

# 基于光子晶体马赫 - 曾德尔干涉仪的太赫兹开关及强度调制器\*

王昌辉<sup>1)</sup> 赵国华<sup>2)</sup> 常胜江<sup>1)†</sup>

1) (南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

2) (73146 部队 90 分队技术室, 泉州 362321)

(2011 年 10 月 8 日收到; 2011 年 12 月 25 日收到修改稿)

通过对二维正方晶格光子晶体线缺陷模色散曲线慢光特性的研究, 利用外电场对液晶分子取向的调控作用, 在填充液晶的正方晶格波导的马赫 - 曾德尔干涉仪结构中实现了开关和强度调制等功能. 利用平面波展开法计算了光子晶体波导的线缺陷模, 分析了液晶折射率的变化对缺陷模的影响. 计算表明, 液晶折射率仅改变了 0.1, 线缺陷模有效折射率改变达 0.168, 该特性可以更为有效地实现对相位的控制, 进而实现高消光比开关和强度调制功能, 这种高效的相位调节器件在集成光系统中将有很好的应用前景.

**关键词:** 太赫兹, 光子晶体, 液晶, 马赫 - 曾德尔干涉仪

**PACS:** 78.67.Pt, 84.30.Qi

## 1 引言

太赫兹波是指频率从 0.1 到 10 THz, 介于毫米波和红外光之间的电磁辐射区域. 由于其特殊的光谱位置以及具有安全性好、分辨本领高、透视性高等优点, 使得太赫兹技术在物体成像、医疗诊断、环境监测、宽带移动通讯、雷达和天文学等领域的应用受到人们广泛的重视<sup>[1-4]</sup>. 在应用太赫兹技术解决实际问题时, 太赫兹波导、开关以及相位控制器等功能性器件是实现整个系统功能所必不可少的器件, 特别是多功能器件, 由于可以减少应用系统的器件数量, 进而减少插入损耗, 多功能太赫兹器件的研究已经成为目前的研究热点.

光子晶体是介质或金属材料呈周期排列的人工材料<sup>[5,6]</sup>. 其结构的设计、制作, 带隙及传输特性的研究一直受到广泛关注<sup>[7,8]</sup>. 光的位相特性是光的典型特性之一, 许多光物理现象如超光速现象和慢光效应等, 都与位相特性有关. 光子晶体在相

位器件设计方面也有很好的应用<sup>[9,10]</sup>. 二维光子晶体线缺陷波导带隙中会产生平坦导模, 群速度较小, 即实现了慢光<sup>[11]</sup>, 可以应用光子晶体的线缺陷模的慢光特性设计高效的位相器件<sup>[12]</sup>.

本文利用平面波展开法, 分析了二维正方晶格介质柱光子晶体线缺陷模的慢光特性. 基于此慢光特性和液晶的可控性, 设计了一种基于光子晶体马赫 - 曾德尔干涉仪的多功能可调谐太赫兹器件. 通过调节该干涉仪某一光臂液晶的折射率, 改变这一区域线缺陷波导的群速度, 使干涉仪两光臂的有效光程差发生改变. 时域有限差分法的分析结果表明, 得益于光子晶体线缺陷模的慢光特性, 该干涉仪比其他单纯依靠改变折射率的相位器件更高效, 可以实现消光比高达 26 dB 的开关功能和深度达 99% 的强度调制功能.

## 2 正方晶格线缺陷模慢光区域

首先确定二维正方晶格光子晶体的结构参数.

\* 国家高技术研究发展计划 (863)(批准号: 2011AA010205), 国家自然科学基金 (批准号: 61171027), 天津市自然科学基金重点项目 (批准号: 10JCZDJC15200) 和教育部博士点基金 (批准号: 20090031110033) 资助的课题.

