

文章编号: 0253-2239(2003)04-0426-05

双折射滤波器光谱透射率函数的平坦化优化计算*

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: 对于双折射偏振光干涉滤波器, 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晶体偏转角度的数值解。给出了三块双折射晶体结构的抖动不大于 0.1% 时的晶体偏转角度的数值解, 讨论了晶体偏角和厚度的变化对透射率函数波形的影响。

关键词: 光通信技术; 双折射滤波器; 傅里叶变换; 波分复用; 交错复用器

中图分类号: TB857 文献标识码: A

1 引 言

随着系统传输容量要求的不断提高, 发展窄的信道频率间隔和大的信道数的密集波分复用 (DWDM) 系统已成为一个迫切要解决的问题。一种交错复用器 (interleaver) 能将一组等间隔的波分复用 (WDM) 信号信道分离成两组两倍于以前信号信道间隔的信号, 可有效减轻现有的波分复用器件解复用对波长间隔要求的负担, 大大提高系统传输容量。这种滤波器必须要有平坦的通频带才能有实际的应用价值, 因为平坦通频带可使激光谱宽、漂移和模式分立的复合效应在一个很大波长范围内对系统的性能影响不大, 所以有很好的发展前景。

Šolc 型干涉滤波器^[1,2], 是由若干块双折射晶体和两块偏振片组成的。主要有两种类型: 一种是 Folded Šolc 滤波器, 另一种是 Fan Šolc 滤波器。前者它的每块晶体的偏角相对于起偏器是交错相等的, 两块偏振片的偏振方向是互相垂直的, 而后者它的每块晶体的偏角相对于起偏器是等间隔增大的, 两块偏振片的偏振方向是互相平行的, 但这两类滤波器的相同点是它们的每块晶体都是等厚的。该滤波器是一种大视场窄带滤波器, 在太阳物理方面有很重要的用途。也能改造成可以实现光谱透射率函数接近于方波的偏振光干涉滤波器^[3], 其采用 3 块不同厚度的双折射晶体, 通过改变各块晶体的快轴或慢轴的相对于其前的起偏器的偏转角以得到想要

的平坦化光谱透射率函数, 因此可用作交错复用器, 但其在计算晶体偏转角时较复杂, 对于特定要求的平坦化光谱透射率函数只得到了一组晶体的偏角值, 同时该平坦化光谱透射率函数的平坦度不是很好。本文在 Šolc 型滤波器的基础上改进了它的结构, 使各块晶体相对于起偏器的偏角, 两块偏振片的偏振方向的夹角和各块晶体的厚度为任意值, 计算上采用傅里叶级数对比法, 得出产生平坦化光谱透射率函数的条件, 再利用搜索法让计算机进行搜索, 可以寻找到在足够大的通带和阻带内抖动不大于一定值时产生该最佳平坦化光谱透射率所需的各块晶体的所有可能的偏角值。作为比较, 本文给出了三块晶体结构的 2/11 周期通带和阻带内抖动不大于 0.1% 的计算实例, 同时计算了该平坦化光谱透射率函数波形的平顶宽度, 最后对各块晶体偏角和厚度的变化进行了讨论。

2 基本原理

级联双折射交错复用器的结构设计如图 1(a) 所示, 其中光垂直入射各晶体, 晶体的光轴平行于晶体表面。晶体的偏转角 θ 定义为双折射晶体的慢轴与起偏器的偏振方向的夹角, 如图 1(b) 所示。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。

2.1 光谱透射率函数的解析表达式

每块双折射晶体的相位差为

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_i d_i, \quad (1)$$

* 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: 2002-04-09; 收到修改稿日期: 2002-06-17

每块双折射晶体的频率间隔 Δf_i 或时延 γ_i 为

$$\Delta f_i = \frac{1}{\gamma_i} = \frac{c}{\varphi_i(\lambda/2\pi)}, \quad (2)$$

其中 Δn_i 为各块晶体的折射率差, d_i 为每块晶体的厚度, c 为光速, λ 为波长, $i = 1, 2, \dots, k$ 。

根据琼斯矩阵理论, 每一个光学元件都可用一个 2×2 的矩阵来表示, 整个系统可用所有光学元件的矩阵相乘来表示, 通过系统后出射光的偏振态为入射光的矢量表示与整个系统的矩阵表示相乘。该系统的光谱透射率函数可表示为

$$T(f) = T_0 + T_1 \cos(2\pi\gamma'_1 f) + T_2 \cos(2\pi\gamma'_2 f) + T_3 \cos(2\pi\gamma'_3 f) + \dots + T_n \cos(2\pi\gamma'_n f) + \dots, \quad (3)$$

