

文章编号: 0253-2239(2003)12-1424-5

一种新型光交错复用器的设计*

张 娟 刘立人 周 煜 周常河

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要: 提出了一种偏振光干涉型光交错复用器的新结构。其核心元件双折射模拟波片等效于双折射晶体波片, 可以获得比一般双折射晶体大得多的等效双折射。该光交错复用器除了具有一般偏振光干涉型光交错复用器的稳定性好、可靠性高的特点外, 特别具有隔离度更高和更容易实现各种大小频率间隔的优点。利用该结构设计了用于 50 GHz 频率间隔波分复用信号的奇偶分离的光交错复用器, 通带和阻带的平坦宽度均大于 1/5 周期, 隔离度为 -30 dB。同时, 对该器件在实际应用中的几个基本参量, 如插入损耗、偏振相关损耗和成本等也作了分析和讨论。

关键词: 光纤通信技术; 密集波分复用; 光交错复用器; 双折射; 偏振光干涉

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

1 引 言

为了更好地利用掺铒光纤放大器(EDFA)的现有的较宽的增益谱和满足人们对带宽无止境的需求, 实现更窄的频率间隔和更多的复用信道一直是人们努力追求的目标^[1], 光交错复用器(Interleaver)技术则是实现更加密集波分复用的一种有效解决方法^[2]。它是从奇偶信道交叉复用角度来解决减小信道间隔, 提高通信容量问题的。光交错复用器复用是将两路分别包含多个等波长间隔的光信号合并成一路波长间隔减半的光信号。解复用是将一路波长光信号分成两路分别包含奇数和偶数信道的间隔倍增的光信号。这种技术大大降低了滤波器件密集度越来越高的设计压力, 同时有效地提高了系统传输容量, 降低了整个器件的成本。在密集波分复用的实际应用中, 滤波器必须具有平坦的通频带和高的隔离度, 从而激光谱宽、波长漂移和模式分立的复合效应才能在一个很大波长范围内对系统的性能影响不大, 各信道信号质量优良。

目前光交错复用器技术的实现方案有多种多样^[3~7], 其中典型方案之一是晶体的偏振光干涉型光交错复用器技术。它是利用晶体的双折射效应和偏振光干涉原理^[8], 通过将密集波分复用光纤通信系统的奇偶信道的信号光分离成偏振态互相正交的

两组信号, 来达到通信容量倍增的效果。Carlsen 等^[9]采用了 3 块厚度比为 1:2:2 的双折射晶体级联的结构, 实现了平坦化的光谱响应。Huishi Li, River Huang^[10]利用了两个双折射晶体波片和一个偏振分束器的级联结构实现了奇偶信道信号的分离。此外, 晶体干涉型光交错复用器国内外多家公司也已有商业化产品。天然生长(或人工制造)的晶体尺寸有限, 晶体的双折射一般都较小, 如在 1.55 μm 波段, 石英约为 0.01, 铌酸锂为 0.07, 方解石为 0.156, 目前双折射最大的晶体金红石也只有 0.256。光学级铌酸锂晶体生长不易, 导致晶体价格不易下降, 且双折射率不高; 方解石多为天然晶体, 存在解理, 易潮解, 加工易开裂; 金红石虽然双折射最大、性能最好, 但其生长过于困难, 因而价格极其昂贵; 石英具有生长相对容易, 各方面光学性能好等特点, 是目前最常用的双折射晶体。若采用石英晶体制作 50 GHz 频率间隔的光交错复用器, 经计算晶体的最小厚度要达 33.3 cm, 这么厚的石英晶体生长和加工十分困难, 成本太高, 且双折射不均匀, 因此利用晶体很难做到 50 GHz 或更小的频率间隔。

本文提出了一种偏振光干涉型光交错复用器的新结构。其中偏振旋转器、双折射晶体、半波片和介质块以适当方式组合构成了双折射模拟波片(以下简称模拟波片), 该结构的模拟波片等效于双折射晶体波片, 等效双折射产生于两介质块的折射率差。由于介质块的选择范围很大, 可任意选择多种不同种类的各向同性介质或各向异性介质, 所以该结构的模拟波片可以获得比一般双折射晶体大得多的等

