

入射角对液晶缺陷光子晶体滤波器透射谱的影响

何杰¹ 宋立涛² 王华磊² 韩毅昂² 李涛²

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

摘要 应用平行向列相液晶作为光子晶体缺陷层设计了一种可调谐滤波器。用 4×4 矩阵方法,详细讨论了入射角对本征透射模式的影响。结果表明,入射角小于 10° 时,透射模式波长主要由外加电压决定,此范围内,可进行电压调谐,通过其偏振敏感性选择透射模式;入射角大于 10° 时,透射模式波长向短波方向移动,且两透射模式变化不一致,因此外加电压大于8V时,可以进行角度调谐,通过改变入射角选择透射模式,使调谐范围增大,同时也增大了实际应用的灵活性。

关键词 光学器件;光子晶体;入射角;液晶;可调谐

中图分类号 O734 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.102301

Transmission Modes with Varying Incident Angle for Photonic Crystal Filter with Liquid Crystal Layer

He Jie¹ Song Litao² Wang Hualei² Han Yi'ang² Li Tao²

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

Abstract A tunable photonic crystal filter is proposed with parallel nematic liquid crystal as defect layer. The transmission modes while varying incident angle are discussed in detail by 4×4 matrix method. The results show that transmission modes are mainly decided by the voltage when the incident angle is smaller than 10° . In this region, the transmission modes can be tuned by voltage and different modes can be selected based on polarization sensitive performance. When the incident angle is greater than 10° , the peaks of two modes shift toward the shorter wavelength side and the change of two modes is different. So the transmission modes can be tuned and selected by varying the incident angle in the voltage region of more than 8 V. Both the tunable range and the flexibility of application are enlarged.

Key words optical devices; photonic crystal; incident angle; liquid crystal; tunable

OCIS codes 230.5298; 160.5298; 060.5295

1 引言

光子晶体是一种新型的人工结构材料,其发展已成为涉及材料科学、光学原理、集成技术以及微纳电子技术的一门新兴学科。其显著特点是具有光子带隙结构,波长落在禁带内的光子不能在其中传输,通过引入缺陷可使光子禁带中出现缺陷态而具有滤波特性^[1~6]。光子晶体可调滤波已备受关注^[1~4],半导体、液晶^[1~3]和金属等材料都能用来实现光子晶体的可调滤波。以液晶为缺陷进行的理论和实验研究已有较多报道^[7~10],近期本课题组在文献[11,12]中分别对平行和扭曲向列相液晶作为缺陷层的一维可调谐光子晶体滤波器的偏振敏感性、本征透射模式以及缺陷层厚度对透射谱的影响等光学特性进行了分析。本文进一步讨论了光波入射角对平行向列相液晶作为缺陷的一维可调谐光子晶体滤波器透射谱的影响。

2 滤波器结构和 4×4 矩阵方法

图1为液晶缺陷一维光子晶体滤波器的结构示意图。缺陷层为平行向列相E7液晶盒,其折射率

收稿日期:2011-04-20;收到修改稿日期:2011-05-24;网络出版日期:2011-08-06

基金项目:国家自然科学基金(10805040)和河南工业大学校引进人才专项(2007BS041)资助课题。

作者简介:何杰(1978—),女,讲师,主要从事光电器件设计方面的研究。E-mail: hejie10@yahoo.com.cn

$n_{\perp} = 1.50, n_{\parallel} = 1.71$, 厚度 $d = 1 \mu\text{m}$, 位于光子晶体中间。缺陷层两侧均为 $(\text{HL})^6\text{H}$ 结构的光子晶体, L 和 H 分别对应 SiO_2 和 TiO_2 , 其折射率 $n_L = 1.465, n_H = 2.065$, 光学厚度均为 $\lambda_0/4, \lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 是光子带隙中心波长。很明显, 其结构为含有各向异性介质的层状结构, 分析其光学特性的常用方法有琼斯矩阵法^[13,14], 4×4 矩阵法^[15,16]等。本文采用了 4×4 矩阵法, 设单色平面光入射到一单轴介质薄层, 其波数为 k , 入射角 θ , 入射面和反射面为 $x-z$ 平面, $x-y$ 平面平行介质界面。介质均匀, 边界位于 z_1 和 z_2 , 其介电张量为

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

由麦克斯韦方程组, 介质中光波电磁矢量的切向分量满足

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

式中 $\boldsymbol{\psi}(z) = [E_x(z), H_y(z), E_y(z), -H_x(z)]^T$, 叫做广义场矢量,

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

是介质的 Berreman 4×4 矩阵。设 $z_1 = 0, z_2 = L$, 解(2)式, 可得联系薄层两边界处的传输矩阵 \boldsymbol{P} , 即

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

将 \boldsymbol{Q} 换为各向同性介质的 4×4 矩阵, 同理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

