

文章编号: 0258-7025(2010)11-2834-04

液晶缺陷光子晶体滤波器的光学特性

宋立涛¹ 何杰^{2*} 王华磊¹ 韩毅昂¹ 李涛¹

(¹郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450052)
(²河南工业大学理学院, 河南 郑州 450001)

摘要 以平行向列相液晶作为缺陷层设计了一种可调谐光子晶体滤波器。采用 4×4 矩阵方法, 对其光学特性和本征偏振态进行了理论分析。结果表明, 电压较低时, 存在两种本征透射模式, 具有偏振敏感性, 通过轴向旋转光子晶体滤波器, 可以选择偏振光透射模式; 随电压升高, 两透射模式对应的波长趋于一致, 发生模式混合, 偏振敏感性消失。光子晶体带隙位置和宽度随电压变化不明显, 滤波器可调谐范围可达 87 nm。透射峰的位置和个数对缺陷层的厚度较为敏感。

关键词 光学器件; 光子晶体; 偏振; 液晶; 可调谐

中图分类号 O734 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2834

Optical Performance of Photonic Crystal Filter with Liquid Crystal Layer

Song Litao¹ He Jie² Wang Hualei¹ Han Yiang¹ Li Tao¹

(¹Physical Engineering College, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450052, China)
(²College of Science, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract A tunable photonic crystal filter was proposed with parallel nematic liquid crystal as defect layer. Optical performance and the eigenmodes were analyzed by 4×4 matrix method. The results show that there are two kinds of transmission modes when the voltage is low. Different modes can be selected by rotating the filter axially. Peaks of two modes merge into one and the polarization sensitive performance disappears as the applied voltage increases. Photonic bandgap is insensitive to voltage. Tunable range of the filter is 87 nm. The positions and number of transmission peaks depend on the thickness of defect layer sensitively.

Key words optical devices; photonic crystal; polarization; liquid crystal; tunable

1 引言

光子晶体是由高低折射率材料在空间上作周期交替排列而得到的人工结构材料。光子晶体具有光子禁带, 频率落在禁带内的光子不能在光子晶体中传输, 通过在光子晶体中引入缺陷可以使光子禁带中出现缺陷态从而具有滤波特性^[1~8]。近年来光子晶体可调滤波的研究备受关注^[1~4]。金属、半导体和液晶(LC)^[1~3]等材料都可以用来实现光子晶体的可调滤波。液晶由于具有较大的介电各向异性和

折射率对外界参量变化很敏感的特性, 是滤波器很好的调制材料。将液晶作为光子晶体的缺陷层所进行的实验和理论研究已有较多报道^[9~12]。本文以平行向列相液晶盒作为缺陷层设计了一种可调谐光子晶体滤波器, 并着重对其偏振敏感性、本征透射模式以及缺陷层厚度对透射谱的影响进行了分析。

2 滤波器结构和 4×4 矩阵方法

图 1 是含液晶缺陷的一维光子晶体滤波器结构

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-05-10

基金项目: 河南工业大学校引进人才专项(2007BS041)资助课题。

作者简介: 宋立涛(1978—), 男, 讲师, 主要从事光电器件设计及核物理等方面的研究。E-mail: Songlt12@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: hejie10@yahoo.com.cn

示意图。中间是缺陷层,为平行向列相 E7 液晶盒,液晶折射率 $n_{//}=1.71, n_{\perp}=1.50$,厚度为 $1 \mu\text{m}$ 。文献[13~15]对向列相液晶盒的结构、制作方法、指向矢取向控制以及电控特性有详细介绍。液晶盒两边是对称分布的光子晶体,结构均为 $[\text{HL}]^6\text{H}$,两种介质的折射率分别为 $n_{\text{H}}=2.065$ (TiO_2), $n_{\text{L}}=1.465$ (SiO_2),光学厚度均为 $\lambda_0/4, \lambda_0=1.55 \mu\text{m}$ 为光子晶体禁带中心波长。

