

文章编号 :0253-2239(2004)01-62-3

薄膜多腔滤光片型梳状滤波器的设计

陈海星 顾培夫 李海峰 章岳光 沈伟东

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 介绍了一种通过使用多个薄膜法布里-珀罗滤光片的叠加来实现密集波分复用中使用的梳状滤波器的设计的新方法。采用间隔层为熔融石英的薄膜法布里-珀罗滤光片作为基本结构的光学梳状滤波器可以比较容易地控制各腔的厚度, 因而能精确地达到波分复用系统中波长间隔非常窄的要求。分析了如何确定间隔层厚度和各法布里-珀罗腔的反射镜的反射率以及它们之间的匹配问题, 最后给出了与设计吻合较好的实验结果, 制作的梳状滤波器在 C 波段的信道间隔为 100 GHz 相邻通道窜音小于 -24 dB, 最小插入损耗约 -0.4 dB。

关键词: 薄膜光学 梳状滤波器; 法布里-珀罗腔 密集波分复用

中图分类号: O484.4⁺¹ 文献标识码: A

Design of Interleaver with Cascaded Thin Film Filter

Chen Haixing Gu Peifu Li Haifeng Zhang Yueguang Shen Weidong

(State Key labs of Modern Optical Instrumentation, ZheJiang University, Hangzhou 310027)

(Received 20 November 2002 revised 15 January 2003)

Abstract: A novel designing method for optical interleaver based on cascaded solid thin film Fabry-Perot filter is presented. It's easy to control the thickness of the spacer of the device when employing the fused quartz as the material of the spacer, so the thin film interleaver can satisfactorily meet the demand of the narrow wavelength gap for the DWDM system. The analysis on how to ascertain the thickness of the spacer, the numbers of thin film Fabry-Perot filters and the match of the reflective index of each Fabry-Perot filter's mirrors are given. The experimental result is coincident with the designed one well, and the device achieves to 100 GHz spaced channels, at wavelength around C band, with adjacent channel's cross-talk less than -24 dB and the minimum insertion loss nearly 0.4 dB or so.

Key words: thin film optics; interleaver; Fabry-Perot etalon; DWDM

1 引言

梳状滤波器^[1]已成为密集波分复用中的一个重要器件。当前已有多种技术实现这一器件, 如晶体双折射型、马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪型、Gires-Tournois(GT)干涉仪型, 双折射 Gires-Tournois 干涉仪型等等^[1~3], 而使用薄膜滤光片的方法来实现梳状滤波器还不多见。这主要是由于目前光通信信道密集的迅速增加和数据传输速率的不断提高对密集波分复用中器件性能提出了更加严格的要求, 信道的增加使得通道的间隔急剧减小, 这就需要薄膜滤光片的截止曲线

非常陡峭以获得可接受的通道宽度。而一个典型的 100 GHz 间隔的薄膜滤光片通常需要镀制 100 多层的薄膜, 由于每一层薄膜厚度和折射率波动产生的误差积累, 从而使得成品率极低^[4]。

本文给出了一种通过采用间隔层为熔融石英的薄膜法布里-珀罗腔滤光片作为基本单元进行多腔叠加设计的梳状滤波器, 这种结构的薄膜梳状滤波器避免了目前经常使用的在同一基底上镀制大量层数的薄膜, 导致误差控制难度加大, 最终成品率极低的方法, 使得结构更简单, 也更容易实现。

2 设计原理

使用固体间隔层制作薄膜法布里-珀罗滤光片

的工作最早是由 Dobrowolski 报道的^[5],由于使用的间隔层材料为晶体石英,这样制作的滤光片会有双折射效应,s 光和 p 光的透射光谱有偏离。随后,Austin^[6]报道了采用间隔层为熔融石英的薄膜法布里-珀罗滤光片,这种方法消除了透射光谱随偏振态不同产生偏离的现象。

如前所述,设计中采用间隔层为熔融石英的薄膜法布里-珀罗滤光片作为基本单元进行多腔叠加来得到可用于密集波分复用的梳状滤波器,而单腔固体间隔层薄膜法布里-珀罗滤光片的间隔层厚度 d 可以简单地由下式决定:

$$d = m\lambda_0/2n, \quad (1)$$

式中 m 为干涉级次, λ_0 为入射光中心波长, n 为间隔层材料的折射率。滤光片的透射峰之间的间隔 $\Delta\lambda$ 可表示为

$$\Delta\lambda = 2nd/m(m+1), \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可得到

$$d = \frac{1}{2n} \left(\frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} - \lambda_0 \right). \quad (3)$$

这样,只要确定了梳状滤波器的信道间隔 $\Delta\lambda$ (对于 50 GHz 的梳状滤波器 $\Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$, 中心波长取 1550.12 nm) 以及间隔层材料的折射率和中心波长,就可以通过(3)式得到间隔层的厚度。

