

文章编号: 0253-2239(2010)09-2710-04

# 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器

苏 坚 陈鹤鸣

(南京邮电大学光通信研究所, 江苏 南京 210003)

**摘要** 太赫兹波调制器是太赫兹波通信系统中关键的一环,同时,可调谐光子晶体作为一种新兴材料,被广泛地用于制作光通信系统中的调制器、光开关和滤波器等功能器件。光子晶体技术和太赫兹波技术相结合为设计太赫兹波调制器提供了新的思路。提出了一种基于二维硅光子晶体的新型太赫兹波调制器。该光子晶体采用点、线缺陷组合的结构,通过在点缺陷处填充5CB液晶,使其成为可调谐光子晶体。当在点缺陷处外加电场时,此太赫兹光子晶体的缺陷态频率发生动态迁移。基于这种机制,此器件可对太赫兹波的通、断状态进行调制。仿真结果表明,调制器的调制深度大于30 dB,调制速率为10 kHz,具有体积小、易于集成的优点。

**关键词** 光电子学; 太赫兹波; 调制器; 光子晶体; 5CB液晶

中图分类号 TN761 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2710

## Terahertz Wave Modulator Based On Liquid-Crystal-Filled Photonic Crystal

Su Jian Chen Heming

(*Institute of Optical Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China*)

**Abstract** Terahertz (THz) wave modulator is a key element in future terahertz communication systems. Meanwhile, as a new kind of material, the tunable photonic crystal is widely used to fabricate modulators, switches, filters, and other functional devices in optical communication systems. The combination of THz technology and photonic crystal technology provides a new approach to design the novel THz wave modulator. A novel THz modulator based on the two-dimensional silicon photonic crystals is presented. The structure of photonic crystals is consisted of the combination of line defects and point defects, and is designed to be the tunable photonic crystals by filling the point defect with 5CB liquid crystal. By applying the external electrical field on the point defect, the frequency of the defect mode of the THz photonic crystals dynamically shifts. Based on this mechanism, the device can modulate the on-off state of the THz wave propagating. The numerical simulating results show that the THz modulator has a modulation depth of more than 30dB, modulation rate of 10 kHz, and a small size, ease to integrate.

**Key words** optoelectronics; terahertz wave (THz wave); modulator; photonic crystal; 5CB liquid crystal

## 1 引 言

太赫兹(THz)波(频率位于0.1~10 THz波段的电磁波)处于毫米波和红外线之间的特殊位置,是电磁波谱中的最后一个空频段。与目前的无线通信相比,太赫兹波段占据了更丰富、宽阔的频谱资源,使其在未来的宽带无线通信领域有着巨大的潜力和

广阔的应用前景。近年来全世界范围内掀起了一个研究太赫兹通信系统及器件<sup>[1~3]</sup>的热潮,而太赫兹调制器就是整个系统中关键的一个环节。

目前利用可调谐光子晶体来实现对太赫兹波的通、断调制成为该领域的一个研究热点。由于光子晶体存在光子禁带和光子局域态的特性,对传输的

收稿日期: 2009-10-16; 收到修改稿日期: 2010-01-14

基金项目: 南京邮电大学科研基金(NY207053)资助课题。

作者简介: 苏 坚(1985—),男,硕士研究生,主要从事光通信与光波技术等方面的研究。E-mail: sujian112@126.com

导师简介: 陈鹤鸣(1958—),男,教授,硕士生导师,主要从事光通信与光波技术等方面的研究。E-mail: chhm@njupt.edu.cn(通信联系人)

光波有很强的操控能力,尤其是可调谐光子晶体材料<sup>[4,5]</sup>,能够在外场激励下(电、光、磁场以及温度等),通过改变晶格参数或折射率来调节自身光子带隙结构,控制光束的传播,因而可被广泛用于制作光开关、光谐振腔、光调制器和光滤波器等光电集成器件。将可调光子晶体应用于太赫兹波段,控制其光子带隙发生动态迁移,可以设计出基于光子晶体的太赫兹波调制器。李九生等<sup>[6~8]</sup>,M. Koch 等<sup>[9]</sup>利用这一原理,设计出了电控、温控和磁控的带隙迁移型太赫兹光子晶体调制器。然而,这些带隙迁移型太赫兹调制器的带隙边缘都达不到很陡峭,因此调制深度或者插入损耗等性能指标都不甚理想。

本文提出和设计了一种新型结构的基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器。该调制器为缺陷模迁移型,采用点、线混合缺陷的光子晶体结构,在点缺陷处填充 5CB 液晶,当对 5CB 液晶施加外加电场时,液晶折射率发生改变,使光子晶体的缺陷态频率发生动态迁移,从而实现太赫兹波的通、断调制。