† E-mail: sjchang@nankai.edu.cn

由于高阻硅在太赫兹波段内的低损耗特性, 二维光子晶体的介质柱由高阻硅构成, 它在 1 THz 处的折射率为 3.42<sup>[13]</sup>, 在硅柱间填充向列相液晶 5CB, 它在 1 THz 波段的折射率是  $n_o = 1.53$ ,  $n_e = 1.75$ <sup>[14]</sup>. 这种高折射率介质柱和低折射率背景的光子晶体容易产生 TE 模式的带隙. 本文定义 TE 模为电场偏振方向平行于硅柱的模式, TM 模为电场偏振方向垂直于硅柱的模式. 如图 1, 二维光子晶体的晶格周期为  $a$ , 介质柱直径为  $d$ , 占空比定义为  $d/a$ . 首先采用平面波展开法计算完整周期光子晶体中 TE 模的带隙及缺陷模. 如图 2 所示, 液晶折射率为 1.53 时, 占空比取 0.5 时, 该正方晶格光子晶体具有最大的带隙. 此时带隙为归一化频率范围 0.24709—0.28852. 液晶折射率为 1.75 时, 计算结果相似. 所以, 本文讨论的光子晶体选取占空比为 0.5.

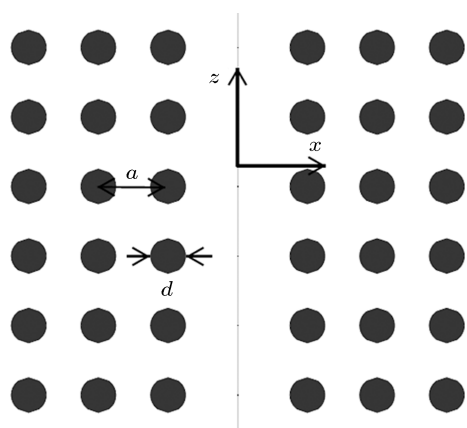


图 1 二维正方晶格光子晶体线缺陷几何结构

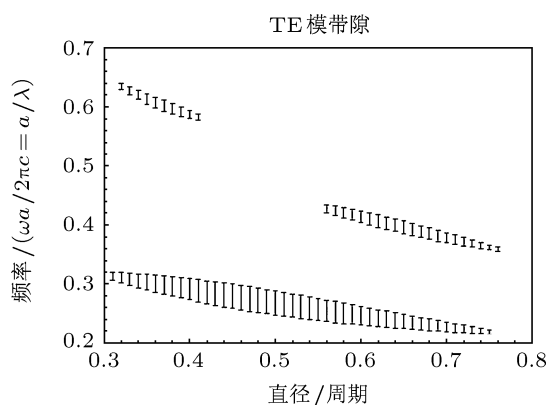


图 2 液晶 5CB 折射率是 1.53 时, 带隙随占空比的变化关系

当液晶的折射率从 1.53 至 1.75 这个范围变化

时, 光子晶体相应的带隙如图 3 所示, 共有带隙在归一化频率范围 0.247092—0.26226.

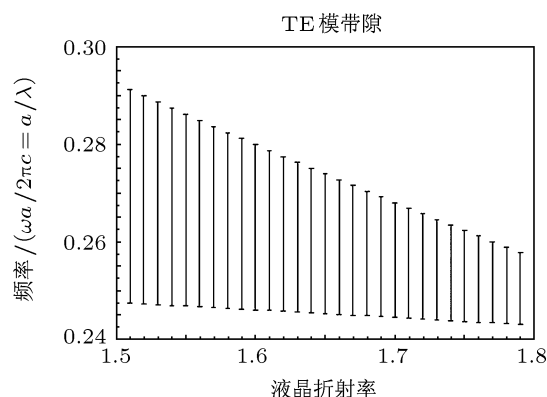


图 3 占空比为 0.5 时, 带隙随液晶折射率的变化关系

用平面波展开法计算包含缺陷的光子晶体的缺陷模时, 需合理选取包含缺陷的超晶格, 本文计算二维正方晶格光子晶体线缺陷模时选取的超晶格如图 4(a) 所示. 液晶 5CB 的折射率变化时, 计算得到不同的线缺陷模式, 结果见图 5, 图中阴影区域为液晶折射率在 1.53—1.75 之间时无缺陷二维光子晶体的共同带隙. 液晶 5CB 折射率由寻常光折射率 1.53 至非寻常光折射率 1.75 之间依次递增选了 4 个点, 对应于 4 条缺陷模曲线. 由图可知, 随着液晶折射率增大, 缺陷模向低频方向平移.

