

基于自准直效应和法布里-珀罗腔的太赫兹波调制器

蒋强 梁斌明 胡艾青 陈家璧 庄松林

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200092)

摘要 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。提出并设计了一种基于自准直效应和法布里-珀罗(F-P)腔的太赫兹波调制器,该调制器通过在特殊结构设计的硅基空气孔型光子晶体中填充5CB液晶制成。应用时域有限差分法(FDTD),研究了太赫兹波在该调制器中的传输特性,包括时域响应、频域响应和稳态能量场分布等。该调制器调制速率约为10 kHz,插入损耗约为0.308 dB,调谐范围为0.308~34.32 dB,体积小易于集成,可根据工作波长需要设计调制器的尺寸。该调制器最大优点在于其工作波长范围宽,是很理想的太赫兹波调制器件。

关键词 光学器件;调制器;时域有限差分法;太赫兹;自准直;光子晶体

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.062301

Terahertz-Wave Modulator Based on Self-Collimation Effect and Fabry-Pérot Cavity

Jiang Qiang Liang Binming Hu Aiqing Chen Jiabi Zhuang Songlin

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200092, China)

Abstract The combination of photonic crystal technology and terahertz technology has provided a new idea to design the terahertz-wave modulator. A terahertz-wave modulator based on self-collimation effect and Fabry-Pérot (F-P) cavity is presented. It is made by filling 5CB liquid crystal into the air holes of the photonic crystal which is designed with special structures. The transmission characteristics of the THz wave, including time-domain response, frequency-domain response and energy distributions of the steady state, are studied with the finite-difference time-domain method (FDTD). The modulator, with a modulation rate of about 10 kHz, an insertion loss of about 0.308 dB, and a tuning range of 0.308~34.32 dB, has a small size. It can be designed according to the demand of the working wavelength and can be easily integrated. Wide operating wavelength range is the greatest advantage of this modulator. It is an ideal terahertz-wave modulator.

Key words optical devices; modulator; finite-difference time-domain method; terahertz; self-collimation; photonic crystal

OCIS codes 230.4110; 160.3710; 230.5298; 130.5296; 060.4510

1 引言

太赫兹波(频率在0.1~10 THz,波长在30 μm~3 mm范围内,1 THz=10¹² Hz)有良好的穿透性,不会引起电离反应,且有较高的光谱分辨本领。它作为通信载体时包含信息更多,空间分辨率更高。太赫兹波段波长比可见光波段波长一个量级,因而该波段微结构器件的研究、设计和制作要比光波段更容易。因此,太赫兹成了世界各国研究的重点。

收稿日期: 2013-01-14; **收到修改稿日期**: 2013-03-11; **网络出版日期**: 2013-05-14

基金项目: 国家973计划(2007CB935300)和国家自然科学基金(61177043,11104184)资助课题。

作者简介: 蒋强(1989—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体理论及器件等方面的研究。

E-mail: jiangqiangjq@126.com

导师简介: 梁斌明(1977—),男,博士,副教授,主要从事新型微纳材料和电磁理论等方面的研究。

E-mail: bmliang78@yahoo.com.cn(通信联系人)

光子晶体(PhC)是介电常数周期性分布的微尺寸人工结构材料^[1],它存在特殊的光子禁带特性和自准直效应^[2]。光子晶体的自准直效应不要求引入缺陷,对空气孔的尺寸精度的要求不如点缺陷或线缺陷的严格,这就意味着它对工艺的要求更低,其制造比引入缺陷的光子晶体更容易实现,且能更好地将光能无损耗传输到下一器件中。

由于光子晶体能控制电磁波在其中的传输,它被广泛地用于开发光通信中的滤波器、调制器、光开关和波分复用器等功能器件。对于新兴的太赫兹波段通信技术,太赫兹调制器是用于将信号加载到太赫兹载波上的关键器件,各国研究人员做了大量的研究。2004年Kleine-Ostmann等^[3]设计了能传输声音的半导体材料太赫兹波调制器,其用音频输出的电信号调节电子气密度,从而实现对太赫兹波强度的调制,但该调制器响应时间为170 μs 。2007年,Fekete等^[4]采用GaAs晶体作为插入缺陷,制作了光控一维太赫兹波光子晶体调制器,脉冲光功率10 nJ时,调制深度为0.5。Li等^[5~8]设计出了电控、温控和磁控的带隙迁移型太赫兹光子调制器。但这些调制器的带隙边缘不够陡峭,其调制深度或插入损耗等性能指标不太理想。苏坚等^[9]设计了基于液晶光子晶体的缺陷模迁移型太赫兹调制器,其调制深度很大,但它是利用缺陷波导传输电磁波的,这对制作工艺的要求比利用自准直效应的光子晶体要求严格。2011年Chen等^[10]提出了一种基于三阶非线性介质聚苯胺的光子晶体太赫兹调制器,其调制时间短,但用来改变聚苯胺折射率的抽运光功率太大,不适于实际操作。

