

级联光子晶体 Mach-Zehnder 干涉仪的可调谐滤波特性

陈卫东^{1,2}, 于娜^{1,2}, 陈颖³, 申远^{1,2}, 王文跃³

- (1. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 河北省特种光纤与光纤传感重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
3. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 基于液晶的电控双折射特性和光子晶体自准直特性, 在二维光子晶体引入复合缺陷提出一种可调谐 Mach-Zehnder 干涉(MZI)滤波器结构, 应用液晶系统的自由能理论, 推导了外加电压与液晶有效折射率的关系, 并结合 MZI 相位调制原理和光子晶体等效折射率理论, 得到液晶的电控双折射特性与 MZI 滤波器的输出光谱间的数学关系, 运用时域有限差分法(FDTD)对滤波器的输出进行仿真模拟, 并根据仿真结果对结构进行一级级联的优化设计。结果表明: 通过控制外加电压的大小可以改变输出端的透射波长, 达到可调谐滤波的效果, 并且一级级联后的滤波效果比级联前有很大的改善, 滤波的半波带宽从 20 nm 减小为 7 nm, 可调谐范围从 15 nm 增大为 40 nm, 因此可以通过进一步级联的方式使滤波器结构更加的优化, 以便运用到光波分复用系统中。

关键词: 滤波; 液晶; 光子晶体; Mach-Zehnder; 级联

中图分类号: TN713+.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)12-4023-05

Tunable filtering characteristics of cascaded photonic crystal Mach-Zehnder interferometer

Chen Weidong^{1,2}, Yu Na^{1,2}, Chen Ying³, Shen Yuan^{1,2}, Wang Wenyue³

- (1. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Qinhuangdao 066004, China;
3. College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Based on the electrically controlled birefringence of the liquid crystal and the photonic crystal self-collimation effect, a tunable Mach-Zehnder interferometer filter structure was designed by introducing complex defects in the two-dimensional photonic crystal. The mathematical model was established between the applied voltage and the effective refractive index of the liquid crystal with applying free energy theory of the liquid crystal. Based on the phase modulation principle of Mach-Zehnder interferometer and the theory of the equivalent refractive index of the photonic crystal, the effect of the electrically controlled birefringence of the liquid crystal on output spectra of Mach-Zehnder interferometer filter was theoretical analyzed, and the output spectra of the filter was simulated with finite difference time domain method. And according to the simulation results, the cascaded optimization of the structure was designed. The results show that by controlling the applied voltage can change the transmission

收稿日期: 2014-04-10; 修订日期: 2014-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61201112, 61172044); 河北省自然科学基金(F2013203250, F2012203169);

河北省普通高等学校青年拔尖人才计划(BJ2014056); 燕山大学青年教师自主研究计划(14LGA013)

作者简介: 陈卫东(1971-), 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事移动机器人智能控制和光子晶体传感器件方面的研究。

Email: wdchen@ysu.edu.cn

wavelength of output and achieve the effect of tunable filter. After level cascaded, the filter effect has a significant improvement. The filter bandwidth of a half-wave reduced from 20 nm to 7 nm, and the tuning range was increased from 15 nm to 40 nm. Therefore, the filter can more optimization by means of further cascading of the structure, in order to used in the optical wavelength division multiplexing system.

Key words: filter; liquid crystal; photonic crystal; Mach-Zehnder; cascaded

0 引言

可调谐滤波器是光波分复用系统中处理多信道光信号的关键器件。经典的滤波器件尺寸大,在越来越受重视的密集波分复用系统中难以广泛的应用。近年来,随着光子晶体概念的提出,使得光子器件的集成化和微型化成为可能,而光子晶体可调谐滤波器的研究也是热点之一。

