

基于法布里-珀罗腔反射光相位特性设计的梳状滤波器 *

陈海星 李海峰 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: 提出了一种用于设计密集波分复用全光网络中梳状滤波器的方法,该器件利用法布里-珀罗腔反射光相位的非线性性质,结合光的相位在一定光程差下随频率呈线性周期变化的特点,通过使这样两束相位匹配的光发生干涉,得到所需滤波特性。运用薄膜特征矩阵对模型进行了模拟计算,并分析了计算结果,论证了这种结构的可行性。

关键词: 应用光学;法布里-珀罗腔;相位;干涉;密集波分复用;梳状滤波器

中图分类号:TB851⁺.7 文献标识码:A

1 引言

当前随着密集波分复用(DWDM)技术的迅猛发展,在一根光纤上复用的信道愈来愈多,从而使频率间隔变得越来越窄。加拿大的Nortel已实现了160个信道的复用,而日本的Fujitsu更是达到了176个信道的复用^[1]。复用及解复用技术是密集波分复用的关键部分,目前主要的复用及解复用技术有:薄膜滤光片,光纤布拉格光栅(FBG)、阵列波导光栅(AWG)和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)等。它们目前能实现的信道间隔为25 G和50 G,但都存在各自的缺点:薄膜滤光片技术已经非常成熟,成本也较低,但是复用度低,目前制造小于50 G的薄膜滤光片已非常困难。而光纤布拉格光栅和马赫-曾德尔干涉仪的温度稳定性都较差,复用度也不高。阵列波导光栅是当前最有竞争力的技术,它最明显的特点就是复用度较高。但在实际实现时,还存在插入损耗大、偏振模式带来的色散损耗(PDL)也较大等问题^[2]。梳状滤波器(Interleaver)技术的产生即是为了解决目前越来越密集的信道复用问题。它的原理就是将信道分成奇偶两个通道,形成一个梳状的输出光谱,使输出的光信号的信道间隔加倍。因此,使用较低复用度的滤光片就可实现较高的复用及解复用

度,且可多级串联,即灵活,又降低成本。

当前,国外已经有一些公司生产出了商用的50 G、100 G的梳状滤波器,而国内的研究还不多见。构造这种梳状滤波器的方法很多,包括晶体加波片、薄膜法布里-珀罗腔堆、马赫-曾德尔干涉仪等。利用法布里-珀罗腔器件在波分复用中实现复用与解复用,已经有很多文献报道^[3-4]。但是,随着全光网技术发展到密集波分复用阶段,仅靠单个法布里-珀罗腔已不能满足密集波分复用的平坦性要求了。本文通过对法布里-珀罗腔的反射光的相位特性研究,利用干涉原理,使光经过法布里-珀罗腔反射后,与反射镜的光发生干涉,得到梳状输出光谱,从而达到将奇偶信道分开的目的,同时满足密集波分复用所需截止度和平坦度。这个系统的光学结构较简单,元件使用少,易实现小型化封装。

2 法布里-珀罗腔的相位计算和分析

法布里-珀罗腔主要是由两块平面玻璃板或石英板构成,两块板朝里的表面各镀有部分透射的高反射膜,并且相互平行,因而当中形成一个平行平面空气层。入射光束在两块板之间发生多光束干涉。由艾里(Airy)公式^[5],反射光的强度为

$$I_r = \frac{4R\sin^2(\delta/2)}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\delta/2)} I_i, \quad (1)$$

其中 I_i 为入射光强度, R 为平板表面反射率, $\delta = (4\pi/\lambda_0)nh \cos \theta$, h 为两板间的厚度, λ_0 为真空

* 浙江省自然科学基金资助课题。

E-mail: opticstar@sohu.com

收稿日期 2001-12-29; 收到修改稿日期 2002-04-08

波长 λ 为两板间介质折射率, θ 为入射光在介质中的折射角。

当法布里-珀罗腔的两块平板的反射率不同时, 可通过类似的推导得到反射光的电矢量振幅和强度为^[6]:

$$A_r = \frac{r_1 + r_1 r_2 \exp(i\delta)}{1 + r_1 r_2 \exp(i\delta)} A_i, \quad (2)$$

$$I_r = \frac{r_1^2 + r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos \delta}{1 + r_1^2 r_2^2 + 2r_1 r_2 \cos \delta}. \quad (3)$$

相位 ϕ 由下式确定

$$\tan \phi = \frac{-r_2(1 - r_1^2) \sin \delta}{r_1(1 + r_2^2) + r_2(1 + r_1^2) \cos \delta}, \quad (4)$$