图 5 中,  $k_{norm}$  为归一化传播常数,  $k_{norm} = k_z \cdot a / 2\pi$ ,  $k_z$  为传播常数, 液晶折射率改变使线缺陷模曲线发生平移时, 曲线的左侧区域斜率较小, 曲线的微小平移会带来较大的传播常数变化, 即有效折射率的变化, 这段平坦区域即为线缺陷模的慢光区域.

根据图 5, 在阴影所示带隙范围内, 取线缺陷模最左侧低频端的归一化频率 0.247, 计算在液晶 5CB 折射率每变化 0.02 时, 光子晶体线缺陷模的有效折射率变化, 计算结果如表格 1 所示, 最大的有效折射率差达到 0.036, 是液晶折射率变化的 1.8 倍. 这种二维光子晶体线缺陷波导的线缺陷模有效折射率变化明显大于光子晶体介质本身折射率变化的特点, 有利于减小相位器件的几何尺寸, 提高相位器件的调谐效率. 本文利用光子晶体线缺陷的这种特性, 设计了一种马赫 - 曾德尔干涉仪结构的光子晶体波导, 实现了太赫兹开关和输出强度调制.

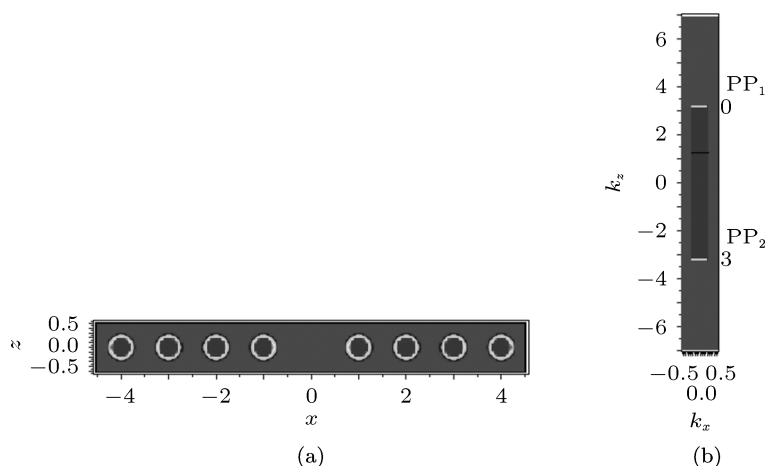


图4 (a) 超晶格; (b) 相应的布里渊区

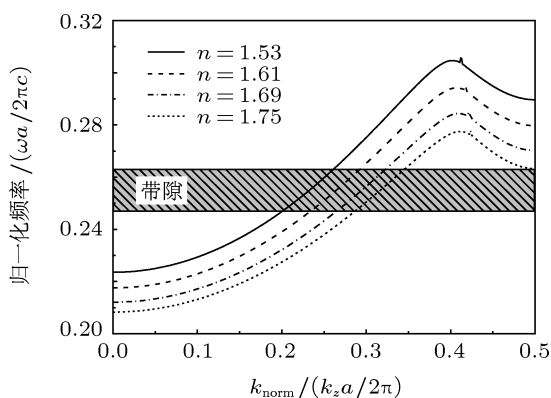


图5 二维正方晶格光子晶体线缺陷模随液晶折射率变化

表1 有效折射率与5CB折射率之间的变化关系

5CB 折射率	工作波段的归一化传播常数	归一化传播常数与前一组数之差	有效折射率与前一组常数之差
1.53	0.2		
1.55	0.208	0.008	0.033
1.57	0.217	0.009	0.036
1.59	0.225	0.008	0.033
1.61	0.233	0.008	0.033
1.63	0.241	0.008	0.032
1.65	0.249	0.008	0.032
1.67	0.256	0.007	0.029
1.69	0.264	0.008	0.032
1.71	0.271	0.007	0.029
1.73	0.279	0.008	0.032
1.75	0.286	0.007	0.029

