

文章编号: 0253-2239(2009)07-1987-04

# 一维向列相液晶光子晶体的研究

刘永军<sup>1</sup> 连佳<sup>1</sup> 鲁兴海<sup>2</sup> 宣丽<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工程大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001  
<sup>2</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 吉林 130033)

**摘要** 从理论和实验相结合的角度, 研究了一维液晶光子晶体透射谱特性。实验给出了不同液晶缺陷层电压下的透射谱, 电压范围在 0~10 V 内, 透射峰的相对透过率变化为 48%~18%, 禁带宽度 290 nm 调谐范围 88 nm, 透射峰半峰全宽 7 nm。理论计算和实验结果比较接近, 这些特性可以使一维液晶光子晶体用于调谐光滤波器和光开关。

**关键词** 光子晶体; 向列相液晶; 缺陷层; 透射谱

**中图分类号** O753<sup>+</sup>.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1987

## Investigation of One-Dimensional Photonic Crystal with Nematic Liquid Crystal

Liu Yongjun<sup>1</sup> Lian Jia<sup>1</sup> Lu Xinghai<sup>2</sup> Xuan Li<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Jilin, Changchun 130033, China)

**Abstract** Transmission spectra characteristics of one dimension (1-D) photonic crystal (PC) with nematic liquid crystal (NLC) are investigated theoretically and experimentally. Transmission spectra of 1D PC with NLC under different applied voltage were obtained in experiment. With the voltage range from 0 V to 10 V, it shows that relative transmittance of transmission peak is from 48% to 18%, range of photonic band gaps (PBG) is 290 nm, tunable range is 88 nm, full width at half maximum (FWHM) of the transmission peaks is 7 nm. Theoretical result is closed to experimental result comparatively. These properties can make 1-D PC with NLC be applied to tunable optical filters or optical switches.

**Key words** photonic crystal(PC); nematic liquid crystal (NLC); defect layer; transmission spectra

## 1 引 言

1999 年 Kurt Bush 等<sup>[1]</sup>首次将向列相液晶 (NLC) 作为缺陷引入反蛋白石结构三维光子晶体 (PC) 中, 开创了液晶在光子晶体中应用的先河。三维光子晶体有其制作简单成本低等优点, 然而, 在其内部引入缺陷是个比较难解决的问题<sup>[2]</sup>。二维光子晶体容易集成, 但液晶在其内部的取向不易控制, 且不易电压控制<sup>[3,4]</sup>。相比较来说, 一维光子晶体<sup>[5~7]</sup>具有制作简单, 缺陷好引入。并且 Fink<sup>[8]</sup>从理论和

实验上指出一维光子晶体结构具有全方向的三维能隙结构。而对于一维液晶光子晶体的研究, A. D. Remenyuk<sup>[9]</sup>、V. Tolmachev<sup>[10]</sup>给出了一种硅槽结构, 该结构受到刻蚀工艺的限制, 并且液晶取向不好控制, 电极不好引入。Ryotaro Ozaki<sup>[11]</sup>给出了利用胆甾相液晶特有的螺旋特性作为固有周期性的光子晶体, 达到可调谐的目的。比较一维液晶光子晶体的设计方法, 多层膜的方法是比较容易实现, 而且调谐效果不受影响。关于这方面的研究未见实验报

**收稿日期**: 2008-09-03; **收到修改稿日期**: 2008-10-24

**基金项目**: 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目 (RC2006QN009025) 和哈尔滨工程大学基础研究基金项目 (HEUFT06034) 资助课题。

**作者简介**: 刘永军 (1977-), 男, 讲师, 主要从事液晶光学器件方面的研究。E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn

道,本文利用多层膜的方法在其内部引入液晶缺陷层,从理论和实验相结合的角度,研究一维液晶光子晶体红外透射谱特性,证明了这种结构有很好的调谐特性,可以用做光开关和密集型波分复用系统中的光滤波器。

## 2 计算模拟

一维液晶光子晶体结构设计如图 1,其结构为 AB...ABCBA...BA。由多层膜介质 A、B 周期性叠置和液晶缺陷层 C 组成,根据薄膜光学理论,光在每层介质中的传输特性可用一个  $2 \times 2$  的特征矩阵表示,对于第  $j$  层介质,其特征矩阵为

