

含液晶层光子晶体的应用研究

李文胜, 张 琴, 黄海铭, 付艳华

(湖北汽车工业学院 理学系, 湖北 十堰 442002)

摘 要: 在由高纯硅和 5CB 液晶组成的光子晶体中, 掺杂一装有电极的 5CB 液晶层作为调制层, 由此构成了一针对特定波长(900 nm)的光子晶体开关。利用传输矩阵计算了其透射谱, 结果表明: 控制调制层上电压的有无就可以实现透射峰中心的移动, 从而达到该开关的通断, 当调制电压小于 5 V, 还可以准确控制透射峰的中心位置。周期数增加, 透射峰的中心位置保持不变, 但其半峰全宽度变窄。该开关的结构周期以 6~7 为宜, 且有一定的角度宽容性, 特别适合小角度入射的情况。这些现象为此类光子晶体实现高频开关提供了理论指导。

关键词: 光子晶体; 5CB 液晶; 传输矩阵; 开关

中图分类号: O434 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1542-05

Application of photonic crystal containing liquid-crystal

Li Wensheng, Zhang Qin, Huang Haiming, Fu Yanhua

(School of Science, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: Transmission spectrum was calculated using transfer matrix. The results show that by controlling voltage of the modulation layer, it's possible to achieve the movement of the center of the transmission peaks and the switching on and off. When the modulation voltage is less than 5 V, the center of transmission peak can be controlled accurately. When the number of cycles increases, the center of transmission peaks unchanged, but the full width at half maximum (FWHM) narrows, the switching cycle of 6 to 7 is appropriate. It has considerable angle tolerance, therefore it is suitable for the cases of small incident angle. It provides theoretical guidance for this type of photonic crystal to achieve high-frequency switching.

Key words: photonic crystal; 5CB liquid-crystal; transfer matrix; switching

收稿日期: 2012-10-18; 修订日期: 2012-11-13

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20122307)

作者简介: 李文胜(1955-), 男, 教授, 主要从事光子晶体方面的研究。Email: liwensheng200099@sina.com

0 引言

自光子晶体的概念提出 20 多年^[1]来,其独特性质引起了人们的广泛关注^[2-4]。迄今为止,光子晶体的研究已取得了突破性进展,理论和应用研究都取得了一系列成果,如光子晶体微腔和无阈值激光器^[5]、光子晶体波导^[6]和光纤^[7]、超棱镜^[8]和低损耗反射镜^[9]、光子晶体偏振器^[10]和滤波器^[11]等。文中提出了一种基于液晶光子晶体的新型高频开关。该开关为高纯硅和 5CB 液晶组成的一维光子晶体结构,当其中某一层液晶施加一高频调制电压时,该层液晶的折射率将发生改变,使该光子晶体的透射峰位置移动,从而实现对特定波长电磁波的通、断控制,开关通、断的频率和调制电压的频率一致。

1 结构模型和机理

高频开关结构如图 1 所示。图中 a 是高纯硅, b 和 c 都是 5CB 液晶,只是 c 层上、下两端分别装有两个电极。5CB 液晶在常温下为向列相,其光学性质与单轴晶体相同。已有实验表明^[12],25 °C 时 5CB 液晶的正常折射率为 1.59~1.83,反常折射率为 1.74~2.04。当两电极间无电压时, b、c 两层都呈现正常折射率,该结构就是一常见的光子晶体;当两电极间加有电压时, b 层仍呈现正常折射率,而 c 层呈现反常折射率。此时,因 c 层的折射率不同于 b 层,使光子晶体原透射峰的位置发生改变,即某一特定波长的电磁波通过该光子晶体的透射率发生了根本的改变,从而达到了对这一特定波长电磁波的通断控制。