其中 r_1 为第一块平板的反射系数, r_2 为第二块平板的反射系数。

在设计的梳状滤波器中, 为了使大部分光能反射出来, 减少损耗, 选择法布里-珀罗腔两块板的反射率不一样。一般地, 可以利用(3)式和(4)式分别计算反射出来的光的强度和相位。在本文中, 我们采用薄膜的特征矩阵方法来计算。

由薄膜理论^[6] 膜系的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & (i/\eta_j) \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中第 j 层膜的相位厚度 $\delta_j = (2\pi/\lambda) n_j d_j \cos \theta_j$, n_j 为折射率, d_j 为物理厚度, 折射角 θ_j 由折射定律决定。 $\eta_j = \begin{cases} n_j / \cos \theta_j \\ n_j \cos \theta_j \end{cases}$ 分别对应于 p 偏振光和 s 偏振光。由(5)式, 最后可以得到多层膜和基片的组合导纳 $Y = C/B$, 这样可求得反射光强度 I_r 和反射相位 ϕ 分别为^[6]

$$I_r = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* I_i, \quad (6)$$

$$\phi = \arctan \left[\frac{i\eta_0 (CB^* - BC^*)}{\eta_0^2 BB^* - CC^*} \right]. \quad (7)$$

其中 η_0 为入射介质导纳。

将法布里-珀罗腔中间层分成 n 个 $\lambda/4$ 空气膜层, 这样就可以完全应用薄膜特征矩阵的方法来计算了。由(5)式~(7)式, 分别计算得到法布里-珀罗腔的反射光的相位和强度曲线如图 1、图 2 所示。

图 1 表示了从法布里-珀罗腔中反射出来的光的相位与频率之间的关系, 其中, 频率间隔采用了国际电信联盟(ITU)规定的标准 100 G 间隔。从图中看出, 适当调整法布里-珀罗腔的前、后板反射率和腔长, 可以得到每 100G 间隔, 相位正好变化一个

周期($-\pi \sim \pi$)。

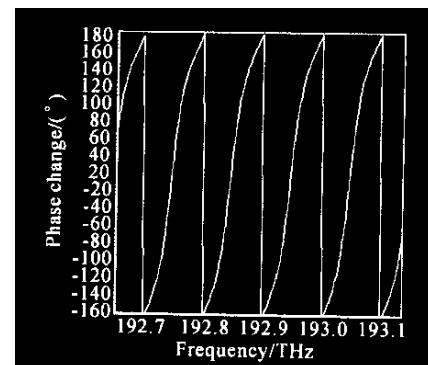


Fig. 1 F-P cavity's reflective phase curve

图 2 表示的是反射光强度和频率之间的关系图。由图可知, 反射光的出射强度随频率的变化也呈现周期性变化的特点, 而且大部分的光均被反射出来。但此时从法布里-珀罗腔反射出来的光的光强分布还不是用于密集波分复用的梳状滤波函数曲线, 因为其相邻通道的截止度和单个通道的平坦度都不够。因此, 必须对其进行处理。

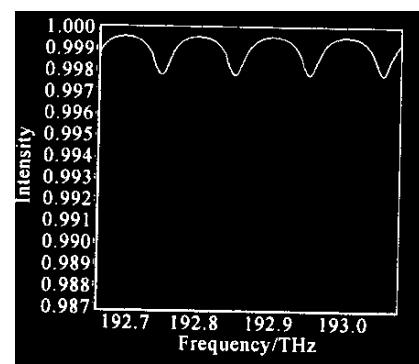


Fig. 2 F-P cavity's reflective spectrum curve

由两束光的干涉原理可知, 干涉光的光强 I 可以由 $I = 4\cos^2(\delta/2)$ 计算, 其中 $\delta = \delta_1 - \delta_2$ 为两干涉光的相位差, δ_1 为第一束光的相位, δ_2 为第二束光的相位。要构造一个梳状光谱函数, 目的就是要使 I 成为一个随频率变化的梳状周期函数。换言之, 需要相位差在透过频率附近尽量接近零, 而在离开透过频率的区域尽可能的大。这样, 经过这种周期相位调制的干涉光谱曲线将在所需透过频率处有一个透过带, 而在相邻频率处有一个截止带, 由于这种变化的周期性, 就有可能得到一个梳状的输出光谱曲线。

基于以上分析, 考虑平面反射镜(介质膜)当反射不同频率光时, 在一定光程差的情况下, 其相位具有相应的线性周期性。可以通过调整光程差来达到同法布里-珀罗腔反射光的相位互相匹配的要求,

