

# 基于液晶缺陷的一维光子晶体可调谐偏振滤波器

肖培 肖峻

(西南民族大学电气信息工程学院, 四川 成都 610041)

**摘要** 提出了一种基于一维缺陷光子晶体的可调谐偏振滤波器,将液晶膜层作为缺陷引入对称结构的一维光子晶体中,利用液晶电控双折射效应的动态可调节性,实现可调谐的偏振光窄带滤波。用传输矩阵法对这一新型滤波器的 TM 偏振光传输特性进行了数值计算,结果验证了此滤波器的可调节性。这种可调谐偏振滤波器具有结构简单易于制作、体积小易于集成、调谐方便、损耗很低、透射峰半峰全宽窄等突出优点,有望在光通信波分复用技术和光学精密测量技术中获得应用。

**关键词** 光学器件; 可调谐偏振滤波器; 传输矩阵法; 一维光子晶体; 向列型液晶

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.072301

## Tunable Polarization Filter Based on One-Dimensional Photonic Crystal with Liquid Crystal Defect

Xiao Pei Xiao Jun

(College of Electrical and Information Engineering, Southwest University for Nationalities, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract** A tunable polarization filter is proposed based on one-dimensional photonic crystal with nematic liquid crystal defect. Tunable polarization filtering can be realized dynamically by the electrically controlled birefringence of nematic liquid crystal. The transmission spectra of TM mode are numerically calculated using the transfer matrix method. The results show that the filter has good tunability and advantages of simple structure, small volume, easy adjustment, low wastage and narrow pass band. The results imply that this filter has potential applications for wavelength division multiplexing and precision optical measurement.

**Key words** optical devices; tunable polarization filter; transfer matrix method; one-dimensional photonic crystal; nematic liquid crystal

**OCIS codes** 230.7408; 230.5298; 230.2090; 230.3720; 230.5440

### 1 引言

在 1987 年, Yablonoitch<sup>[1]</sup> 和 John<sup>[2]</sup> 通过类比电子在周期性势场中传播时形成的能带结构, 指出光在周期性结构介质中传播时也有带隙形成, 从而提出了光子晶体的概念。光子晶体本质上是一种具有周期性结构的人工材料, 晶格常数与工作光波长为同一量级。其最主要的特点是具有光子带隙(PBG), 频率落在该带隙之中的光将不能通过光子晶体传播。一块光子晶体就可作为一个理想的带阻滤波器。采用由多块不同周期的光子晶体组合而成的多层结构<sup>[3]</sup> 或通过在光子晶体中引入某种形式的缺陷<sup>[4]</sup> 可构造出窄带滤波器。动态改变缺陷的光学厚度, 可引起缺陷模迁移, 实现可调谐窄带滤波<sup>[5-9]</sup>。可调谐滤波器的使用能避免相似产品的重复购置, 不仅可以节约成本, 还可以提高系统的灵活性。可调谐滤波器在光通信和光信息处理方面有着广泛的应用。

一维光子晶体结构简单、制作方便、理论计算成熟, 在滤波器设计和应用方面有突出优势。本文提出了一种新型的可调谐的偏振滤波器结构, 将液晶作为缺陷膜层引入一维光子晶体, 利用液晶的电控双折射效应(ECB) 实现调谐滤波, 用传输矩阵法(TMM)数值计算此结构的传输特性, 验证了其可调谐滤波特性。