### 3 填充液晶的介质柱型正方晶格马赫曾德尔干涉仪

光子晶体波导马赫-曾德尔干涉仪的结构如图6所示, 线缺陷沿着  $z$  方向, 硅介质柱方向为  $y$  方向, port<sub>1</sub> 为太赫兹波入射端, port<sub>2</sub> 为太赫兹波出射端. 归一化频率 0.247 对应于 1 THz, 此时二维光子晶体周期应为 74.1  $\mu\text{m}$ , 高阻硅介质柱直径  $d = 0.5a$ . 在线缺陷中传播的太赫兹波的电场分量垂直于液晶分子取向时, 太赫兹波是寻常光; 相反, 电场分量平行于液晶分子取向时, 太赫兹波是非寻常光<sup>[15]</sup>. 当施加均方根强度 (RMS) 大于 0.699 V, 频率为 1 kHz 的正弦电压时<sup>[15]</sup>, 液晶 5CB 分子取向随着外加电场而发生转动, 在没有外加电场时, 液晶分子由于泊锚作用, 平行于硅柱排列. 在整块光子晶体区域内  $z$  方向施加固定电场  $E_z$ , 使液晶 5CB 分子的取向沿着  $z$  方向, 由于 TE 模电场分量沿着  $z$  方向, 此时太赫兹波为寻常光; 在图 6 中 arm<sub>2</sub> 方块区域内施加  $y$  方向电场  $E_y$ ,  $E_y$  大小可调, 所以光子晶体这块区域合成电场方向可以调节, 从而调节 arm<sub>2</sub> 处的液晶折射率. 设 arm<sub>1</sub> 为参考光臂, 液晶折射率为寻常光折射率  $n_o = 1.53$ , arm<sub>2</sub> 为信号光臂, 液晶折射率可以在 1.53 至 1.75 间任意调节. 如图 6 左下方的坐标所示, 调节电场后液晶分子的排列方向为  $\theta$ , 此时液晶的折射率  $n_z(\theta)$  为<sup>[16]</sup>

$$\frac{1}{n_z^2(\theta)} = \frac{\sin^2(\theta)}{n_e^2} + \frac{\cos^2(\theta)}{n_o^2}, \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{E_y}{E_z}.$$

表2 液晶 5CB 分子取向角度和液晶折射率关系表

液晶 5CB 折射率	$\theta/(\circ)$	液晶 5CB 折射率	$\theta/(\circ)$
1.53	0	1.65	50.47
1.55	19.26	1.67	55.66
1.57	27.52	1.69	61.04
1.59	34.10	1.71	66.93
1.61	39.89	1.73	74.06
1.63	45.27	1.75	90