光子晶体的可调谐滤波器的研究有以下几个方面:Hui-Chuan Hung 等人采用将杂质、磁化物质或等离子体引入到一维光子晶体缺陷中,通过调节缺陷层物质的参数实现可调谐滤波^[1-4]。J.Cos 等人采用两个相同的一维光子晶体中间环绕填充液晶的液晶盒制成 Fabry-Perot 滤波器,通过控制液晶光轴旋转的角度实现可调滤波^[5]。李文超等人在二维光子晶体中引入点缺陷,并在点缺陷中引入磷酸氧钛钾,通过控制点缺陷两端的交流电场改变点缺陷折射率为制作可调谐微腔提供依据^[6]。S. Robinson 等人在二维光子晶体中设置不同结构谐振腔,实现多通道的滤波^[7-8],这种结构的滤波器虽然滤波的半带宽较窄,但是不具有可调谐性;Feng Shuai 等人应用二维光子晶体带隙特性,制作下载滤波器,通过改变椭圆点缺陷的方向角,实现不同通道的可调谐滤波。

文中应用光子晶体的自准直特性,设计了一种基于马赫曾德尔干涉 (Mach-Zehnder Interference, MZI) 滤波器,通过调节光子晶体中介质柱的半径和添加缺陷实现分束和反射,构成 MZI 结构;在二维光子晶体 MZI 一个光路中添加液晶,通过控制外加电压对结构的输出谱进行调制。理论分析了外加电压对 MZI 滤波输出的影响,建立电压和透射波长之间的理论关系,用时域有限差分法仿真模拟,由于单一 MZI 的透射曲线的滤波性能的不足这一缺点,对结构进行一级级联优化,级联后的滤波特性有了明显的改善。该结构采用二维光子晶体自准直传播代替波导的传播,制作更加简单,将液晶充入 MZI 传

输光路实现滤波可调谐,并且 MZI 级联后可实现窄带滤波,在光波分复用系统中有一定的应用价值。

1 MZI 结构

文中采用旋转 45° 的二维正方晶格空气柱型光子晶体。以硅为背景材料,折射率 $n=3.5$,空气柱半径 $r=0.31a$, a 是晶格常数。文中定义 TE 模为电场偏振方向平行于介质柱的模式。应用平面波展开法得到该结构中波矢量的等频线图,由图 1 可知在归一化频率 a/λ 在 0.165 4~0.183 1 范围内等频线为正方形,说明光束可以自准直。并且当空气柱内填充 5CB 液晶时,自准直频率范围改变很小,说明增大介质柱的折射率在一定频率范围内,光束还可以保持自准直传播。5CB 液晶是一种单轴向列型液晶,其正常折射率和反常折射率分别为 1.53 和 1.75。

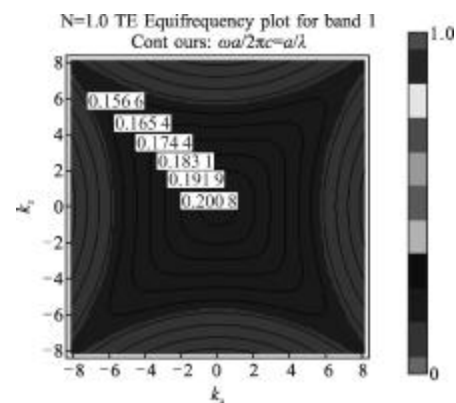


图 1 该结构光子晶体等频线

Fig.1 Equifrequency plot of photonic crystal

整体结构如图 2 所示,主要结构为分束镜(SM1、SM2)、全反镜(RM1、RM2)。分束镜通过放大一排 $1 \times$ 方向的空气柱形成线缺陷,通过应用 FDTD 算法计算不同缺陷半径分束后的透射强度和折射强度,如图 3 所示,可以看出当缺陷半径 $Rd=0.48a$ 时,透射强度与折射强度相同。

说明透射率 $T \approx$ 反射率 R ,分束后两光路能量基本相等,为入射光能量的一半,因此我们选择分束镜缺陷介质柱半径 $Rd=0.48a$ 。全反镜采用去除 $1 \times$ 方向 3