## 2 结构模型和调制机理

### 2.1 调制器结构

设计的调制器采用二维三角晶格、空气孔型硅光子晶体。晶格常数  $a=30\ \mu\text{m}$ ,空气孔为圆形,空气孔半径  $r=0.45a$ 。基底介质为高纯硅,其在太赫兹波段的折射率为 3.4,损耗忽略不计<sup>[10]</sup>。首先在完整结构的光子晶体中心空气孔处填充 5CB 液晶材料,构成点缺陷,并在其上、下两端加上电极。然后在中心点缺陷的上、下两侧分别引入两条线缺陷,并使点、线缺陷位于同一直线上。此调制器的结构如图 1 所示。

### 2.2 调制机理

这种点、线缺陷组合结构的独特之处在于:线缺陷的引入,实质是为太赫兹波的传输提供了波导,使频率范围落在光子禁带内的太赫兹波能通过线缺陷;点缺陷的引入,实质上起一个太赫兹波谐振腔的作用,它可以对太赫兹波选频,使符合谐振频率(即缺陷模)的太赫兹波在点缺陷处谐振。因此当未外加电场信号时,符合缺陷模频率的太赫兹波入射到第一条线缺陷构成的波导并耦合入点缺陷,在点缺陷处谐振、不断积累能量,最终耦合至第二条线缺陷,输出调制器。而当外加电场超过阈值时,点缺陷处 5CB 液晶的折射率发生改变,缺陷模就会发生迁移,此时符合原缺陷模频率的太赫兹波就无法在点缺陷处谐振,从而无法通过调制器。

## 3 仿真结果分析

利用二维时域有限差分法(2D-FDTD)来仿真计算所设计的太赫兹波调制器的性能。调制器所采用的光子晶体由  $21\times 21$  个元胞组成,晶格常数  $a=30\ \mu\text{m}$ ,器件的尺寸为  $0.63\ \text{mm}\times 0.63\ \text{mm}$ ,调制器四周设有完美匹配层(PML),取 2D-FDTD 的横向、纵向空间步长各为  $2\ \mu\text{m}$ ,时间步长  $t$  满足稳定性条件,取  $c\times t=1\ \mu\text{m}$ , $c$  为真空中的光速。太赫兹波源设置为连续波,频率为 4.24 THz,在调制器的出口处设置了监视器。

### 3.1 缺陷模迁移仿真与分析

对这种缺陷模迁移型太赫兹波调制器的调制过程进行仿真分析。5CB 液晶在  $24\ ^\circ\text{C}\sim 35.3\ ^\circ\text{C}$  时为向列相,光学性质与单轴晶体类似,太赫兹波段的损耗很小可以忽略<sup>[11]</sup>。由实验<sup>[12]</sup>测得  $25\ ^\circ\text{C}$  时,其太赫兹波段( $0.3\sim 1.4\ \text{THz}$ )的正常折射率为  $1.59\sim 1.83$ ,反常折射率为  $1.74\sim 2.04$ 。仿真计算中取其正常折射率为 1.67,反常折射率为 1.77。现考虑一束 TE 模(即电场方向  $E_y$  与 2D 平面垂直)太赫兹波从调制器的线缺陷入射的情况:当施加在点缺陷上、下电极处的调制电压为零时,5CB 液晶分子指向矢在二维平面内,此时对 TE 模来说,点缺陷处的液晶分子呈现正常折射率  $n=1.67$ 。根据 FDTD 算法计算并利用 RSOFTE 软件仿真,可以得到此时点缺陷处的谐振频率为 4.24 THz(对应波长  $70.735\ \mu\text{m}$ ),品质因子  $Q$  达到 1088,频谱图如图 2 所示。

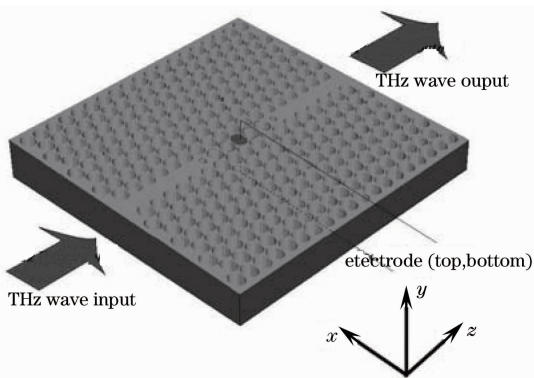
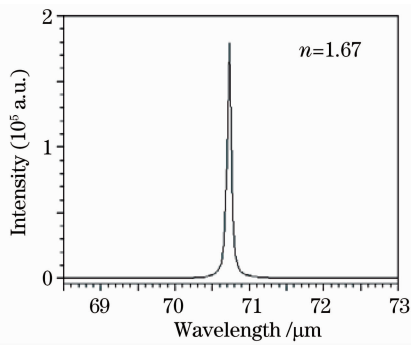
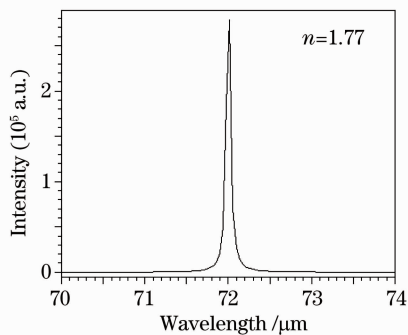


