

文章编号: 0258-7025(2004)10-1227-04

一种模拟双折射可调谐密集波分复用 滤波器的设计

张 娟, 刘立人, 周 煜

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 提出了一种基于模拟双折射模块的可调谐偏振光干涉型密集波分复用滤波器(DWDM)的新结构。其由置于起偏和检偏器之间的若干个具有相同结构的模拟双折射模块级联构成。每个模拟双折射模块由两个分别用于分束和合束的双折射晶体、放置于其中的两个具有不同折射率的介质块和一个半波片构成。研究了该滤波器的中心频率的可调谐特性。研究表明,利用该结构的滤波器,在满足一定平坦化要求的情况下,如果小角度旋转模拟双折射模块单元,可以在获得大平坦宽度的通带和阻带以及高隔离度的同时简便地实现中心频率的微调谐。实验中,用单级模拟双折射模块验证了该结构的可行性。

关键词 光纤光学;光学滤波器;微调谐;密集波分复用;偏振光干涉

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Design of a Tunable Dense-Wavelength-Division-Multiplexing Filter Based on Analog Birefringent Structure

ZHANG Juan, LIU Li-ren, ZHOU Yu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A new structure of tunable polarization interference dense wavelength division multiplexing (DWDM) filter based on the analog birefringent module is presented. It is composed of several cascaded analog birefringent modules with the same structure located between two polarizing devices. Each analog birefringent module consists of a pair of birefringent plates for splitting and combination, respectively, and in between a set of two medium plates of different indices of refraction and one half-wave plate. The center-frequency tunability characteristic of the filter is investigated as well. Results show that as a definite flattening requirement is satisfied, the passband and stopband with wide flatness width and high isolation can be obtained and the center frequency tunability can be accomplished simultaneously when slightly rotating the analog birefringent module unit. The feasibility of the analog birefringent structure is verified through an experiment.

Key words fiber optics; optical filter; fine tuning; dense wavelength division multiplexing; polarization interference

1 引 言

密集波分复用(DWDM)技术是当前提高光纤通信容量的一种最有前景的技术方案。光学滤波器则是密集波分复用技术中的关键元件之一^[1~7]。在密集波分复用的实际应用中,一个理想的密集波分

复用滤波器应具有平坦的通频带和中心频率的可调谐性,这也将大大扩展其使用范围。利用晶体的双折射效应和偏振光干涉原理可制作偏振光干涉型密集波分复用滤波器,与其他类型的干涉滤波器相比,具有易于调谐的优点^[8]。但利用晶体的双折射制作 50 GHz 及更小频率间隔的密集波分复用滤波器则

收稿日期:2003-04-30;收到修改稿日期:2003-11-04

基金项目:国家科技部(编号:2002CCA03500)和上海市科委光科技计划(编号:012261011)资助项目。

作者简介:张 娟(1976—),女,陕西咸阳人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光通信无源器件的设计和应用方面的研究。E-mail:juanzhang_zj@hotmail.com

难度很大,很难实现。此外,该滤波器频率选择的动态特性也缺乏系统的研究。

在我们近期的工作中,提出了一种基于模拟双折射模块结构的光交错复用器^[9]。该光交错复用器的关键元件为模拟双折射模块,其中每个模拟双折射模块等效于一个双折射晶体波片,等效双折射产生于其中的两介质块的折射率差。介质块可选择多种不同种类各向同性介质(如玻璃)和各向异性介质(如晶体),因此等效双折射范围很大,最小可为0.35,最大可达0.75,从而使50 GHz及更小的频率间隔的信号分离成为可能。本文在该交错复用器结构的基础上,提出了一种可调谐的偏振光干涉型密集波分复用滤波器的新结构,并对其动态特性即中心频率可调谐特性进行了分析和研究。用单块模拟模块在实验中验证了该结构的可行性。

2 基于模拟双折射模块的密集波分复用滤波器

模拟双折射模块的结构如图1所示,它由两双折射晶体、两不同折射率的介质块和半波片以一定方式组合而构成,半波片的偏振旋转角为 90° 。第一个双折射晶体作为偏振分束器,它将入射光分离成偏振态互相正交的两束平行光,之后分别入射两介质块产生一定相位延迟,经过半波片后偏振方向各发生了 90° 的旋转,从而经过第二块双折射晶体后可被合并为一束光。该结构中,光在两双折射晶体中引起的附加双折射延迟被消除了。

