

文章编号: 0253-2239(2004)09-1269-5

平面波导环形格子结构型光交错复用器的设计*

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: 在分析比较双折射晶体偏振光干涉型和平面波导环形格子结构型光交错复用滤波器原理的基础上, 揭示了两者在光谱透射率的数学上的等效性, 给出了两者结构参量之间的等效关系, 可以直接利用经简单傅里叶级数对比法获得的晶体的结构参量对平面波导环形格子结构型光交错复用滤波器进行结构设计。利用该方法对一个两级平面波导环形格子结构型光交错复用滤波器进行了优化设计, 信道隔离度比文献中结构提高了近 5 dB, 而且结构参量有多种组合。与利用复杂的格子理论计算仅获得一组结构参量相比, 该方法更加简单、有效。

关键词: 光纤通信技术; 密集波分复用; 光交错复用器; 偏振光干涉; 定向耦合器; 相位延迟线

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

An Optimized Design of Interleaver Filter Based on Planar Lightwave Circuit-Type Lattice Structure

Zhang Juan Liu Liren Zhou Yu

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

(Received 21 April 2003; revised 30 December 2003)

Abstract: On the basis of analyzing the principles of interleaver filters of the interference of polarized light and planar lightwave circuit-type lattice structure, the equivalent mathematical representation of the spectral transmittance of the two kinds of interleavers is revealed. The equivalent relationships of the structural parameters of them are given. The interleaver filter based on planar lightwave circuit-type lattice structure can be designed through directly utilizing the structure parameters of crystal obtained by the method of comparing Fourier series. A two-stage lattice structural interleaver filter is designed by the use of the method. Compared with only one group of structural parameters obtained using a lattice theory proposed recently, the designing method is more simple and efficient for isolation to be increased by 5 dB and many groups of structural parameters to be obtained.

Key words: optical fiber communication technology; dense wavelength-division multiplexing; interleaver filter; interference of polarized light; directional coupler; phase delay line

1 引 言

随着通信容量的迅猛增加, 实现更窄的频率间隔和更多的复用信道一直是波分复用(WDM)系统进行系统扩容的一个主要发展方向, 其中光交错复用器(interleaver)技术则是实现更加密集波分复用的一种有效解决方法^[1,2]。

目前光交错复用器技术的实现方案多种多样^[3~7], 其中平面波导环形格子结构型光交错复用器技术(包括光纤马赫-曾德尔型光交错复用器技术)是典型方案之一。Oguma 等^[8]利用了三个耦合率分别为 50%, 70% 和 10% 的定向耦合器和两个光程差分别为 L 和 $2L + \lambda/2$ 的相位延迟线实现了平坦化的光谱响应。但其在计算定向耦合器的耦合率以及相位延迟线的光程差时采用的是基于散射矩阵因子分解的合成算法^[9], 该方法较复杂, 波形平坦度不是很好。偏振光干涉型光交错复用器技术也是实现光交错复用器技术的一个典型方案。Carlsen 等

* 国家自然科学基金(60177016)、国家科技部(2002CCA03500)、上海市科委科技计划(012261011)资助课题。

E-mail: juanzhang_zj@hotmail.com

收稿日期: 2003-04-21; 收到修改稿日期: 2003-12-30

人采用了 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^[10]。其在计算晶体方位角时采用的是 Ammann 方法^[11],该方法较复杂,在通带和阻带的抖动不大于 1% 时,只得得到了一组晶体方位角值,而且在通带和阻带抖动不大于 0.1% 时,通带和阻带的宽度与周期的比值不到 3%。我们针对晶体的偏振光干涉滤波器提出了一种产生平坦化光谱透射率函数的傅里叶级数对比较的搜索方法,可在较大的通带和阻带范围内找到抖动很小时的晶体方位角度的所有数值解^[12],由于其属于正向搜索,所以十分简单。

本文利用晶体的结构参量对平面波导环形格子结构型光交错复用器的结构进行设计,大大简化了平面波导环形格子结构型光交错复用器的结构参量的计算,同时也优化了波形,隔离度明显提高。