图 1 太赫兹波调制器模型

Fig. 1 Model of THz wave modulator

图 2  $n=1.67$  时点缺陷处的谐振频率Fig. 2 Resonant frequency at the point defect when  $n=1.67$ 

当施加在点缺陷上、下电极处的电压不断增加,液晶分子指向矢发生变化,当电压超过阈值时(阈值电场强度为  $2.2 \times 10^4 \text{ V/m}^{[7]}$ ,整个调制器厚度设计为  $30 \mu\text{m}$ ,从而计算得出阈值电压约为  $0.66 \text{ V}$ ),在电控双折射效应(ECB)的影响下,液晶分子的指向矢与外加电场方向完全平行(即垂直于 2D 平面),此时液晶分子呈现反常折射率,折射率为 1.77。数值仿真得到此时点缺陷处的谐振频率为  $4.17 \text{ THz}$ (对应波长  $72.018 \mu\text{m}$ ),品质因子  $Q$  达到 911,频谱图如图 3 所示。

图 3  $n=1.77$  时点缺陷处的谐振频率Fig. 3 Resonant frequency at the point defect when  $n=1.77$ 

对比图 2,3 可见,随着点缺陷处 5CB 液晶分子的折射率由 1.67 变为 1.77,缺陷态频率发生了动态迁移,从  $4.24 \text{ THz}$  红移到  $4.17 \text{ THz}$ 。因此取入射调制器的太赫兹波频率为  $4.24 \text{ THz}$  时,只要控制外加电压的有、无,就可实现对太赫兹波的通、断调制。调制器通、断状态时的频谱透射率如图 4 所示。

### 3.2 稳态模场能量仿真与分析

然后对此调制器的稳态模场能量仿真结果进行分析,图 5 为调制电压为零时,太赫兹调制器处于“通”状态时的时域稳态响应图。

可见符合缺陷模频率  $4.24 \text{ THz}$  的太赫兹波通

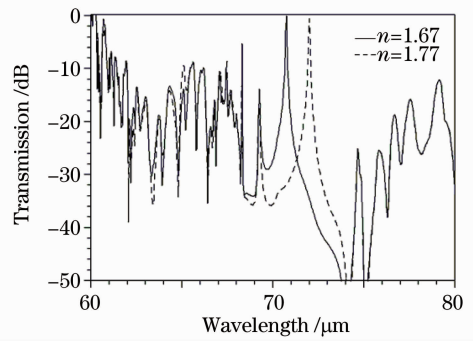
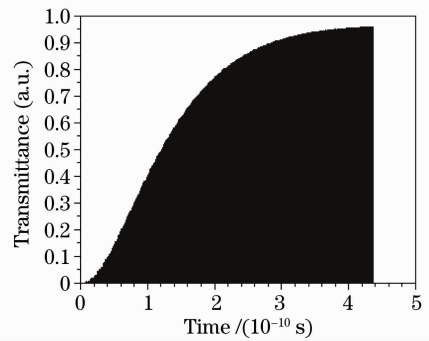
图 4 “通”状态( $n=1.67$ )与“断”状态( $n=1.77$ )下频谱透射率图Fig. 4 Transmission spectra of “on” ( $n=1.67$ ) and “off” ( $n=1.77$ ) states

图 5 “通”状态下的时域稳态响应图

Fig. 5 Time-domain steady response of “on” state 过调制器时损耗很小,95.63%的能量通过了调制器,插入损耗仅为  $0.2 \text{ dB}$ 。图 6 为调制电压高于阈值时,太赫兹调制器处于“断”状态时的时域稳态响应图。当调制电压高于阈值时,5CB 液晶折射率发生改变,点缺陷处缺陷模频率迁移至  $4.17 \text{ THz}$ ,因此频率为  $4.24 \text{ THz}$  的太赫兹波无法在点缺陷处谐振,通过调制器的能量仅为  $0.06\%$ 。

