

文章编号: 0253-2239(2003)09-1123-4

密集波分复用薄膜滤光片的群延迟补偿设计

陆 巍 顾培夫 刘 旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 设计了一种基于薄膜干涉理论的反射式相位补偿器件,用以补偿密集型波分复用窄带滤光片所产生的群延迟,使 50 GHz 薄膜滤光片的群延迟特性适应于 40 Gb/s 系统的要求,在 0.2 nm 带宽下群延迟波动从 10 ps 左右下降到 0.76 ps 以下。

关键词: 薄膜光学; 薄膜滤光片; 群延迟; 相位补偿器

中图分类号: O484.4 文献标识码: A

1 引 言

滤波器是实现密集波分复用(DWDM)系统的关键器件。目前最成熟的滤波器是利用光学薄膜技术制造的。实践证明,薄膜滤波器具有极低的温度系数($<0.002 \text{ nm}/^\circ\text{C}$)、长的时间稳定性和很小的偏振相关损耗,被广泛用于分波/合波器(Mux/Demux)、分插复用器(OADM)、增益平坦滤波器(GFF)等光无源器件上。

光学薄膜滤波器(Thin film filter, 缩写为 TFF)虽然是一项比较成熟的技术,但是随着复用程度的提高,光纤中的信道越趋密集,单信道的数据传输速率亦飞速上升。在此情况下原本广泛应用的窄带滤光片的性能已不敷其用,尤其是在 40 Gb/s 系统中,而薄膜滤光片所固有的色散特性使得误码率显著增加,因此必须加以改进,以降低其色散对系统的影响。

目前国际上对色散的研究大都集中在光纤传输上,对滤波器等无源器件色散特性研究还很少。本文结合前人数字滤波理论成果并应用光学薄膜理论设计了一种基于反射的群延迟补偿器件,用以改善薄膜滤光片的色散性能,适应下一代 40 Gb/s 系统的发展。

2 薄膜滤光片的色散表示

薄膜滤光片是一种色散元件,信号经过滤光片后波形会展宽、失真。这种现象可用通带的群延迟(Group delay)参量表征。定义为

$$T_g(\omega) = -\partial\phi(\omega)/\partial\omega,$$

其中 ϕ 为透射的相位变化, ω 为角频率。 ϕ 的单位为弧度,群延迟的单位为 s。

另一种表示方法是用群延迟色散(Group delay dispersion, 缩写为 GDD)来描述^[1]:

$$D = \tau'_g(\omega) = -\partial^2\phi/\partial\omega^2,$$

群延迟的物理意义在于可表征不同频率信号通过滤波器时产生的时间延迟。如果带通滤波器通带的透射率为常量 A , 通带内的群延迟为常量 τ_g , 则输出信号跟输入信号形状相同, 只是时间延迟了 τ_g , 振幅是原来的 A 倍, 相位延迟了一个常量 ϕ , 这是理想的情况。对于实际的带通滤光片而言, 通带内的群延迟并不是常量, 而是有一定的波动。这就说明对于不同频率, 经过带通滤光片需要不同的时间, 因此会造成波形的失真。

决定数字信号质量的是比特周期(bit period), 根据贝尔实验室的实践, 两个信号间 0.1 个位周期的变化是可以接受的。于是对 10 Gb/s 的系统而言, 通带的群延迟波动应该小于 10 ps; 对 40 Gb/s 的系统, 群延迟的波动应该小于 2.5 ps。

图 1 表示一个 50 GHz 滤光片的透过率、反射率曲线和群延迟曲线, 其通带范围内的群延迟波动幅度在 40 Gb/s 时大约为 10 ps, 因此不适用于 40 Gb/s 系统, 必须对群延迟进行补偿或优化设计。

3 薄膜滤光片群延迟优化或补偿的理论基础

3.1 关于优化

由于光学滤波器与电学滤波器有着较直观的可

E-mail: luwei2000@hotmail.com

收稿日期: 2002-06-28; 收到修改稿日期: 2002-09-28

比性,因此许多研究人员都运用数字信号理论来分析光学滤波器的各种特性^[2~7]。

研究表明,根据幅度响应与相位响应,薄膜滤波器可分为最小相位滤波器(Minimum phase filter,缩写为 MPF)和非最小相位滤波器(Nonminimum phase filter,缩写为 Non-MPF)^[4,5]。透射式薄膜滤光片属于最小相位滤波器,反射式薄膜滤光片属于非最小相位滤波器,两者皆为线性系统中的概念。所谓最小相位滤波器就是指这种滤波器的幅度响应与相位响应具有唯一确定关系,亦即是说滤波器所要求的振幅曲线确定后其相位曲线也已确定,该相