本文提出和设计了一种基于自准直效应和法布里-珀罗(F-P)腔的新型太赫兹波调制器,该调制器插入损耗低,调制范围宽,且对工作波长要求不严格。应用时域有限差分法(FDTD),研究了太赫兹波在该调制器中的传输特性。该调制器通过在特殊结构设计的硅基空气孔型光子晶体中填充5CB液晶(LC)制成。当外加电压改变而使5CB液晶的折射率发生变化时,作为反射层的光子晶体对电磁波的反射率随之发生变化,从而使通过两两平行的反射层构成的F-P腔后的输出能量会发生变化,以此来实现对太赫兹波的调制。

2 结构模型和工作原理

2.1 调制器结构

调制器中所用的光子晶体是二维(2D)空气孔型正方格子硅基光子晶体,高纯硅在太赫兹波段的相对介电常数为11.56^[11]。光子晶体的晶格常数为 a ,空气孔半径 $R_1=0.32a$ 。分析双F-P腔结构,选其中三组相邻的五排空气孔作为反射结构,令其半径为 $R_2=0.5a$,每组空气孔间距为 $16a$ 。这三组空气孔和它们之间的16排空气孔两两构成一个F-P腔。将5CB液晶填充于整个F-P腔结构的空气孔中,在孔的两侧用包层玻璃覆盖,包层玻璃内侧镀附氧化锡铟(ITO)薄膜,薄膜上引出的电极上加上外加调制电压。整个调制器结构如图1、2所示。

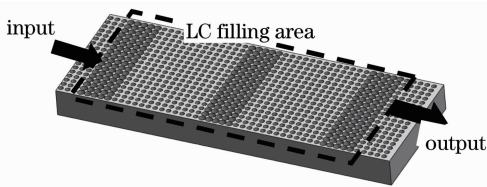


图1 二维空气孔型硅基光子晶体立体图
Fig. 1 Perspective view of the 2D air-hole silicon PhC

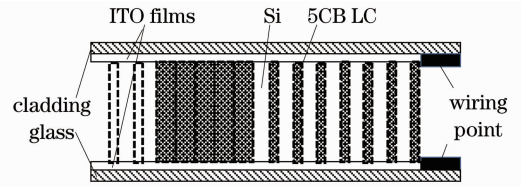


图2 太赫兹波调制器的结构剖面图
Fig. 2 Sectional view of the terahertz wave modulator structure

2.2 工作原理

在二维空气孔型正方格子硅基光子晶体的所有空气孔半径均为 $R_1=0.32a$ 时^[12],其横电模(TE模)第二能带的等频图(EFC)如图3所示。显然,频率在 $0.2708\sim 0.2748(2\pi c/a)$ (c 为光速)的等频面在垂直 Gx 方向是很平坦的,因此,在此频率附近会有自准直效应。

液晶具有双折射特性,其正常介电系数为 ϵ_o ,反常介电系数为 ϵ_e 。实验测得太赫兹波段、25 $^{\circ}\text{C}$ 时,5CB型液晶的正常折射率和反常折射率范围分别为 $1.59\sim 1.83$ 和 $1.74\sim 2.04$ ^[13]。TE模的电场在二维光子晶体 $x-z$ 平面内,假设液晶的指向矢沿 $x-z$ 平面,则相列型液晶的介电张量元可以描述为: $\epsilon_{xx}(r) = \epsilon_o(r) \cos^2 \Phi +$

