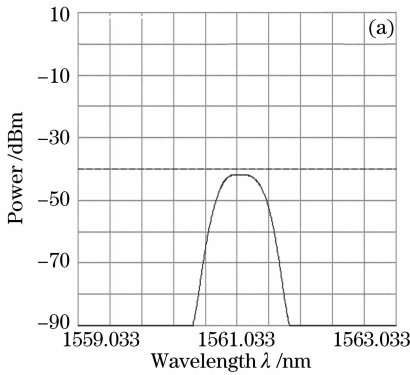


图 4 ROADM 下载信道光谱。(a) 在 4.8° 时, (b) 在 20° 时

Fig. 4 Measured spectrum of the ROADM at the drop port, at the incident angles of 4.8° (a), 20° (b)

为检测下载信道对相邻信道的影响,在调谐范围的中间处 1545 nm 按照 100 GHz DWDM 的信道指标输入了三个相邻的信道,光谱如图 5 所示。在下载了中间信道后从输出端口看信道下载后对相邻信道的影响,正确的 ROADM 在下载了一路波长的光信号后只应包含该路波长信号的峰值,同时对相邻信道的光信号不应有影响,其测量光谱如图 5 所示。从图 4 可以看出直通时 ROADM 器件的插入损耗小于 2 dB。

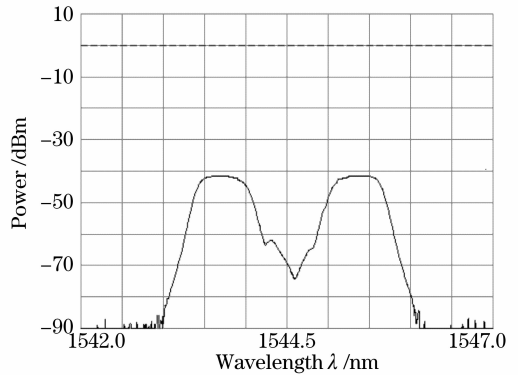


图 6 ROADM 下载后相邻信道的输出光谱

Fig. 6 Output spectrum of the isolation channels after the ROADM drops one channel

从图 6 可以看出,ROADM 下路对相邻信道没有损伤,同时从该光谱可以看出器件的相邻信道隔离度大于 34 dB,与前面理论计算的结果较为接近,完全达到了目前商用 ROADM 器件对相邻信道隔离度的指标要求。在不使用反射镜组直接测试滤光片反射端口时其隔离度只有 28 dB,可见使用反射镜组后反射光两次通过滤光片滤光后,相邻信道隔离度能有较大的提高,进一步减小了串扰。

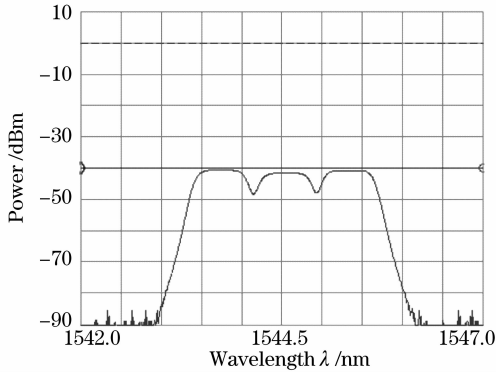


图 5 DWDM 三个相邻信道的直通光谱

Fig. 5 Measured output spectrum of three DWDM isolation channels

4 结 论

提出了一种新型的基于角度调谐滤光片的 ROADMs, 理论分析和实验证明它具有结构简单、插入损耗低、串扰小、带宽指标好、可调谐范围大、偏振相关损耗低等优点。通过步进电机调制滤光片的倾斜入射角度实现了可调谐的光信号上下路, 同时对非下路信号影响很小。器件的指标完全可以应用于 100 GHz DWDM 系统中, 对可重构光分插复用器的设计和使用具有较高的指导意义, 同时该器件具有较大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 M. J. Kim, H. K. Kim, H. M. Lee *et al.*. Low-cost optical add drop multiplexer module using a 2×2 port optical device[J]. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(9): 2489~2490
- 2 Y. K. Chen, C. J. Hu. Low-crosstalk and compact optical add-drop multiplexer using a multiport circulator and fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(10): 1394~1396
- 3 H. Harald, R. Ulrich, S. Klayse. Tapered acoustical directional couplers for integrated acousto-optical mode converters with weighted coupling[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(3): 364~374
- 4 T. Yoshi, I. Yasuyuki, I. Motohaya *et al.*. Arrayed-waveguide grating multiplexer with loop-back optical paths and its applications[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 977~984
- 5 Yuta Goebuchi, Tonoyuki Kato, Yasuo Kokutun. Multiwavelength and multiple hitless wavelength-selective switch using series-coupled microring resonators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(9): 671~673
- 6 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng *et al.*. Design of DWDM thin film interference filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 794~797
顾培夫, 白胜元, 李海峰等. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 794~797
- 7 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. Optimal design and arithmetic on the stack of the angle-tuned filter[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1287~1291
俞侃, 刘文, 黄德修等. 角度调谐滤光片的膜系优化设计算法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1287~1291
- 8 Dan Wang, Zhengxiu Fan, Jianbing Huang *et al.*. Symmetrical periods used as matching layers in multilayer thin film design[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(11): 675~677
- 9 Ma Xiaofeng, Wang Dan, Liu Dingquan *et al.*. Design of non-polarizing broadband antireflection coating using equivalent layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 563~566
马小凤, 王丹, 刘定权等. 利用等效层的消偏振宽带减反膜设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 563~566