其中, T_n 是与各块晶体的慢轴相对于起偏器的偏振方向的偏转角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k$ 及检偏器的偏振方向与起偏器的偏振方向的夹角 θ_p 有关的系数, γ'_n 为 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_k$ 的单独或者其任意组合的差项、和项或者和差项。

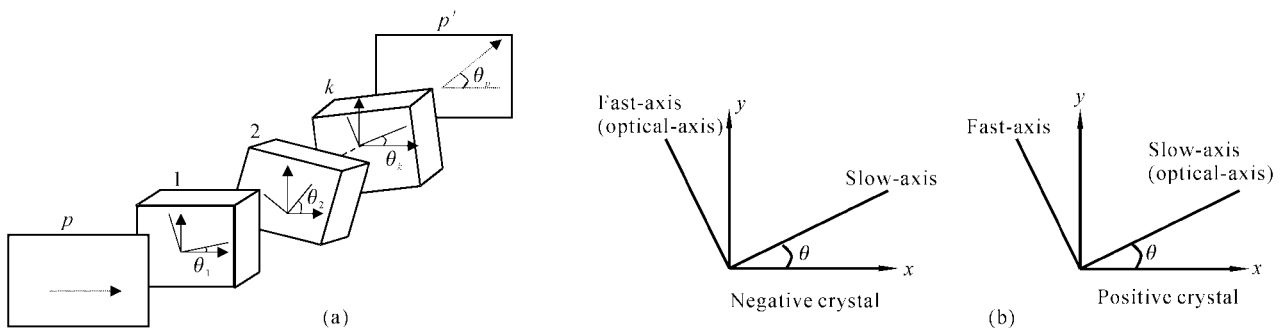


Fig. 1 (a) Structure of the birefringent chain filter for interleaver (b) when light is normally incident into birefringent crystal with optical-axis parallel to its surface, the relation between deflection angle and optical-axis

2.2 理想周期性矩形光谱透过率函数的傅里叶级数表达

一个理想的周期性矩形光谱透过率函数(见图 2)为

$$T(f) = \sum_n \text{rect}\left(\frac{f - n\Delta f}{\delta f}\right), \quad (4)$$

其中 δf 为光谱透过开口宽度。

该周期性矩形光谱透过率函数可以用傅里叶级数表达为^[4]

$$T(f) = a_0 + a_1 \cos\left(2\pi \frac{f}{\Delta f}\right) + a_2 \cos\left(2\pi \frac{2f}{\Delta f}\right) + a_3 \cos\left(2\pi \frac{3f}{\Delta f}\right) + \dots + a_n \cos\left(2\pi \frac{nf}{\Delta f}\right) + \dots, \quad (5)$$

其中傅里叶系数为

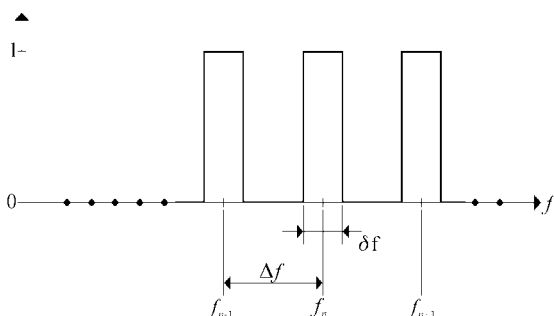


Fig. 2 The ideal periodical rectangle spectral transmittance

2.3 产生平坦化光谱透射率函数的条件及搜索方法

为了得到任一开口比的矩形光谱透射率函数[参见公式(4)], 晶体的偏转角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k$ 和频率间隔 $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3, \dots, \Delta f_k$ 必须满足一定的条件, 这可以通过傅里叶级数对比法而得到, 即对比(3)式和(5)式使得其所产生的光谱透射率函数的级数[(3)式]与周期矩形函数的傅里叶级数[(5)式]相近, 即得到与周期矩形函数相近的光谱透射率函数。