确定间隔层厚度以后,可以通过滤波器的半峰全宽来确定法布里-珀罗腔反射镜的反射率 R。一般地,半峰全宽可由下式表示:

$$W_{1/2} = 2\arcsin[(1-R)/2\sqrt{R}]\lambda_0/m\pi. \quad (4)$$

将(1)式代入,消去 m, 得到 R 的表达式:

$$R = 1 + 2\sin^2(\pi nd \cdot W_{1/2}/\lambda_0^2) - \sqrt{[1 + 2\sin^2(\pi nd \cdot W_{1/2}/\lambda_0^2)]^2 - 1}. \quad (5)$$

由(5)式,可以得到在一定的间隔层厚度下,单腔薄膜法布里-珀罗滤光片的半峰全宽与其反射镜的反射率之间的关系,如图 1 所示。从图 1 可以知道,通过改变反射镜的反射率,可以得到所需的半峰全宽。同时,可以看出,单个法布里-珀罗腔的输出光谱在输出波长位置不够平坦,而且截止度不够高,显然不能满足密集波分复用的要求。为此,须采取多个腔叠加使得透过峰变得平坦以满足设计要求^[7]。滤光片的腔的数目增加,使得截止度提高,半峰全宽不变,但 -0.5 dB 处的带宽会增加,而 -25 dB 的带宽会明显缩小^[8]。

多腔叠加时,其各腔反射镜的反射率必须满足一定的匹配条件,Herman van de Stadt 对不同数目的腔叠加的反射率匹配条件进行了详细地分析^[9]。一般地,中间的法布里-珀罗腔反射镜反射率的大小

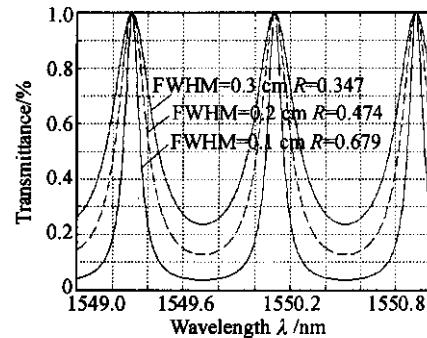


Fig. 1 Reflective index vs FWHM

对透过光谱影响较大,因此,需要仔细调整使其与两边的其他各腔反射镜的反射率达到匹配。同时,要达到 -30 dB 的截止度,至少要采用 3~5 个腔的叠加。这样,经过调整和优化各腔反射镜的反射率后,可以得到所需的薄膜梳状滤波器。图 2 是利用薄膜软件模拟计算的输出光谱,图中设计采用了 4 个熔融石英间隔层的薄膜法布里-珀罗腔叠加。

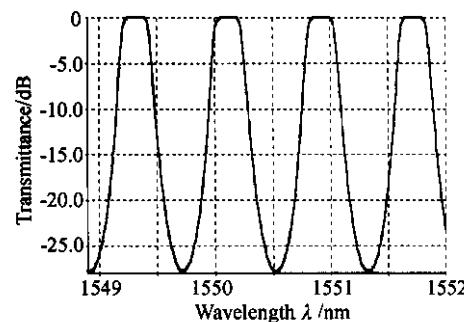


Fig. 2 Designed interleaver spectrum

3 实验结果及讨论

通过用电子枪蒸发的方法在熔融石英的两个表面镀上交替的 1/4 周期的 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 反射膜,得到固体间隔层的薄膜法布里-珀罗腔单元。然后将 4 个腔叠加在一起,得到了设计的薄膜梳状滤波器。实际器件的测试光路示意图如图 3 所示。

仔细调整光路,使可调谐激光器发出的激光束经物镜准直扩束后,垂直入射到薄膜梳状滤波器,探测器将接收到的光强值转换为电信号,直接由计算机采集后处理,同时,计算机控制可调谐激光器进行波长扫描。这样,即可以得到在一定波长范围内滤波器的光谱特性。实验得到的测试曲线如图 4 所示。

从测试结果来看,薄膜梳状滤波器的透过光谱在接近 -24 dB 处的带宽为 0.8 nm, 在 -0.5 dB 处的带宽约 0.12 nm, 如图 5 所示。同时,还可以看到实测的光谱曲线中中心波长的位置与设计有所偏离,

