

doi:10.3788/gzxb20134201.0090

偏振无关的双折射多波长滤波器的 Z 域设计

刘群

(防灾科技学院 基础课教学部, 河北 三河 065201)

摘 要:基于双折射铌酸锂晶体的电光效应,设计了一种偏振无关的二端口波导型多波长可调谐滤波器.在非对称干涉仪的上下分支波导上,耦合电极与相移电极周期性交叉级联实现模式的偏振转换.利用琼斯矩阵的 Z 域分析,求解驱动电压模拟实现多个波长的同时选择.仿真实现了自由光谱范围内分布任意的窄带多波长输出.波长中心处传输率为 100%;旁瓣大小受到所选波长个数的影响,三个波长同时滤波的旁瓣可达 12 dB.同时得到了梳状滤波输出谱,其通带顶部平坦,旁瓣可达 15 dB 以上.

关键词:电光调谐滤波器;偏振无关;多波长选择;Z 变换求解

中图分类号:TN253

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)01-0090-4

Z-domain Design of Polarization-independent Birefringent Multi-wavelength Filter

LIU Qun

(Department of Fundamental Courses, Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065201, China)

Abstract: A polarization-independent two-port wave-guided multi-wavelength tunable filter is designed based on the electro-optic effect of birefringent Lithium Niobate (LiNbO_3) crystal. Mode-coupled electrode and phase-shifted electrode periodically alternated cascaded are set on each arm of an asymmetric interferometer to realize mode conversion. Z-domain analysis of Jones matrix is utilized to get the values of driving voltages so that wavelengths can be selected simultaneous. Narrow-band multi-wavelength with arbitrary distribution is simulated successfully in Free Spectrum Range (FSR). 100% transmittance is obtained at each wavelength. Number of wavelengths has an influence on sidelobe of each wavelength. And sidelobe of 12 dB can be realized when three wavelengths are selected. Comb filter can also be obtained using this method, which has a flat passband and sidelobe of more than 15 dB.

Key words: Electro-optic tunable filter; Polarization independence; Multi-wavelength selecting; Z-transform solution

0 引言

多波长光滤波器在波分复用系统中的应用,降低了信号的复用解复用对波长间隔的要求,提高了系统的传输容量;并且减小了网络节点处的插入损耗,增强了滤波的灵活性^[1-3].已报道的多波长滤波器主要有铁电性的二维光子晶体型^[4]、基于非周期性极化铌酸锂(Aperiodic Poled Lithium Niobate, APLN)的 solc 型^[5]、法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-

P)干涉仪型^[6]、马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, M-Z)干涉仪型^[7]、光纤光栅组合型^[8]等,并且主要以梳状滤波、奇偶交错滤波为主^[9-10].电学中的傅里叶分析方法为光器件的设计提供了新的思路^[11-12].本文对基于铌酸锂(LiNbO_3)晶体的偏振转换器进行 Z 域的设计与分析;离散傅里叶变换的运用,使得任意分布的多个波长的同时提取成为可能.并且利用非对称干涉仪结构模拟实现了偏振无关的多波长电光可调谐滤波器.

基金项目:中国地震局教师科研基金(No. 20120120)资助

第一作者:刘群(1978-),女,讲师,硕士,主要研究方向为激光与光电子技术. Email: liuqun@cidp.edu.cn

收稿日期:2012-05-29;录用日期:2012-10-08

1 工作原理

多波长滤波器结构如图 1. 二端口干涉仪的两个 Y 型波导均为对称的 3dB 功率分配器, 上下钛扩散铌酸锂 ($\text{Ti} : \text{LiNbO}_3$) 分支波导有半个波长的相对光程差. 在干涉臂上, 电压驱动独立的多级耦合电极和相移电极交替级联构成偏振转换单元 (Polarization Conversion Unit, PCU), 叉指型耦合电极的周期为 Λ , 相移电极对的间距为 G , 相邻两级耦合电极的间距为 L . 上下偏振转换单元有 $\Lambda/2$ 的空间位置差.

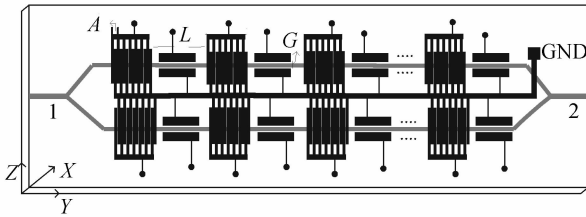


图 1 多波长滤波器结构

Fig. 1 Schematic illustration of multi-wavelength filter

波分复用的光信号从端口 1 输入, 在第一个 Y 型波导处等分为两部分分别进入上下干涉臂. 如果信号的波长 λ 满足偏振转换单元的相位匹配条件, 则在该波长处, 分支波导中光波的偏振模式进行偏振转换. 因为干涉臂的半波长光程差, 光信号在第二个 Y 型波导处相位差为 π . 但在波长 λ 处, 上下偏振转换单元 $\Lambda/2$ 的位置差同样导致了 π 的相位差. 所以波长为 λ 的光信号可从端口 2 输出, 其他光波则辐射进入基底.