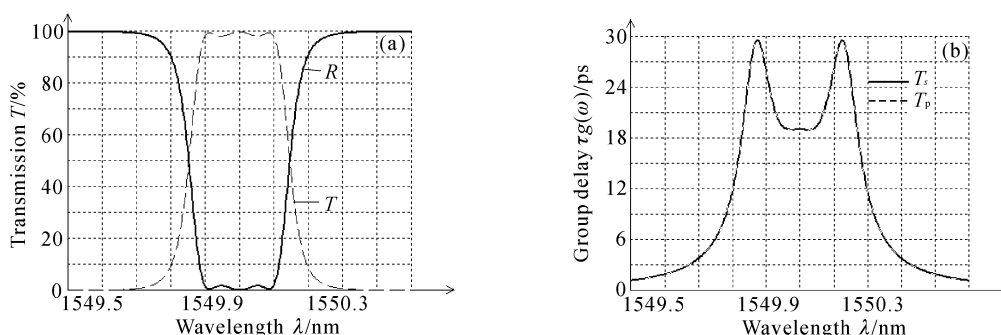


Fig. 1 The performance of 50 GHz thin film filter at 1550 nm. (a) The transmittance and reflectance curves; (b) The group delay curve

3.2 关于补偿

薄膜滤光片只有在反射时才是非最小相位滤波器,即可在保证全反射的同时调整相位曲线使整个相位为线性。所以对 50 GHz 滤光片的补偿应采用反射式的补偿板(Reflective phase compensator,缩写为 RPC),如图 2 所示。

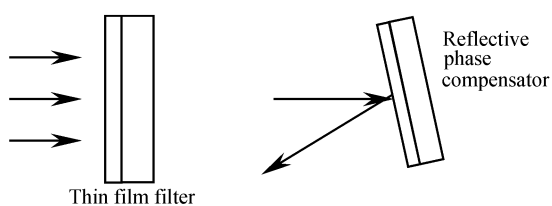


Fig. 2 Schematic of compensation setup of 50 GHz thin film filter. RPC: reflective phase compensator; TFF: thin film filter

由数字信号理论可知任何非最小相位滤波器都可以表示为一个最小相位滤波器加一个全通滤波器(APF, all-pass filter),全通滤波器实际是非最小相位滤波器的一个极端,其幅度响应为一常量而相位响应可以任意变化,因而经常被用于相位补偿。G-T 干涉仪(Gires-Tournois interferometer)就是一种单级的全通滤波器^[6],基于薄膜的 G-T 干涉仪还可做成多级

位曲线可以对振幅响应作希尔伯特变换(克拉默斯-克勒尼希关系)求得。所谓非最小相位滤波器则是指相位与振幅不具有确定关系,所以可以在保证振幅不变的情况下,获得所需的相位曲线。

由最小相位滤波器性质,振幅响应与相位是希尔伯特变换对,可推出大的群延迟总是出现在振幅剧烈变化处,如通带和截止带边缘;或者说大的群延迟必然造成振幅变形,如图 1 所示。对于密集波复用滤光片来说由于必须首先保证滤光片的通带特性,因此相位曲线优化的空间相当小,应该着眼于其相位或群延迟的补偿。

的全通滤波器使补偿曲线变得平坦,因此可以用 G-T 腔设计反射式相位补偿器件。

4 补偿设计结果与讨论分析

考虑对光通信用的 50 GHz 滤光片在 -0.5 dB 带宽的群延迟进行补偿,使其群延迟变化小于 2.5 ps。50 GHz 滤光片带宽如表 1 所示。滤光片的膜系结构为

Glass | (HL)¹⁰ HHLLL (HL)²⁰ LLH (HL)²¹ H (HL)¹⁰ 0.59525H0.73669L | Air

其群延迟曲线如图 1(b)所示。

Table 1 The bandwidth of 50 GHz thin film filter

Center wavelength λ_0	$\Delta\lambda_{-0.5 \text{ dB}(90\%)}$	$\Delta\lambda_{-3.0 \text{ dB}(50\%)}$	$\Delta\lambda_{-20 \text{ dB}(1\%)}$
1550.0 nm	>0.22 nm	<0.3 nm	<0.6 nm

为了补偿群延迟,设计了反射式的补偿薄膜系统如图 2 所示,工作在 5° 入射情况下以使入射光与出射光分离。在设计中首先注意到 50 GHz 滤光片的群延迟曲线在 -0.5 dB 带宽中存在一个宽约 1 nm 的较为平坦的波谷,故补偿曲线也要在该区域中有平顶,由前所述可以通过叠加 G-T 腔得到,其次谷壁近似直线,因此可引入相反斜率的补偿曲线使