$\epsilon_c(r) \sin^2 \Phi, \epsilon_{zz}(r) = \epsilon_0(r) \sin^2 \Phi + \epsilon_c(r) \cos^2 \Phi, \epsilon_{zx}(r) = \epsilon_{xz}(r) = [\epsilon_0(r) - \epsilon_c(r)] \cos \Phi \sin \Phi$, Φ 是液晶指向矢与 x 轴的夹角。显然, $\Phi = 0^\circ$ 时液晶呈现正常折射率; $\Phi = 90^\circ$ 时, 液晶呈现反常折射率。液晶上的电压变化时, 由于电光效应, Φ 发生变化, 从而使液晶的折射率发生变化, F-P 腔的光学腔长和反射结构的反射率也会变化, 继而导致出射电磁波的能量发生变化。5CB 液晶的阈值电场强度为 500 V/m, 最低饱和电场强度为 2 kV/m^[14], 假设设计调制器光子晶体部分的厚度为 1 mm, 可计算得出所需电压大概在 0.5~2 V。

3 调制器的仿真分析

3.1 自准直效应受液晶折射率影响的分析

图 4 所示为填充于空气孔中的液晶折射率 n 分别为 1.65 和 1.8 时光子晶体的等频图。

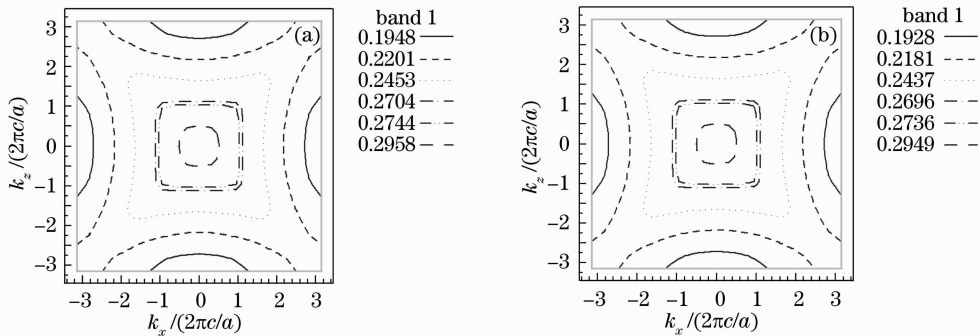


图 4 填充 5CB 液晶的二维硅基光子晶体的等频图。(a) $n=1.65$; (b) $n=1.8$

Fig. 4 EFCs of 2D silicon PhC filled with 5CB LC. (a) $n=1.65$; (b) $n=1.8$

对比图 3 和图 4, 液晶折射率为 1.65 时, 自准直频率范围为 $0.2704 \sim 0.2754(2\pi c/a)$; 折射率为 1.8 时, 自准直频率范围为 $0.2696 \sim 0.2736(2\pi c/a)$ 。可知液晶折射率变化时, 自准直频率变化较小。取入射电磁波的频率为 $0.27(2\pi c/a)$ 。

3.2 调制器工作性能的 FDTD 模拟分析

用二维时域有限差分法 (2D-FDTD) 来分析所设计的双 F-P 腔调制器的性能。将二维空气孔型正方格子硅基光子晶体中间 $47a \times 20a$ 的光子晶体设计为调制器结构, 以折射率 n 来表征液晶的折射率。结合文献资料^[15], 本仿真中取 $n_o = 1.65, n_e = 1.8$ 。由于太赫兹波进入介质波导时被吸收得较少, 可以以文献^[16] 所述方式高效耦合入光子晶体中, 因此模拟中取入射 TE 模式的连续电磁波宽度为 $10a$ 、频率为 $0.27(2\pi c/a)$, 整个结构边界采用完美匹配层 (PML)。当晶格常数 $a = 108 \mu\text{m}$ 时, 光子晶体调制器部分尺寸为 $5.076 \text{ mm} \times 2.16 \text{ mm}$, 输入电磁波波长为 $400 \mu\text{m}$ (0.75 THz)。在液晶的折射率 n 从 1.65 变化到 1.8 时, 输出端的功率监测器探测到的输出功率随 n 的变化关系如图 5 所示。