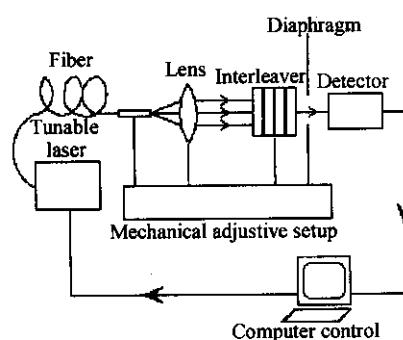


Fig. 3 Diagram of experimental setup

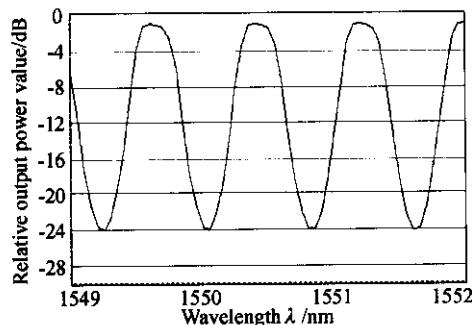


Fig. 4 Transmittance spectrum of experimental interleaver

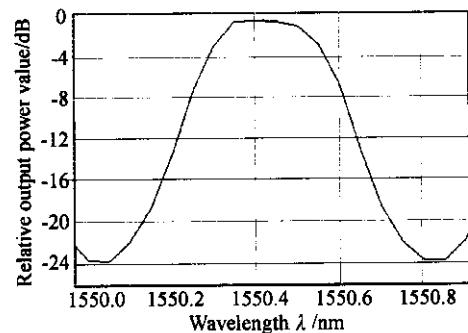


Fig. 5 The characterization of a single channel

这是由几方面的原因引起的。首先,作为间隔层材料的熔融石英的厚度是一个很重要的参量,而实际加工的精度使得厚度值和理论设计肯定有偏差,在 -0.5 dB 处带宽要求在 0.12 nm,中心波长为 1550 nm计算,由(1)式得到间隔层厚度误差须控制在 $\pm 6.45\%$ 。所以实际测试曲线会因间隔层的厚度误差而与设计产生偏离。其次,测量时,由于光路调整的误差,使得入射光束不是正入射而是以微小的角度入射到薄膜梳状滤波器的表面,这样有效厚度实际也变小了,因此,中心波长也会朝短波方向偏移。最后,由于间隔层材料熔融石英的色散存在(其在 1.53 μm 处为 1.44427 μm, 1.66 μm 处为 1.44267 μm),因而随波长的增大,间隔层的实际光学厚度变小,透射光谱也随着波长的增加朝短波方向移动,虽然这种色散引起的波长偏移可以通过调

整间隔层的厚度解决,但由于厚度控制精度的限制,这种偏差还是经常会发生。此外,输出光谱的截止度设计值应为 -28 dB,但实际测量值接近 -24 dB,其平坦度与设计相比也有偏差。这是因为多个薄膜法布里-珀罗腔叠加的时候,由于每个腔的参数在分别镀制时会有细微差别,导致每个薄膜法布里-珀罗腔的中心波长有所偏差,在叠加时,不能很好的匹配,故会使截止度降低,透过率下降。

结论 本文给出了一种利用熔融石英作为间隔层,通过镀膜方法实现的多个法布里-珀罗腔叠加的薄膜梳状滤波器的设计方法,并进行了实验,测试结果表明与原设计大致吻合。目前,光通信器件的发展将朝着更低成本,更高性能和更好可靠性的方向发展,介质薄膜滤光片由于其插入损耗小,温度稳定性好,偏振损耗小等优点,无疑在性能上具有一定的优势,而通过使用多个薄膜法布里-珀罗滤光片叠加的方法设计的梳状滤波器既结合了薄膜器件的优点,同时又因为采用了熔融石英作为间隔层从而避免了在同一基板上镀制大量膜层的问题,使得结构更简单,成本也得到极大的降低。

参 考 文 献

- Li Weizhong, Guo Qingdong, Gu Shijie. Interleaver technology review. *Proc. SPIE*, 2002, **4906**: 73~80
- Chen Haixing, Li Haifeng, Gu Peifu et al. Interleaver design based on phase characteristics of Fabry-Perot cavity. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1): 37~40 (in Chinese)
- Li Jie, Tong Zhengrong, Meng Hongyun et al. Theoretical study on optical comb-filter of cascaded M-Z interferometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1): 41~44 (in Chinese)
- Willey R R. Achieving narrow bandpass filters which meet the requirement for DWDM. *Thin Solid Films*, 2001, **398~399**: 1~9
- Dobrowolski J A. Mica interference filters with transmission bands of very narrow half-widths. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, **49**(8): 794~806
- Austin R R. The use of solid etalon devices as narrow band interference filters. *Opt. Engng.*, 1972, **11**(3): 65~69
- Macleod H A. *Thin-Film Optical Filters*. Bristol: Adam Hilger Ltd., 1986. 270
- Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng et al. Design of DWDM thin-film interference filters. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 794~797 (in Chinese)
- van de Stadt H, Muller J M. Multimirror Fabry-Perot interferometers. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1985, **2**(8): 1363~1370

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/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

易迪拓培训

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>