**收稿日期**: 2013-01-20; **收到修改稿日期**: 2013-03-27; **网络出版日期**: 2013-06-21

**作者简介**: 肖培(1957—), 男, 讲师, 主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: xiaop705@189.cn

## 2 结构模型与理论基础

可调谐偏振滤波器结构如图 1 所示,类似法布里-珀罗(F-P)干涉仪的结构: $(AB)^N C(BA)^N$ ,其中,介质层 A 的折射率为  $n_1$ 、厚度为  $d_1$ ;介质层 B 的折射率  $n_2$ 、厚度为  $d_2$ 。介质层周期  $d = d_1 + d_2$ ,两层介质的光学厚度相等,使  $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0 / 4$ , $\lambda_0$  为可调谐滤波器的中心波长。 $N$  为液晶层两侧介质层的周期数。缺陷膜层 C 为向列型液晶,向列型液晶分子的排列可以受外界条件(如温度、电场、磁场等)的控制,并具有较强的介电各向异性。在外电场作用下向列型液晶呈各向异性,类似于单轴晶体,两主折射率分别为  $n_o$  和  $n_e$ 、膜层厚度为  $d_3$ ,折射率平均值为  $n_{av} = (n_o + n_e) / 2$ ,使  $n_{av} d_3 = \lambda_0 / 2$ 。周围为空气介质(折射率为  $n_0$ )。光波从左向右垂直入射通过滤波器。在液晶膜层上、下端加上电极,当外加电场超过阈值时,缺陷膜层液晶的分子指向矢会随电极上的电压变化而变化<sup>[10]</sup>,其非常光折射率发生改变,缺陷膜频率随之发生迁移,使其成为可调谐滤波器。

根据薄膜光学理论<sup>[11]</sup>,光在每层介质中的传播特性可用  $2 \times 2$  的传输矩阵表示。对于第  $j$  层介质,其传输矩阵为

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

式中

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j, \quad (2)$$

$$\eta_j = \begin{cases} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n_j \cos \theta_j & \text{for TE mode} \\ \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{n_j}{\cos \theta_j} & \text{for TM mode} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $\theta_j$  为光波在第  $j$  层前表面的折射角或后表面的入射角, $\lambda$  为光波波长。

当光波正入射时, $\theta_j = 0$ ,在各向同性介质(介质层 A 和介质层 B)中,TE 模与 TM 模简并。然而,在各向异性介质(液晶层 C)中,即使  $\theta_j = 0$ ,由于通常  $n_{TE} \neq n_{TM}$ ,故 TE 模与 TM 模非简并。

当液晶分子指向矢  $\mathbf{S}$  在图 1 所示的  $x-z$  平面、与  $z$  轴夹角为  $\phi$  时,

$$\begin{cases} n_{TE} = n_o \\ n_{TM} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \phi + n_e^2 \cos^2 \phi}} \end{cases}. \quad (4)$$

由上式可知,当液晶分子的指向角  $\phi$  随电极上的电压发生变化,将引起 TM 模的折射率变化,实现对 TM 偏振模调谐滤波,而对 TE 偏振模无调谐作用。因此,当入射光为非偏振光时,应先通过透振方向平行于  $x$  轴的偏振片,获得 TM 偏振光波,才能进行可调谐滤波。

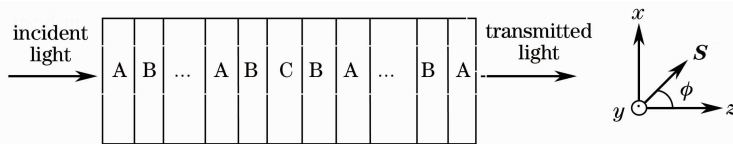


图 1 可调谐偏振滤波器结构示意图

Fig. 1 Structure of tunable polarization filter

整个膜系的传输矩阵为

$$\mathbf{M} = \prod_{j=1}^{2N+1} \mathbf{M}_j. \quad (5)$$

记  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$ , 则整个膜系的透射率为

$$T = \left| \frac{2\eta_0}{(m_{11} + m_{12}\eta_0)\eta_0 + (m_{21} + m_{22}\eta_0)} \right|^2. \quad (6)$$

根据滤波器的结构参数和光波波长,由以上各式可分析各波长光波通过滤波器的传输特性,从而得到滤波器的透射谱。

### 3 数值模拟与结果分析

对于图 1 所示的滤波器结构,取  $\lambda_0 = 1550$  nm(在目前光通信波段范围内), $n_1 = 1.38$ (氟化镁), $d_1 = 280.80$  nm, $n_2 = 2.38$ (硫化锌), $d_2 = 162.82$  nm。缺陷膜层 C 选用研究成熟的向列型液晶 5CB,两主折射率分别为  $n_o = 1.522$  和  $n_e = 1.706$ , $n_{av} = (n_o + n_e)/2 = 1.614$ , $d_3 = 480.17$  nm。