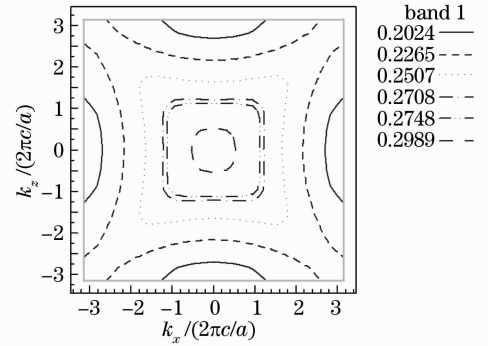


图 3 二维空气孔型正方格子硅基光子晶体的等频图

Fig. 3 EFCs of 2D square lattice air-hole silicon PhC

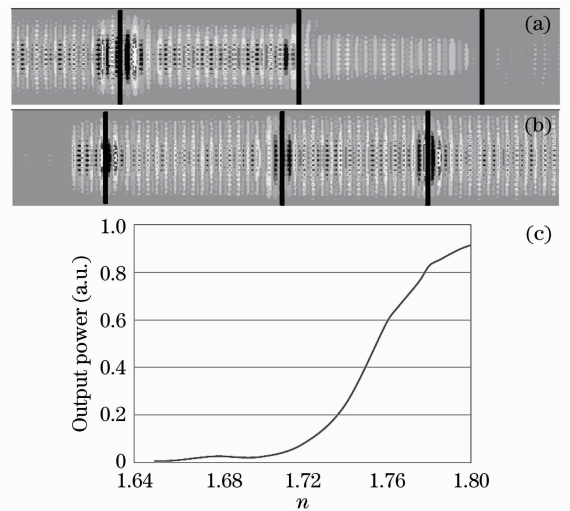


图 5 输出端的功率与 n 的关系。(a) $n=1.65$ 时的电场强度分布图; (b) $n=1.8$ 时的电场强度分布图; (c) 输出端功率随 n 变化的曲线图

Fig. 5 Relation between output power and n . (a) Electric field strength distribution with $n=1.65$; (b) electric field strength distribution with $n=1.8$; (c) output power versus n

由图 5 可知,输出功率随折射率 n 变化而单调变化。当 $n=1.65$ 时,输出功率最小,为 0.037%,称其为“断”态;当 $n=1.8$ 时,输出功率最大,为 93.15%,称其为“通”态。可计算得出插入损耗约 0.308 dB,调谐范围 0.308~34.32 dB。图 6 所示为调制器的时域稳态响应图。显然,稳态建立的时间都在 2 ps 左右,决定调制时间的是液晶的电光效应响应时间,约为 100 μs ,故调制速率约为 10 kHz。图 7 所示为“通”态和“断”态的频谱透射率图。可以看出该透射谱保留 F-P 腔的特性,存在多个峰值。在仿真波长 400 μm (0.75 THz)处, $n=1.65$ 时(虚线)透射率很小,而 $n=1.8$ 时(实线)透射率很大。同时,由图 7 可以看出,入射波长处于 397~400 μm (0.75~0.756 THz)时,也能达到很好的“通”、“断”效果,这与光子晶体在一定的频率范围内有自准直效应是完全吻合的,它表明调制器对工作波长的要求不严格。

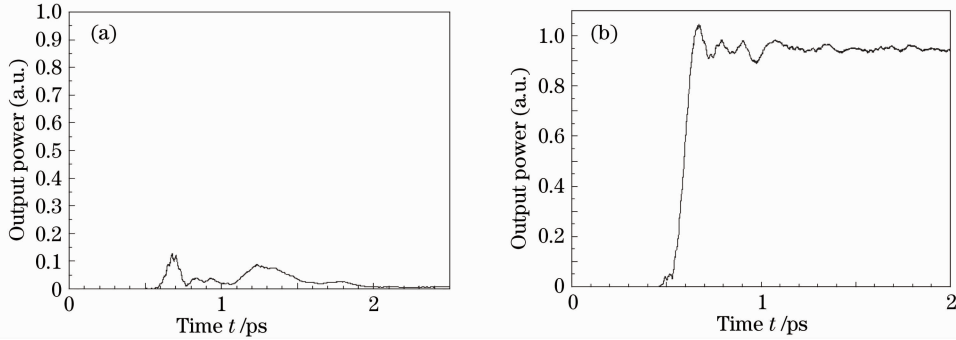


图 6 时域稳态响应图。(a) $n=1.65$ (“断”态);(b) $n=1.8$ (“通”态)

Fig. 6 Time-domain steady-state responses of (a) $n=1.65$ (off state); (b) $n=1.8$ (on state)