2 原 理

2.1 平面波导环形格子结构型光交错复用器

平面波导环形格子结构型光交错复用器的结构如图 1(a)所示,它由 n 个相位延迟线、 $n+1$ 个定向耦合器以及 n 对置于相位延迟线的每个波导上的相

位平移器构成,相位延迟线上的相位平移器用于修正光程差的误差。输入光束经输入端口 1 入射,在第一个耦合器处按其耦合率分解成两路光束,这两路光分别经相位延迟线的两波导后产生一定相位延迟,在第二个耦合器处这两束光又分别按第二个耦合器的耦合率被分解成两路光束,之后分别经第二个相位延迟线产生一定相位延迟,以此方式经多个耦合器和延迟线后发生多光束干涉。

耦合器的传输矩阵可表示为

$$\mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & -j \sin \varphi_i \\ -j \sin \varphi_i & \cos \varphi_i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 φ_i 为第 i 个耦合器的相位因子,耦合率 $C_i = \sin^2 \varphi_i$ 。

相位延迟线的传输矩阵为

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_i) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 Φ_i 为第 i 个相位延迟线的相位差, n 为波导的有效折射率, l_{i1} 和 l_{i2} 分别为第 i 个相位延迟线两波导的长度, λ 为光的波长。令 $t_i = \frac{n \cdot (l_{i1} - l_{i2})}{c}$,其中 c 为光速,则 Φ_i 可表示为: $\Phi_i = 2\pi \cdot f \cdot t_i$ 。

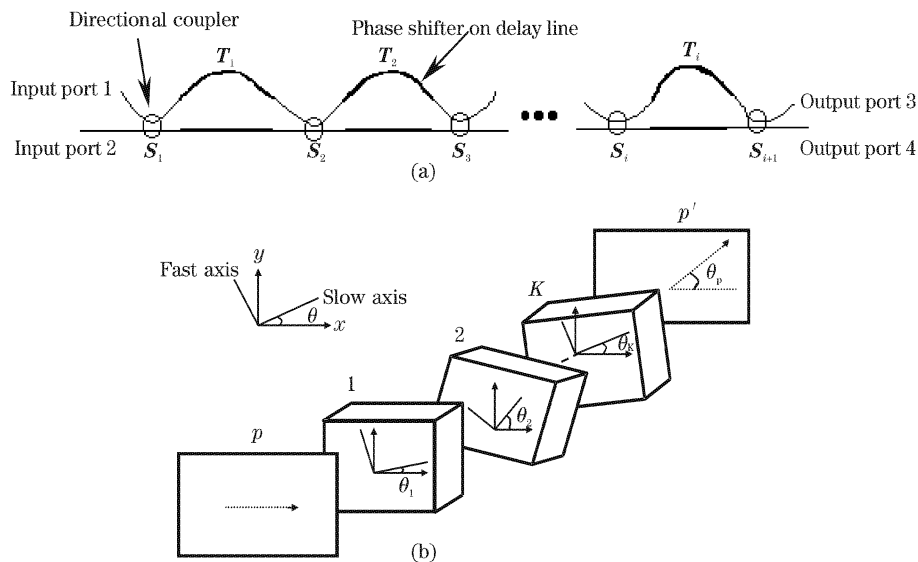


Fig. 1 Schematic configuration of interleaver filter based on (a) planar lightwave circuit-type lattice structure, (b) cascaded birefringent crystals

从输出端口 3 和 4 输出的光束可表示为

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \mathbf{S}_{i+1} \cdot \mathbf{T}_i \cdot \cdots \cdot \mathbf{S}_2 \cdot \mathbf{T}_1 \cdot \mathbf{S}_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

则从输出端口 3 和 4 输出的光强分别为

$$I_3 = E_3 \cdot E_3^*, \quad I_4 = E_4 \cdot E_4^*, \quad (4)$$

将(1)式~(3)式代入(4)式,则输出端口 3 的光谱透

射率函数可表示为

$$T'(f) = a_0 + a_1 \cos(2\pi \cdot t'_1 f) + a_2 \cos(2\pi \cdot t'_2 f) + \cdots + a_n \cos(2\pi \cdot t'_n f) + \cdots, \quad (5)$$