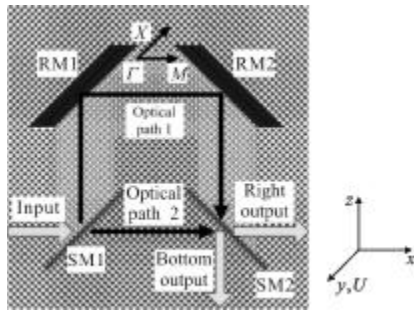


图 2 MZI 整体结构

Fig.2 Structure of MZI

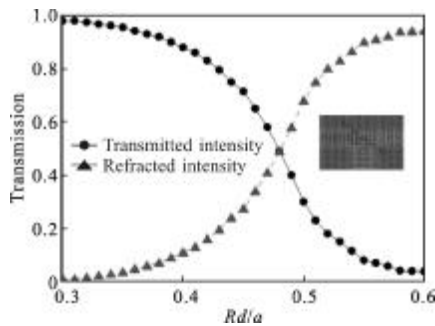


图 3 分束器透射和反射强度与缺陷半径关系及 $Rd=0.48a$ 时的稳态场分布

Fig.3 Relationship of the transmission and reflection intensity of beam splitter with defect radius and the steady-state field distribution when Rd is equal to $0.48a$

排空气柱, 然后插入一个空气平板波导来实现全反射的效果, 由图 4 可以看出光路发生了 90° 的偏

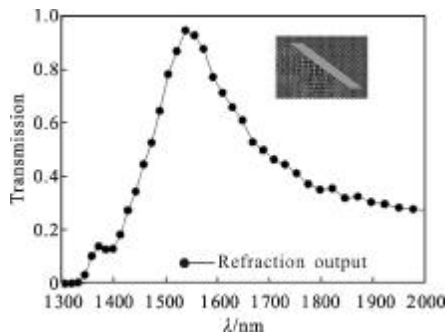


图 4 全反镜结构及透射谱

Fig.4 Structure of reflecting mirror and transmission spectrum after reflecting

折, 实现了全反射的作用, 并且反射光路的透射谱在入射波中心波长处其反射的效率很高, 将近 100%。

2 液晶的电控双折射效应对 MZI 滤波的影响

2.1 液晶的电控双折射效应

假设液晶分子很纯, 内部没有离子和电子的流动, 对于 P 型向列型液晶 ($\epsilon_{||} > \epsilon_{\perp}$), 当外加电场方向与

液晶分子指向矢方向平行, 达到稳态。将两块平行放置的玻璃片, 表面做平行取向处理, 在其中充入 P 型向列型液晶后, 液晶分子会沿平面排列, 当施加 y 轴方向的电场, 并且电场达到阈值时, 液晶分子在电场的作用下, 会旋转一定的角度, 旋转的角度随着施加电场的增大而增大, 直到与电场方向平行, 如图 5 所示。

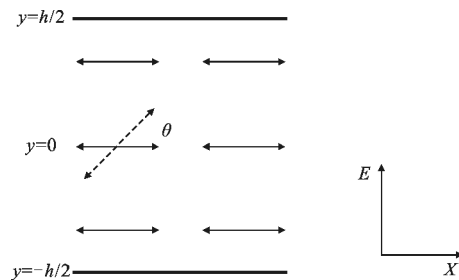


图 5 液晶在外场下的重新取向

Fig.5 Reorientation of liquid crystal under external fields

当液晶分子旋转 θ 时, 液晶盒内任一点的指向矢可以表示为:

$$n_x = \cos\theta(y), n_y = \sin\theta(y), n_z = 0$$

将液晶作为连续弹性媒质考虑, 由向列型液晶的自由能密度 f 表达式(假设展曲、扭曲和弯曲的比例因子相等, 都等于 k , 且不考虑磁场的影响)得:

$$f = f_t - f_e = \frac{1}{2} k [(\nabla \cdot \hat{n})^2 + (\nabla \times \hat{n})^2] - \frac{1}{2} \Delta \epsilon (\mathbf{E} \cdot \hat{n})^2 =$$

$$\frac{1}{2} k \left[\frac{d\theta(y)}{dy} \right]^2 - \frac{1}{2} E^2 \cdot \Delta \epsilon \cdot \sin^2\theta(y) \quad (1)$$