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{p_j} \sin \delta_j \\ -i p_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\delta_j = (2\pi/\lambda) n_j d_j \cos \theta_j$ ,  $n_j d_j$  是该介质层的光程,  $\theta_j$  是光线在该介质层中与界面法线方向的夹角,  $\lambda$  为入射光的波长,其中

$$p_j = \begin{cases} \sqrt{\epsilon_j/\mu_j} \cos \theta_j & (\text{TE}) \\ \sqrt{\mu_j/\epsilon_j} \cos \theta_j & (\text{TM}) \end{cases},$$

$\epsilon_j, \mu_j$  为第  $j$  层介质的介电常数与磁导率。

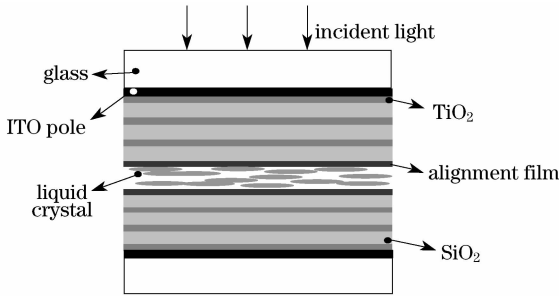


图 1 一维液晶光子晶体结构图

Fig. 1 Configuration of 1D PC with NLC

沿着光的传输方向将所有的特征矩阵相乘,即会得到液晶光子晶体的整体特征矩阵  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = (\mathbf{M}_A \mathbf{M}_B \cdots \mathbf{M}_{LC} \cdots \mathbf{M}_B \mathbf{M}_A), \quad (2)$$

其中  $\mathbf{M}_{LC}$  是 NLC 的特征矩阵<sup>[12]</sup>:

$$\mathbf{M}_{LC} = \exp(-i\varphi) \times \begin{bmatrix} \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \sin \gamma & \cos \gamma + i \left(\frac{\beta}{\gamma}\right) \sin \gamma \\ -\cos \gamma + i \left(\frac{\beta}{\gamma}\right) \sin \gamma & \left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{\pi d}{\lambda} (n_e(\vartheta) + n_o), \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} (n_e(\vartheta) - n_o), \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \quad (6)$$

$n_e(\vartheta)$  为电压的函数,  $\vartheta$  为液晶的倾斜角,  $\alpha$  为液晶层的扭曲角。

由(2)式可得,透射系数和反射系数分别为

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} p_N) p_1 - (m_{21} + m_{22} p_N)}{(m_{11} + m_{12} p_N) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_N)},$$

$$t = \frac{2 p_1}{(m_{11} + m_{12} p_N) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_N)}, \quad (7)$$

$p_1$  与  $p_N$  定义如前面  $p_j$ , 对应第一层介质与最后一层介质。

由(7)式可得到反射率  $R$  与透射率  $T$  分别为

$$R = |r|^2, T = \frac{p_N}{p_1} |t|^2. \quad (8)$$

计算模拟时,取介质层 A ( $\text{SiO}_2$ ) 的折射率  $n_1 = 1.46$ , 其厚度  $d_1 = 265$  nm, 介质层 B ( $\text{TiO}_2$ ) 的折射率  $n_2 = 2.35$ , 其厚度  $d_2 = 165$  nm, 两层介质的光学厚度相等  $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0/4$ ,  $\lambda_0$  为中心波长, 取  $\lambda_0 = 1550$  nm。液晶的折射率  $n_e = 1.714$ ,  $n_o = 1.516$ , 其厚度为  $d = 500$  nm。多层膜镀制在折射率为 1.52 的玻璃基板上, 共 16 层。