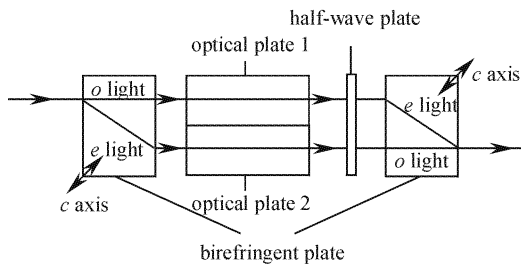


图1 模拟双折射模块的结构图

Fig. 1 Structure of analog birefringent module

可以看出每个模拟模块等效于具有一定双折射延迟和取向的双折射晶体波片,光在模拟模块中的等效双折射等于介质块1和2的折射率之差,模拟模块的等效方位角可通过在其前后各置一个具有一定旋转角度的偏振旋转片而得到,偏振旋转片的旋转角等效于双折射晶体的取向即方位角。偏振旋转

片也可以不用,这时可通过将整个模拟模块沿轴线旋转相应的角度而实现。

光在模拟模块中的光程差可表达为

$$\Delta_i = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{i,1} - n_{i,2})L_i \quad (1)$$

其中, $n_{i,1}$ 和 $n_{i,2}$ 分别为第 i 个模拟模块中的两介质块的折射率, L_i 为第 i 个模拟模块中的介质块的长度, λ 为光波长。

基于该模拟双折射模块的密集波分复用滤波器的结构如图2所示,它由多个该同样结构的模拟模块级联放置于起偏和检偏器之间而构成。为得到平坦的光谱透射率函数,各模拟模块中偏振旋转片的旋转角(整个模拟模块的旋转角) θ_i ($i = 1, 2, 3, \dots$),检偏器与起偏器偏振方向的夹角 θ_p 和光在各模拟模块中的光程差 Δ_i 必须满足一定的条件。若采用三个模拟模块级联的结构,当光在各模拟模块中的光程差之比(即 $\Delta_1 : \Delta_2 : \Delta_3$)为 $1:2:4$,通带和阻带的平坦宽度均大于 $1/5$ 周期,抖动不大于 0.1% 时, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 以及 θ_p 的角度可有多种组合^[9]。典型波形之一 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -88^\circ, \theta_3 = -8^\circ, \theta_p = 0^\circ$ 可见图3中的实线所示。

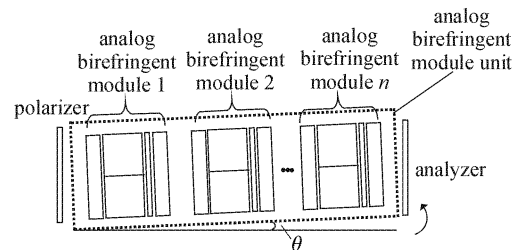


图2 新型密集波分复用滤波器的结构图

Fig. 2 Schematic configuration of the new type DWDM filter

3 基于模拟双折射模块的密集波分复用滤波器的动态调谐特性

中心频率指光谱透射率函数的通带(阻带)的中心位置所对应的频率。当给定满足一定平坦化要求的光谱透射率所需的 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n$ (及 θ_p)的特定值时,光谱透射率函数只与光在各模拟模块中的光程差 Δ_i 有关。按照中心频率的定义,如果调节光在各模拟模块中的光程差,则该密集波分复用滤波器具有中心频率可调性。只要光在各模拟模块中的光程差仍满足特定的比例关系(如 $1:2:4$),整个光谱透射率函数的形状不会受光在各模拟模块中光程差变化的影响。

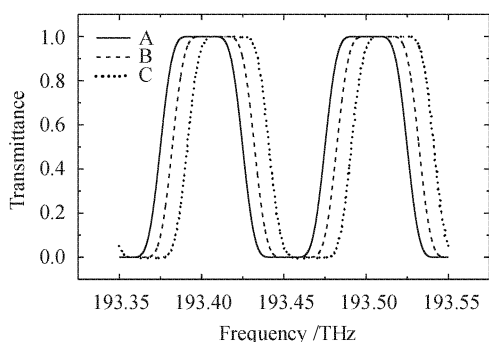


图 3 当模拟模块的调谐角为(A) $\theta = 0^\circ$, (B) $\theta = 0.8^\circ$, (C) $\theta = 1.2^\circ$ 时, 滤波器中心频率的可调谐特性

Fig. 3 Center-frequency tunability for tuning angle

(A) $\theta = 0^\circ$, (B) $\theta = 0.8^\circ$, (C) $\theta = 1.2^\circ$.
($\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = -88^\circ$, $\theta_3 = -8^\circ$, $\theta_p = 0^\circ$)