2 理论分析与数值模拟

偏振转换单元作为滤波器的核心, 驱动电压的取值决定了滤波的波长以及性能好坏. 通过对偏振转换单元琼斯矩阵的 Z 域分析求解, 可求得所需滤波输出的对应电压取值. 上下臂 PCU 的电压取值是对称的, 分析方法相同.

N 级级联 PCU 中, 每级均由相同的耦合电极和相移电极构成, 光波的传播过程可以视作不同模式在不同长度光路中的叠加. 令 $z = e^{j\omega}$ (ω 为输入的波长信号归一化后的角频率), 每级偏振转换网络的琼斯矩阵 C_i 和 P_i 分别表示为

$$C_i = \begin{pmatrix} \cos(k_i l) & -j \sin(k_i l) \\ -j \sin(k_i l) & \cos(k_i l) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$P_i = \begin{pmatrix} z^{-1/2} \exp(-j\Delta\varphi_i/2) & 0 \\ 0 & z^{1/2} \exp(j\Delta\varphi_i/2) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, k_i 为耦合电极单位长度的耦合系数, 与驱动电压 V_i^c 为单调递增的关系. l 为耦合电极的长度.

$\Delta\varphi_i$ 为电压 V_i^p 驱动相移电极引起的偏振模式的相位差. 那么上下臂中的 N 级级联 PCU 的传输矩阵均可以表示为 Z 域的有限脉冲响应滤波网络

$$S(z) = \prod_{i=1}^N P_i C_i \quad (3)$$

各级电压 V_i^c 和 V_i^p 可通过待定系数法求解^[13-14]

$$\begin{cases} V_i^c = \kappa_i \lambda_0 \Lambda / (4\pi \Gamma_{\text{TE-TM}} \sqrt{n_{\text{TE}}^3 n_{\text{TM}}^3} \gamma_{51}) \\ V_i^p = \Delta\varphi_i \lambda_0 G / \pi L (\Gamma_{\text{TE}} \gamma_{33} n_{\text{TE}}^3 - \Gamma_{\text{TM}} \gamma_{13} n_{\text{TM}}^3) \end{cases} \quad (i=1, 2 \dots N) \quad (4)$$

式中, λ_0 为自由光谱范围 (Free Spectrum Range, FSR) 的中心波长, Γ_{TE} , Γ_{TM} 和 $\Gamma_{\text{TE-TM}}$ 均为电场不均匀性引起的归一化积分交叠系数, γ_{51} , γ_{33} 和 γ_{13} 均为铌酸锂晶体的电光系数.

如此, 在设定所需的滤波器传输函数 $H(z)$ 后, 通过待定系数法求解 k_i 和 $\Delta\varphi_i$, 就可以求得各个电压的取值.

$$\begin{cases} \kappa_i = \text{actan}(m_1^{[i]} / n_1^{[i]}) / l \\ \Delta\varphi_i = -\arg[(m_2^{[i]} n_1^{[i]} - m_1^{[i]} n_2^{[i]}) / ((m_1^{[i]})^2 + (n_1^{[i]})^2)] \end{cases} \quad (5)$$

式中, $m^{[i]}$ 表示 i 级级联的 PCU 的传输函数 $H(z)^{[i]}$ 的系数, $n^{[i]}$ 表示 $H(z)^{[i]}$ 互易函数 $F(z)^{[i]}$ 的各级系数.

各级电压通过耦合电极和相移电极独立控制偏振模式的耦合与相移, 从而增强了滤波函数的灵活性. 通过编程模拟, 本文得到了梳状滤波谱和任意分布的多波长滤波.

2.1 梳状滤波

若将相移电极的驱动电压均置零, 根据分析求得各级耦合电压 V_i^c , 可得到梳状滤波谱. 每个通带的传输函数可采用窗函数来表示, 并且窗函数的形式在一定程度上影响着通带的滚降特性及旁瓣大小. 图 2 为滤波器级联级数 $N=33$ 时中心波长为 1 550 nm 处的梳状谱输出, 每个通带采用 blackman 窗表示. 其中横轴坐标为波长, 纵轴坐标为强度透

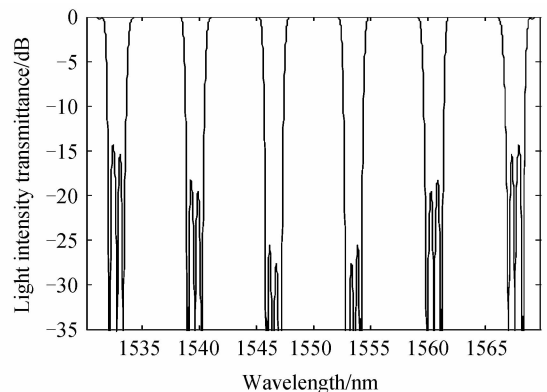


图 2 梳状滤波输出

Fig. 2 Output of comb filtering

射率.