当外加电场使  $n_{TM} = n_{av}$  时,对于不同的介质层周期数  $N$ (分别取为 4、6 和 8),由(6)式可计算出滤波器的透射谱曲线,如图 2 所示。由图可知,对于不同的周期数  $N$ ,禁带宽度几乎不变,但带阻区边沿的陡峭度随  $N$  增大而变陡,接近  $90^\circ$ ;其缺陷模的中心波长和中心波长处的透射率峰值几乎不变,但滤波通道半峰全宽(FWHM)随  $N$  增大而变窄,通带的透射率的振荡会随  $N$  增大而加剧。可以看到当  $N=4$  时已有足够好的窄带滤波特性。

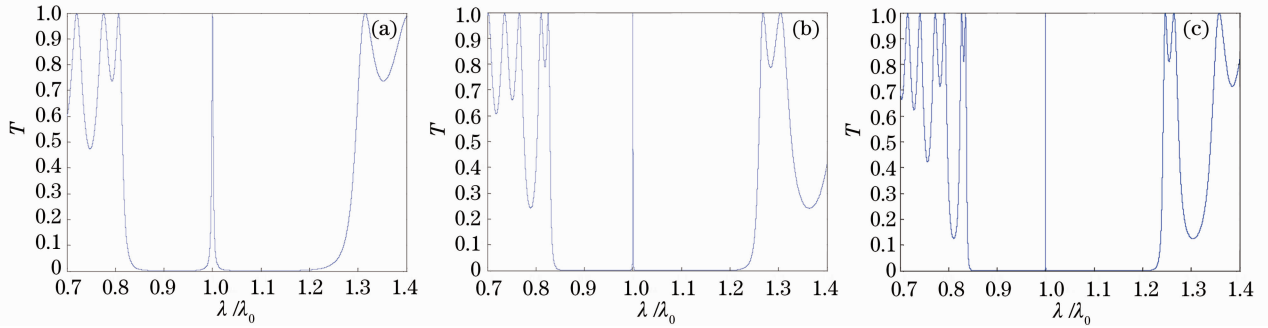


图 2 外加电场使  $n_{TM} = n_{av}$  时,不同介质层周期数情况下的透射谱曲线。

(a)  $N=4$ , FWHM 5.239 nm; (b)  $N=6$ , FWHM 0.589 nm; (c)  $N=8$ , FWHM 0.0651 nm

Fig. 2 Transmission spectra with different periodicity numbers under electrical control for  $n_{TM} = n_{av}$ .

(a)  $N=4$ , FWHM 5.239 nm; (b)  $N=6$ , FWHM 0.589 nm; (c)  $N=8$ , FWHM 0.0651 nm

当外加电场超过阈值电场后,随电压变化液晶分子指向矢角可由 0 到  $\pi/2$  变化,非常光的折射率由  $n_o = 1.522$  变化到  $n_e = 1.706$ ,随着缺陷层的光学厚度偏离  $\lambda_0/2$ ,其缺陷模中心波长会发生迁移,由(6)式计算出液晶分子指向矢角  $\phi$  分别为 0、 $\pi/4$  和  $\pi/2$  时 TM 波的透射谱曲线如图 3 所示。由图 3 可知,当非常光的折射率低于平均折射率时,其缺陷模中心波长小于  $\lambda_0$ ,反之,当非常光的折射率高于平均折射率时,其缺陷模中心波长大于  $\lambda_0$ 。无论液晶分子指向矢角为何值,TE 波的缺陷模中心波长都是固定的(对应  $\phi=0$  时的 TM 波缺陷模中心波长 1522.1 nm)。当复色非偏振光直接入射时,可透过此确定波长的 TE 波和波长可调谐的 TM 波。