图 2 是 8 对无缺陷层的多层膜透射谱的模拟,

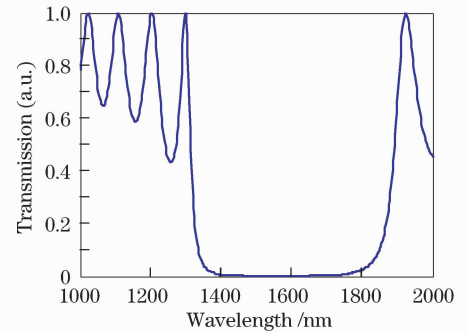


图 2 无缺陷层一维光子晶体透射谱模拟

Fig. 2 Calculated transmission spectra of 1D PC without defect layer

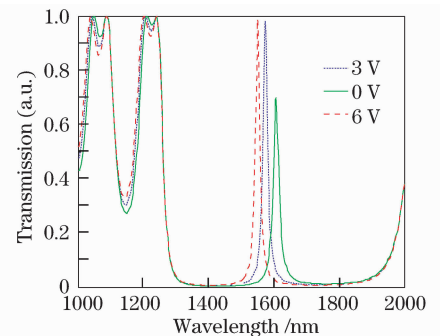


图 3 液晶缺陷层在不同电压下的一维光子晶体的透射谱模拟

Fig. 3 Calculated transmission spectra of 1D PC with NLC for different applied voltage

从图中可以看出其禁带宽度和截止深度都很好,其由膜层数和两种材料折射率的差值所决定,说明多层膜材料选择合适。图 3 是 16 对中间含有不同电压液晶缺陷层的多层膜的透射谱模拟,从图中可以看出其禁带宽度和截止深度变得更好,禁带宽度从 1346 nm 到 1832 nm 共 486 nm。并且,可以看出透射峰的位置随着液晶缺陷层电压的增加而向短波方向移动。

### 3 实验与讨论

实验制作液晶光子晶体的参数与前面模拟的参数一致。其制作过程为:在两片洁净玻璃基板一侧镀制 ITO 导电电极。然后,在 ITO 侧交替镀制 8 对 SiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 多层膜。在两基板的多层膜侧继续印刷取向膜,取向膜经定向摩擦处理,并使上下基板按摩擦方向反平行对叠。基板间具有控制液晶层厚度的隔垫物,用胶固定上下基板。注入纯向列相液晶,液晶呈反平行取向排列,形成了一维液晶光子晶体。

将制作好的液晶光子晶体在 UV3101PC 分光光度计上进行透射谱的测试,图 4 与图 5 是测试结果。其中图 4 没有液晶缺陷层,图 5 含有不同电压的液晶缺陷层,施加频率为 5 kHz 的方波电场,液

晶的电压分别为 0 V、5 V、7 V、10 V。从图 5 可以看出,最大电压范围在 0~10 V 内,透射峰的相对透过率在 18%~48% 内变化,禁带宽度为 290 nm,调谐范围 88 nm,透射峰半峰全宽 7 nm。并且,随着电压的增加透射峰向短波方向移动,这与模拟时的结果相一致。这是由于使用的是正性液晶,随着电压的增加光波通过的有效光程变小而造成的。透射峰半峰全宽有点偏大可以通过对液晶层均匀性控制加以改进,由于本实验是手工制作液晶盒,液晶层的均匀性控制稍差。

利用 LCT-5016C 液晶器件参数综合测试仪对液晶光子晶体进行了响应时间的测试。图 6 是测试装置示意图,白光光源发出的光经光阀、起偏器、液晶器件和检偏器后被光电探测器接收。利用计算机对光阀、液晶器件和光电探测器进行控制,起偏器与检偏器偏振方向相同且与液晶的取向方向呈 45°。

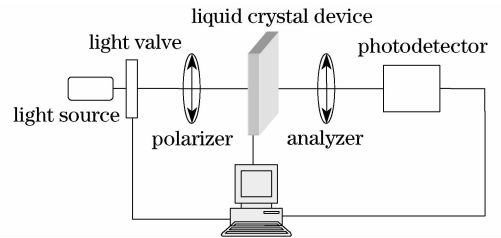


图 6 液晶响应时间的测试装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup for response time of LC

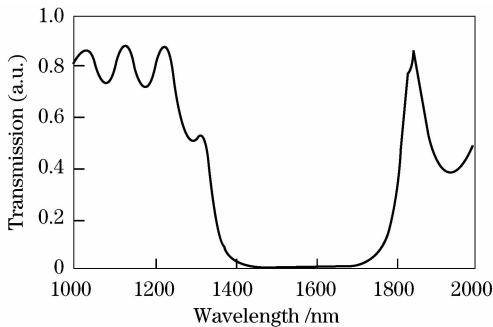


图 4 一维光子晶体的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of 1D PC without defect layer