从而使它们干涉以后的光强分布满足上面所分析的要求。

一定光程差下,不同频率光产生的线性相位可以根据以下公式计算:

$$\delta = (2\pi n d / c) f, \quad (8)$$

其中 n 为介质折射率, d 为光所经过的路程, c 为光在真空中的速度, f 为光的频率。

将(8)式两边微分,就得到相位改变量和频率间隔之间的关系为

$$\Delta\delta = (2\pi n d / c) \Delta f. \quad (9)$$

从(8)式、(9)式可以看出,随着频率的增加,相位也线性增加。同时,对于所取光频的周期性间隔,其相位也是在 $-\pi \sim \pi$ 间周期性变化的。

适当地调节反射镜的位置,从而调整光程差,即改变公式(8)式中的 d ,可以得到从反射镜出来的反射光相位在所需波长范围的变化情况,将其与法布里-珀罗腔相位图同时作于一幅图上,就能清楚地看到其相位差的变化情况,如图3。图中线性部分是反射镜的反射光相位变化曲线,通过调整法布里-珀罗腔的中心波长,其相应的相位值所对应的点亦发生改变,由于反射光相位曲线的周期性,故可使整个曲线向左或右移动,达到两相位变化曲线在所需波段匹配。如图3所示,两曲线所表示的相位差在 192.9 THz、193.1 THz 等奇数频率点处均为零,在其附近处差值也非常小;而在 192.8 THz、193.0 THz 等偶数频率点处相差为 π ,在其附近处相差很大。反之,适当调整法布里-珀罗腔和反射镜的参数,也可以使得奇偶频率点的情况相反。当这样的两束光发生干涉时形成的光谱输出将是一个梳状函数,计算结果如图4所示。

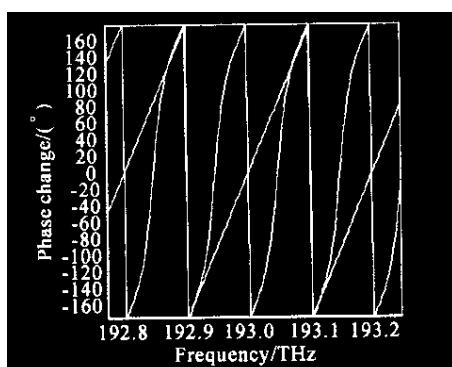


Fig. 3 F-P cavity and Mirror's matching phase curves

图4是本文设计得到的一个16通道的梳状滤波器输出光谱曲线的一部分,从图中可以看出,在奇

数波长点透过率极大,而在偶数波长点透过率极小(均在 -30 dB 以下)。按照中心波长为 1550.12 nm 计算,100 GHz 间隔对应 0.8 nm 带宽。这样它在 -0.5 dB 的带宽为 0.64 nm(如图5),-25 dB 的带宽为 1.12 nm(如图6),而且它的透过率曲线的波纹度极小,最大不超过 0.004 dB。这样,当间隔为 100 GHz 的光信号通过梳状滤波器解复用后,透过波长的光信号之间的间隔变为 200 GHz,此时即可使用 200 GHz 的滤光片来进行处理了。