* 国家自然科学基金(60177016)、上海市科委光科技计划(012261011)及国家杰出青年基金(60125512)资助课题。

E-mail: juanzhang_zj@hotmail.com

收稿日期: 2002-09-02

效双折射。光学玻璃的折射率为 1.45~1.8, 光学晶体的折射率为 1.5~2.2, 若两介质均采用各向同性材料(如玻璃), 则等效双折射最大可达 0.35; 若两介质均采用各向异性材料(如晶体), 则等效双折射最大可达 0.7; 而当两介质采用各向异性材料和各向同性材料的组合时, 等效双折射则更大, 最大可达 0.75。以第一种情况即等效双折射为 0.35 为例, 要制作 50 GHz 频率间隔的光交错复用器, 可计算得介质块的最小长度只有约 8.6 mm。因此与晶体干涉型光交错复用器相比, 本结构的器件结构尺寸大大减小, 器件结构设计更加紧凑; 同时, 由于可采用各向同性介质, 因而也大大降低了成本, 从而使

50 GHz 及更小的频率间隔的信号分离成为可能。本文利用该结构设计了用于 50 GHz 频率间隔波分复用信号的奇偶分离的光交错复用器, 通带和阻带的平坦宽度均大于 1/5 周期, 隔离度为 -30 dB。本结构具有隔离度更高和更容易实现各种大小频率间隔的优点, 因而尤其适用于高度密集波分复用信号的分离。

2 结构设计

光交错复用器的整体结构如图 1 所示。其中, 准直透镜 2 用于对输入光纤 1 发射的无规偏振波分

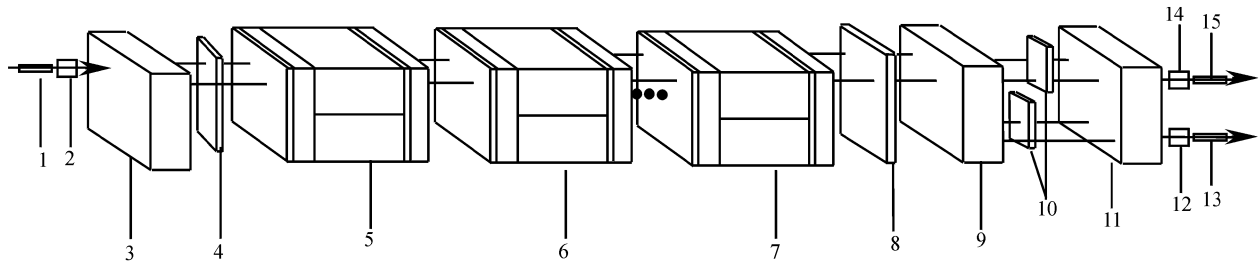


Fig. 1 The schematic configuration of polarization interference interleaver. 1: Input fiber; 2: collimating lens; 3: birefringent crystal; 4: half-wave plate; 5, 6, 7: chain birefringent analog wave plate; 8: polarization rotator; 9: birefringent crystal; 10: half-wave plate; 11: birefringent crystal; 12, 14: focusing lens; 13, 15: output fiber

复用信号光束进行准直和扩束, 聚焦透镜 12、14 对双折射晶体 11 的两出射光束进行聚焦并耦合入两输出光纤, 双折射晶体 3 和 9 作为偏振分束器, 双折射晶体 3 将入射光在水平方向上分离成偏振态互相正交的两束平行光, 而双折射晶体 9 在竖直方向上分离光束。双折射晶体 11 作为偏振合束器, 它将同一水平方向上的偏振态互相正交的两束平行光合并成一束偏振光。级联的双折射模拟波片 5、6、7 用于滤波, 所有半波片的偏振旋转角均为 90° 。

2.1 模拟波片

光在模拟波片中的光路如图 2 所示, 入射光经偏振旋转器后偏振方向旋转了一定角度, 第一个双折射晶体作为偏振分束器, 它将这束光分离成偏振态互相正交的两束平行光, 之后分别入射进两介质块后产生一定相位延迟, 经过半波片后偏振方向旋转了 90° , 从而经过第二个双折射晶体后可被合并为一束光输出。

当采用双折射晶体作为偏振分束器或偏振合

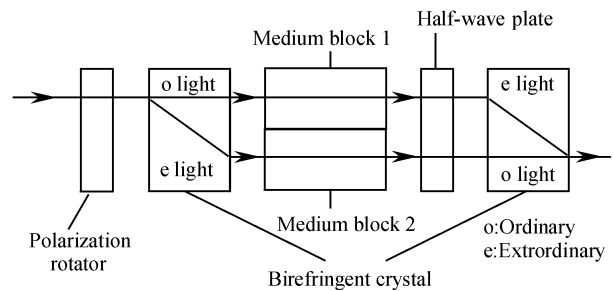


Fig. 2 The optical schematic of paths of light in birefringent analog wave plate

束器时, 非寻常光偏离寻常光的偏离角 α 可表示为

$$\tan \alpha = \left(\frac{n_o^2}{n_e^2} - 1 \right) \frac{\cot \beta_1}{1 + (n_o^2/n_e^2) \cot^2 \beta_1}, \quad (1)$$