考虑到光子晶体加工时的误差和调制器工作环境的温度变化等对调制器性能的影响,下面对其做进一步分析。图 8(a)、(b)所示为光子晶体的两种孔半径 R_1 和 R_2 的微小变化对调制器调制曲线的影响。以最小输出功率小于 1%作为合适的调制器的判断标准,显然,对 R_1 而言,在孔半径介于 $0.31a \sim 0.32a$ 时,调制器输出的最小功率变化很小;对于 R_2 ,孔半径介于 $0.497a \sim 0.5a$ 时,调制器输出的最小功率变化很小。硅的热光系数为 $1.86 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}^{[17]}$,文献[15]中对 5CB LC 在太赫兹波段的折射率随温度的变化做了实验,实验数据表明,温度越高,双折射率差越大,但变化不是太大。参考该文献,接下来分析 10 $^\circ\text{C}$ 和 30 $^\circ\text{C}$ 时调制器的性能,结果如图 8(c) 所示。可见,温度变化对调制器的调制曲线没有太大影响。

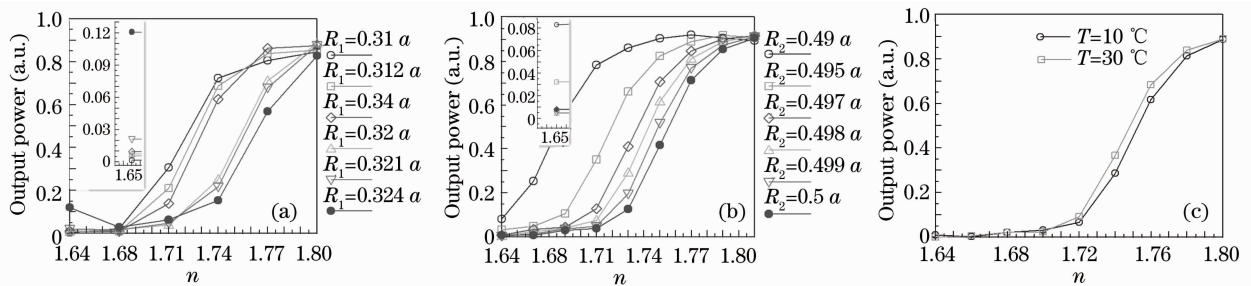


图 8 (a) R_1 、(b) R_2 和 (c) 温度变化时的调制曲线

Fig. 8 Relation between output power and n with the variation of (a) R_1 , (b) R_2 and (c) temperature

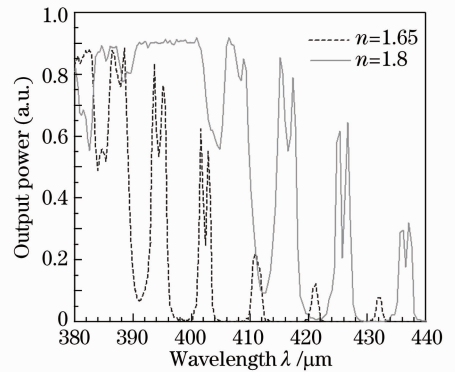


图 7 $n=1.65$ 和 $n=1.8$ (“通”、“断”态)时的频谱透射谱图

Fig. 7 Spectral transmission of the modulator with $n=1.65$ (“off” state) and $n=1.8$ (“on” state)

上面分析的是双 F-P 腔的调制器,该结构在实际生产使用时也可以扩展到多腔。图 9 所示为三 F-P 腔结构的调制器电场强度分布图和调制曲线。与双 F-P 腔的调制器相比,三腔结构的调制器调制曲线更陡峭,这意味着“通”、“断”态间的转换更容易。同时也可看出,腔越多调制器的插入损耗越大。

4 结 论

本文设计的基于光子晶体自准直效应和 F-P 腔干涉结构的太赫兹波调制器加工方便,可集成,太赫兹波自准直传播和工作性能良好。所需调制电压在伏特级,调制速率约为 10 kHz,调制器的插入损耗约 0.308 dB,调谐范围 0.308~34.32 dB,是很理想的太赫兹波调制器件。本调制器的一个突出优点是,由于光子晶体的自准直效应有一定的频率宽度,这使得调制器对输入波长的要求降低。在生产该器件时,根据工作波长的要求,可以按要求设计光子晶体的晶格常数 a 的值来获得所需工作波长的太赫兹波调制器。同时,也可以根据需求设计多 F-P 腔结构的调制器。