式中: f_t 为弹性自由能密度; f_e 电场引起的自由能密度增量; k 为弹性模量。稳定时角度 $\theta(y)$ 应使公式(1)的变分 $\delta \cdot f = 0$, 代入欧拉方程, 整理得:

$$\sin\theta(y) \cdot \cos\theta(y) + \frac{k}{E^2 \Delta \epsilon} \frac{d^2\theta(y)}{dy^2} = 0 \quad (2)$$

求解公式(2)可得液晶分子旋转角和外加电压及位置的关系为:

$$\theta(y, U) = \cos \frac{\pi y}{h} \cdot \sqrt{8 \left(\frac{U}{U_{th}} - 1 \right)} \quad (3)$$

式中: $U_{th} = \sqrt{\frac{k}{\Delta \epsilon}} \cdot \pi$ 为阈值电压。上式表明当外加电场超过阈值 U_{th} 时, 液晶分子随电压的增大开始旋转。

2.2 液晶分子旋转对 Mach-Zehnder 滤波影响的理论分析

已知液晶分子的有效折射率 $n_{||}$ 和旋转角度 θ 直接的关系为:

$$n_{||} = \left(\frac{\sin^2\theta}{n_{||}^2} + \frac{\cos^2\theta}{n_{\perp}^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中： $n_{//}=\sqrt{\varepsilon_{//}}$ ， $n_{\perp}=\sqrt{\varepsilon_{\perp}}$ 。进而由旋转角度可得到相应的液晶分子有效折射率。

由 MZI 干涉理论可知，两光路的输出和两个传输臂的相位差有关，而两臂相位差：

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(n_{\text{eff}1}L_1-n_{\text{eff}2}L_2) \quad (5)$$

式中： $n_{\text{eff}1}$ 、 $n_{\text{eff}2}$ 分别为光子晶体中两个传输臂的等效折射率； L_1 、 L_2 为对应的传输长度，由参考文献[9]可知光子晶体的等效折射率为：

$$n_{\text{eff}}=\sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}=\sqrt{d\varepsilon_1+(1-d)\varepsilon_2} \quad (6)$$

式中： d 为占空比； ε_1 、 ε_2 分别为介质柱和背景的介电常数。

这样就建立起外加电压和 MZI 透射波长之间的理论关系，当受外界电压的影响液晶分子发生旋转后，在传输光路中的有效折射率进而发生改变，两个传输臂的相位差产生变化，进而影响 MZI 的透射谱。

3 可调谐 MZI 滤波器输出特性分析

3.1 可调谐特性分析

为实现结构的可调谐性，在图 2 中光路 1 中的空气柱内填充 5CB 向列型液晶($n_{\perp}=1.53$ ， $n_{//}=1.75$)，并对结构表面做平行处理，稳定时液晶分子指向矢沿 x 轴方向。由于液晶具有双折射特性，液晶分子指向矢随外加电压的变化而转动，在没有外加电压时液晶分子平行于空气柱排列，由于 TE 模偏振方向平行于介质柱，电矢量分量沿 x 轴方向，平行于液晶分子指向矢，此时液晶分子不发生转动，液晶呈正常折射率 $n_0=n_{\perp}=1.53$ ；当添加 y 轴方向的可控电压时，当电压达到阈值电压 $U_{th}=0.699\text{V}$ 时，液晶分子随外加电压的增加发生转动，液晶的有效折射率从 1.53 增大到 1.75。

当外加电压小于阈值电压时，液晶分子不发生旋转，应用时域有限差分法(FDTD)算法，如图 6 所示，分析可得在归一化频率 $a/\lambda=0.1566\sim 0.1831$ 范围内两个出口的光谱基本互补，符合 Mach-Zehnder 滤波的结果，并且由图 6 可以看出在自准直效果好的归一化频率处透射率接近 100%。