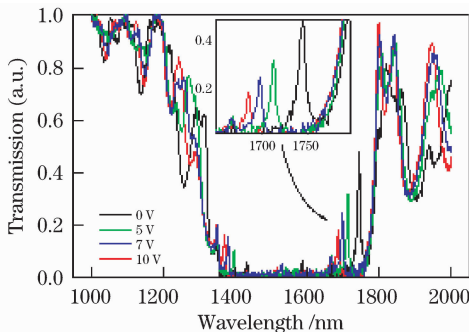


图 5 液晶缺陷层在不同电压下的透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of 1D PC with NLC under different applied voltage

晶的响应时间的测试结果,其上升时间 1.5 ms,下降时间 6.5 ms。可见,由于液晶层的厚度较薄其响应速度比较快。这对于速度要求不高的地方可以应用。

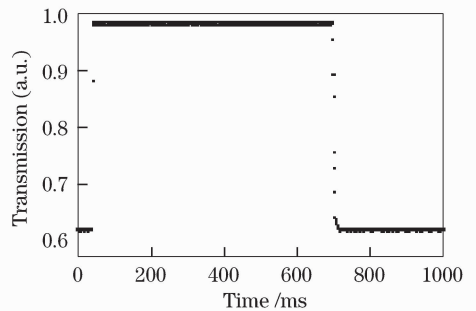


图 7 液晶光子晶体的响应时间

Fig. 7 Transmission as a function of response times for PC with NLC

### 4 结 论

从理论和实验相结合的角度,研究了一维液晶光子晶体红外透射谱特性,给出了不同液晶缺陷层

电压下的透射谱,实验和理论模拟结果比较接近。电压范围在 0~10 V 内,透射峰的相对透过率在 48%~18%,禁带宽度 290 nm,调谐范围 88 nm,透射峰半峰全宽 7 nm,证明了这种结构有很好的调谐特性。液晶光子晶体在光滤波器、光波导和光开关等领域有着很好的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Kurt Busch, Sajeev John. Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(5): 967~970
- 2 Ryotaro Ozaki, Yuko Matsuhisa, Masanori Ozaki *et al.*. Electrically tunable lasing based on defect mode in one-dimensional photonic crystal with conducting polymer and liquid crystal defect layer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(11): 1844~1846
- 3 Ch. Schuller, F. Klopff, J. P. Reithmaier *et al.*. Tunable photonic crystals fabricated in III-V semiconductor slab waveguides using infiltrated liquid crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(17): 2767~2769
- 4 Brett Maune, Marko Lončar, Jeremy Witzens *et al.*. Liquid-crystal electric tuning of a photonic crystal laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(3): 360~362
- 5 Wang Hao, Liao Changjun, Fan Guanghan *et al.*. The fabrication of narrow spectrum LED by employing asymmetry one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 408~411
- 王 浩, 廖长俊, 范广涵等. 应用不对称一维光子晶体结构制备窄光谱 LED[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 408~411
- 6 Tian Guoxun, Wu Yonggang, Wang Zhanshan *et al.*. Design and modification of double channel of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 661~664
- 田国勋, 吴永刚, 王占山等. 一维光子晶体的双通道位置设计及调整[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 661~664
- 7 Fang Yuntuan, Shen Tinggen, Tan Xilin. Study on one-dimensional photonic crystal with impurity defect s [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1557~1560 (in Chinese)
- 方云团, 沈廷根, 谭锡林. 一维光子晶体掺杂缺陷模研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1557~1560
- 8 Fink Y., Winn J. N., Fan S. *et al.*. A dielectric omnidirectional reflector[J]. *Science*, 1998, **282**(5394): 1679~1682
- 9 A. D. Remenyuk, E. V. Astrova, R. F. Vitman *et al.*. Alignment of liquid crystal E7 in composite photonic crystals based on single crystal silicon[C]. *SPIE*, 2005, **5825**: 400~407
- 10 Vladimir Tolmachev, Tatiana Perova, Ekaterina Astrova *et al.*. Optical characteristics of ordinary and tunable 1D Si photonic crystals in the mid-infrared range[C]. *SPIE*, 2005, **5825**: 85~94
- 11 Ryotaro Ozaki, Yuko Matsuhisa, Hiroyuki Yoshida *et al.*. Optical properties and electric field enhancement in cholesteric liquid crystal containing different periodicities [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(2): 023102
- 12 K. Lu, B. E. A. Saleh. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator[J]. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(3): 240~246