

电光可调谐有限脉冲响应滤波器设计

刘 菲 金 杰 李 可 佳

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 为得到高矩形度、低旁瓣、电光调谐逆向可导及通带带宽可调的电光可调谐滤波器,在 x 切 y 传的钛扩散铌酸锂($\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$)波导上,对周期性分布的 N 级叉指电极组提供分立电压 \mathbf{V} ,产生周期性电场,实现似 TE 模与似 TM 模的偏振转换,进而实现滤波功能。该结构构成有限脉冲响应(FIR)网络,网络传输矩阵 $\mathbf{H}(z)$ 与电压 \mathbf{V} 具有一一对应关系。利用 z 变换原理,运用待定系数法求解 $\mathbf{H}(z)$,从而推导所需电压值 \mathbf{V} ,实现了电光调谐逆向可导。加入不同电压,可以实现自由光谱范围(FSR)内不同通带宽度的可调谐滤波特性。通过仿真验证,该算法是可行的。当 N 为 17 时,边模抑制比(SMSR)可达到 25 dB。并且滤波曲线的矩形度随着叉指电极组级联级数 N 的增大而增大。

关键词 光电子学;电光有限脉冲响应(FIR)滤波;Z 变换;通带宽度可调;偏振转换;矩形度

中图分类号 TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1023003

Design of Electro-Optic Tunable Finite Impulse Response Filter

Liu Fei Jin Jie Li Kejia

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract In order to realize the electro-optic tunable filter with high rectangular degree, low sidelobe, electro-optic tuning reverse derivation and passband width tuning, the N -stage interdigital electrodes distributed periodically are provided with independent voltages \mathbf{V} on the x -cut, y -propagation Ti-diffused LiNbO_3 . The induced periodic electrical field could achieve conversion of the quasi-TE mode and the quasi-TM mode and also the wavelength filtering. The finite impulse response (FIR) digital filter network is composed of this optical path. And there is a one to one correspondence between the transmission function $\mathbf{H}(z)$ and the voltage matrix \mathbf{V} . Using z -transform and method of undetermined coefficients, the voltage matrix \mathbf{V} is derived to realize the electro-optic tuning reverse derivation. The tunable passband width in the free spectrum range (FSR) can be realized with different voltage matrices \mathbf{V} . This method is proved to be feasible through the simulation. When N is equal to 17, side mode suppression ratio (SMSR) could reach 25 dB. Also, the rectangular degree of the filtering increases with the increase of cascading stage N .

Key words optoelectronics; electro-optic finite impulse response (FIR) filter; Z-transform; passband width tunable; polarization converter; rectangular degree

OCIS codes 230.2090; 230.3120; 230.7408; 250.3140

1 引 言

光滤波器在通信系统中有着广泛的应用,主要有复用解复用器、交叉连接器、分插复用器、色散补偿和增益平坦化等^[1~4],其中通带带宽和信道间隔可调谐的滤波器以其极大的灵活性成为近年来的研

究热点。电光可调滤波器(EOTF)具有亚微秒级的响应速度^[5],能够更好地满足光网络大容量、高速率的传输要求。基于电光效应,Heismann 等^[6]在钛扩散铌酸锂($\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$)波导上,通过电压 V_{MC} 控制叉指电极,通过电压 V_{T} 控制相移电极的交替级

收稿日期: 2011-05-06; 收到修改稿日期: 2011-07-01

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20090032110027)资助课题。

作者简介: 刘 菲(1987—),女,硕士研究生,主要从事光滤波技术方面的研究。E-mail: conch_f@sina.com

导师简介: 金 杰(1962—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。

E-mail: jinjie@tju.edu.cn

联结构实现了任意模式之间的转换以及电光波长可调谐滤波,并能够达到较高的滤波边模抑制比(SMSR),但矩形度较低。Yang等^[7]设计了分立式电压供电叉指电极结构,采用余弦函数加权电压进行切趾,实现了低旁瓣滤波。数字滤波中的Z变换方法在马赫-曾德尔(M-Z)型光滤波器中的广泛应用,提高了滤波的矩形度,并且提供了一种逆向推导光滤波器中物理参数的新思想^[8,9],但同时,高阶数的M-Z干涉耦合级联带来了更大的传输损耗,且调谐的灵活度不高^[10,11]。本文在此基础上,将有限脉冲响应(FIR)滤波网络模型应用到以LiNbO₃为基底的电光偏振转换器中,运用Z变换方法,设计了自由光谱范围(FSR)内控制电压可逆向推导的通带带宽可调的EOTF,并且该滤波器具有较高的