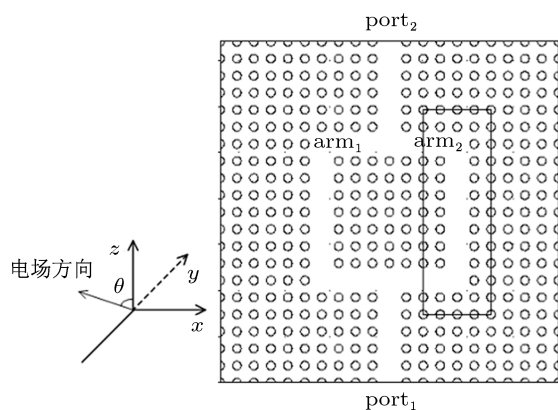


图6 正方晶格线缺陷波导马赫-曾德尔干涉仪

上节计算了 12 个不同液晶折射率时相对应的线缺陷模有效折射率, 参考光臂  $\text{arm}_1$  处液晶折射率为  $n_o$  时线缺陷的有效折射率记为  $n_{\text{eff}1}$ , 信号光臂  $\text{arm}_2$  处液晶折射率为  $n_z(\theta)$  时线缺陷的有效折射率记为  $n_{\text{eff}2}$ . 该干涉仪两臂的相位差即为

$$\phi_d = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (n_{\text{eff}2} - n_{\text{eff}1}) \cdot 12a. \quad (2)$$

用时域有限差分法 (FDTD) 分析在外加电场为  $E_y = 0, E_y = 0.5E_z, E_y = 1.01E_z$  时, 频率为 1 THz 的高斯光波在马赫-曾德尔干涉仪中的传播特性, 外边界条件设为完美匹配层 (PML)<sup>[17]</sup>, 即对入射的电磁波完全吸收.  $E_y = 0$  时, 干涉仪两光臂的光程差为 0, 太赫兹波在输出端相干相加, 干涉仪此时处在开状态, 如图 7(a) 所示.  $E_y = 1.01E_z$ , 即  $\theta = 45.27^\circ$  时, 由 (1) 式可求得此时  $n_z(\theta) = 1.63$ , 干涉仪两光臂液晶折射率差 0.1, 根据表格 1 可知此时,  $n_{\text{eff}2} - n_{\text{eff}1} = 0.168$ , 代入 (2) 式, 得  $\phi_d = \pi$ , 太赫兹波经干涉仪两光臂在输出端相干相消, 此时干涉仪处在关状态, 输出端没有太赫兹波传出, 如图 7(c) 所示.  $E_y = 0.5E_z$  时, 根据 (1) 式,  $\theta = 26.57^\circ$ , 液晶折

射率  $n_z(\theta) = 1.58$ , FDTD 法模拟计算得输出光强是输入光强的 41.62%, 如图 7(b) 所示.