要在原理上消除奇数通道和偶数通道之间的交叉干扰, 透过率的最大峰峰值和最小峰谷值应当分别为 1 和 0。由于实际应用中使用的晶体个数是有限的, 它产生的透过率函数的级数项也是有限的, 因此不可能形成理想的周期性矩形函数, 但可以实现平坦的透过通带和透过阻带。在此前提下定义了平坦宽度, 设定最大峰值降低了 $s\%$ 的宽度为透过通带的光谱平坦宽度, 设定最小峰值增加 $s\%$ (s 为任意的常量) 的宽度为透过阻带的光谱平坦宽度。如 $s = 0.1$ 时对应于 -30dB 的交叉干扰, $s = 1$ 时对应于 -20dB 的交叉干扰。

计算采用的搜索方法为, 在角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$ 、

θ_k (及 θ_p , 其为检偏器的偏振方向与起偏器的偏振方向的夹角, 一般取 0° 或 90°) 的全部范围内每隔一定角度进行光谱透射率函数的计算, 搜索达到要求的平坦光谱透射率函数所需的 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k$ (及 θ_p) 的特定值, 可见该方法属于正向推导法。其计算和评估过程分为三步:

第一步, 根据峰值是否为 1 和 0 以及奇偶分离器光谱透过率级数的系数与对照矩形函数的系数是否相近而进行初步选择;

第二步, 通过初选后, 计算一定平坦宽度下, 即 $s\%$ 时的光谱透过通带和阻带的宽度;

第三步, 计算透过率曲线。

3 数值计算结果及讨论

选取 3 块方解石晶体和 2 块偏振方向互相平行的偏振片, 如结构图 1 放置。频率范围为 193.35~193.55 THz, 对应的波长在 1548.91~1550.52 nm

波段, 主要用于 50 GHz 波分复用信号的奇偶分离, 分离后的波分复用信号频率间隔为 100 GHz。

首先令 $k=3$, 按照琼斯矩阵理论, 计算出光谱透射率函数的表达式; 其次该交错复用器应当产生 1:2 开口比的周期性平坦通带和阻带的光谱透过函数, 按照(5)式、(6)式、(7)式计算该开口比的理想周期矩形函数的傅里叶级数; 对比第一步计算出的光谱透射率函数的表达式和第二步计算出的 1:2 开口比的理想周期矩形函数的傅里叶级数可知, 要产生该平坦化光谱透射率函数, 可要求 $\theta_1 = 45^\circ$ 和三块晶体的厚度比为 1:2:2 (这里考虑前五阶傅里叶级数); 最后再利用搜索方法, 编程让计算机每隔 1° 对 θ_2 和 θ_3 在 $(-\pi/2, \pi/2)$ 内作循环, 同时限定通带和阻带抖动不大于 0.1%, 范围为大于 2/11 周期 (这里检偏器与起偏器偏振方向平行, 即 $\theta_p = 0^\circ$), 则搜索到了多组 θ_2 和 θ_3 的角度值。具体的搜索结果见表 1, 典型波形之一 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -71^\circ, \theta_3 = 83^\circ$ 的波形可见图 3 中的实线所示。

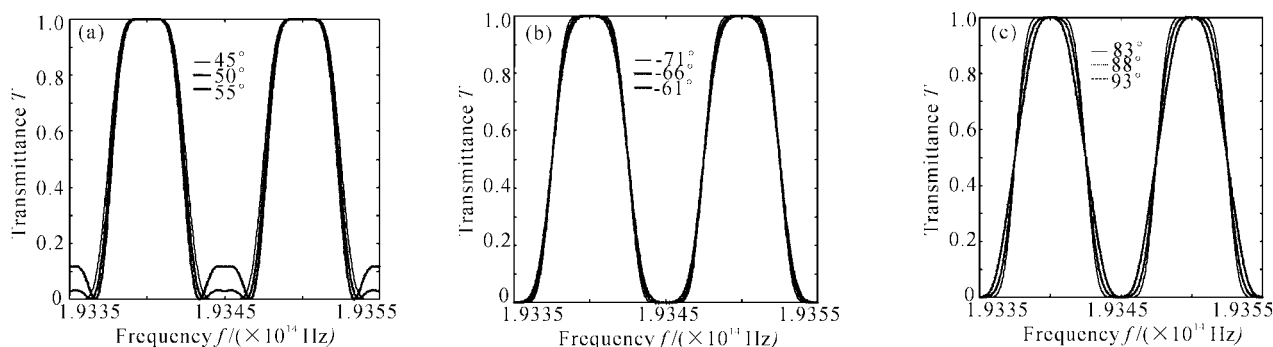


Fig. 3 The waveform corresponding to the different deflection angle of a certain crystal. (a) When $\theta_2 = -71^\circ, \theta_3 = 83^\circ$, the waveform of different θ_1 ; (b) When $\theta_1 = 45^\circ, \theta_3 = 83^\circ$, the waveform of different θ_2 ; (c) When $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -71^\circ$, the waveform of different θ_3