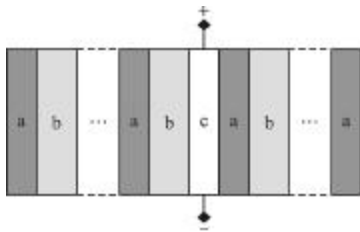


图 1 光子晶体开关结构图

Fig.1 Structure of photonic crystal switching

2 计算结果及分析

为使计算结果更具有实用性,高纯硅的色散特

性必须考虑。根据参考文献^[13],在 600~2 000 nm 的波长范围内,高纯硅的色散关系可表示为:

$$n_1 = 3.057\lambda^6 - 24.33\lambda^5 + 78.89\lambda^4 - 133.57\lambda^3 + 124.925\lambda^2 - 61.851\lambda + 16.4586 \quad (1)$$

设开关所对应的特定波长为 900 nm,依照传输矩阵的特点,仿真计算时, a、b、c 三层介质的几何厚度分别取 $d_1=62$ nm、 $d_2=134$ nm 和 $d_3=113$ nm。根据参考文献^[12],5CB 液晶的正常折射率取 $n_2=1.67$,反常折射率取 $n_3=2.00$,且忽略调制电压对相邻介质层的影响。设 a 介质即高纯硅有 6 层, b 介质即 5CB 液晶有 5 层, c 介质即带有电极的 5CB 液晶只有 1 层,其排列顺序如图 1 所示。

2.1 调制电压断、通状态下的透射谱

取上述参数,当 c 层 5CB 液晶上没有调制电压时,该层液晶和其他液晶层一样取正常折射率 1.67。在电磁波垂直入射的条件下,对 TE 波,其透射谱如图 2 中 a 所示。从图中可见,在 650~1 300 nm 波长范围内,仅在 860 nm 处有一个透射率为 1 的透射峰。此状态下,该开关对 900 nm 的电磁波是“断”状态。而当 c 层 5CB 液晶上加有峰值大于阈值的调制电压时,此层液晶取反常折射率 2.00,而其他液晶层仍取正常折射率。在此情况下,保持入射条件不变,原中心在 860 nm 处的透射峰红移到了 900 nm 处,如图 2 中 b 所示。从图中可见,透射峰移动前后,透射峰的透射率始终保持为 1,且其半峰全宽度也不变。由此可知,当 c 层液晶上施加有电压时,上述光子晶体对波长为 900 nm 的电磁波是导通的,否则,对此波长的电磁波是不导通的。因此,上述光子晶体就是一个对波长为 900 nm 的电磁波的开关。利用 c 层液晶折射率的变化而导致透射峰位置移动的特点就可以设计出针对特定波长的开关,若施加在 c 层液晶上的电压是高频的,则上述开关的通断也是高频的。

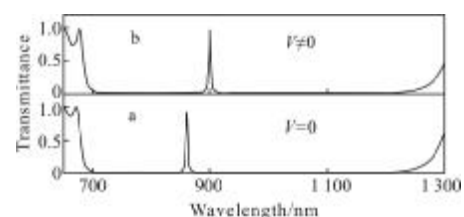


图 2 调制电压“通”或“断”状态下的透射谱

Fig.2 Transmission peak when modulation voltage is "on" or "off"

2.2 入射角对通带中心的影响

以上所讨论的是垂直入射的情况,这只是一种理想状态。多数情况下入射角 θ 不为零,因此,讨论入射角对透射峰中心位置的影响对了解上述光子晶体开关的角度效应具有实际意义。

设光子晶体的所有参数均保持不变,且 c 层液晶上加有相应的调制电压,当入射角 θ 从 0° 到 50° 变化时,其透射谱如图 3 所示。从图中可见,入射角 θ 增加时,透射峰峰值基本保持不变,但其中心发生蓝移。透射峰中心随入射角的变化情况如图 4 所示。从图中可见,透射峰中心位置随入射角的变化率 $d\lambda/d\theta$ 为负,且是变化的。在 θ 小于 10° 时,其蓝移量较小,随着入射角的增加,蓝移量迅速增加,入射角越大,移动量也越大。