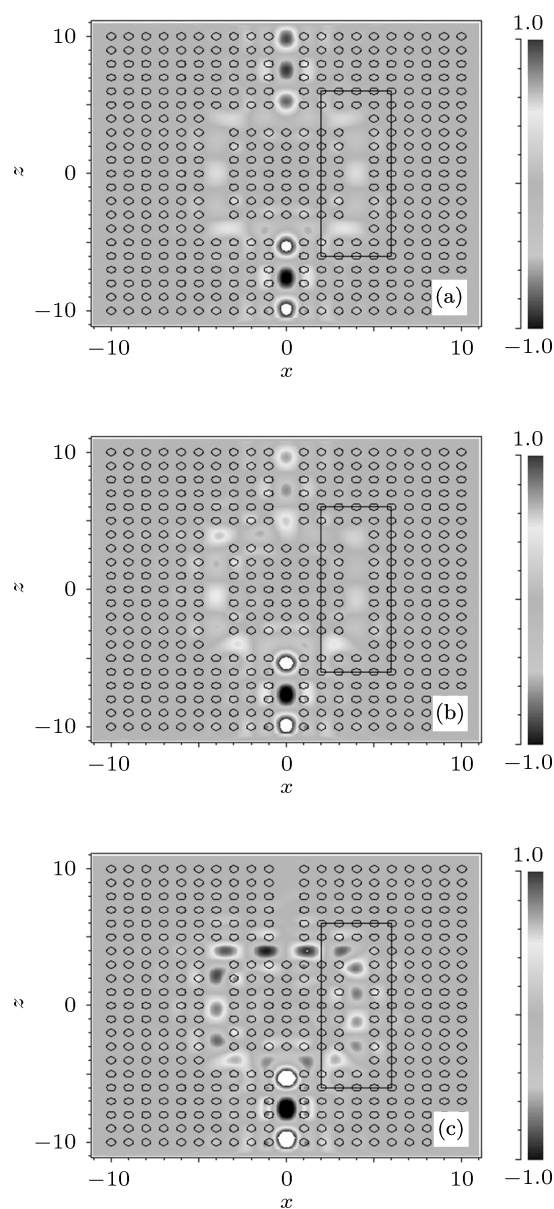


图7 太赫兹 TE 模在液晶填充马赫-曾德尔干涉仪中的电场分布 (a)  $E_y = 0$ ; (b)  $E_y = 0.5E_z$ ; (c)  $E_y = 1.01E_z$

通常情况, 向列型液晶分子转动的响应时间在毫秒级别, 不过, 有文献记载纳米尺度范围内的液晶的响应时间能达到  $100 \mu\text{s}$ <sup>[18]</sup>. 按照表格 2 中的 12 种不同液晶折射率下的液晶分子取向角度, 用时域有限差分法计算了干涉仪的太赫兹强度输出和液晶分子取向角度的关系, 结果如图 8 所示, 在液晶折射率的变化区间 1.53 至 1.75 内完成了一个从开到关再到开的周期, 输出端在开和关的情况下输出光强占输入端光强的百分比分别是 99.69% 和 0.2%,

根据消光比公式  $-10 \log(P_{\text{off}}/P_{\text{on}})$ , 算得消光比为 26.98 dB, 光强最大调制深度达到 99.6%.

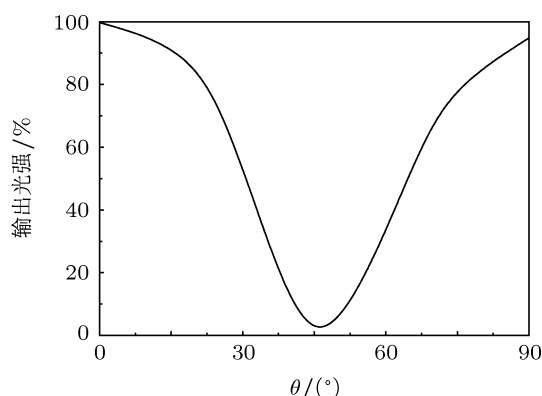


图 8 不同液晶分子取向角度下的太赫兹强度输出曲线

综上所述分析, 本文所设计的液晶填充正方晶格马赫 - 曾德尔干涉仪可以通过调节液晶折射率作为光开关或强度调制功能器件. 得益于二维光子晶

体线缺陷慢光特性, 光子晶体两光臂长度在 12 个光子晶体周期内, 即  $889.2 \mu\text{m}$  尺度内, 液晶折射率仅变化 0.1, 就达到了达到相位差  $\pi$  所需的折射率差 0.168, 大大提高了该干涉仪的开关和强度调制效率.

## 4 结论

本文采用平面波展开法对填充液晶的高阻硅介质柱二维正方晶格结构光子晶体的线缺陷进行计算分析, 数值模拟结果表明, 当液晶折射率变化时, 该正方晶格线缺陷模发生平移. 在线缺陷模的平坦区域, 平移造成线缺陷波导的有效折射率变化明显大于液晶本身折射率的变化. 对填充液晶的正方晶格波导的马赫 - 曾德尔干涉仪的数值模拟结果表明, 基于填充液晶的二维光子晶体波导的相位器件比单纯改变折射率的相位器件 (如液晶盒相位器件<sup>[19]</sup>) 效率要高很多.