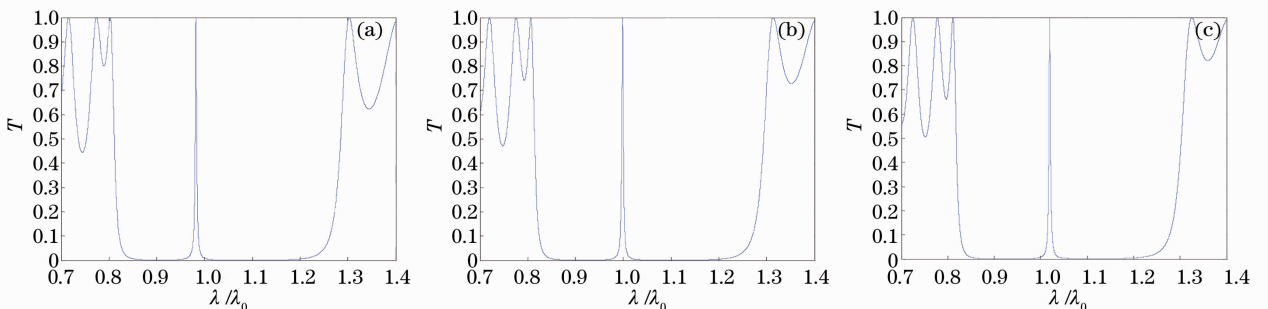


图 3 不同液晶指向矢角的透射谱曲线( $N=4$ )。

(a)  $\phi=0$ ,  $\lambda_0 = 1522.1$  nm; (b)  $\phi=\pi/4$ ,  $\lambda_0 = 1547.52$  nm; (c)  $\phi=\pi/2$ ,  $\lambda_0 = 1580.07$  nm

Fig. 3 Transmission spectra with different director angle of liquid crystal when  $N=4$ . (a)  $\phi=0$ ,  $\lambda_0 = 1522.1$  nm;

(b)  $\phi=\pi/4$ ,  $\lambda_0 = 1547.52$  nm; (c)  $\phi=\pi/2$ ,  $\lambda_0 = 1580.07$  nm

图4给出了液晶分子指向矢从0到 $\pi/2$ 变化对应的缺陷模的中心波长及其透射率的变化曲线,其中变化缓慢的是透射峰中心波长变化曲线,总体近似呈线性变化,变化范围都为1522.1~1579.5 nm,这由液晶的两主折射率差决定;另一条呈振荡变化的是透射率变化曲线,随着 $N$ 的增大,透射率振荡加剧,调谐范围内透射率均匀性变差。当 $N$ 为4和5时,透射率振荡范围不大,分别为0.9197~1和0.5604~1,整个透射峰中心波长调谐范围1522.1~1579.5 nm都是在3 dB带宽范围内,可以连续调谐。当 $N=6$ 时,透射率振荡范围为0.1254~1,在透射峰中心波长调谐范围1522.1~1579.5 nm内部分波长的透射率低于0.5,只能进行不连续的调谐。因此,在透射率与透射峰 FWHM 之间平衡考虑, $N=4$ 的结构有适当的透射峰 FWHM,而且在整个调谐变化范围内损耗都很低,能满足应用需要。