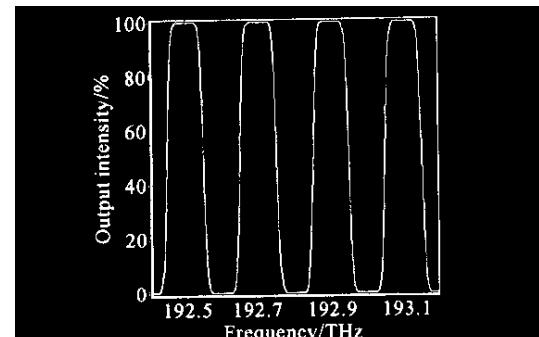


Fig. 4 Interleaver's output spectrum

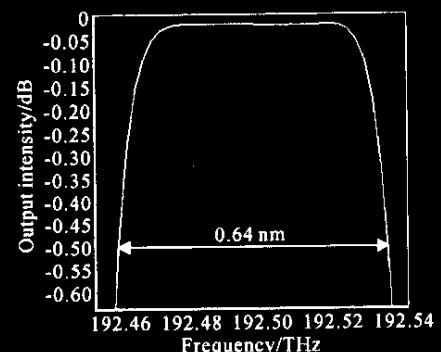


Fig. 5 Bandwidth at -0.5 dB for the interleaver showed in Fig. 4

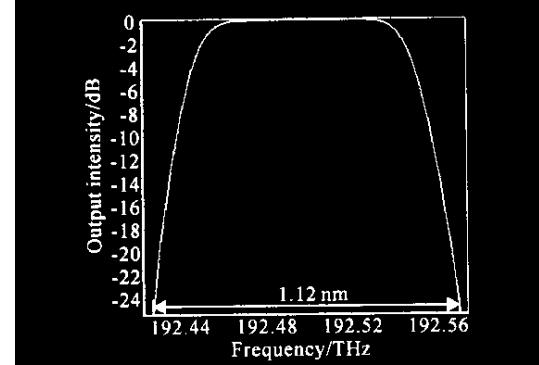


Fig. 6 Bandwidth at -25 dB for the interleaver showed in Fig. 4

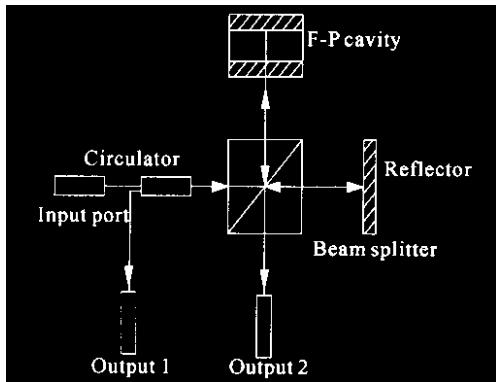


Fig. 7 Interleaver optical design diagram

3 光学系统设计

根据前面的理论分析和计算,所设计的光学系统如图7所示。整个系统主要由分束棱镜、法布里-珀罗腔、反射镜、环路器构成,元件个数少,结构简单。入射的准直平行光束首先进入分束棱镜(BS),在分束棱镜分束镜表面,光被分成两束等能量的透射光和反射光分别入射到法布里-珀罗腔和反射镜。进入法布里-珀罗腔的一束光,经过法布里-珀罗腔的相位调制后,从表面反射出来的光再一次入射到分束棱镜的分束镜表面和从反射镜反射回来的另一束光在此发生干涉,干涉的结果使得到的透射光的光强分布将是一个梳状输出光谱曲线。

结论 本文提出的利用法布里-珀罗腔对不同频率光的相位有非线性周期调制的特性,通过匹配相位的方法,使得干涉光强分布形成随频率变化的梳状滤波函数,从而得到可用于密集波分复用的复用及解复用的无源光梳状滤波器器件。鉴于梳状滤波器器件是适应目前全光网络快速发展的,同时避免了制造密集度非常高的波分复用器件,从而能极大地降低成本并减轻当前传统薄膜滤光片和光栅器件的设计压力,因此,这方面的研究工作是非常具有现实意义的。

参 考 文 献

- 1 Liu Karen , Ryan J , RHK Inc. All the Animals in the Zoo : The Expanding Menagerie of Optical Components. IEEE Communication Magazine , July 2001 , 112
- 2 Gu Peifu , Li Haifeng , Zhang Yueguang et al... Application of optical coatings on WDM Systems. *Optical Instruments(光学仪器)* , 2001 , 23(5 ~ 6) :105 ~ 109 (in Chinese)
- 3 Mallinson S R. Fibre-coupled Fabry-Perot wavelength demultiplexer. *Electron. Lett.* , 1985 , 21 :121 ~ 122
- 4 Mallinson S R. Wavelength-selective filters for single-mode fiber WDM systems using Fabry-Perot interferometers. *Appl. Opt.* , 1987 , 26(3) :430 ~ 436
- 5 Born M , Wolf W. *Principles of Optics(光学原理,上册)*. Transl. Yang Jiasun. Beijing : Science Publishing Press , 1978 (in Chinese)
- 6 Tang Jingfa , Zheng Quan. *Applied Thin Film Optics(应用薄膜光学)*. Shanghai : Shanghai Science and Technology Publishing Press , 1984 (in Chinese)

Interleaver Design Based on Phase Characteristics of Fabry-Perot Cavity

Chen Haixing Li Haifeng Gu Peifu Liu Xu

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

(Received 29 December 2001 ; revised 8 April 2002)

Abstract : A novel method for designing the interleaver applied in DWDM optical communication is presented. This passive component combines the nonlinear phase feature of the reflective beam within F-P cavity and the linear periodic phase characteristic of the beam at certain propagation difference with the frequency. The performance could satisfy the DWDM's requirement when those two phase-matched beams interfered. The theoretic model is simulated using the characteristic matrix of thin film. The result is calculated and analyzed, and the feasibility of this kind of design is demonstrated.

Key words : applied optics ; F-P cavity ; phase ; interference ; DWDM ; Interleaver

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题，有资深工程师领衔主讲，课程既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，设计原理和设计仿真实践相结合，向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频，专家授课，中文讲解，直观易学；既有微波滤波器设计原理的详细解释，也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解，旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程：

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>