- [1] Yao J Q, Lu Y, Zhang B G, Wang P 2005 *J. Optoelectronics. Laser* **16** 503 (in Chinese) [姚建铨, 路洋, 张百钢, 王鹏 2005 光电子·激光 **16** 503]
- [2] Nagel M, Haring Bolivar P, Brucherseifer M, Kurz H, Bosserhoff A, Bosserhoff A, Buttner R 2002 *Appl. Phys. Lett.* **80** 154
- [3] Yue W W, Wang W N, Zhao G Z, Zhang C L, Yan H T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3094 (in Chinese) [岳伟伟, 王卫宁, 赵国忠, 张存林, 闫海涛 2005 物理学报 **54** 3094]
- [4] Ma S H, Shi Y L, Xu X L, Yan W, Yang Y P, Wang L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4091 (in Chinese) [马士华, 施宇蕾, 徐新龙, 严伟, 杨玉平, 汪力 2006 物理学报 **55** 4091]
- [5] Yablonovitch E 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2059
- [6] John S 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 2486
- [7] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese) [陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [8] Fan F, Guo Z, Bai J J, Wang X H, Chang S J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084219 (in Chinese) [范飞, 郭展, 白晋军, 王湘晖, 常胜江 2011 物理学报 **60** 084219]
- [9] Dai Q F, Li Y W, Wang H Z 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061121
- [10] Wu K S, Long X T, Dong J W, Chen D H, Wang H Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6381 (in Chinese) [伍楷舜, 龙兴腾, 董建文, 陈弟虎, 汪河洲 2008 物理学报 **57** 6381]
- [11] Zhang M, Pan W, Xi L S, Luo B, Zhen D, Xu X G, Wang L, Liu C, Liu H T 2009 *Chinese J. Lasers* **36** (in Chinese) [张曼, 潘炜, 习连山, 罗斌, 郑狄, 徐小果, 王亮, 刘聪, 刘海涛 2009 中国激光 **36**]
- [12] Vlasov Y A, O'boyle M, Hamann H F, Mcnab S J 2005 *Nature* **438** 65
- [13] Afsar M N 1984 *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on* **32** 1598
- [14] Li J S, He J L, Hong Z 2007 *Appl. Opt.* **46** 5034
- [15] Liu C Y, Chen L W 2004 *Opt. Express* **12** 2616
- [16] Zhang H, Guo P, Chen P, Chang S J, Yuan J H 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 101
- [17] Berenger J P 1994 *J. Comput. Phys.* **114** 185
- [18] Shimoda Y, Ozaki M, Yoshino K 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3627
- [19] Chen C Y, Hsieh C F, Lin Y F, Pan R P, Pan C L 2004 *Opt. Express* **12** 2625

# Photonic-crystal-waveguide based Mach-Zehnder interferometer for terahertz switch and modulator\*

Wang Chang-Hui<sup>1)</sup> Zhao Guo-Hua<sup>2)</sup> Chang Sheng-Jiang<sup>1)†</sup>

1) (*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

2) (*Element 90, No. 73146 Troop, PLA, Quanzhou 362321, China*)

(Received 8 October 2011; revised manuscript received 25 December 2011)

## Abstract

We propose a novel tunable photonic crystal (PC) waveguide Mach-Zehnder interferometer (MZI) based on nematic liquid crystals (LCs) 5CB and investigate its interference properties numerically by using the finite-difference time-domain method. We can change the refractive index of LC by rotating the directors of the LC molecules. The line defect modes of the PC waveguide with different liquid crystal refractive indices are analyzed by using the plane wave expansion method. Owing to the slow group velocity region of the line defect mode, when the index of 5CB changes from 1.53 to 1.63, the variation of the effective index of the line defect mode arrives at 0.168. This property helps to significantly control the phase of light propagation in a PC waveguide MZI. The novel interferometer can be used as either an optically controlled on-off switch or an amplitude modulator in optical circuits.

**Keywords:** terahertz, photonic crystals, liquid crystals, Mach-Zehnder interferometer

**PACS:** 78.67.Pt, 84.30.Qi

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA010205), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61171027), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 10JCZDJC15200), and the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (Grant No. 20090031110033).

† E-mail: sjchang@nankai.edu.cn