SMSR和矩形度。

2 算法设计

N阶电光可调滤波器结构如图1所示。在x切y传的钛扩散LiNbO₃波导上,叉指电极组周期性级联分布,级联级数为N。每级中叉指电极的组数相同,设其为M₀。Λ为叉指电极周期,L_c为每级叉指电极组长度,显然有L_c=M₀Λ。L_d为每级叉指电极组的间隔长度,设每级叉指电极组之间的间隔长度相同。每级叉指电极组进行独立供电,在叉指电极两端加入电压V,V为1×N电压值矩阵。当偏振光进入该系统后,通过控制V的取值,产生相应的周期性电场,实现偏振模式的相互转换,即可得到相应的滤波曲线。

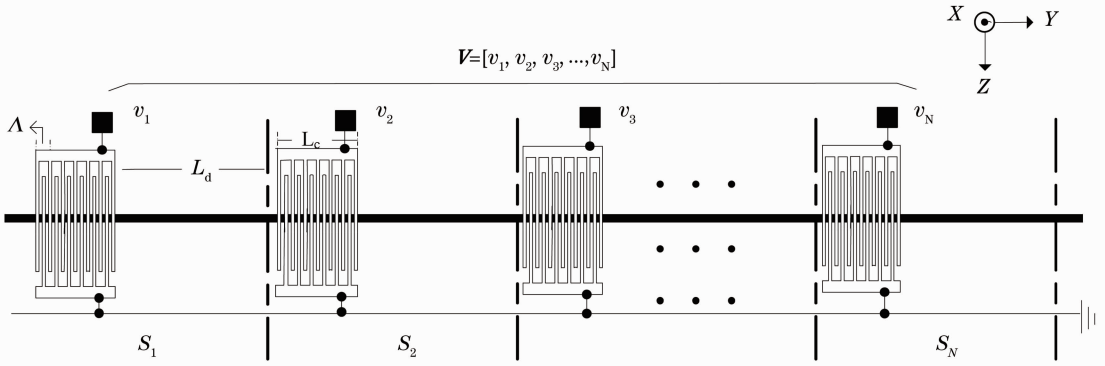


图1 N阶电光可调滤波器结构示意图

Fig. 1 Structure of the Nth-order electro-optic tunable filter

在波长λ处,TE模和TM模的有效折射率分别表示为n_{TE}(λ)和n_{TM}(λ),则其传输常数β_{TE}(λ)和β_{TM}(λ)可表示为

$$\begin{cases} \beta_{TE}(\lambda) = 2\pi n_{TE}(\lambda)/\lambda \\ \beta_{TM}(\lambda) = 2\pi n_{TM}(\lambda)/\lambda \end{cases} \quad (1)$$

受周期性电场的影响,偏振光进行模式耦合。在耦合过程中,两种模式存在一定程度的相位失配,设δ为单位长度内两种模式的一阶相位失配度,由文献^[12],得到

$$\delta = [\beta_{TM}(\lambda) - \beta_{TE}(\lambda)]/2 - \pi/\Lambda \quad (2)$$

设中心波长为λ₀,要实现最大效率的偏振转换,在λ₀处,两种模式的相位是完全匹配的,即有

$$\delta = 0 \quad |_{\lambda=\lambda_0}$$

由(2)式,叉指电极周期Λ需满足:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{(n_{TE} - n_{TM})} \Big|_{\delta=0} \quad (3)$$