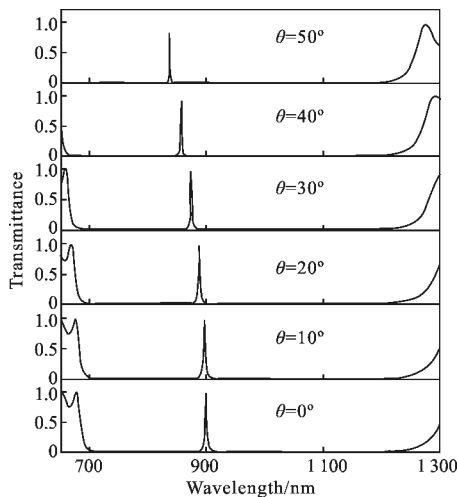


图 3 入射角不同时的透射谱

Fig.3 Transmission spectrum at different incidence

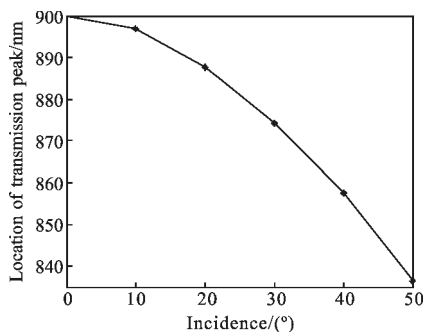


图 4 入射角不同时的透射峰中心

Fig.4 Center of transmission peaks at different incidence

透射峰中心随入射角的变化规律可以从理论上做一个简要的分析。依传输矩阵^[14]的特点,对 a 层介质应有:

$$2\pi n_a d_a \cos \theta_a / \lambda = \delta_a \tag{2}$$

且

$$\theta_a = \sin^{-1}(n_0 \sin \theta / n_a) \tag{3}$$

式中: θ 和 θ_a 分别为电磁波的入射角和在 a 介质中的折射角; n_0 和 n_a 分别为光子晶体外侧和 a 层介质的折射率; δ_a 为常数。由公式(2)、(3)可得:

$$\lambda \delta_a = 2\pi n_a d_a \cos(\sin^{-1}(n_0 \sin \theta / n_a)) \tag{4}$$

公式(4)两边微分,并把 $n_a = n_0 \sin \theta / \sin \theta_a$ 代入化简可得:

$$\frac{d\lambda}{d\theta} = - \frac{2\pi n_0 d_a}{\delta_a} \tan \theta_a \cos \theta \tag{5}$$

由公式(5)可知, $d\lambda/d\theta < 0$, 且当入射角 θ 为零时, $d\lambda/d\theta$ 也为零; θ 较小时, $d\lambda/d\theta$ 也较小; θ 增加, $d\lambda/d\theta$ 迅速增加。对其他介质层也可作类似讨论,得出相同的结论。这就是透射峰中心随入射角 θ 变化规律的简单解释。这一现象说明,上述光子晶体开关的角度宽容度还有待进一步改善,以适合大角度入射的情况。

2.3 结构周期数对透射峰宽度的影响

为了讨论结构周期数对透射峰宽度的影响,先取一 ababcaba 结构,为表述方便不妨称其为 4 “周期”结构。以其中 c 层介质(即装有电极的液晶层)为中心,依次先右后左增加一周结构 ab,则分别可得到 4 到 10 “周期”结构的光子晶体。

数值计算表明,在各层介质几何厚度保持不变,周期数不改变透射峰的中心位置,但影响透射峰的宽度。进一步的计算表明,透射峰的半峰全宽度和“周期”数的关系如表 1 所示。从表中可见,“周期”数较小时,透射峰的半峰全宽度较宽。“周期”数增加,透射峰的半峰全宽度变窄,且在“周期”数 $N \leq 6$ 时,宽度变化量较大;而 $N \geq 7$ 时,宽度变化量较小。