其中, n_o 为寻常光折射率, n_e 为非寻常(异常)光折射率, β_1 为光轴与晶体界面的夹角。

由于半波片的作用, 偏振分束器中的寻常偏振光和异常偏振光在偏振合束器中分别变为异常偏振光和寻常偏振光。模拟波片中寻常光和非寻常光的相位延迟可表达为

$$\varphi_k = \frac{2\pi}{\lambda} [n_{a,k} L_{a,k} - n_{b,k} L_{b,k} + n_o (L_{c,k} - L_{d,k}) - n_e (\beta_2) (L_{c,k} - L_{d,k})], \quad (2)$$

其中, $n_{a,k}$ 、 $n_{b,k}$ 分别为第 k 个模拟波片中的介质 1 和介质 2 的折射率, $L_{a,k}$ 、 $L_{b,k}$ 分别为其长度, $L_{c,k}$ 、 $L_{d,k}$ 分别为第 k 个模拟波片中的偏振分束器和偏振合束器的长度, β_2 为偏振分束器中 o 光与晶体光轴的夹角, $n_e(\beta_2)$ 为 e 光的等效折射率, 可表达为

$$n_e^2(\beta_2) = \frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2 \sin^2 \beta_2 + n_e^2 \cos^2 \beta_2}. \quad (3)$$

当 $L_{a,k} = L_{b,k} = L_k$ 和 $L_{c,k} = L_{d,k}$ 时, 寻常光和非寻常光的相位延迟简化为

$$\varphi_k = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{a,k} - n_{b,k})L_k. \quad (4)$$

每个模拟波片的光谱周期 Δf_k 或等效时延 γ_k 为

$$\Delta f_k = \frac{1}{\gamma_k} = \frac{c}{\varphi_k(\lambda/2\pi)}, \quad (5)$$

其中, c 为光速, λ 为入射光的波长。

由(2)式和(4)式可知, 偏振分束器和偏振合束器引入的双折射延迟被抵消, 每个模拟波片等效于具有一定双折射延迟和取向的双折射晶体, 光在模拟波片中的等效双折射等于介质块 1 和 2 的折射率之差, 偏振旋转器的旋转角等效于双折射晶体的取向即方位角。

两介质块可采用各向同性材料如玻璃或者各向异性材料如晶体制作, 此时晶体必须沿主轴切割。模拟波片中的偏振旋转器也可以不用, 但这时整个模拟波片需要沿光轴旋转相应的角度。此外, 当模拟波片中的介质块旋转时, 其产生的等效双折射延迟会发生变化, 这可以用于光谱带宽的微调谐。偏振分束器和偏振合束器还可以采用偏光棱镜组合。

2.2 产生平坦化光谱透射率的条件

密集波分复用系统对波分复用/解复用器的特性要求之一是: 信道隔离度大、通频带平坦^[4]。为得到平坦的光谱透射率函数, 我们采用傅里叶级数对比法, 即通过控制系统的偏振旋转器的旋转角 θ_p 、各模拟波片的偏振旋转器的旋转角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k$ 和光谱周期 $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \dots, \Delta f_k$, 使其产生的光谱透射率函数与周期矩形函数的傅里叶级数的表达式相近, 即得到与周期矩形函数相近的光谱透射率函数。其中计算各偏振旋转角度时采用的方法为搜索方法, 详见文献[11]。该傅里叶级数对比的搜索方法可在较大的通带和阻带范围内寻找到抖动很小时的所有可能的各偏振旋转器的偏振旋转角度的数值解。

以 3 个模拟波片级联的结构为例, 用于 50 GHz 波分复用信号的奇偶分离, 波长在 1550 nm 波段, 则利用傅里叶级数对比法可得, 3 个模拟波片中介质

块的长度应满足 1:2:4 的比例关系(这里考虑前七阶傅里叶级数), 即 $4L_1 = 2L_2 = L_3$ (其中 $L_{a,1} = L_{b,1} = L_1, L_{a,2} = L_{b,2} = L_2, L_{a,3} = L_{b,3} = L_3$)。利用搜索方法每隔 1° 对角度进行搜索知, 可采用的各模拟波片中的偏振旋转器的旋转角度 θ_1, θ_2 和 θ_3 共有七种组合值, 具体可见表 1 所示(这里 $\theta_p = 0^\circ$, 通带和阻带的范围为大于 1/5 周期、抖动不大于 0.1%, 即串扰 -30 dB)。