根据模式耦合理论,每级叉指电极组的琼斯矩阵为

$$C_i = \begin{bmatrix} a_i \exp[-j(\beta_{TE} + \delta)L_c] & b_i \exp[-j(\beta_{TE} + \delta)L_c] \\ -b_i^* \exp[-j(\beta_{TM} - \delta)L_c] & a_i^* \exp[-j(\beta_{TM} - \delta)L_c] \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中角标*表示复数共轭,系数分别为

$$a_i = \cos(\sqrt{\kappa_i^2 + \delta^2}L_c) + j(\delta/\sqrt{\kappa_i^2 + \delta^2})\sin(\sqrt{\kappa_i^2 + \delta^2}L_c), \quad (5)$$

$$b_i = -j(\kappa_i/\sqrt{\kappa_i^2 + \delta^2})\sin(\sqrt{\kappa_i^2 + \delta^2}L_c), \quad (6)$$

式中κ_i为第i级叉指电极组中单位长度的耦合系数,设ν_i为加在第i级叉指电极组两端的电压,则κ_i的取值是由ν_i决定的,并与ν_i呈一一对应的线性关系。参考文献^[6],可以得到

$$\kappa_i = \Gamma_{TE-TM}(4\pi/\lambda_0) \sqrt{n_{TE}^3 n_{TM}^3} \gamma_{51} \cdot \nu_i/\Lambda, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中 $\Gamma_{\text{TE-TM}}$ 为电场 X 方向不均匀分布产生的归一化重叠积分因子, γ_{51} 为线性电光系数。

在每级叉指电极组之间, 两种模式在传输过程中存在一定的相位差, 可用传输矩阵 \mathbf{P}_i 表示为

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} \exp[-j(\beta_{\text{TE}} - \beta_{\text{TM}})L_d/2] & 0 \\ 0 & \exp[-j(\beta_{\text{TM}} - \beta_{\text{TE}})L_d/2] \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

在相邻耦合单元之间, 相位延迟应为 2π 的整数倍, 所以每级叉指电极的距离 L_d 应满足关系 $L_d = PL_c = Q\Lambda$, 其中 P 和 Q 为任意整数。

至此, 设 N 级级联滤波系统的传输函数为 \mathbf{S} , 可以表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_N \mathbf{S}_{N-1}, \dots, \mathbf{S}_2 \mathbf{S}_1 = \prod_{i=1}^N \mathbf{S}_i, \quad (9)$$

式中 \mathbf{S}_i 为第 i 阶网络单元的传输函数, 且有

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{P}_i \mathbf{C}_i \quad (i = 1, 2, \dots, N). \quad (10)$$

由(9)式可以看出, 光在偏振转换器中的传输可以理解为在不同长度的光路中传输的叠加效应。并且, 通过计算可以验证, 矩阵 \mathbf{S}_i , \mathbf{P}_i 和 \mathbf{C}_i 均为酉矩阵。因而, 采用 FIR 网络来表示 \mathbf{S} , 即

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(z) & -\mathbf{F}^* \left(\frac{1}{z^*} \right) \\ \mathbf{F}(z) & \mathbf{H}^* \left(\frac{1}{z^*} \right) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中目标传输函数可表示为

$$\mathbf{H}(z) = \sum_{i=1}^N a(i) z^{-i}, \quad \mathbf{F}(z) = \sum_{i=1}^N b(i) z^{-i}. \quad (12)$$

易验证, \mathbf{S} 为酉矩阵, 所以 $\mathbf{H}(z)$ 和 $\mathbf{F}(z)$ 具有滤波互易性。运用待定系数法, 参考文献[13], 得到

$$\kappa_i = -\text{actan} \left[\frac{b(i)^{[i]}}{a(i)^{[i]}} \right] / L_c, \quad (13)$$

式中 $a(i)^{[i]}$ 和 $b(i)^{[i]}$ 分别是 i 阶滤波器中, 传输函数为 $\mathbf{H}(z)$ 和 $\mathbf{F}(z)$ 的第 i 级的展开系数。