Table 1 The crystals' deflection angle in 2/11 period passband and stopband when the ripple is not greater than 0.1% and the ratios of the width of passband T_1 and stopband T_2 to period T using these searched deflection angles

$\theta_1 / (^\circ)$	$\theta_2 / (^\circ)$	$\theta_3 / (^\circ)$	T_1/T	T_2/T	$\theta_1 / (^\circ)$	$\theta_2 / (^\circ)$	$\theta_3 / (^\circ)$	T_1/T	T_2/T
45	-72	84	0.185		45	-70	83	0.190	
	-18	6				-20	7		
	-71	83				-69	81		
	-19	7	0.199	-21		9	0.192		
	-70	82	-69	82					
	-20	8	0.202	-21		8			0.189

晶体偏角和厚度是影响滤波器波形的关键因素, 因此讨论晶体偏角和厚度变化对滤波器波形的影响将是非常重要的。

下面以 $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -71^\circ, \theta_3 = 83^\circ$ 为例, 讨论

晶体偏角和厚度分别发生变化对方波波形的影响。

首先讨论三块晶体偏角每块单独发生变化时方波波形的变化, 所得波形如图 3。由图 3 可知, 当变化相同的角度时, 第一块晶体角度的变化对方波的

通带和阻带的影响不一致,且其对通带的影响很小,而对阻带影响较大;第二块晶体角度的变化对方波波形影响最小,但其同等的影响通带和阻带,且其变化主要影响通带和阻带的宽度范围;第三块晶体角度的变化对方波波形的影响稍大于第二块,其也同等影响通带和阻带,而且影响主要表现在通带和阻带的宽度范围。由此知,对同一方波而言,第一块晶体所允许的角度变化范围最小,其次为第三块晶体,第二块晶体所能允许的角度变化范围最大。表 2 为每块晶体角度单独发生变化仍满足在 2/11 周期的通带和阻带内抖动不大于 0.1% 的角度范围(以 0.1° 为搜索间隔),可知在该条件下晶体 1 的角度变化范围不超过 1° ,晶体 2 的角度变化范围为 2° 左右,晶体 3 的角度变化范围小于 2° 。

其次讨论每块晶体的厚度单独发生变化对方波

波形的影响[这里以频率间隔的变化代替厚度变化,频率间隔与厚度的关系见(1)式和(2)式],所得波形如图 4。由图 4 可知,当频率间隔变化大小相同(这里频率间隔的变化量均为 0.002 GHz)时,第二块晶体厚度发生变化对波形的影响最大,且方波波形明显发生改变;第三块晶体厚度发生变化对波形的影响最小,且主要表现在通带和阻带处;第一块晶体厚度发生变化对波形的影响大小介于两者之间。由此可知,对同一方波而言,第二块晶体所允许的厚度变化范围最小,其次为第一块晶体,第三块晶体所允许的厚度变化范围最大。进一步计算,还可知在本文表格中对所搜索方波的条件要求下,晶体 1 的频率间隔的允许变化范围为 233 kHz,晶体 3 的频率间隔的允许变化范围为 304 kHz,而晶体 2 的频率间隔的允许变化范围为只有 86 kHz。

Table 2 The deflection angle range of crystals when the deflection angle of each crystal changes solely, while the ripple of passband and stopband is not greater than 0.1% in the 2/11 period passband and stopband (the searching step is 0.1°)

Group of angle value / ($^\circ$)	Range of θ_1 / ($^\circ$)	Range of θ_2 / ($^\circ$)	Range of θ_3 / ($^\circ$)
45, -72, 84	45.0~45.5	(-72.8)~(-71.4)	83.2~84.1
45, -18, 6	44.5~45.0	(-18.6)~(-17.2)	5.9~6.8
45, -71, 83	44.5~45.4	(-71.8)~(-69.4)	82.3~83.8
45, -19, 7	44.6~45.5	(-20.6)~(18.2)	6.2~7.7
45, -70, 82	44.2~45.2	(-70.6)~(-68.5)	81.6~83.4
45, -20, 8	44.8~45.8	(-21.5)~(-19.4)	6.6~8.4
45, -70, 83	44.8~45.6	(-71.8)~(-69.4)	81.6~83.4
45, -20, 7	44.4~45.2	(-20.6)~(-18.2)	6.6~8.4
45, -69, 81	44.2~45.0	(-69.2)~(-68.4)	80.9~82.6
45, -21, 9	45.0~45.8	(-21.6)~(-20.8)	7.4~9.1
45, -69, 82	44.5~45.4	(-70.6)~(-68.5)	80.9~82.6
45, -21, 8	44.6~45.5	(-21.5)~(-19.4)	7.4~9.1