其平坦。通过尝试发现两腔结构已经可以满足要求,设计参量总结为:入射介质为空气($n_0=1.0$),基底为玻璃($n_s=1.52$);镀膜材料为 SiO_2 ($n_L=1.47$) 和 Ta_2O_5 ($n_H=2.065$);总的层数为 116 层。设计得到的膜系结构为

Glass | (HL)²² 10H (LH)¹⁸ L6HL (HL)⁹ | Air
可认为是 (HL)²² 10H (LH)⁹ 和 (LH)⁹ L6HL (HL)⁹ 的组合,前者是 G-T 腔,后者为法布里-珀罗腔。两个腔的反射层和间隔层对膜系特性影响各有不同。对于反射层(LH)¹⁸层数越多则膜系反射率越大,(HL)¹⁶反射率为 95%,(HL)¹⁹反射率达到 99.3%,(HL)²²时已达到 99.9%,且能同时保证群延迟特性不变。对于反射层(LH)¹⁸,层数增加群延迟值迅速上升,且反射率在 1550 nm 处迅速降低;层数减少群延迟值减少并出现波动,反射率基本无影响。反射层(HL)⁹层数发生变化则反射率均变小,且层数增加反射率与群延迟都产生波动,层数越多波动幅度越大;层数越少群延迟曲线越尖锐。间隔

层 10H 随层数 2H 变化反射率基本不变,群延迟随层数增加而变大,曲线变尖锐;层数减小群延迟值变小并有波动出现。间隔层 6H 层数变化对反射率也基本没影响,且随层数增加群延迟曲线出现波动且幅度越来越大,随层数减少群延迟曲线变尖锐。

该膜系在正入射和 5°入射时的反射率和反射群延迟如图 3 所示。可以看出,在滤光片中心波长,补偿板的反射率在 99.9% 以上,但群延迟得到了很好的补偿。表 2 是 50 GHz 滤光片和反射式相位补偿系统在正入射时的群延迟补偿情况。从表中总和可以看出,在以 1550 nm 为中心的 ± 0.1 nm 范围内 $T_g(\omega) < 0.23$ ps;但在 ± 0.15 nm 范围内则增大到约 10 ps。表 3 和表 4 分别表示 5°入射时 p 分量和 s 分量的情况。显然,对 p 偏振光在 1550 nm ± 0.1 nm 范围内左右 $T_g(\omega) < 0.33$ ps;但在 ± 0.15 nm 范围则增大到约 10.2 ps。而对 s 偏振光在 1550 nm ± 0.1 nm 范围内 $T_g(\omega) < 0.76$ ps;但在 ± 0.15 nm 范围则增大到约 11.7 ps。

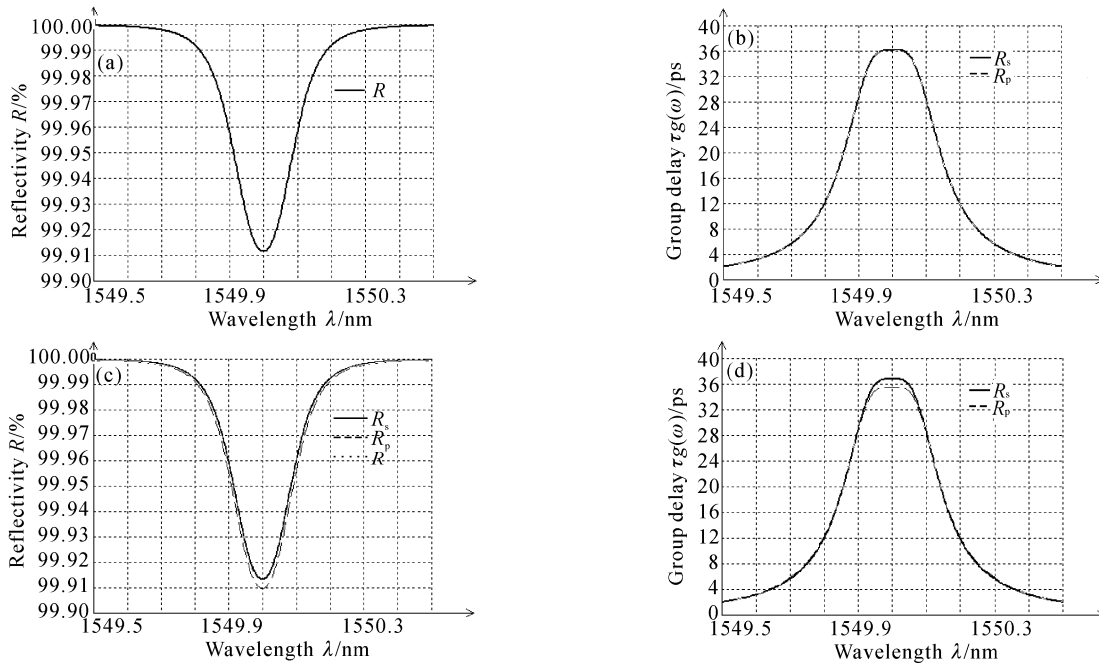


Fig. 3 The performance of reflective phase compensator (RPC). (a) The reflectance of RPC at normal incidence; (b) The group delay of RPC at normal incidence; (c) The reflectance of RPC at 5° incidence; (d) The group delay of RPC at 5° incidence

