

# 宽带调谐光子晶体光纤多功能太赫兹器件

侯宇 范飞 王湘辉 常胜江

(南开大学现代光学研究所 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

**摘要** 基于液晶分子的指向矢随外加电场改变而变化的特点,设计了一种新型电场调制液晶太赫兹器件。利用全矢量平面波展开法和光束传播法分别研究了光子晶体光纤的带隙位置和传输光谱的电场分布。同时,利用时域有限差分法计算了液晶分子指向矢随外电场的变化关系。结果显示该器件不仅可以在 0.55 THz 的宽带范围内实现开关功能,且具有耦合损耗低、消光比高等优点,消光比为 30.78 dB。当太赫兹波的入射频率满足光纤的单偏振条件时,该器件还具有偏振控制功能,能够改变传输模式的偏振状态。

**关键词** 光纤光学;太赫兹;开关;光子晶体光纤;液晶

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s111004

## Broadband Tuning Multifunctional Photonic Crystal Fiber for Terahertz Device

Hou Yu Fan Fei Wang Xianghui Chang Shengjiang

(Key Laboratory of Photoelectric Technology and Science of Ministry, Education Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract** A theoretical study of liquid crystal filled photonic crystal fiber is presented. The effects of electric birefringence of liquid crystal in the liquid crystal filled photonic crystal fiber and the transmitting properties of photonic crystal fiber are investigated by using the full vector plane wave expansion and beam propagation methods. At the same time, finite different time domain method is used to calculate the change of liquid crystal molecules with the external electric field. The simulation results show that the electrically controlled liquid crystal filled photonic crystal fiber can act as a terahertz switch with about 0.55 THz bandwidth. It also has low coupling loss and high extinction ratio which is more than 30.78 dB. Furthermore, when the frequency of the incident terahertz wave meets some conditions, the device can control the polarization state of the incident terahertz wave.

**Key words** fiber optics; terahertz; switch; photonic crystal fiber; liquid crystal

**OCIS codes** 040.2235; 130.4815; 060.5295; 160.3710

## 1 引言

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz (波长 30  $\mu\text{m}$ ~3 mm) 的电磁波<sup>[1~3]</sup>。太赫兹技术在生物工程、光谱学、成像、安检等领域都有广阔的应用前景<sup>[4~8]</sup>。在应用太赫兹技术解决实际问题时,太赫兹波导、相位控制器以及开关等功能性器件是实现整个系统功能必不可少的部分。尤其是结构简单的开关器件,在太赫兹传输和通信方面都有重要应用,这方面的报道也屡见不鲜,所以这一领域已成为目

前国内外的研究热点。2008年,Ghattan等<sup>[9]</sup>从实验上证实,施加外电场可以改变液晶的光轴方向和二维光子晶体中太赫兹波的传输特性,进而实现波导的开关功能。2009年,Zhang等<sup>[10]</sup>利用液晶的双折射效应设计了不同晶格结构的二维光子晶体太赫兹开关,实现了 94 GHz 的宽带调谐并且计算了带隙分布随外加磁场的变化趋势。范飞等<sup>[11]</sup>又利用铁氧体磁光材料从理论上研究了具有可控开关、偏振分束和连续可调谐波片 3 种功能的磁光子晶体太

**收稿日期**: 2011-08-02; **收到修改稿日期**: 2011-09-02

**基金项目**: 国家 973 计划(2007CB310403)和国家自然科学基金(60772105)资助课题。

**作者简介**: 侯宇(1984—),男,博士研究生,主要从事太赫兹器件方面的研究。E-mail: hynankai@126.com

**导师简介**: 常胜江(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事图像处理 and 太赫兹等方面的研究。

E-mail: sjchang@nankai.edu.cn(通信联系人)

赫兹器件,相比液晶填充的二维光子晶体开关具有更快的调制速度。此外,美国的 Wilk 等<sup>[12]</sup>还利用一维光子晶体的多膜反射效应制成了便携式的太赫兹开关,在 60 GHz 的调谐范围内实现了对太赫兹波的控制。

然而,这些功能器件有一个共同的缺点:无论是对自由空间的太赫兹波还是对波导中的太赫兹波来说,实现开关控制都需要先将太赫兹波耦合进光子晶体中,这必然导致很大的耦合损耗,Reyes 等<sup>[13]</sup>用实验证实了硅基二维光子晶体的耦合损耗高达 5.8 dB。光子晶体光纤(PCF)作为一种低损耗的波导,已被广泛用于设计太赫兹波传输器件,如果能在 PCF 中直接实现开关功能,这将大大减小功能器件与传输波导之间的耦合损耗。在可见光波段已经有许多关于 PCF 功能器件的报道。2002 年, Bise 等<sup>[14]</sup>利用液晶的热效应,设计了一种液晶填充光子晶体光纤(LCPCF)器件,通过调节温度使光纤带隙的位置发生了移动,实现了开关和低通滤波的功能。最近,美国的 Du 等<sup>[15]</sup>又利用电场调谐液晶分子的转动实现了对光纤带隙的控制,并且设计了一种新颖的电控开关器件,其消光比超过了 30 dB。在太赫兹区域,这方面的报道还很少。南开大学的吴犇等<sup>[16]</sup>设计了基于中空布拉格光纤的太赫兹开关,其耦合损耗显著减小,但是可调谐范围较窄,且消光比不足。