根据(7)式, 可以逆向推导出需要加入的电压 v_i , 并且实现通带带宽可变的滤波效果。

3 仿真与数据分析

根据上述的算法设计, 编写了相应的程序, 对该算法进行了验证, 并针对不同通带宽度以及不同级联数 N 进行仿真及滤波效果比对, 对所得数据进行了分析。

实验中, 设 FSR 为 1000 GHz, 中心波长 $\lambda_0 = 1550$ nm, 每级叉指电极长度 $L_c = 5\Lambda$, 每级相移电极长度 $L_d = 40L_c$ 。参考文献[6], $0 \leq \Gamma_{\text{TE-TM}} \leq 1$, 在此取 $\Gamma_{\text{TE-TM}} = 1$ 。

如图 1 所示, 在仿真设计中, 以波长 $\lambda_0 = 1550$ nm 为中心的 FSR 内似 TM 波输入, 在输出端口观察 Z

方向的光强透射率。

首先, 选定级联级数 $N = 17$, 目标传输函数 $\mathbf{H}(z)$ 的通带宽度与阻带宽度之比约为 7:3。根据(7), (11)和(13)式, 进行编程计算, 得到电压 \mathbf{V} 的值。将电压 \mathbf{V} 逐级加入叉指电极两端, 仿真得到 FSR 内输出光强透射率谱, 如图 2 所示。图中, 横坐标表示 1546~1554 nm 内的波长, 纵坐标表示光强透射率, 可以看出, 该滤波曲线通带较为平坦, 且 SMSR 可达到 25.6 dB。

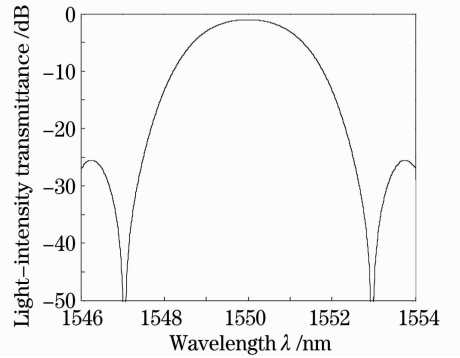


图 2 $N=17$ 时滤波器 FSR 内输出光强透射率谱

Fig. 2 Light-intensity transmittance of the filter in FSR when $N=17$

在 λ_0, L_c, L_d , FSR 以及温度 T 不变的情况下, 令级联级数 $N = 24$, $\mathbf{H}(z)$ 的通带宽度与阻带宽度之比为 3:7, 仿真得到 FSR 内输出光强透射率谱, 如图 3 所示。与图 2 相比, 该频谱的 SMSR 约为 25 dB, 几乎没有明显变化, 但矩形度明显提高。

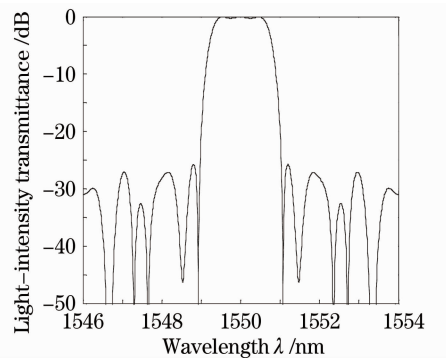


图 3 $N=24$ 时滤波器 FSR 内输出光强透射率谱

Fig. 3 Light-intensity transmittance of the filter in FSR when $N=24$

由此可以得出,在该滤波网络中采用 Z 变换方法是可行的。该滤波器可实现通带宽度可调;滤波频谱的矩形度随着级数 N 的增大而增大,但 SMSR 无明显变化,约为 25 dB。表 1 为 $N=17$ 时的电压 V_i 的取值。分析表中的数据,可以看出,电压满足规律 $V_i = V_{N-i+1}$ 。

表 1 $N=17$ 时滤波器的电压值Table 1 Voltage value of the filter when $N=17$

Stage number i	Voltage V_i
1	-116.5014
2	25.4113
3	65.8758
4	52.4419
5	44.2085
6	9.7499
7	6.3314
8	0.1371
9	134.3990
10	0.1371
11	6.3314
12	9.7499
13	44.2085
14	52.4419
15	65.8758
16	25.4113
17	-116.5014