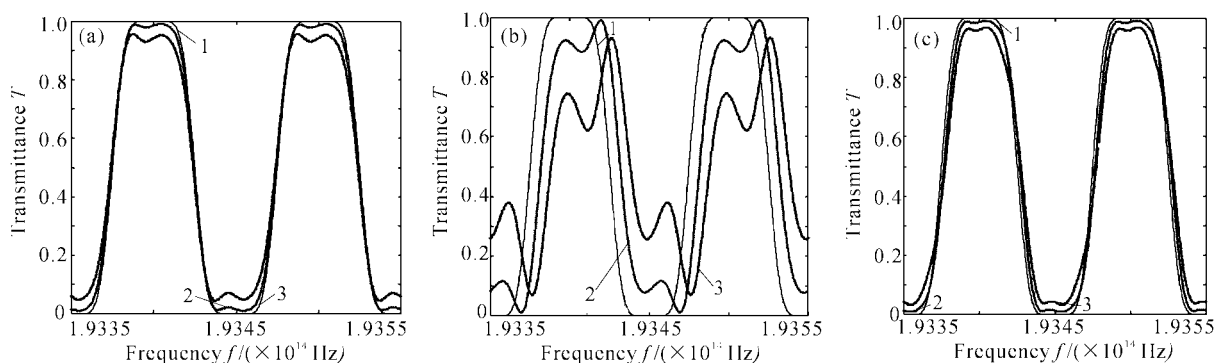


Fig. 4 When $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = -71^\circ, \theta_3 = 83^\circ$, the waveform corresponding to the different frequency spacing of each crystal. (a) The waveform of different frequency spacing of the first crystal, 1: 1.0×10^{11} Hz, 2: 1.0002×10^{11} Hz, 3: 1.0004×10^{11} Hz; (b) The waveform of different frequency spacing of the second crystal, 1: 5.0×10^{10} Hz, 2: 5.0002×10^{10} Hz, 3: 5.0004×10^{10} Hz; (c) The waveform of different frequency spacing of the third crystal, 1: 5.0×10^{10} Hz, 2: 5.0002×10^{10} Hz, 3: 5.0004×10^{10} Hz

对比图 3 与图 4 我们发现,晶体厚度所要求的精确度要比晶体偏角的要求严格得多,晶体厚度发生微小的变化给方波波形带来的影响都要比偏角发生变化时造成的影响大得多。

结束语 参考文献[3]在通带和阻带的抖动不大于 1% 时,只得到了一组晶体偏角值,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%。本实施方案采用 1° 为间隔进行晶体偏角的搜索,搜索到了在通带和阻带的抖动不大于 0.1% 时所有可能的多组晶体偏角的数值解,同时通带和阻带的宽度与周期的比值均在 20% 左右,

若以更小的角度间隔进行搜索,会得到更多组的晶体偏角值。

参 考 文 献

- 1 Šolc I. Birefringent chain filters. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, **55**(6):621~625
- 2 Yariv A, Yeh P. *Optical Waves in Crystals*. New York: John Wiley & Sons, 1984. 121~148
- 3 Carlsen W J, Buhrer C F. Flat passband birefringent wavelength-division multiplexers. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(3):106~107
- 4 Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab S H. *Signals & Systems*. Beijing: Tsinghua University Press, 1998. 171~195

Flattening Optimization of Spectral Transmittance for Birefringent Filter

Zhang Juan Liu Liren Zhou Yu Zhou Changhe

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

(Received 9 April 2002; revised 17 June 2002)

Abstract: A searching method of Fourier series contrast capable of producing flat spectral transmittance for birefringent filter is presented based on the interference of polarized light. All the possible numerical solutions of the deflection angles of the crystals can be searched out in a relative large range of passband and stopband when the ripple is relatively small. For the system containing three birefringent crystals, all the possible deflection angles of the crystals were searched out when the ripple is not greater than 0.1%. The influence of the deflection angles and thickness of the crystals on the system's spectral transmittance was discussed.

Key words: optical communication technology; birefringent filter; Fourier transform; wavelength-division multiplexing; interleaver