可以看到,相对于中心波长 1 550 nm,输出谱是对称的.通带顶部平坦,每个通带带宽约为 7 nm,过渡带小,带宽利用率较高.中心波长处旁瓣可达 30 dB,但由于滤波频带在远离中心波长处会有一定的相位失配,所以其通带旁瓣会有所降低,图中为 15 dB.所以该方法得到的梳状滤波适用于较小的 FSR.

通过验证,该方法所得到的梳状输出,滤波器传输函数 $H(z)$ 满足线性相位条件,即在较小的 FSR 内,光信号的群色散可以忽略不计.

2.2 任意分布的多波长滤波

当相移电极的电压不为零时,可在模式转换的同时控制相位的偏移度,从而使非对称的任意分布的多波长同时滤波成为可能.运用离散傅里叶变换 (Discrete Fourier Transform, DFT) 表示所需的滤波函数,即设所需滤出波长的透射光强为 1,其他为 0.利用前述的分析方法可得到各级控制电压 V_i^p 和 V_i^q 的取值.

图 3 为级联级数 $N=16$ 时,中心波长 1 550 nm 处的 8 nm 范围内,相对于中心波长 1 550 nm 的非对称波长 1 546.5 nm、1 549.5 nm、1 551.5 nm 的同时滤波输出.每个波长的 3 dB 带宽约为 0.5 nm,且所选波长的中心处可以达到 100% 透射,旁瓣约为 12 dB.

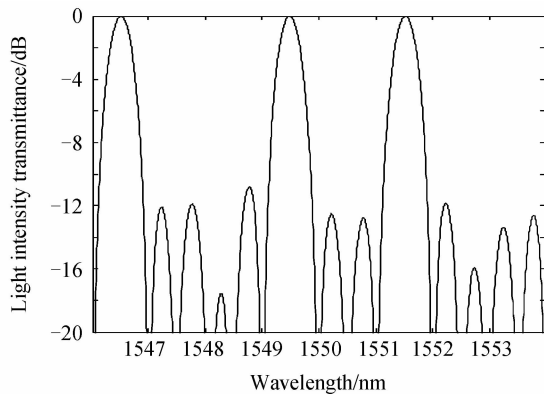


图 3 三个波长同时滤波输出

Fig. 3 Output of three wavelengths filtering

在级数不变的情况下,所选波长的 3 dB 带宽是一定的,但旁瓣会随着滤波波长个数的增加而增大.图 4 为 1 546.5 nm、1 548.5 nm、1 550.5 nm、1 552.5 nm 和 1 553.5 nm 五个波长的同时滤波.其中每个波长的 3 dB 带宽仍为 0.5 nm,旁瓣则降至 8 dB 左右.

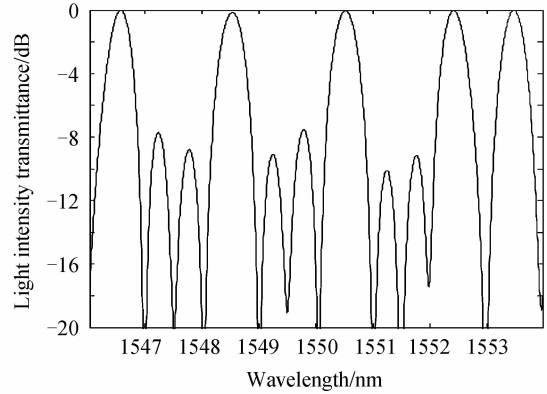


图 4 五个波长同时滤波输出

Fig. 4 Output of five wavelengths filtering

3 结论

本文设计了一种波导型多波长滤波器.非对称干涉仪结构以及具有空间位置差的偏振转换单元使滤波偏振无关,并且通过传输函数在 Z 域的分析求解得到驱动电压.改变电压的分布,可以分别得到梳状滤波谱及任意分布的非对称多波长滤波输出.讨论了影响滤波特性的主要参量.该滤波器能够更灵活地进行波长选择,并且具有亚微秒级的电光调谐速率,能够更好地应用于光网络节点.