表 1 周期数 N 不同时透射峰的半峰全宽度

Tab.1 FWHM of transmission peaks at different cycle count

N	4	5	6	7	8	9
$\Delta\lambda/\text{nm}$	16.8	11.4	6.7	3.2	1.8	0.9

透射峰的半峰全宽度随结构周期的变化规律,可理解为各结构周期相互调制的结果,结构周期越大,调制越深。根据透射峰半峰全宽度与结构周期数 N 的

关系, 考虑到电磁波在各层介质传播时实际存在的损耗, 结合上述光子晶体开关的单色性要求, 此类光子晶体开关的结构周期以 6~7 为宜。

2.4 调制电压对透射峰的影响

当施加在调制层上的电压变化时, 液晶分子指向矢也将发生变化, 当电压达到阈值时, 在电控双折射效应的影响下, 液晶分子的指向矢与外加电场的方向完全平行, 此时液晶呈反常折射率。根据参考文献[15]可知, 5CB 液晶阈值电场强度为 $2.2 \times 10^2 \text{ V/m}$, 设调制厚度(垂直与电磁波的正入射方向)为 0.010 m, 则可计算对应的阈值电压为 2.20 V。为方便讨论, 设 5CB 液晶的反常折射率与调制电压间呈线性关系。当上述光子晶体取 abababcababa 结构、电磁波垂直入射、调制电压在 0~22 间变化时, 对应的透射谱如图 5 所示。

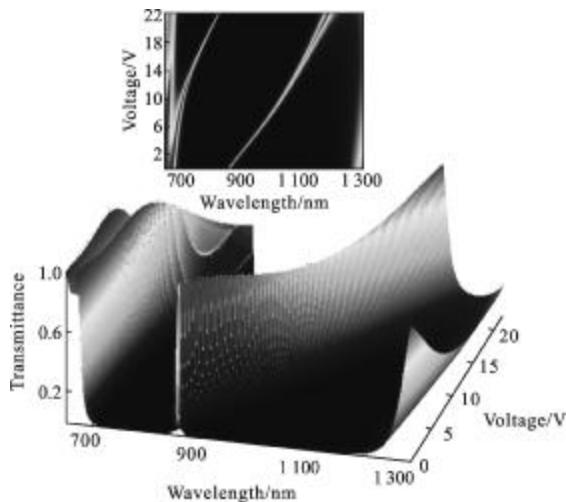


图 5 调制电压不同时的透射谱

Fig.5 Transmission spectrum at different modulation voltage

从图中可见, 当调制电压从 0 增加到 5 V 时, 透射峰的半峰全宽度和透射率基本不变, 但其中心发生红移。从图 5 中的附图进一步计算可得, 透射峰中心随调制电压的红移率是 13.08 nm/V。而当调制电压大于 5 V 时, 透射峰的透射率有所下降, 且电压增至 10 V, 透射率降至最小; 若调制电压再增加, 透射峰的透射率和半峰全宽度增加, 但透射峰的移动率也增大, 且不再是常数。由此可见, 基于此类光子晶体的开关, 若调制电压不超过 5 V, 则可以通过调整调制电压的大小, 准确地选择通断电磁波的中心波长。