其中 $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ 是与各耦合器的相位因子 $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_n, \varphi_{n+1}$ 有关的系数, t'_1, \cdots, t'_n 为 t_1, t_2, \cdots, t_n 的单

独或者其任意组合的和项、差项或者和差项。同样可计算输出端口 4 的光谱透射率函数,可知输出端口 4 和 3 的光强满足如下关系:

$$I_3 + I_4 = 1. \tag{6}$$

2.2 偏振光干涉型光交错复用器

偏振光干涉型光交错复用器利用的是晶体的双折射效应和偏振光干涉原理。级联双折射偏振光干涉型光交错复用器的结构设计如图 1(b),其中光垂直入射各晶体,晶体的光轴平行于晶体表面。晶体的方位角 θ 定义为双折射晶体的慢轴与起偏器的偏振方向的夹角。当晶体为单轴负晶体时,快轴方向与晶体的光轴方向重合,而为单轴正晶体时,慢轴方向与晶体的光轴方向重合。

一任意方向偏振的入射光经起偏器后成为偏振光,偏振方向与起偏器的偏振方向平行,接着垂直入射第一块双折射晶体,在第一块晶体内分解为分别沿光轴方向和与光轴垂直方向偏振的 e 光和 o 光,这两光束的传播方向与光轴垂直,振幅大小与该晶体的方位角有关,经过晶体后产生了一定的相位延迟,当入射第二块晶体时,由于两晶体的方位角不同,这两束光在第二块晶体内又会分别分解为沿第二块晶体光轴方向和与光轴垂直方向的 e 光和 o 光,振幅大小与两晶体的方位角有关,经过第二块晶体后也产生一定的相位延迟,以此方式经过多块晶体后共有多个相位不同的光束产生,最后这些光束在检偏器偏振轴方向的分量发生干涉。

每块双折射晶体的相位差为

$$\phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_i \cdot d_i, \tag{7}$$

每块双折射晶体的频率间隔 Δf_i 或时延 γ_i 为

$$\Delta f_i = \frac{1}{\gamma_i} = \frac{c}{\phi_i(\lambda/2\pi)}, \tag{8}$$

其中 Δn_i 为第 i 块晶体 e 光和 o 光的折射率差, d_i 为第 i 块晶体的厚度, c 为光速, λ 为波长, $i = 1, 2, \dots, K$ 。

根据琼斯矩阵理论,该系统的光谱透射率函数可表示为

$$T(f) = T_0 + T_1 \cos(2\pi\gamma'_1 f) + T_2 \cos(2\pi\gamma'_2 f) + \dots + T_n \cos(2\pi\gamma'_n f) + \dots, \tag{9}$$

其中 $T_0, T_1, T_2, \dots, T_n$ 是与各块晶体的方位角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_K$ 及检偏器的方位角(偏振方向相对于起偏器偏振方向的夹角) θ_p 有关的系数, $\gamma'_1, \gamma'_2, \dots, \gamma'_n$ 为 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ 的单独或者其任意组合的和项,差项或者和差项。

2.3 结构参量的等效

从 2.1 节和 2.2 节的分析,发现偏振光干涉型光交错复用器和平面波导环形格子结构型光交错复用器存在以下异同点:它们都是将入射光按一定比例分解成两路光(前者两路光在空间彼此不分开,而后者两路光在空间是分离的),之后分别产生一定延迟,随后这两路光以一定比例又分别发生第二次光束分解,这样经过多个该同样结构的元件后发生多光束干涉。不同的是前者光束的分解和相位延迟的产生利用的是晶体,而后者利用定向耦合器对光束进行分解,光束相位延迟的产生利用的是相位延迟线。比较偏振光干涉型光交错复用器的光谱透射率的表达式(9)和平面波导环形格子结构型光交错复用器的光谱透射率的表达式(5),两者结构参量存在如下关系:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \theta_1, \\ \varphi_2 = \theta_2 - \theta_1, \\ \dots\dots\dots \\ \varphi_i = \theta_i - \theta_{i-1}, \\ \varphi_{i+1} = \theta_p - \theta_i, \\ \Phi_i = \phi_i, \end{cases} \tag{10}$$