3.1 光在模拟模块中的光程差

将所有的模拟模块封装成为一个单元, 各模拟模块中所对应的介质块选用相同材料, 即 $n_{1,1} = n_{2,1} = n_{3,1}$; $n_{1,2} = n_{2,2} = n_{3,2}$, 通过在入射面内小角度旋转这个单元就可以精确调节光在各模拟模块中的光程差。

当以 θ 角旋转模拟模块单元时, 如图 4 所示(图中旋转光束而模拟模块保持不动), 由于倾斜入射, 光在双折射晶体和介质块中的路径发生了变化, 但出射的两束光仍与入射光平行, 这两束平行光经过半波片, 偏振方向分别发生 90° 的变化, 第二个双折射晶体将这两束平行光合并成一束光并以 θ 角度出射。在上述过程中, 由于半波片的厚度很小, 忽略旋转模拟模块单元时光程差在其中的变化。可见, 光均以 θ 角入射各元件, 而且所有的人射和出射光均平行, 因此旋转模拟模块单元可使光均以 θ 角入射各模拟模块。

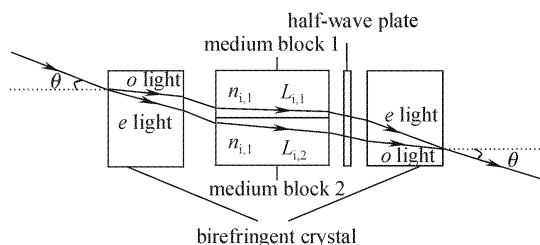


图 4 入射面内旋转模拟模块单元时, 光在模拟模块中的光路变化

(这里以旋转光束代替了旋转模拟模块单元)

Fig. 4 Optical schematic of paths of the incident light in the analog module when rotating it in the incident plane

旋转模拟模块单元时, 光在第 i 个模拟模块中的光程差可表达为

$$\Delta_i = n_{i,1}L_{i,1} - n_{i,2}L_{i,2} = n_{i,1} \frac{L_i}{\cos\alpha_i} - n_{i,2} \frac{L_i}{\cos\beta_i} \quad (2)$$

这里, $L_{i,1}$ 和 $L_{i,2}$ 分别为光在第 i 个模拟模块中的介质块 1 和 2 中的路径长度。 α_i 和 β_i 分别为光在第 i 个模拟模块中的介质块 1 和 2 中的折射角, 利用折射定律, 折射角 α_i, β_i 与旋转角 θ 的关系可表达为

$$\sin\theta = n_{i,1}\sin\alpha_i; \quad \sin\theta = n_{i,2}\sin\beta_i \quad (3)$$

因此式(2)又可表达为

$$\Delta_i = n_{i,1} \frac{L_i}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2\theta}{n_{i,1}^2}}} - n_{i,2} \frac{L_i}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2\theta}{n_{i,2}^2}}} \quad (4)$$

当 θ 很小, 即 $\sin^2\theta \ll n_{i,1}^2, \sin^2\theta \ll n_{i,2}^2$ 时, 公式(4)可简化为

$$\Delta_i = \Delta_{0,i} \left(1 - \frac{\sin^2\theta}{2n_{i,1}n_{i,2}}\right) \quad (5)$$

其中, $\Delta_{0,i} = (n_{i,1} - n_{i,2})L_i = \Delta_{n_i} \cdot L_i$ 为光在第 i 个模拟模块中的初始光程差, 即 $\theta = 0^\circ$ 时的情况。

由式(5)发现小角度旋转模拟模块单元可始终保持光在各模拟模块中的光程差为一定的比例。由图 4 可知, 两介质块前的两平行光束的间距在经过介质块后有些许变宽, 经过简单计算就会发现这个变化很小, 因而可忽略其对两束平行光经过第二个双折射晶体后合束的影响。

3.2 中心频率调谐特性

当以小角度旋转模拟模块单元时, 该滤波器具有中心频率可调谐特性, 如图 3 所示。在模拟模块单元的旋转角度很小的情况下, 中心频率在发生漂移的同时保持带宽几乎不变。

图 5 表示了该滤波器中心频率随模拟模块单元旋转角的变化。由图 5 可知中心频率随旋转角度的增大而向短波方向漂移, 当刚开始旋转时, 中心频率随旋转角度的变化漂移很慢, 随着旋转角度的不断增大, 中心频率的漂移变得越来越快, 旋转角度只需变化大约 3° 即可使中心频率移动一个周期。