Table 1 The polarization rotation angle of polarization rotator in analog waveplate when ripples are not greater than 0.1% (i. e. isolation -30 dB) in both the passband and stopband with the width of greater than 1/5 period and the ratios of passband width T_1 and stopband width T_2 to period T (corresponding to the searched angles)

| $\theta_1/(^\circ)$ | $\theta_2/(^\circ)$ | $\theta_3/(^\circ)$ | T_1/T | T_2/T |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| 45 | -90 | -9 | 0.215 | |
| | 90 | -9 | | |
| | 0 | -81 | | |
| | -88 | -8 | 0.206 | |
| | -2 | -82 | | |
| | 2 | -80 | | |
| | 88 | -10 | 0.211 | |

3 设计实例

这里仍采用 3 个模拟波片级联的结构, 用于 50 GHz 波分复用信号的奇偶分离, 波长在 1550 nm 波段, 器件整体结构见图 1。其中各模拟波片的两介质块均采用等长的光学玻璃, 介质块 1 的牌号为 SF11, 介质块 2 的牌号为 BK7, 则介质块 1 的折射率为 $n_a = 1.74474$, 介质块 2 的折射率为 $n_b = 1.50065$, 等效双折射 $\Delta n = 0.24409$ 。

由(4)式和(5)式及模拟波片中介质块的长度所满足的 1:2:4 的比例关系, 可计算得 $L_1 = 12.282$ mm, $L_2 = 24.564$ mm 和 $L_3 = 49.128$ mm。

所有的偏振分束器和偏振合束器都采用单块自然切割的光束入射面与出射面相平行的方解石晶体块。所有的偏振旋转器和半波片都采用石英半波片。以 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -88^\circ, \theta_3 = -8^\circ$ 的情况为例确定其它各参量, 则第一、第二和第三个模拟波片的偏振旋转器的偏振旋转角分别为 $45^\circ, -88^\circ$ 和 -8° 。易知第一、第二和第三个模拟波片中的偏振旋转器(即半波片)的快轴(或慢轴)与输入光的偏振方向的

夹角分别为 22.5° 、 -44° 和 -4° 。因为 $\theta_p = 0^\circ$ ，所以系统结构的偏振旋转器可以不要。系统结构的半波片 1、2 和各模拟波片中的半波片的偏振旋转角为 90° ，则其快轴(或慢轴)与输入光的偏振方向的夹角为 45° 。在两输出端口得到的平坦化光谱透射率函数的波形如图 3 所示。

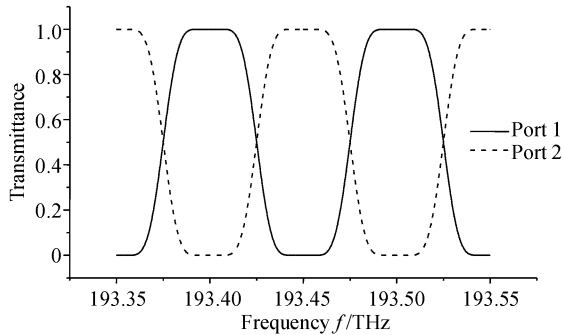


Fig. 3 The flattening spectrum transmittance at output port 1 and 2 when three analog waveplates are used and the rotation angles of polarization rotators are, $\theta_1 = 45^\circ$, $\theta_2 = -88^\circ$, $\theta_3 = -8^\circ$, respectively

4 讨 论

光交错复用器在密集波分复用系统的实际应用中,除要求通、阻带平坦、隔离度高以外,还应满足插入损耗和偏振相关损耗小以及成本低等要求。

Carlsen 等采用的是晶体的双折射,本器件采用的是模拟波片中两块介质的折射率差,因此不仅能生成范围很大的等效双折射差值,而且能达到比晶体双折射大得多的等效双折射。本结构的模拟波片优质介质易得,介质材料的选择余地大,易于实现各种大小光谱频率间隔的波分信号的奇偶分离,特别适用于高度密集波分复用信号的分离,并实现晶体干涉法以及其它方法达不到的很小的光谱频率间隔。同时旋转介质对可以改变光程而实现光谱带宽的微调谐,器件易于装校。

插入损耗是指由于增加光波分复用器/解复用器而产生的附加损耗^[12]。一般插入损耗主要来源于光在各元件表面上的反射和在元件内的吸收等。该光交错复用器中的各晶体和玻璃在所应用的光波段是透明的^[13](例如 BK7 玻璃在 $0.31 \sim 2.67 \mu\text{m}$ 波段的吸收系数小于 0.1 cm^{-1});此外,如前所述,在输入和输出端没有采用偏振元件(起偏器或检偏器),它是通过双折射晶体和半波片的组合来使任意无规偏振的入射光分解为偏振互相垂直的线偏振光,最后又利用其将两束光合并。因此该器件减小