即偏振光干涉型光交错复用器和平面波导环形格子结构型光交错复用器结构参量满足:后者中除最后一个定向耦合器的相位因子对应于前者中的检偏器的方位角和紧位于其前的晶体的方位角的差值外,其它定向耦合器的相位因子和与其对应晶体的相对方位角相等。每个相位延迟线的相位延迟和与其相应的晶体的相位差对应。

3 优化实例

以设计一个两级平面波导环形格子结构型光交错复用器的情况为例,利用偏振光干涉型光交错复用器的结构参量对该平面波导环形格子结构型光交错复用器结构进行优化设计。

对两块晶体级联的偏振光干涉型光交错复用器,采用傅里叶级数对比的搜索方法,可得到当晶体厚度比为 1:2 时,晶体和检偏器方位角的多组组合值,如表 1 所示。以其中的任意一种角度组合值 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -11^\circ, \theta_p = 4^\circ$ 为例进行优化,则两级平面波导环形格子结构型光交错复用器中的 3 个定向耦合器的相位因子分别为: $\varphi_1 = 45^\circ, \varphi_2 = -56^\circ, \varphi_3 = 15^\circ$, 即耦合率分别为 50%、68.7% 和 6.7%, 将上述结构参量代入(5)式中进行计算,所得波形如图 2 中实线所示(这里光谱透射率以 dB 表示),虚线

为利用 Oguma 等人计算的结构参量得到的曲线图(该结构为两级平面波导格子结构,两个相位延迟线的相位延迟为 L 和 $2L + \lambda/2$, L 对应于自由光谱范围为 100 GHz 时的长度,定向耦合器的耦合率分别为 50%, 70% 和 10%。

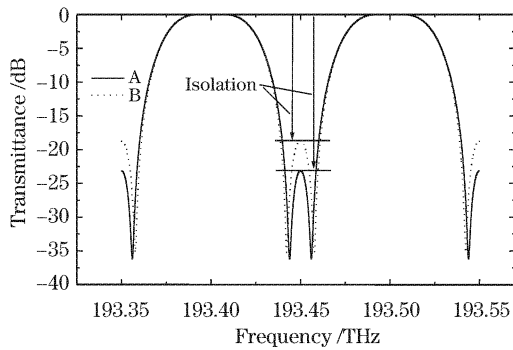


Fig. 2 The spectral transmittance of a two-stage interleaver filter based on planar lightwave circuit-type lattice structure when coupling ratios of directional couplers are, respectively, corresponding to (A) 50%, 68.7%, 6.7% (B) 50%, 70% and 10%

由图 2 可知,利用偏振光干涉型光交错复用器中的晶体和检偏器的方位角对平面波导环形格子结构型光交错复用器中耦合器的耦合率进行优化,所得光谱透射率曲线大大改善,可计算隔离度分别为 -18.5 dB 和 -23.3 dB,隔离度提高了近 5 dB。

图 3 为图 2 中的光谱透射率在通带处的放大结果。从图 3 可清楚看出,通过优化结构参量,光谱透射率在通频带处的抖动明显减小,也即隔离度的提高,这些在波分复用系统的实际应用中都是十分有意义的。表 2 为利用表 1 中的参量值优化平面波导环形格子结构型光交错复用器的结构时所得的耦合率。为了证实结构参量多种组合的有效性,再取表 2 中的另一组结构参量,即耦合率分别为 50%、70.3% 和 92.4% 对光谱透射率进行计算,所得曲线如图 4 中实

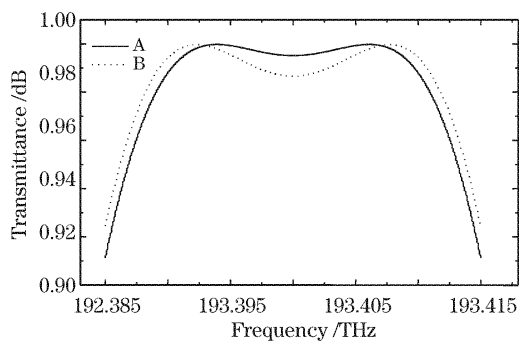


Fig. 3 The magnified graphs of spectral transmittance at passband in Fig. 2

线所示,其中 Oguma 等人计算的光谱透射率曲线如虚线所示也一同画在图中以便进行对比。从图 4 可看出光谱透射率曲线同样也得到了明显改善,从而验证了该方法的参量有多种组合的特点。