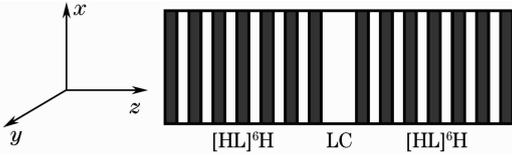


图1 含液晶缺陷的一维光子晶体滤波器结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of one dimensional photonic crystal filter with liquid crystal layer

分析光在包含各向异性介质的多层结构中传输的方法主要有琼斯矩阵法^[16,17]、 4×4 矩阵法^[14,18]等。下面对 4×4 矩阵法做一简单介绍。设波矢量为 \mathbf{k} 的单色平面光入射到一单轴均匀介质薄层,介质边界分别位于 z_1 和 z_2 处(坐标如图1)。 x - y 平面平行于薄层界面,入射面和反射面位于 x - z 平面内,入射角为 θ 。设单轴晶体的介电张量为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

由麦克斯韦(Maxwell)方程组可得到单轴介质中光波的电场矢量和磁场矢量的切向分量满足线性微分方程

$$\frac{d\boldsymbol{\psi}}{dz} = -ik\mathbf{Q}\boldsymbol{\psi}, \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{\psi}(z) = [E_x(z), H_y(z), E_y(z), -H_x(z)]^T$ 为广义场矢量,介质的 Berreman 4×4 矩阵 \mathbf{Q} 为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} -\frac{\varepsilon_{zx}}{\varepsilon_{zz}} \sin \theta & 1 - \frac{\sin^2 \theta}{\varepsilon_{zz}} & -\frac{\varepsilon_{zy}}{\varepsilon_{zz}} \sin \theta & 0 \\ \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{zz} \frac{\varepsilon_{zx}}{\varepsilon_{zz}} & -\frac{\varepsilon_{xz}}{\varepsilon_{zz}} \sin \theta & \varepsilon_{xy} - \varepsilon_{zz} \frac{\varepsilon_{zy}}{\varepsilon_{zz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \varepsilon_{yx} - \varepsilon_{zz} \frac{\varepsilon_{zx}}{\varepsilon_{zz}} & -\frac{\varepsilon_{yz}}{\varepsilon_{zz}} \sin \theta & \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz} \frac{\varepsilon_{zy}}{\varepsilon_{zz}} \sin^2 \theta & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

对向列相液晶, $\varepsilon_{xx} = n_o^2 + (n_e^2 - n_o^2) \cos^2 \gamma \cos^2 \varphi$, $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx} = (n_e^2 - n_o^2) \cos^2 \gamma \cos \varphi \sin \varphi$, $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx} = (n_e^2 - n_o^2) \sin \gamma \cos \gamma \cos \varphi$, $\varepsilon_{yy} = n_o^2 + (n_e^2 - n_o^2) \cos^2 \gamma \sin^2 \varphi$, $\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy} = (n_e^2 - n_o^2) \sin \gamma \cos \gamma \sin \varphi$, $\varepsilon_{zz} = n_o^2 + (n_e^2 -$

$n_o^2) \sin^2 \gamma$, 其中 γ 为指向矢倾角, φ 为指向矢扭曲角。设 $z_1 = 0, z_2 = L$, 解方程(2)式,可得薄层两边界内表面处的传输矩阵 \mathbf{P} 为

$$\boldsymbol{\psi}(L) = \mathbf{P}\boldsymbol{\psi}(0), \quad (4)$$

把 \mathbf{Q} 换为各向同性介质的 4×4 矩阵,采用相同的方法,可得到各向同性介质的传输矩阵。则光学器件总的传输矩阵为各层传输矩阵的乘积,表示为

$$\mathbf{T} = \prod_i \mathbf{P}_i. \quad (5)$$

3 结果与讨论

液晶为光学各向异性介质,折射率和指向矢分布有关,要分析液晶光学性质,首先要知道指向矢分布。采用差分迭代法^[15]计算了液晶指向矢随电压的分布,指向矢边界条件采用强锚泊条件,未加电压时,液晶指向矢平行于 x 轴^[13~15]。在得到指向矢分布后,用 4×4 矩阵法计算了光子晶体滤波器的透射谱,计算中假设光垂直入射,入射面为 x - z 面,滤波器两侧介质均为空气。