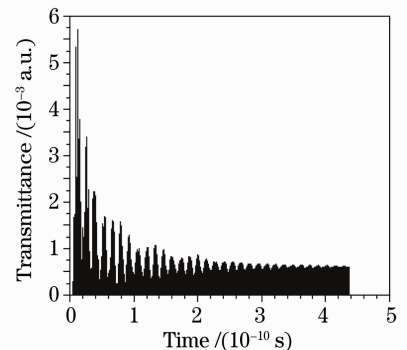


图 6 “断”状态下的时域稳态响应图

Fig. 6 Time-domain steady response of “off” state

由此计算出调制器的调制深度为  $32 \text{ dB}$ ,且稳态模场的建立时间很短,仅为  $0.4 \text{ ns}$  左右。图 7,8 分别显示了太赫兹调制器在调制电压为零时(点缺

陷处折射率为 1.67),以及高于阈值时(点缺陷处折射率为 1.77),对应的稳态太赫兹波场强  $E_y$  分布图。

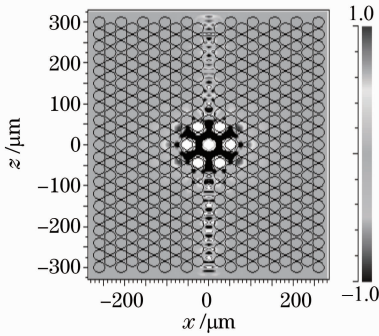


图 7 “通”状态时的稳态模场分布

Fig. 7 Steady field distribution of “on” state

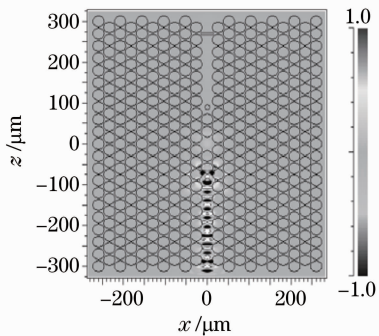


图 8 “断”状态时的稳态模场分布

Fig. 8 Steady field distribution of “off” state

由仿真结果可知这种新型结构的太赫兹波调制器可以有效实现对太赫兹波的电调制,具有调制深度大,尺寸小,易于集成的优点。

## 4 结 论

提出了一种基于电控的可调谐液晶光子晶体的太赫兹波调制器。通过对 5CB 液晶施加电场,改变其折射率,从而使缺陷模迁移,达到通、断调制的目的。此调制器调制深度可达 32 dB,调制电压只有 1 V 左右,调制速率达到 10 kHz,且器件尺寸小 (0.63 mm×0.63 mm)。这种太赫兹波调制器在未

来太赫兹通信系统中具有重要的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 T. Kosugi, T. Shibata, T. Enoki *et al.*. A 120 GHz millimeter-wave MMIC chipset for future broadband wireless application[J]. *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, 2003, **2**(1): 129
- 2 Hu Jie, Chen Heming. Loss characteristics of photonic crystal fiber as terahertz waveguide[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 567~572  
胡 婕, 陈鹤鸣. 光子晶体太赫兹波导的损耗特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 567~572
- 3 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical met hods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1349~1359  
孙 博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1349~1359
- 4 Liu Jing, Zheng Zhiqiang, Feng Zhuohong *et al.*. Tunable optical filter based on two-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2034~2037  
刘 璟, 郑志强, 冯卓宏 等. 二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- 5 Qian Xiangzhong. Effect of temperature on transmission properties in photonic crystal fibers infiltrated with liquid crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 988~991  
钱祥忠. 温度对液晶填充光子晶体光纤传输特性的影响[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 988~991
- 6 Jiusheng Li. Terahertz modulator using photonic crystals[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(1): 98~101
- 7 Jiusheng Li. Terahertz wave switch based on silicon photonic crystals[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5034~5037
- 8 Jiusheng Li, Haibo Qiu, Zheng Yin *et al.*. Novel terahertz wave switch[J]. *Terahertz Photonics*, 2007, (6840): 684019
- 9 Z. Ghattan, T. Hasek, M. Koch *et al.*. Sub-terahertz on-off switch based on a two-dimensional photonic crystal infiltrated by liquid crystals[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(18): 4623~4625
- 10 Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. *Terahertz Science Technology and Applications* [M]. Beijing: Peking University Press, 2007. 32~36  
许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社, 2007. 32~36
- 11 Rafal Wilk, Nico Vieweg, Olaf Kopschinski *et al.*. THz spectroscopy of liquid crystals from the CB family [J]. *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2009, **30**(11): 1139~1147
- 12 T. R. Tsai, C. Y. Chen, C. L. Pan *et al.*. THz time-domain spectroscopy studies of the optical constants of the nematic liquid crystal 5CB[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(13): 2372~2376