

多波长电光可调谐滤波器*

金杰, 李可佳**, 孔曦, 毛祥芳

(天津大学电子信息工程系, 天津 300072)

摘要: 分析设计了一种可同时提取多个密集波分复用波长的电光可调谐滤波器, 在钛扩散铌酸锂波导上集成两个偏振分束器, 以两层电极分别完成偏振转换和波长调谐, 达到滤波功能。由于偏振转换是由多组独立供电的叉指电极实现的, 通过合理计算其电压分布, 可实现旁瓣抑制和多波长的同时提取。计算仿真表明, 采用高斯型电压对叉指电极电压加权, 可将频谱旁瓣从-10dB抑制到-35dB以下; 而若采用周期的叉指电压分布, 可得到任意两个波长的和对称分布的四波长同时提取。

关键词: 可调谐光滤波器; 电光调谐; 旁瓣抑制; 多波长提取

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

Multi-wavelength Electrooptic Tunable Filter

JIN Jie, LI Ke-jia, KONG Xi, MAO Xiang-fang

(College of Electronic and Communication Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: An electrooptic tunable filter which is capable of obtaining more than one wavelength with a single device synchronously is designed and analyzed. The filter employed two polarization beam splitters based on titanium diffused lithium niobate waveguides and the two layered electrodes which tune the wavelength and convert the two polarizations respectively. Benefiting from the fact that separated voltages are applied in the interdigital electrodes to realize the polarization mode conversion, the side-lobe suppression below -35dB and arbitrary double-wavelength, symmetric four-wavelength extraction are achievable.

Key word: tunable optical filter; electro-optical tuning; sidelobe suppression; multi-wavelength extraction

1 引言

可调谐光滤波器是以密集波分复用(DWDM)为基础的光通信网络的核心器件之一^[1]。与其他调谐手段相比, 电光可调谐滤波器具有超高的响应速度和调谐速度, 是唯一可在亚微秒量级完成调谐的方案, 最早见于 Fred Heismann 等人的报道^[2-3]。它引入了多组叉指电极和相移电极, 电极交替地在波导中以电光效应实现波长相关的偏振转换, 完成滤波功能。本文研究的滤波器将叉指电极和相移电极分层设计, 并对每组叉指电极分别供电, 可实现旁瓣抑制及多波长同时提取等功能。

2 工作原理

本文设计滤波器的结构如图 1 和 2 所示。

在 X 切、Y 传铌酸锂基底上以钛扩散工艺制作如图 1 所示的四端口波导结构。两个完全相同的波导型偏振分束器(PBS1、PBS2)之间分布着由 SiO₂ 缓冲层隔开的两层电极图案。底层的相移电极(图 1 所示)在波导每一臂的两侧以电压 V_r 施加 Z 方向电场, 控制相位延迟, 达到波长调谐的目的。而上层级联的多组叉指电极(图 2 所示)以 X 方向的周期电场引发偏振模式转换。

光波从 1 端口输入, 经 PBS1 后偏振态分离, TM 模从直通臂(即图 1 的上臂)进入电极区, TE 模经耦合臂(图 1 的下臂)进入电极区。若波长不满足由各电压决定的相位匹配条件, 光波经 PBS2 后从 3 端口输出。而满足相位匹配条件的波长经过各电极后, 偏振模式

*基金项目: 国家自然科学基金项目资助(60777014)

**Email: feimaojia@mail.nankai.edu.cn

逐渐发生转换, 最终上臂中的 TM 模完全化为 TE 模, 而下臂中 TE 模完全转化为 TM 模。这样在经过 PBS2 后, 该波长的 TM、TE 模将同时从 4 端口输出。

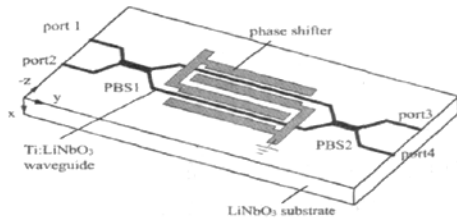


图1 滤波器底层波导和电极结构

Fig.1 Schematic illustration of waveguides and sublayer electrodes

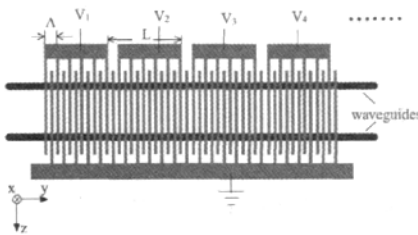


图2 上层电极结构图

Fig.2 Cascade interdigital electrodes in top layer

3 理论分析及数值模拟

波导的每一臂中, 光波经过每一组叉指电极后的偏振模式转换可以用如下矩阵表示^[4]:

$$C_i = \begin{pmatrix} r_i \exp[j(\beta_{TE} + \delta)L] & s_i \exp[j(\beta_{TE} + \delta)L] \\ -s_i^* \exp[j(\beta_{TM} - \delta)L] & r_i^* \exp[j(\beta_{TM} - \delta)L] \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} r_i = \cos(\sqrt{\kappa_i^2 + \delta^2}L) - j\delta(\kappa_i^2 + \delta^2)^{-\frac{1}{2}} \sin(\sqrt{\kappa_i^2 + \delta^2}L) \\ s_i = j\kappa_i(\kappa_i^2 + \delta^2)^{-\frac{1}{2}} \sin(\sqrt{\kappa_i^2 + \delta^2}L) \end{cases} \quad (2)$$

上式中, $\delta = 1/2(\beta_{TM} - \beta_{TE}) - \pi/\Lambda$ 为相位失配因子, $\kappa_i = \Gamma_{TE-TM} \lambda^2 V_i \sqrt{\beta_{TE}^3 \beta_{TM}^3} \gamma_{31} / (2\pi^2 \Lambda)$ 为单位长度的偏振耦合系数, Λ 和 L 分别表示叉指电极周期和电极组周期, V_i 为各组叉指电极的电压, 如图(2)所示。

在考虑到相移电极的作用后, 传输常数 β 应改写为如下形式

$$\begin{cases} \beta_{TE} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - \frac{1}{2} \Gamma_{TE} n_e^3 \gamma_{33} \frac{V_T}{G}) \\ \beta_{TM} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - \frac{1}{2} \Gamma_{TM} n_o^3 \gamma_{13} \frac{V_T}{G}) \end{cases} \quad (3)$$

以上各式中 Γ 为由电场不均匀性引起的积分

因子, γ_{31} 、 γ_{33} 和 γ_{13} 为电光系数, n_o 和 n_e 分别为铌酸锂晶体中寻常光和非常光的折射率, G 为相移电极的间隙。

若要实现完全偏振转换, 必须调节各叉指电极的电压, 使下式满足。

$$\sum_{i=1}^N \kappa_i(V_i) \cdot L = \pi/2 \quad (4)$$

式中 N 为叉指电极的组数。这样, 在经过 $N/3$ 组叉指电极后, 两臂中满足 $\delta=0$ 的波长的偏振态旋转了 $\pi/2$, 而其他波长的偏振转换效率随偏移中心波长而迅速衰减。相移电极通过(3)式调节满足 $\delta=0$ 的波长。相移电极电压与滤波波长的关系可以表示为:

$$V_T(\lambda) = \frac{2G[\lambda + (n_e - n_o)\Lambda]}{\Lambda(\Gamma_{TE} n_e^3 \gamma_{33} - \Gamma_{TM} n_o^3 \gamma_{13})} \quad (5)$$

由于相移电极充满了电光作用区域, 对于同样的波长, 该滤波器所需的调谐电压比以往的设计方案降低了一半左右^[2]。因此, 器件也具有更大的调谐范围。

式(4)为欠定方程, 各组解都可以使滤波波长处实现完全偏振转换, 但整个输出频谱有很大差别。利用这一点, 通过合理设计叉指电极电压的分布, 可实现不同功能。

3.1 旁瓣抑制

若叉指电极采用相同的电压, 一阶旁瓣约为-10dB。对周期结构采用加权处理可以有效的抑制旁瓣特性, 如 I. R. Croston 等人对叉指电极的指数加权, 得到了-25dB 的一阶旁瓣^[5]。本文的各叉指电极采用分立设计, 可施加不同电压, 只需对电压加权, 即可实现不同程度的旁瓣抑制。相对于其他切趾方案, 更为灵活。

本文采用的加权函数为高斯函数:

$$V_i = v \exp[-\frac{(i - N/2)^2}{\alpha^2}] \quad (6)$$

其中, 参数 v 和 α 的选取满足式(4)。图3给出了不同的参数 α 对应的下载端口的频谱响应。由图可见, α 越小, 旁瓣抑制越明显, 而半极大值全带宽(FWHM)越大。当取 $\alpha=15$ 时, 可将旁瓣抑制在-35dB 以下。而 α 值越大, 对旁瓣的抑制越弱, 对应的 FWHM 越小。例如当 α 取无穷时(高斯形电压分布退化为一致电压), 一阶旁瓣为-10dB, 此时的 FWHM 最小。