图2比较了不同入射光的透射谱,其中(a)是自然光、(b)和(c)分别是偏振方向与 x 轴的夹角为 0° 和 90° 的线偏振光。图2(a)表明以自然光入射,外加电压较低时,存在两个本征透射模式。由于光在液晶中传播时会分成 o 偏振光和 e 偏振光,这两个模式可以理解为 o 模式和 e 模式。由图2(b)和(c)可以看出, 0° 和 90° 线偏振光的透射谱中均只有一个透射模式,因此可以将其作为两个基本方向,分析透射峰的强度和入射光的偏振方向之间的关系。图3(a)和(b)分别给出了 10° 和 80° 偏振光的透射谱,可以看出,在 10° 时 o 模式的透射峰很弱,在 80° 时 e 模式的透射峰很弱。进一步的分析表明,偏振方向在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 和 $85^\circ \sim 95^\circ$ 之间时,已经可以认为只有一个透射模式,这给实际应用带来了很大的方便。

由于液晶指向矢的取向和外加电压有关,所以两透射模式所对应的波长也和外加电压有关。电压低于阈值电压(约 1 V)时,液晶分子排列方向保持不变,由图2,3可以看出,两模式透射谱也基本保持不变。电压在 $1 \sim 3 \text{ V}$ 时,指向矢开始向电场方向偏转, e 光折射率也随之减小, e 模式随电压升高向短波方向移动,若入射光为线偏振光,可通过轴向旋转滤波器让光以 e 模式透过,然后改变电压进行调谐。在此范围内,电压的变化和波长移动基本呈线性关系,电压的小幅度改变就可以实现大范围的波长调

谐。电压大于 3 V 时,指向矢方向与外加电场方向基本平行,e 光折射率趋近于 o 光折射率,两透射模

式的波长趋于一致并发生模式混合,偏振敏感性消失。

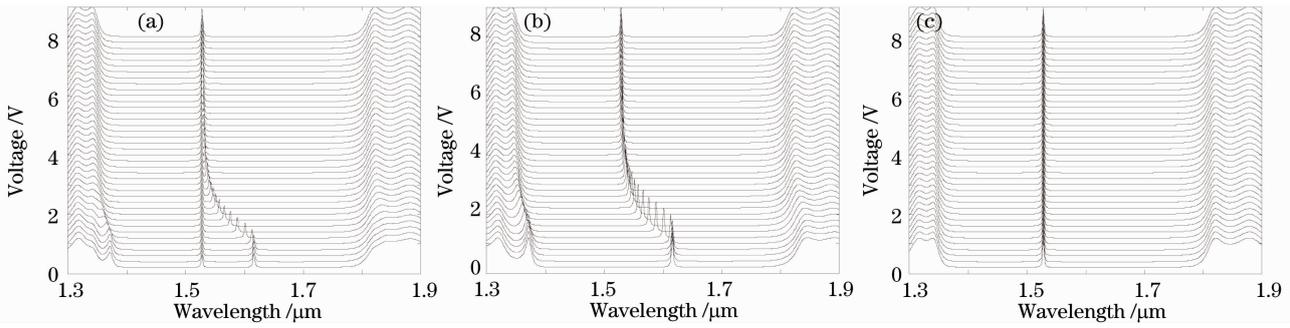


图 2 不同入射光的透射谱。(a)自然光,(b)0°偏振光,(c)90°偏振光

Fig. 2 Transmission spectra of different incident lights. (a) natural light, (b) 0° linearly polarized light, (c) 90° linearly polarized light