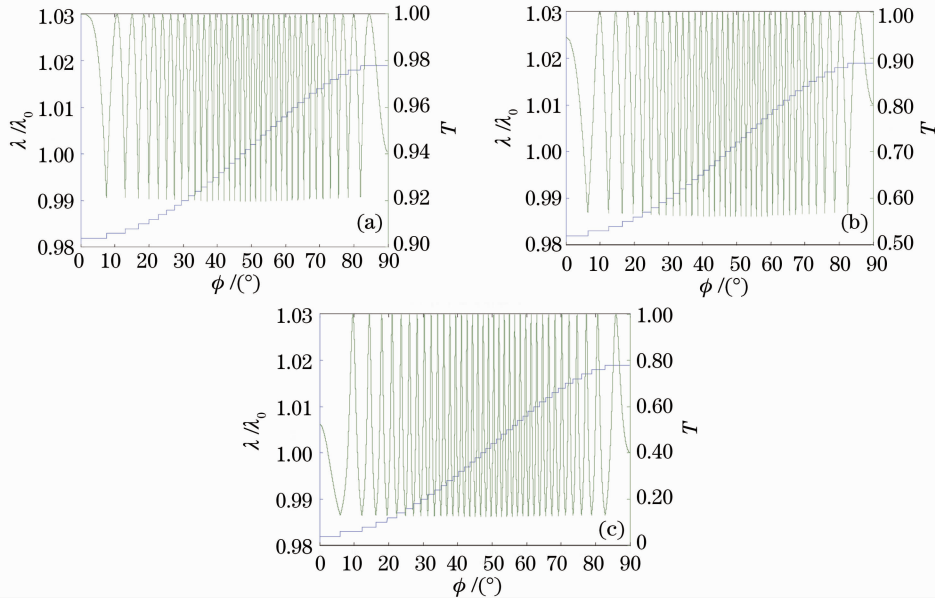


图4 缺陷模的中心波长及其透射率随液晶指向矢角的变化。(a)  $N=4$ ,  $T=0.9197\sim 1$ ;  
(b)  $N=5$ ,  $T=0.5604\sim 1$ ; (c)  $N=6$ ,  $T=0.1254\sim 1$

Fig. 4 Changes of central wavelength and the transmission peak value of the defect mode with director angle of liquid crystal. (a)  $N=4$ ,  $T=0.9197\sim 1$ ; (b)  $N=5$ ,  $T=0.5604\sim 1$ ; (c)  $N=6$ ,  $T=0.1254\sim 1$

## 4 结 论

从原理上验证了在不改变一维掺杂光子晶体的结构和各膜层几何参数的情况下,通过改变外加电场的大小控制液晶层的非常光折射率可实现调谐滤波。采用向列型5CB液晶,在两侧介质层周期数为4的简单结构下,TM偏振光波在中心波长1550 nm附近可获得57.4 nm调谐范围,其透射率峰值高于0.9197、透射率峰值 FWHM 为5.239 nm。这种可调谐偏振滤波器具有结构简单易于制作、体积小易于集成、调谐方便、损耗很低、透射峰半峰全宽窄等突出优点,滤波性能远优于普通的光滤波片,在波分复用光通信系统和精密光学测量中更有应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electrons[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 Sajeed John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Ouyang Zhengbao, Liu Haishan, Li Jingzhen. Photonic crystal super narrow optical filters[J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(3): 281-283.  
欧阳征标, 刘海山, 李景镇. 光子晶体超窄带滤波器[J]. 光子学报, 2002, 31(3): 281-283.
- 4 Zhang Yuping, Zhang Huiyun, Zheng Yi, et al.. Super narrow and multi-channel narrow photonic crystal optical filters[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2004, 10(4): 173-175.

- 张玉萍, 张会云, 郑义, 等. 超窄带和多通道窄带光子晶体滤波器[J]. 量子光学学报, 2004, 10(4): 173-175.
- 5 H Nemeč, L Duvillaret, F Garet, *et al.*. Thermally tunable filter for terahertz range based on a one dimensional photonic crystal with a defect[J]. J Appl Phys, 2004, 96(8): 4072-4075.
- 6 R Ozaki, T Matsui, M Ozaki, *et al.*. Electrically color-tunable defect mode lasing in one-dimensional photonic-band-gap system containing liquid crystal[J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(21): 3593-3595.
- 7 G Pucker, A Mezzetti, P Bellutti, *et al.*. Silicon based near-infrared tunable filters filled with positive or negative dielectric anisotropic liquid crystals[J]. J Appl Phys, 2004, 95(2): 767-769.
- 8 Yun Maojin, Li Guohua, Wu Fuquan, *et al.*. Characteristics of Lyot tunable liquid crystal filters[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(5): 627-631.
- 云茂金, 李国华, 吴福全, 等. 利奥型可调谐液晶电光滤波器的特性分析[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 627-631.
- 9 Liu Qineng. Theoretic study of a novel kind of tunable filter based on 1-D photonic crystal[J]. J Optoelectronics Laser, 2007, 18(5): 574-577.
- 刘启能. 一种新型可调谐光子晶体滤波器的理论研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18(5): 574-577.
- 10 Wang Ning, Yun Maojin, Li Guohua. Voltage-dependent birefringence measurements of liquid crystals[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(12): 1064-1066.
- 王宁, 李国华, 云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(12): 1064-1066.
- 11 Wu Jian, Yan Gaoshi. Principles of Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 42-46.
- 吴健, 严高师. 光学原理教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 42-46.