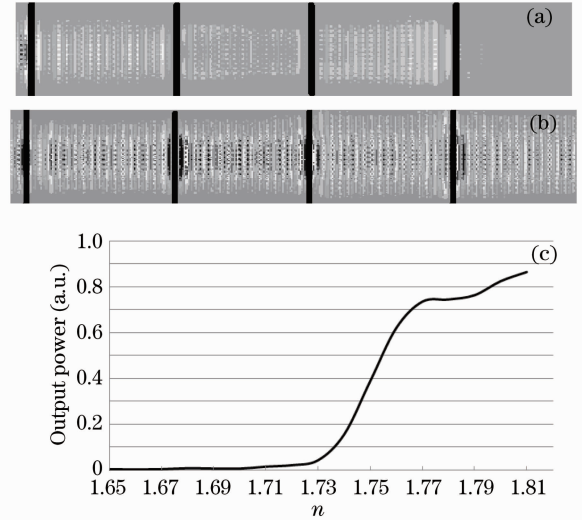


图 9 三 F-P 腔调制器输出端的功率与 n 的关系 (a) $n=1.65$ 时的电场强度分布图;(b) $n=1.8$ 时的电场强度分布图;(c)三 F-P 腔调制器的调制曲线

Fig. 9 Relation between output power and n of three F-P cavity modulators. (a) Electric-field strength distribution with $n=1.65$; (b) electric-field strength distribution with $n=1.8$; (c) modulation curve of three-F-P cavity modulators

参 考 文 献

- 1 E. Yabonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita *et al.*. Self-collimating phenomena in photonic crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(9): 1212~1215
- 3 T. Kleine-Ostmann, K. Pierz, G. Hein *et al.*. Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(2): 124~126
- 4 L. Fekete, F. Kadlec, H. Nemecek *et al.*. Fast one-dimensional photonic crystal modulators for the terahertz range[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(14): 8898~8912
- 5 Li Jiusheng. Terahertz modulator using photonic crystals[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(1): 98~101
- 6 Li Jiusheng, He Jinlong, Hong Zhi. Terahertz wave switch based on silicon photonic crystals[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22): 5034~5037
- 7 Li Jiusheng, Qiu Haibo, Zheng Ying *et al.*. Novel terahertz wave switch[C]. *SPIE*, 2007, **6840**: 684019
- 8 Z. Ghattan, T. Hasek, R. Wilk *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
- 9 Su Jian, Chen Heming. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2710~2713
- 10 苏 坚, 陈鹤鸣. 基于液晶光子晶体的太赫兹波调制器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2710~2713
- 11 Chen Heming, Su Jian, Wang Jingli *et al.*. Optically-controlled high-speed terahertz wave modulator based on nonlinear photonic crystals[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(4): 3599~3603
- 12 Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz Science Technology and Applications[M]. Beijing: Peking University Press, 2007. 32~36
- 13 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
- 14 Lai Guozhong, Chen Xiyao, Wang Yufei *et al.*. Photonic crystal Fabry-Perot self-collimation interferometer by liquid crystal infiltration[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, **428-429**: 573~578
- 15 Tsai Tsong-Ru, Chen ChaoYuan, Pan Ciling *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy studies of the optical constants of the nematic liquid crystal 5CB[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(13): 2372~2376
- 16 Rafal Wilk, Nico Vieweg, Olaf Kopschinski *et al.*. THz spectroscopy of liquid crystals from the CB family[J]. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 2009, **30**(11): 1139~1147

- 15 Pan Rupin, Hsieh Chofan, Pan Ciling *et al.*. Temperature-dependent optical constants and birefringence of nematic liquid crystal 5CB in the terahertz frequency range[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(9): 093523
- 16 Dennis W. Prather, Lin Chunchen. Terahertz integrated photonic crystal devices[C]. 3rd IEEE International Conference on Group IV Photonics, 2006, **3**: 240~242
- 17 Tong Kai, Cui Weiwei, Wang Meiting. Temperature measurement with one dimensional defect photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(2): 762~766
童 凯, 崔卫卫, 汪梅婷. 一维缺陷光子晶体温度的测量[J]. *物理学报*, 2008, **57**(2):762~766