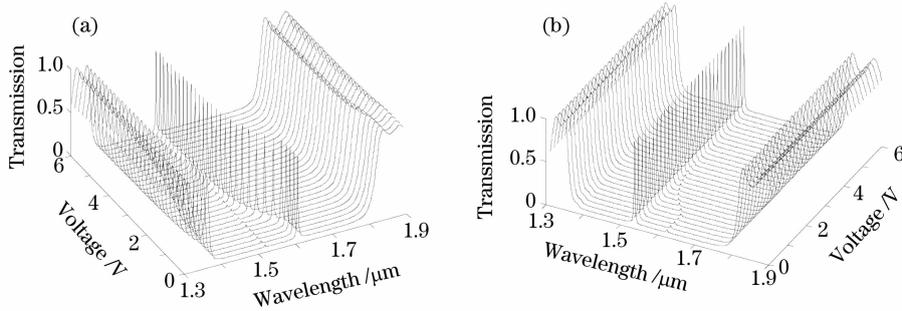


图 3 不同偏振光的透射谱。(a)10°偏振光,(b)80°偏振光

Fig. 3 Transmission spectra of different linearly polarized lights. (a) 10° linearly polarized light, (b) 80° linearly polarized light

图 4 给出了电压为 0 V 和 8 V 时 e 模式的透射谱。可以看出,该光子晶体滤波器的调谐范围可达 87 nm。光子晶体带隙位置和宽度随电压有一定变化,但不是很大。这是由于尽管带隙的位置主要决定于光子晶体的周期性结构,但液晶缺陷层的各向异性随外加电压变化比较大的时候,也会对其有一定的影响。

晶厚度 d 较为敏感,但带隙位置和宽度随 d 的变化不明显;随 d 增加,透射峰向长波方向移动,并逐渐移出带隙范围,同时新的透射峰逐渐从短波端移入,且这种变化具有周期性,在一个周期内,透射峰波长与厚度基本成线性关系;透射峰的个数随 d 增加逐渐增多。这是由于透射峰的位置和个数主要和缺陷层的光学厚度有关,而带隙的位置主要决定于光子晶体的周期性结构。从图中还可以看出,透射峰位

图 5 给出了外加电压为 8 V 时,不同缺陷层厚度的透射谱。可以看出,透射峰的位置和个数对液

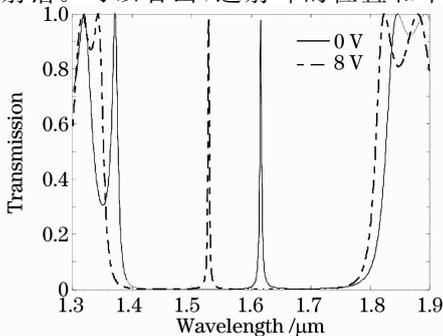


图 4 外加电压为 0 V 和 8 V 时 e 模式的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of e-mode with voltage 0 V and 8 V

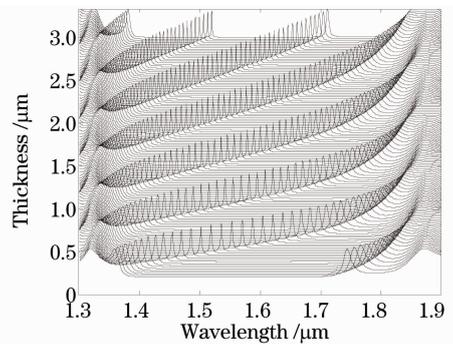


图 5 不同缺陷层厚度的透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of different defect layer's thicknesses