如图 3 所见,特性曲线以中心波长 1550 nm 左右对称,因此表 2~表 4 仅列出中心波长以左数据。

如表 2~表 4 所见,该器件在 ± 0.1 nm 范围内很好地补偿了滤光片的群延迟,只要制造时能保证反射式相位补偿的中心波长与窄带滤光片一致,则上述设计是个很好的群延迟补偿器。但此设计补偿带宽尚较窄,在 ± 0.15 nm 时整个器件的群延迟迅速增大到

11 ps 左右,因此可对该设计作进一步改进,通过叠加腔数以得到更大范围的补偿。由表 3 及表 4 可知该补偿板存在轻微的偏振模式色散,p 光与 s 光的最大群延迟差在中心波长 1550 nm 处,约为 1.26 ps,此时 p、s 光的反射率最小均为 98.7%,但此偏振色散对系统的影响不大。

Table 2 The group delay $\tau_g(\omega)$ /ps of reflective phase compensator (normal incidence)

Wavelength λ /nm	50 GHz filter	RPC	Sum
1549.8	12	12.25	24.25
1549.85	25.2	19.05	44.25
1549.87	29	22.73	51.73
1549.9	26.2	28.77	54.97
1549.96	19.2	35.96	55.16
1550	19	36.2	55.2

Table 3 The group delay $\tau_g(\omega)$ /ps of reflective phase compensator (5° incidence, p-polarization)

Wavelength λ /nm	50 GHz filter	RPC	Sum
1549.8	12	12.38	24.38
1549.85	25.2	19.2	44.4
1549.87	29	22.81	51.81
1549.9	26.2	28.68	54.8
1549.96	19.2	35.4	54.6
1550	19	35.55	54.55

Table 4 The group delay $\tau_g(\omega)$ /ps of reflective phase compensator (5° incidence, s-polarization)

Wavelength λ /nm	50 GHz filter	RPC	Sum
1549.8	12	12.1	24.1
1549.85	25.2	18.9	44.1
1549.87	29	22.64	51.64
1549.9	26.2	28.85	55.05
1549.96	19.2	36.53	55.73
1550	19	36.81	55.81

结论 此器件通过一个法布里-珀罗腔与一个 G-T 腔的叠加得到结构简单、性能良好的群延迟补偿器。该器件可在 ± 0.1 nm 范围对 50 GHz 滤光片进行相位补偿使其群延迟小于 0.76 ps, 满足薄膜滤光片在 40 Gb/s 系统中通带波动需小于 2.5 ps 的苛刻要求。

参 考 文 献

- 1 Macleod A. Challenges in the design and production of narrow band filters for optical fiber telecommunications. *Proc. SPIE*, 2000, **4094**:46~57
- 2 Madsen C K, Lenz G. Optical all-pass filters for phase response design with applications for dispersion compensation. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(7):994~996
- 3 Madsen C K, Lenz G. A multi-channel dispersion slope compensating optical allpass filter. *OFC '2000*, (2):94~96
- 4 Lenz G, Eggleton B J *et al.*. Dispersive properties of optical filters for WDM systems. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **34**(8):1390~1402
- 5 Lenz G, Eggleton B J, Madsen C K *et al.*. Optimal dispersion of optical filters for WDM systems. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4):567~569
- 6 Lenz G, Eggleton B J, Madsen C K *et al.*. Optical delay lines based on optical filters. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(4):525~532
- 7 Lenz G, Madsen C K. General optical all-pass filter structures for dispersion control in WDM systems. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7):1248~1254

Designing of a Reflective Phase Compensator for DWDM Thin Film Filter's Group Delay

Lu Wei Gu Peifu Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 28 June 2002; revised 28 September 2002)

Abstract: A reflective phase compensator (RPC) based on thin film interference theory is constructed. It can be used to compensate the group delay (GD) of an extra-narrow band pass filter that cannot be compatible with the 40 Gb/s system. The group delay for an extra-narrow band filter with bandwidth of 0.2 nm is reduced from about 10 ps to <0.76 ps by means of combination of a 50 GHz narrow band thin film filter and RPC filter.

Key words: thin film optics; thin film filter; group delay; phase compensator