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

3 结果与讨论

液晶是光学各向异性介质, 分析其光学性质, 首先需得到液晶分子指向矢分布。本文采用差分迭代法^[17] 计算了液晶指向矢随外加电压的分布, 指向矢边界应用强锚泊条件, 未加电压时, 指向矢平行于 x 轴^[17]。图 2 是指向矢分布的计算结果, 可以看出, 随电压升高, 中间部分的液晶分子倾角逐渐接近 90° , 电压增大到到 8V 时, 液晶分子指向矢的分布趋于饱和, 曲线形状已基本不变, 液晶光学性质随电压的变化趋于稳定。指向矢分布一方面可以帮助理解透射谱的特点, 另一方面代入指向矢即可得到液晶的 Berreman 4×4 矩阵。利用计算得到的指向矢分布, 采用 4×4 矩阵法对滤波器的透射谱进行了分析。根据指向矢分布和电压之间的关系, 选择 0V 和 8V 外加电压的透射谱进行了展示和比较。计算中假设滤波器两侧介质均为空气, 入射面为 $x-z$ 面。



图 1 液晶缺陷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

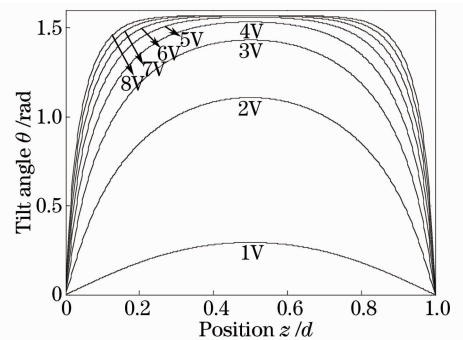


图 2 平行向列相液晶指向矢的空间分布与外加电压的关系
Fig. 2 Relation of nematic liquid crystal director and voltage

图 3 比较了入射角在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 之间不同入射角的透射谱, 图 3(a) 为液晶盒外加电压 8V 的 o 模式透射

谱,图 3(b)为液晶盒外加电压 8V 的 e 模式透射谱,图 3(c)为液晶盒外加电压 0V 的 o 模式透射谱,图 3(d)为液晶盒外加电压 0V 的 e 模式透射谱。可以看出,入射角在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 之间变化时,透射谱没有明显改变,透射模式波长位置主要由外加电压决定。因此,入射角在此范围时,可以通过滤波器的偏振敏感性选择透射模式,通过控制液晶盒外加电压进行调谐^[11]。这给实际应用带来了很大方便,应用中很难保证入射方向的单一性。

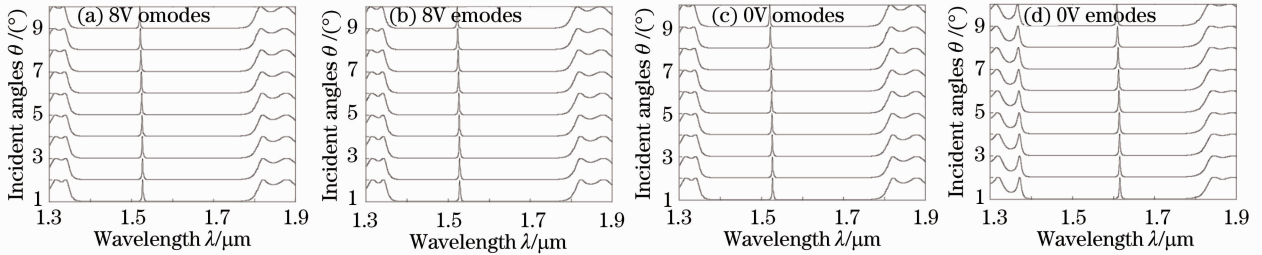


图 3 $0^\circ \sim 10^\circ$ 入射角时的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of $0^\circ \sim 10^\circ$ incident angles

图 4 比较了入射角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间不同入射角的透射谱,图 4(a)为液晶盒外加电压 8V 的 o 模式透射谱,图 4(b)为液晶盒外加电压 8V 的 e 模式透射谱,图 4(c)为液晶盒外加电压 0V 的 o 模式透射谱,图 4(d)为液晶盒外加电压 0V 的 e 模式透射谱。可以看出,当入射角大于 10° 时,随入射角的增加,透射模式波长迅速向短波方向移动,透射波长和入射角密切相关。因此,入射角大于 10° 时,除电压调谐外,还可以进行角度调谐,不仅增大了调谐范围,还可增加实际应用的灵活性。