于带隙中心附近时,半峰全宽较小;透射峰靠近带隙边缘时,半峰全宽增大。

4 结 论

从以上分析可以看出,电压较低时,所设计的液晶缺陷一维光子晶体滤波器具有偏振敏感性,可以通过轴向旋转滤波器,选择线偏振光的透射模式。随电压升高,e 模式透射峰向短波方向移动,逐渐靠近 o 模式,最后两透射模式对应的波长趋于一致并发生模式混合,偏振敏感性消失。因此,可通过改变外加电压进行调谐,可调谐范围可达 87 nm。光子晶体的带隙宽度和位置对电压和偏振变化不敏感。透射峰的位置和个数对缺陷层的厚度较为敏感。

参 考 文 献

- 1 K. Bush, S. John. Liquid-crystal photonic-band-gap materials: the tunable electromagnetic vacuum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(5): 967~970
- 2 K. Yoshino, Y. Shimoda, Y. Kawagishi *et al.*. Temperature tuning of the stop band in transmission spectra of liquid-crystal infiltrated synthetic opal as tunable photonic crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(7): 932~934
- 3 S. W. Leonard, J. P. Mondia, N. M. van Driel *et al.*. Tunable two-dimensional photonic crystals using liquid crystal infiltration [J]. *Phys. Rev. B.*, 2000, **61**(4): R2389~R2392
- 4 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. A variable optical attenuator based on the photonic crystal waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 671~674
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 光子晶体波导可调光衰减器[J]. 中国激光, 2007, **34**(5): 671~674
- 5 Wang Jizhou, Xiong Yuqing, Wang Duoshu *et al.*. Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2914~2919
王济洲, 熊玉卿, 王多书等. 一维光子晶体缺陷模的滤波特性及应用研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2914~2919
- 6 Fu Haiwei, Zhao Hui, Qiao Xueguang *et al.*. Study on temperature response of photonic crystal microcavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 237~239
傅海威, 赵 辉, 乔学光等. 光子晶体微腔温度响应特性研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 237~239
- 7 Liu Qineng. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 777~780
刘启能. 杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 777~780
- 8 Qian Xiangzhong. Effect of temperature on transmission properties in photonic crystal fibers infiltrated with liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 988~991
钱祥忠. 温度对液晶填充光子晶体光纤传输特性的影响[J]. 光学学报, 2008, **28**(5): 988~991
- 9 V. A. Tolmachev, T. S. Perova, S. A. Grudinkin *et al.*. Electro-tunable in-plane one-dimensional photonic structure based on silicon and liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(1): 011908
- 10 D. V. Ignacio, R. M. Ignacio, J. A. Francisco. Analysis of one-dimensional photonic band gap structures with a liquid crystal defect towards development of fiber-optic tunable wavelength filters [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 430~436
- 11 J. Cos, J. Ferre-Borrull, J. Pallares *et al.*. Tunable Fabry-Pérot filter based on one-dimensional photonic crystals with liquid crystal components [J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(6): 1220~1225
- 12 Y. K. Ha, Y. C. Yang, J. E. Kim *et al.*. Tunable omnidirectional reflection bands and defect modes of a one-dimensional photonic band gap structure with liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(1): 15~17
- 13 Liu Yongzhi, Yang Kaiyu. Liquid Crystal Display Technology [M]. Chengdu: The University of Electronic Science and Technology Press, 2000. 23~25
刘永智, 杨开愚. 液晶显示技术 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2000. 23~25
- 14 Y. H. Huang, T. X. Wu, S. T. Wu. Simulations of liquid-crystal Fabry-Pérot etalons by an improved 4×4 matrix method [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(5): 2490~2495
- 15 Q. Wang, S. L. He, F. H. Yu *et al.*. Iterative finite-difference method for calculating the distribution of a liquid-crystal director [J]. *Opt. Eng.*, 2001, **40**(11): 2552~2557
- 16 R. C. Jones. A new calculus for the treatment of optical systems [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1941, **31**(7): 488~493
- 17 P. Yeh. Extended Jones matrix method [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(4): 507~513
- 18 D. W. Berreman. Optics in stratified and anisotropic media: 4×4 matrix formulation [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(4): 502~510