3 结论

在由高纯硅和 5CB 液晶组成的光子晶体中掺杂一装有电极的 5CB 液晶层作为调制层, 由此构成了一针对特定波长的光子晶体开关。调制层上有相应的调制电压时, 此光子晶体在 900 nm 处有一尖锐的透射峰。数值计算表明, 该透射峰有以下特征: 入射角 θ 增加时, 透射峰峰值保持为 1, 但其中心发生蓝移, 且透射峰中心的蓝移量随入射角的变化率 $d\lambda/d\theta$ 也是变化的, 在入射角 $\theta \leq 10^\circ$ 时, 其蓝移量很小, 可以忽略。当光子晶体结构周期数增加时, 透射峰的中心位置保持不动, 但其半峰全宽度变窄, 在结构周期数 N 由 4 增加到 6 时, 透射峰半峰全宽度 $\Delta\lambda$ 变化较大; 当 $N \geq 7$ 后, $\Delta\lambda$ 变化较小。调制电压的大小不影响透射峰的透射率和半峰全宽度, 仅影响其中心位置。这些特征表明, 上述结构的光子晶体, 当结构周期为 6~7 时, 把它作为某一特征波长的光开关是可行的, 特别是透射峰中心位置随调制电压大小而移动的特性, 为该开关通断波长的动态调控提供了可能。以上结论对上述光子晶体开关的理论和实验研究具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission solid state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58 (20): 2059-2062.
- [2] Lindell I V, Tretyakov S A, Nikoskinen K I, et al. BW-media with negative parameters capable of supporting backward wave[J]. Microw and Opt Tech Lett, 2001, 31(2): 129-133.
- [3] Belov P A. Backward wave and negative refraction in uniaxial dielectrics with negative dielectric permittivity along the anisotropy axis [J]. Microw and Opt Tech Lett, 2003, 37(4): 259-263.
- [4] Enoch S, Simon J J, Escoubas L, et al. Simple layer-by-layer photonic crystal for the control of thermal emission[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86: 261101.
- [5] Chan D L, Soljacic M, Joannopoulos J D. Thermal emission and design in one-dimensional periodic metallic photonic crystal slabs[J]. Physical Review E, 2006, 74: 016609.
- [6] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, et al. Photonic Crystal-molding the Flow of Light [M]. 2nd ed. USA:

- Princeton University Press, 2007: 20-21.
- [7] Zhang Zhengren, Long Zhengwen, Yuan Yuqun, et al. The band structure of symmetrical structured 1-D photonic crystal with single-negative materials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(1): 587-591. (in Chinese)
张正仁, 隆正文, 袁玉群, 等. 对称型单负交替一维光子晶体的能带结构[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 587-591.
- [8] Wang Chong, Peng Tongjiang, Duan Tao. Preparation and band-gap properties of hetero structure photonic crystal I [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, 39(2): 474-480. (in Chinese)
王充, 彭同江, 段涛. 异质结构光子晶体的制备与带隙特性研究[J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(2): 474-480.
- [9] Li Wensheng, Zhang Qin, Huang Haiming, et al. Polarization properties of photonic crystal tunneling mode containing single -negative materials [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2033-2037. (in Chinese)
李文胜, 张琴, 黄海铭, 等. 含单负材料光子晶体隧穿模的偏振特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2033-2037.
- [10] Gao Yongfang, Shi Jiaming, Zhao Dapeng. Far infrared and laser band compatible camouflage material based on photonic crystals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 647-650. (in Chinese)
高永芳, 时家明, 赵大鹏. 基于光子晶体的红外与激光兼容伪装材料[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 647-650.
- [11] Li Wensheng, Luo Shijun, Huang Haiming, et al. Polarization properties of one-dimensional photonic crystal tunneling mode containing metamaterials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(10): 104101. (in Chinese)
李文胜, 罗时军, 黄海铭, 等. 含特异材料光子晶体隧穿模的偏振特性[J]. *物理学报*, 2012, 61(10): 104101.
- [12] Tsai T R, Chen C Y, Pan C L, et al. THz time-domain spectroscopy studies of the optical constants of the nematic liquid crystal 5BC [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(13): 2372-2376.
- [13] Li Wensheng, Huang Haiming, Fu Yanhua, et al. Properties of one-dimensional photonic crystal tunneling mode containing single-negative material with symmetrical structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 69-72. (in Chinese)
李文胜, 黄海铭, 付艳华, 等. 含单负材料对称型一维光子晶体隧穿模的特性[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(1): 69-72.
- [14] Lin Yonchang, Lu Weiqiang. *Principle of Optical Thin Films* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 40-44. (in Chinese)
林永昌, 卢维强. *光学薄膜原理* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 40-44.