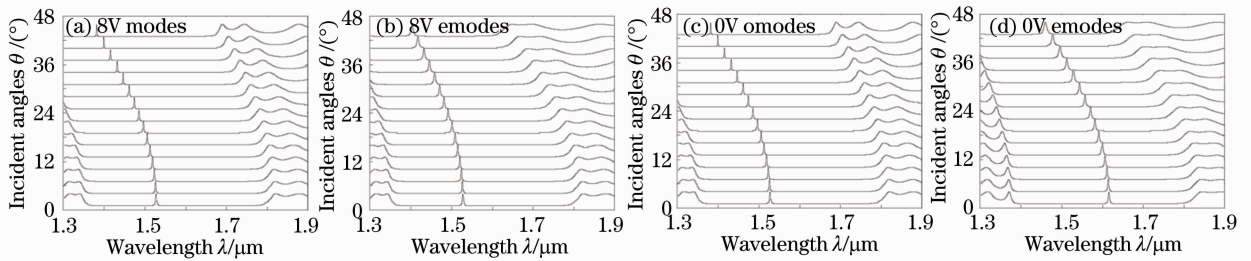


图 4 不同入射角的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of different incident angles

仔细分析图 4,可以看出入射角对两种透射模式的影响并不相同,为了便于比较,分别提取了 0V 和 8V 的透射模式波长,并在图 5 中进行了比较。可以看出,入射角对两种透射模式的影响有着明显的不同,尤其电压高于 8V 时,e 模式的变化明显滞后于 o 模式。这种变化的不同步同样有很大的好处,当外加电压大于 8V 时,液晶指向矢的分布已趋饱和,滤波器不再对入射光具有偏振敏感性,不能再通过轴向旋转光子晶体滤波器选择透射模式^[11],这时则可通过改变入射角选择透射模式。

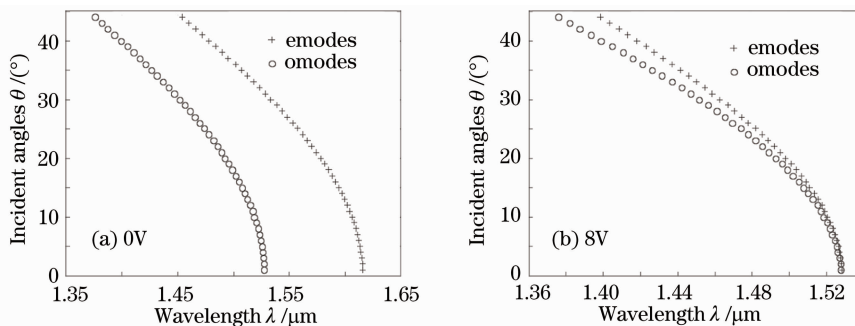


图 5 透射模式波长随入射角的变化

Fig. 5 Transmission modes wavelength of different incident angles

4 结 论

从以上分析可以看出,入射角小于 10° 时,滤波器透射模式波长主要由液晶盒外加电压决定,在此范围内,可以通过滤波器的偏振敏感性选择透射模式,通过控制液晶盒外加电压进行调谐^[11]。随入射角的进一步增大,透射模式波长明显的向短波方向移动,变得和入射角密切相关,并且两透射模式变化不同步,因此当入射角大于 10° 时,可以进行角度调谐,调谐范围增大,同时也增大了实际应用的灵活性。由于两种透射模式变化的不一致,外加电压大于 8V 时,可以通过改变入射角选择透射模式。

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 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
- 7 V. A. Tolmachev, T. S. Perova, S. A. Grudinkin *et al.*. Electrotunable in-plane one-dimensional photonic structure based on silicon and liquid crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(1): 011908-1~011908-3
- 8 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
- 9 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
- 10 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
- 11 Song Litao, He Jie, Wang Hualei *et al.*. The optical performance of photonic crystal filter with liquid crystal layer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2834~2837
宋立涛,何杰,王华磊等. 液晶缺陷光子晶体滤波器的光学特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2834~2837
- 12 He Jie, Song Litao, Wang Hualei *et al.*. Polarization sensitive performance of one dimensional photonic crystal filters with a liquid crystal layer[J]. *Optoelectron. Lett.*, 2010, **6**(6): 0432~0434
- 13 R. C. Jones. A new calculus for the treatment of optical systems[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1941, **31**(7): 488~493
- 14 P. Yeh. Extended Jones matrix method[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(4): 507~513
- 15 Y. H. Huang, Thomas X Wu, Shin-Tson Wu. Simulations of liquid-crystal Fabry-Perot etalons by an improved 4×4 matrix method[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(5): 2490~2495
- 16 D. W. Berreman. Optics in stratified and anisotropic media: 4×4 matrix formulation[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(4): 502~510
- 17 He Jie, Song Litao, Luo Chongtai *et al.*. Optical performance analysis of nematic liquid crystal fabry-perot filter[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(10): 114~117
何杰,宋立涛,罗崇泰等. 平行行列相液晶法-珀滤光片的光学特性分析[J]. 光电工程, 2007, **34**(10): 114~117