4 实验方法和结果

当使用单波长光源时, 若在水平面内旋转整个模拟模块, 则光在两介质块内的路径会发生变化, 从而产生不同的光程差实现透射率函数的不同分布。本实验中, 利用单级模拟模块的结构和单波长光源 He-Ne 激光($0.6328 \mu\text{m}$), 采用上述方法来验证该

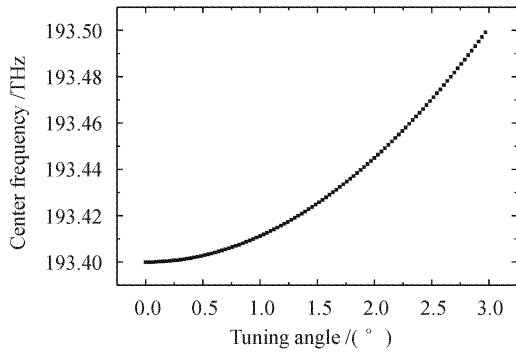


图 5 中心频率随模拟模块单元调谐角的变化关系图

Fig. 5 Center-frequency as a function of the tuning angle of the analog module unit

($\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = -88^\circ$, $\theta_3 = -8^\circ$, $\theta_p = 0^\circ$)

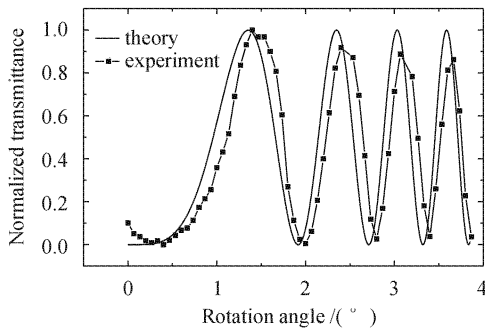


图 6 利用单块模拟模块和氦氖激光光源得到的透射率函数的理论和实验曲线

Fig. 6 Graph of theory and experiment when an analog module and a He-Ne laser are used

($\Delta f_1 = 100$ GHz, $n_1 = 1.51466$, $n_2 = 1.74970$)

模拟模块结构的可行性,其中模拟模块前后各置一偏振旋转片。两介质块分别选用 K9 和 ZF6 玻璃。该光学平板的平行度为 $1''$,厚度误差 < 0.05 mm。介质块厚度的选取使单级模拟模块的频率间隔为 100 GHz,所得实验曲线和理论曲线如图 6 所示。该实验结果与理论吻合得较好,从而充分验证了该模拟结构的可行性。两者之间很小的不一致可能来

源于温度的影响、旋转控制器的机械误差以及各元件表面的反射损耗等等。

5 结 论

利用模拟双折射模块结构,当小角度旋转该模拟模块单元时,可在获得较大的平坦通频带宽度和更高隔离度的同时简便地实现中心频率的微调谐。以单级模拟模块实验验证了该结构的可行性,实验结果与理论分析相符。

参 考 文 献

- 1 W. J. Carlsen, C. F. Buhner. Flat passband birefringent wavelength-division multiplexers [J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(3):106~107
- 2 Miao Yang, Claire Gu. Flattopped tunable wavelength-division-multiplexer filter design [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(9):1692~1699
- 3 Benjamin B. Dingel, Tadashi Aruga. Properties of a novel noncascaded type, easy-to-design, ripple-free optical bandpass filter [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(8):1461~1469
- 4 A. Frenkel, C. Lin. Inline tunable etalon filter for optical channel selection in high density wavelength division multiplexed fibre systems [J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(3):159~161
- 5 K. Hirabayashi, H. Tsuda, T. Kurokawa. Tunable liquid-crystal Fabry-Perot interferometer filter for wavelength-division-multiplexing communication systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(12):2033~2043
- 6 A. M. Title, W. J. Rosenberg. Tunable birefringent filters [J]. *Opt. Eng.*, 1981, **20**(6):815~823
- 7 Yu Benli, Sun Zhipei, Qian Jingren. Experimental research on dual-tunable Er^{3+} -doped optical fiber ring resonator filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):163~166
俞本立,孙志培,钱景仁. 双可调谐掺铒光纤环形腔滤波器的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):163~166
- 8 Ke Changjian, Liu Deming, Huang Dexiu *et al.*. Optimization of output spectra performance in crystal typed interleaver [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Suppl.):375~378
柯昌剑,刘德明,黄德修等. 晶体型 interleaver 器件的带宽优化设计[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊):375~378
- 9 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver [J]. *Acta Optics Sinica*, 2003, **23**(12):1424~1428
张娟,刘立人,周煜等. 一种新型光交错复用器的设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12):1424~1428