了使用偏振元件所带来的能量损耗大的不足,理论峰值透过率接近 100%,插入损耗大大降低。另外,在具体应用中,各元件表面加镀增透膜,可有效减小反射损耗,从而进一步降低插入损耗。偏振相关损耗指的是由于偏振态的变化所造成的插入损耗的最大变化值^[12]。由于该器件与入射光的偏振状态无关,因此理论上偏振相关损耗很小。此外,由于该光交错复用器的自身结构特点,避免了使用光纤或光纤光栅带来的弯曲效应和应力偏振等引起的偏振相关损耗。在器件成本上,由于该器件在结构上以小尺寸的光学晶体和光学玻璃的组合替代了生长和加工十分困难的大尺寸光学晶体,利用传统光学加工技术即可加工各光学元件,具有设备简单、工艺可靠的优点,将大大降低整个器件的成本。

结束语 本文提出了一种偏振光干涉型光交错复用器的新结构。该器件的关键元件模拟波片,等效于双折射晶体波片,等效双折射产生于两介质块的折射率差。因为介质块的选择范围很大,可选择各种不同的各向同性介质或各向异性介质,所以该结构的模拟波片可以获得比一般双折射晶体大得多的等效双折射,具有隔离度更高和更容易实现各种大小频率间隔的优点,同时器件尺寸可大大减小,从而为设计者们提供了一个新的设计思路。本文利用该结构设计了用于 50 GHz 频率间隔波分复用信号的奇偶分离的光交错复用器,通带和阻带的平坦宽度均大于 1/5 周期,隔离度为 -30 dB ,同时,对该器件在实际应用中的几个其它基本参量,如插入损耗、偏振相关损耗和成本等也作了分析和讨论,相关实验工作将另文报道。

参 考 文 献

- 1 Andrew Zeng, Joseph Chon. Ultra-high capacity and high speed DWDM optical devices for telecom and datacom applications. *Proc. SPIE*, 2001, **4581**:13~20
- 2 Bob Shine, Jerry Bautista. Interleavers make high-channel-count system economical. *Lightwave*, 2000, (8):140~144
- 3 Huang Dingwei, Chiu Tsunghsuan, Lai Yinchieh. Arrayed waveguide grating DWDM interleaver. *OFC 2001*, Paper WDD80, 2001/5/22
- 4 Loh W H, Zhou F Q, Pan J J. Novel design for sampled grating-based multiplexers-demultiplexers. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21):1457~1459
- 5 Oguma M, Jinguji K, Kitoh T *et al.*. Flat-passband interleaver filter with 200 GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure. *Electron.*

- Lett.*, 2000, **36**(15):1299~1300
- 6 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
- 7 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
- 8 Yariv A, Yeh P. *Optical Waves in Crystals*. New York: John Wiley & Sons, 1984. 121~148
- 9 Carlsen W J, Buhrer C F. Flat passband birefringent wavelength-division multiplexers. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(3):106~107
- 10 Li Huishi, Huang River. The application and technical approaches of interleaver. *Proc. SPIE*, 2001, **4581**:79~87
- 11 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Flattening optimization of spectral transmittance for birefringent filter. *Acta Optics Sinica* (光学学报), 2003, **23**(4):426~430
- 12 Ji Yuefeng. *Optical Wavelength Division Multiplexing System* (光波分复用系统). Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication Press, 1999
- 13 Michael Bass. *Handbook of Optics* (2nd edition). McGraw Hill Inc., 1995, vol. II

Design of a New Type Interleaver

Zhang Juan Liu Liren Zhou Yu Zhou Changhe

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

(Received 2 September 2002)

Abstract: A new structure of polarized light interference interleaver is presented. The key component of the interleaver is birefringent analog waveplate. It is equivalent to a birefringent crystal. The equivalent birefringence can be much larger than that of a conventional birefringent crystal. The interleaver has the characteristics of good stability, high reliability that the general polarized light interference interleaver possesses. Moreover, it has much higher isolation and can more easily realize any size of frequency spacing. An interleaver with the frequency spacing of 50 GHz is designed. The flatness width of passband and stopband are both greater than 1/5 period, and the channel isolation is -30 dB. Several parameters in practical applications of this device, such as insertion loss, polarization dependent loss and cost are analyzed and discussed as well.

Key words: optical fiber communication technology; dense wavelength division multiplexing; interleaver; birefringence; polarized light interference