3.2 多波长下载

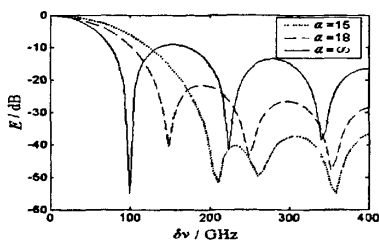


图3 不同电压参数的频响曲线

Fig. 3 Frequency response at different parameters of voltage

本文涉及的滤波器以相移电极按照式(5)对输出波长进行调节,而由 $\delta=0$ 的条件可以得出的等式(7)也表明,调节叉指周期 Λ 也能达到条件波长的目的。

$$\lambda|_{V_T=0} = (n_{TM} - n_{TE})\Lambda \quad (7)$$

这一点可以通过引入周期分布的叉指电极电压,产生等效的叉指周期的偏移 $\Delta\Lambda$ 实现。例如采用下式的电压分布

$$V(y) = V_0(y) \cos(2\delta(\lambda_1)y) \quad (8)$$

可以得到 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda_1$ 两个峰值。其中 $\Delta\lambda_1 = \lambda_0 - \lambda_1$, λ_0 为 $V_0(y)$ 电压分布下产生的偏振转换效率曲线的峰值波长。如图4所示为 $\lambda_0 = 1555\text{nm}$, $\Delta\lambda_1 = 5\text{nm}$ 得到的频谱。

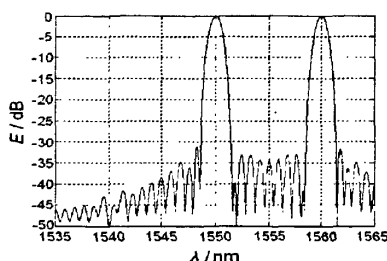


图4 双波长滤波的频谱

Fig. 4 Spectra with two wavelengths

利用式(7)可以在调谐范围内得到任意的双波长同时提取。以上对电压的加权是相互独立的,可同时以多个函数加权电压。例如,若 $V_0(y)$ 是经过切趾加权的电压,则输出的两个波长也是经过切趾的(如图4所示)。在此基础上,若再以 $\cos(2\delta(\lambda_2)y)$ 乘以电压函数,则可以提取 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda_1 \pm \Delta\lambda_2$ 四个波长。如图5所示为1542nm、1548nm、1562nm和1568nm四个波长同时提取的频谱。同理,若叉指电极组数足够大,对称的8信道、16信道等的同时提取也是可行的。

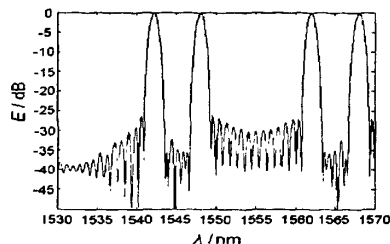


图5 四波长滤波的频谱

Fig. 5 Spectra with four wavelengths

4 结论与总结

设计并分析了一种基于铌酸锂晶体电光效应的可调谐滤波器。由于其采用了相移电极和偏振转换电极分层的结构,波导的作用长度得到了充分利用,可大大降低调谐电压,进而也增大了调谐范围。而由于偏振转换是由多组独立的叉指电极完成的,通过调整其电压分布可实现旁瓣抑制和多波长同时提取等功能,拓展了光滤波器在通信网中的应用。

参考文献:

- [1] HUANG Qi-rui, LUO Feng-guang, CAO Ming-cui, *et al.* Reconfigurable M-Z optical add/drop multiplexer based on parallel structure[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2007, 18(1): 36-39. (in Chinese)
- [2] Fred Heismann, Rod C. Alfemess, Wavelength-tunable electrooptic polarization conversion in birefringent waveguides [J]. *Quantum Electronics*, 1988, 24(1): 83-93.
- [3] W. Warzanski, F. Heismann, and R.C. Alfemess, "Polarization-independent electrooptically tunable narrow-band wavelength filter," *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 53:13-15.
- [4] Li Kejia, Jin Jie, Zhang Ruifeng, *et al.*, "Reconfigurable optical add/drop multiplexer based on electrooptic effect in two directions", *Proc SPIE, Optoelectronic Devices and Integration II*, 2008: 683810.
- [5] I. R. Croston, A. D. Carr, N. J. Parsons, *et al.*, Lithium niobate electro-optic tunable filter with high sidelobe suppression [J], *Electronics Letters*, 1993, 29(2): 157-159

作者简介:

金杰 (1962-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 天津大学电子信息工程学院教授, 博士生导师, 主要从事光通信器件的研究。

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>