由于光子晶体器件较小，厚度较薄，因此在外加电压时只考虑 $y=0$ 处的液晶分子的旋转情况，应用时域有限差分法(FDTD)分析外加不同电压时下输出端口的透射谱，如图 7 所示。由图可以看出随外加电压的变化液晶分子发生旋转，在传播方向的液晶分子有效折射率发生变化，进而改变传输区域的等效折

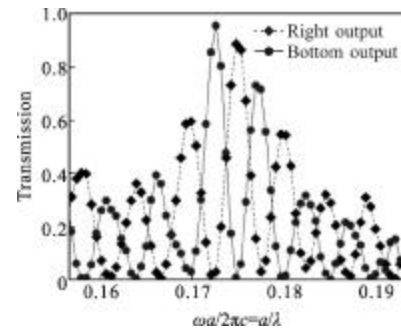


图 6 电压为 0 时两个通道的频率谱

Fig.6 Frequency spectra of the two channels when voltage is equal to 0

射率，改变两个光路的相位差，使输出透射谱的中心波长发生漂移，且向长波长方向移动。从图 7 可以看出曲线基本成余弦形状，并且单一 MZI 滤波器的滤波效果一般，半波带宽约为 20 nm，可调谐范围较小，约为 15 nm，还不能达到常用滤波器的性能要求，因此需要对结构进行优化。

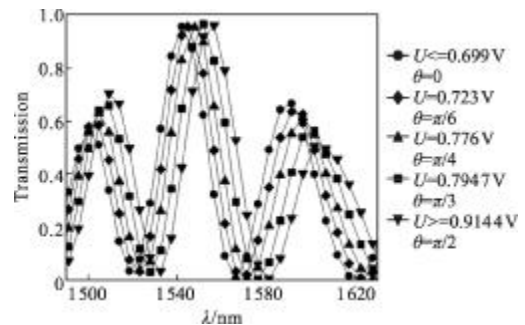


图 7 电压对 MZI 右侧输出谱的调制

Fig.7 Modulation of voltage on the right output spectrum of MZI

3.2 结构优化

由图 6 和图 7 都可以看出光谱的半波带宽约为 20 nm，可调谐范围约 15 nm，滤波性能不是很理想，根据 MZI 的级联特性，采用前面讨论的参数对结构进行一级级联(如图 8 所示)，并用 FDTD 仿真模拟级联后的光谱如图 9 所示，由图 9 可以看出输出 2 和 3 端口的的光谱明显比输出 1 端口的的光谱频带窄，半波带宽约为 7 nm，在相应的波长范围内自由光谱范围变小，这是由于自由光谱范围，其中为两光路的光程差，由此可见随着级联后的增大，F 随之减小，级联后的滤波性能得到很大的提高，因此可以通过进一步的级联优化滤波器的性能。虽然级联后的透射率有所下降，这是由于传输过程中光的色散，但由图 9 可以看出透射率还是可以达到 80% 以上，还是有较高的透射率。