4 结 论

在 x 切 y 传的 $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ 波导上,对周期性分布的叉指电极组提供分立式电压,设计了 N 阶电光调谐滤波器。引入 FIR 滤波网络模型,得到传输函数 $H(z)$ 和调谐电压 V 的对应关系,运用 Z 变换,实现电光调谐逆向可推导,并且通带宽度可调谐。通过仿真验证表明,该算法是可行的,滤波器的 SMSR 可达 25 dB,矩形度随着级联级数 N 值的增大而显著提高。这使得该滤波器具有响应速度快、动态可调、矩形度高的优势。通过分析,本文得出了 $V_i = V_{N-i+1}$ 的电压规律。如果在各级叉指电极后面加入相移电极并接入电压,参考文献[6],可以对滤波波段进行波长窄带微调,调谐范围满足 $\Delta\lambda \leq \lambda_0/200$ 。若该滤波器与偏振分束器(PBS)相结合,可以得到偏振无关的可调谐滤波器^[14,15],这有待在后续工作中继续改进。

参 考 文 献

- Hu Aizi, Rao Yunjiang, Niu Yongchang. A novel tunable LPFG gain equalizer based on a bend insensitive fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 30~34
- 胡爱姿,饶云江,牛永昌. 基于弯曲不敏感光纤的长周期光纤光栅可调谐增益均衡器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 30~34
- Jiang Weiwei, Li Jian, Zhao Ruifeng *et al.*. Analysis of fiber grating filters written in fiber coupler by employing the unified coupled-mode theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 644~649
- 江微微,李 坚,赵瑞峰等. 用统一耦合模理论分析光纤光栅耦合器型滤波器的滤波特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 644~649
- Jin Jie, Li Kejia, Kong Xi *et al.*. Multi-wavelength electro-optical tunable filter[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(suppl.): 1~4
- 金 杰,李可佳,孔 曦等. 多波长电光可调谐滤波器[J]. *光电子•激光*, 2010, **21**(增刊): 1~4
- Ge Chunfeng, Zhang Ruifeng, Hu Zhiyong *et al.*. Design of optical lattice FIR gain equalization filters[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2004, **15**(9): 1074~1078
- 葛春风,张瑞峰,胡智勇等. 光格型 FIR 增益均衡滤波器设计[J]. *光电子•激光*, 2004, **15**(9): 1074~1078
- Haim Kobrinski, Kwok-Wai Cheung. Wavelength-tunable optical filters: applications and technologies[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 1989, **27**(10): 53~63
- Fred Heismann, Rod C. Alferness. Wavelength-tunable electrooptic polarization conversion in birefringent waveguides[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(1): 83~93
- Yang Ping, O. Eknayan, K. Christy *et al.*. Programmable polarization-independent electrooptic matched bandpass filter utilizing symmetric branch beam splitters in $\text{Ti}:\text{LiNbO}_3$ [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(8): 2198~2205
- M. Kuznetsov. Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filters for wavelength-division-multiplexed optical systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(2): 226~230
- Yang Wei, Liu Ying, Xiao Lifeng *et al.*. Suppression of sidelobe levels for acousto-optic tunable filters using cascaded single-stage acousto-optic tunable filters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2734~2739
- 杨 薇,刘 迎,肖立峰等. 多级级联声光可调谐滤波器旁瓣的抑制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2734~2739
- Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1424~1428
- 张 娟,刘立人,周 煜等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1424~1428
- C. K. Madsen, J. H. Zhao. *Optical Filter Design and Analysis: A Signal Processing Approach*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1999. 129~140
- A. Yariv. Coupled-mode theory for guided-wave optics [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **9**(9): 919~933
- K. Jinguji, M. Kawachi. Synthesis of coherent two-port lattice-form optical delay-line circuit[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(1): 73~82
- Pingsheng Tang, Ohannes Eknayan, H. F. Taylor. Rapidly tunable optical add-drop multiplexer (OADM) using a static-strain-induced grating in LiNbO_3 [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(1): 236~245
- H. F. Taylor, A. Yariv. Guided wave optics[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, **62**(8): 1044~1060