Table 1 The azimuth angles of crystals and analyzer when ripples are not greater than 0.7% (i. e. isolation > 21.5 dB) in both the 2/11 period of passband and stopband

$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$	$\theta_p/(\circ)$
45	-79	-4
	-78	
	-77	
	-76	
	-14	4
	-13	
	-12	
	-11	

Table 2 The produced coupling ratios of directional couplers when optimizing the structure of interleaver filter based on planar lightwave circuit-type lattice structure through utilizing the parameters in Table 1

C_1	C_2	C_3
50%	68.7%	93.3%
		6.7%
	70.3%	92.4%
		7.6%
	71.9%	91.5%
		8.5%
	73.5%	90.5%
		9.5%

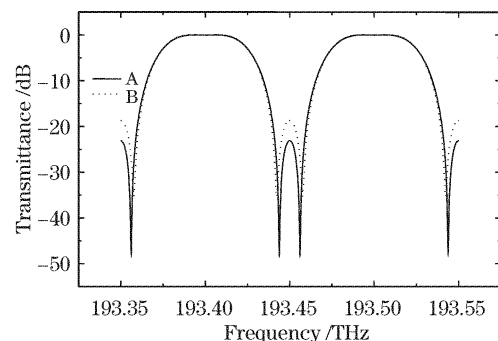


Fig. 4 The spectral transmittance of a two-stage interleaver filter based on planar lightwave circuit-type lattice structure when coupling ratios of directional couplers are, respectively, corresponding to (A) 50%, 70.3%, 92.4% (B) 50%, 70% and 10%

结论 从偏振光干涉型光交错复用器和平面波导环形格子结构型光交错复用器(包括光纤马赫-曾德尔型光交错复用器)的原理出发,推导了两者光谱透射率的表达式,得出了两者在本质上的一致性,给出了两者在结构参量上的等效关系。利用两块晶体级联的偏振光干涉型光交错复用器的结构参量对两级平面波导环形格子结构型光交错复用器进行了优化设计,所得信道隔离度和文献相比提高近 5 dB,从而为平面波导环形格子结构型光交错复用器的设计提供了一个新颖的、简单有效的设计方法。由于结构参量有多种组合,因而在实际应用中扩大了选择余地、降低了加工难度。

参 考 文 献

- 1 Shine B, Bautista J. Interleavers make high-channel-count system economical. *Lightwave*, 2000, (8): 140~144
- 2 Cai Yanmin, Zhao Ling, Zhou Yingwu *et al.*. Experimental study on interleaved demultiplexer based on polarization beam interferometer. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, **30**(3): 239~242 (in Chinese)
- 3 Dingel B B, Aruga T. Properties of a novel noncascaded type, easy-to-design, ripple-free optical bandpass filter. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(8): 1461~1469
- 4 Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver. *Acta Optics Sinica* (光学学报), 2003, **23**(12): 1424~1428 (in Chinese)
- 5 Meng Yichao, Huang Zhaoming, Wang Lutang. Transmission characteristics of interleaver based on Mach-Zehnder interferometer with optical all pass filter inserted. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(5): 575~580 (in Chinese)
- 6 Huang Dingwei, Chiu Tsung-hsuan Chiu, Lai Yinchieh. Arrayed waveguide grating DWDM interleaver. OFC 2001, Paper WDD80, 2001/5/22
- 7 Loh W H, Zhou F Q, Pan J J. Novel design for sampled grating-based multiplexers-demultiplexers. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(21): 1457~1459
- 8 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
- 9 Jinguji K, Oguma M. Optical half-band filters. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **18**(2): 252~259
- 10 Carlsen W J, Buhner C F. Flat passband birefringent wavelength-division multiplexers. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(3): 106~107
- 11 Ammann E O. Synthesis of optical birefringent networks, in: *Progress in Optics IX*. North-Holland, Amsterdam, 1971. 123~177
- 12 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 (in Chinese)