参考文献

- [1] LI Shuai, WU Yuan-da, YIN Xiao-jie, *et al.* Tunable filters based on SOI microring-resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1143-1148.
李帅,吴远大,尹小杰,等.基于绝缘硅的微环谐振可调谐滤波器[J].光子学报,2011,**40**(8):1143-1148.
- [2] HUO Lei, ZENG Xiao-dong, FENG Zhe-jun, *et al.* Non-reciprocity of collinear acousto-optic tunable filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1149-1153.
霍雷,曾晓东,冯喆珺,等.共线型声光可调谐滤波器非互易效应研究[J].光子学报,2011,**40**(8):1149-1153.
- [3] REN Guan-jun, YAO Jian-quan. Voltage-tunable liquid crystal filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 789-791.
任广军,姚建铨.液晶电控调谐滤波器的研究[J].光子学报,2010,**39**(5):789-791.
- [4] FU Yu-lan, ZHANG Jia-xiang, HU Xiao-yong, *et al.* Electro-optic tunable multi-channel filter in two-dimensional ferroelectric photonic crystals[J]. *Journal of Optics*, 2010, **12**(7): 075202.
- [5] LENG Zi, ZENG Xiao-qi, TANG Hai-bo, *et al.* Thermally tunable 100GHz spaced four-wavelength electro-optic filter based on aperiodically poled lithium niobate[J]. *Journal of Optics*, 2011, **13**(11): 115202.
- [6] CHEN Hai-xing, GU Pei-fu, LI Hai-feng, *et al.* Design of interleaver with cascaded thin film filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **24**(1): 62-64.
陈海星,顾培夫,李海峰,等.薄膜多腔滤光片型梳状滤波器的设计[J].光学学报,2004,**24**(1):62-64.

- [7] ZHANG Rui-feng, GE Chun-feng, WANG Shu-hui, *et al.* Interleaver[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002, **13**(6): 652-656.
张瑞峰, 葛春风, 王书慧, 等. 奇偶交错空分滤波器[J]. *光电子 • 激光*, 2002, **13**(6): 652-656.
- [8] WANG Qing-ya, QIN Li, WEI Zhan-xiong, *et al.* Design and its fabrication of comb-filter with fiber gratings[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(1): 20-22.
王庆亚, 秦莉, 韦占雄, 等. 光纤光栅梳状滤波器的设计及制作[J]. *光电子 • 激光*, 2000, **11**(1): 20-22.
- [9] YANG Xiao-wei, ZHANG Juan. A novel design method for interleaver based on IIR[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(9): 2205-2209.
杨小伟, 张娟. 一种基于 IIR 光交错滤波器的设计方法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(9): 2205-2209.
- [10] DONG Xin-yong, LI Lan, SHEN Ping, *et al.* Hybrid fiber grating-based optical comb filters with changeable channel numbers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 238-242.
董新永, 李岚, 沈平, 等. 一种通道数可变的光纤光栅梳状滤波器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(2): 238-242.
- [11] KANAME JINGUJI, TAKASHI YASUI, Design algorithm for multichannel interleaver filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(8): 2268-2276.
- [12] LENZ G, EGGLETON B J, MADSEN C K, *et al.* Optical delay lines based on optical filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **37**(4): 525-532.
- [13] YANG PING, O EKNOYAN, K CHRISTI, *et al.* Programmable polarization-independent electrooptic matched bandpass filter utilizing symmetric branch beam splitters in Ti:LiNbO₃ [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(8): 2198-2205.
- [14] LIU Fei, JIN Jie, LI Ke-jia. Design of electro-optic tunable finite impulse response filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1023003-1-1023003-4.
刘菲, 金杰, 李可佳. 电光可调谐有限脉冲响应滤波器设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 1023003-1-1023003-4.

• 下期预告 •

基于多分辨率双边滤波的红外场景杂波抑制

宗靖国, 秦翰林, 刘德连, 袁胜春, 赵小明

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘要: 背景杂波是影响红外搜索跟踪系统探测性能的主要因素, 针对这一问题, 根据红外场景中目标和背景特性, 提出了一种基于多分辨率双边滤波的红外场景杂波抑制新方法. 首先采用非下采样轮廓波对红外场景图像进行多尺度、多方向分解, 提取红外原始场景图像在不同尺度和方向上的细节特征, 然后, 根据目标和背景信号子带分布特性之差异, 通过应用双边滤波调整分解后的各子带系数, 最后重构各子带就可将红外场景中目标信号和背景杂波分离, 可有效地将背景杂波剔除. 将本文提出的方法应用于实际的红外场景, 实验结果显示, 与经典的二维最小均方误差方法相比较, 该方法具有更好的杂波抑制能力.

关键词: 目标检测; 杂波抑制; 非下采样轮廓波变换; 双边滤波