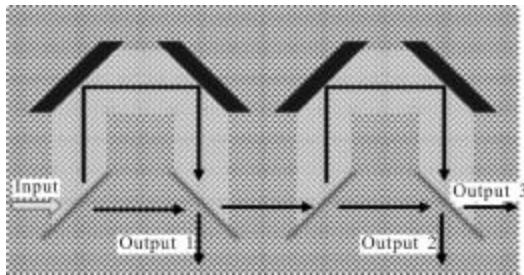


图 8 级联 MZI 滤波器结构

Fig.8 Cascaded MZI filter structure

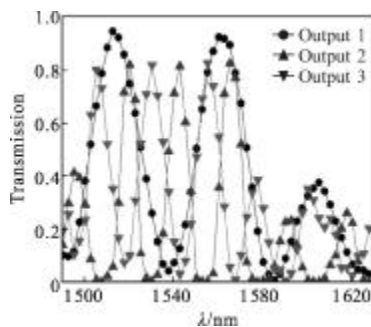


图 9 级联 MZI 滤波器透射谱

Fig.9 Transmission spectrum of cascaded MZI filter

另外结合文中第二部分的理论分析,由图 10 可以看出级联后,当外加电压小于阈值时,液晶分子旋转角为 0° ,此时液晶的有效折射率为 1.53,第 m 级透射峰的波长为 1520.1 nm;当外加电压增大到 0.9144 V 时,稳定时液晶分子旋转角达到 90° ,此时液晶的有效折射率为 1.75,第 m 级透射峰波长为 1560.5 nm,这样相比于图 7 可调谐范围增大到 40 nm。可调谐性能有了明显的改善。

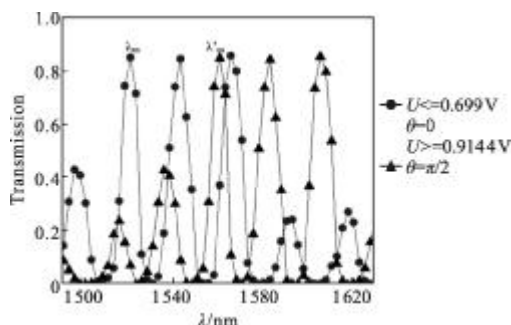


图 10 级联 MZI 滤波器电压调制透射谱

Fig.10 Voltage modulation transmission spectrum of cascaded MZI filter

4 结论

基于液晶电控双折射特性和光子晶体自准直特性,设计了一种可调谐光子晶体 Mach-Zehnder 滤波

器结构,建立了外加电压和滤波器透射波长间的数学模型,并通过时域有限差分法分析了滤波器的透射曲线,根据单一 MZI 滤波结构的透射曲线可知其滤波半波带宽约为 20 nm,可调谐范围在 15 nm,滤波效果不够理想,因此采用一级级联的方式对结构进行优化。结果表明,级联后滤波器的性能有了很大的改善,半波带宽减小为 7 nm,应用液晶的电控双折射特性实现了对光子晶体 MZI 滤波器的可调谐性,可调谐范围增大为 40 nm,频带宽度较窄,有较好的滤波效果。该结构应用液晶实现的可调谐滤波器,采用多级级联后,在波分复用系统有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] Hung Huichuan, Wu Chienjang, Yang Tzongjer, et al. Tunable multichannel filter in a photonic crystal containing semiconductor photonic quantum well [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(1): 283-290.
- [2] Electro-optical tunable filter with symmetric generalized fibonacci photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(11): 1723-1727.
- [3] Su An. Photonic crystal quantum well with function of multi-channel photonic filter and amplifying[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 727-732. (in Chinese)
- [4] Cos J, Ferre-Borrull J, Pallares J, et al. Tunable Fabry-Perot filter based on one-dimensional photonic crystals with liquid crystal components [J]. Optics Communication, 2009, 282: 1220-1225.
- [5] Li Wencho, Liu Zhengjun, Zhao Hongdong, et al. Design and characteristics of two-dimensional photonic crystal micro-cavity based on tunable defect refractive index [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 330-334. (in Chinese)
- [6] Robinson S, Nakkeeran R. Investigation on two dimensional photonic crystal resonant cavity based bandpass filter [J]. Optik, 2012, 123: 451-457.
- [7] Liu Weijia, Tian Huiping, Ji Yuefeng, et al. Optical single sideband modulation of 60 -GHz radio over fiber (ROF) system using ultra compact photonic crystal ring-shaped channel drop filter [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 49: 6-12.
- [8] Feng Shuai, Wang Yiquan. Tunable multichannel drop filters based on the two-dimensional photonic crystal with oval defects [J]. Optik, 2012, 123: 688-691.
- [9] Sun Guilin, Kirk A G. On the relationship between Bloch modes and phase-related refractive index of photonic crystals [J]. Optics Express, 2007, 15(20): 13149-13154.