本文从理论上研究了太赫兹波在光纤带隙中的传输特性,设计了一种新颖的太赫兹开关器件。该器件具有易于控制、集成方便、调谐范围宽等优点。当太赫兹波的人射频率满足光纤的单模单偏振条件时,该开关还能调节模式的偏振状态,实现保偏功能。

## 2 液晶填充光子晶体光纤的理论基础

向列型液晶是一种由棒状分子组成的各向异性材料。分子的质心具有长程有序性,上下方向排列整齐,但沿前后左右方向排列并无规则且可以随意变动。本文所填充的液晶为 5 CB,在太赫兹波段损耗较小,基本可以忽略其影响。根据液晶分子指向矢方向的不同,它的折射率会发生变化。当指向矢的方向与外电场方向垂直时,它表现为 o 光特性,折射率为 1.52,当指向矢的方向与外电场平行时,它表现为 e 光特性,折射率为 1.70。

液晶填充光子晶体光纤的端面结构如图 1 所示,该光纤为具有 5 层包层结构的实芯 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 光纤,基质折射率 1.445,

依靠全内反射导光。填充液晶后,由于液晶折射率高于基质折射率,导光机理变为带隙导光,从而通过调节带隙位置可以实现开关功能。 $\Lambda = 375 \mu\text{m}$  是两个空气孔之间的距离, $d$  为空气孔直径。在空气孔中填充液晶时需要预先将空气孔的表面进行处理,例如注入一些活性试剂,将液晶分子的方向锚定为平行于光纤光轴的方向。由于空气孔的尺寸比较大,所以锚定的影响有限,并不是所有分子的排列方向都相同。但是,液晶分子指向矢的方向是所有分子取向的一个平均值,所以这种非同一性不会影响模拟结果。

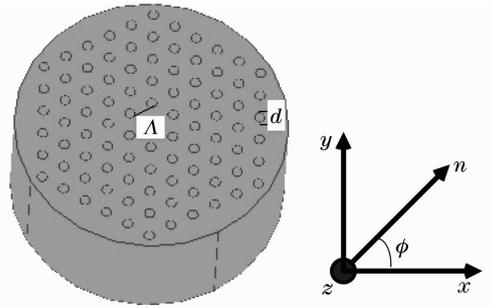


图 1 液晶填充光子晶体光纤端面和液晶分子的指向矢分布图

Fig. 1 LCPCF structure with triangular lattice. The right shows the direction of a liquid crystal molecule as an anisotropic material, when an external electric field is added in the  $x$ - $y$  plane, the dielectric constant tensor of liquid crystal molecules can be expressed as<sup>[17]</sup>

$$\epsilon_r = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & 0 \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_o \sin^2 \phi + \epsilon_e \cos^2 \phi, \quad (2)$$

$$\epsilon_{yy} = \epsilon_e \sin^2 \phi + \epsilon_o \cos^2 \phi, \quad (3)$$

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = (\epsilon_e - \epsilon_o) \sin \phi \cos \phi, \quad (4)$$

$$\epsilon_{zz} = \epsilon_o, \quad (5)$$

$\epsilon_o$  为 o 光的介电常数, $\epsilon_e$  为 e 光的介电常数。 $\phi$  为液晶分子指向矢转动的角度, $\phi$  值的变化会影响光纤的模式特性,但对其带隙影响较小。对于本文所设计的开关器件来说,只需要考虑  $\phi = 0^\circ$  和  $90^\circ$  的情况。液晶分子对外场十分敏感,即使不大的电磁场、切变力、表面吸附等都能使液晶产生形变,使液晶分子的取向随空间位置变化<sup>[18,19]</sup>。根据液晶分子的对称性,液晶中可以独立存在以下 3 种形变:展曲、扭曲和弯曲形变,分别另称为 Freedericksz 转变 I、II 和 III。3 种弹性形变分别对应各自的弹性系数:展曲弹性系数  $k_{11}$ 、扭曲弹性系数  $k_{22}$  和弯曲弹性系数

$k_{33}$ 。3种形变对应的阈值电压为

$$\text{Fredericksz 转变 I : } V_c = \pi \sqrt{\frac{k_{11}}{\Delta\epsilon_0}}, \quad (6)$$

$$\text{Fredericksz 转变 II : } V_c = \pi \sqrt{\frac{k_{22}}{\Delta\epsilon_0}}, \quad (7)$$

$$\text{Fredericksz 转变 III : } V_c = \pi \sqrt{\frac{k_{33}}{\Delta\epsilon_0}}. \quad (8)$$

从(6)~(8)式可以看出,液晶在电场作用下的Fredericksz转变的电压阈值与锚泊层之间的距离无关。取液晶层厚度为 $10\ \mu\text{m}$ ,根据(7)式可以计算出扭曲状态下液晶分子的阈值电压,图2为液晶分子指向矢转动的角度 $\phi$ 随电压的变化关系。没有外加电压时,液晶分子的排列方向与电场方向垂直,随着外加电压的升高,液晶分子向与电场平行的方向转动。当电压在 $0.5\sim 2.5\ \text{V}$ 之间变化时曲线最为陡峭, $\phi$ 由 $0^\circ$ 增加到了 $85^\circ$ 。外加电压超过 $3\ \text{V}$ 以后, $\phi$ 值的变化趋于平缓,此时大部分液晶分子已经

平行于电场方向排列。

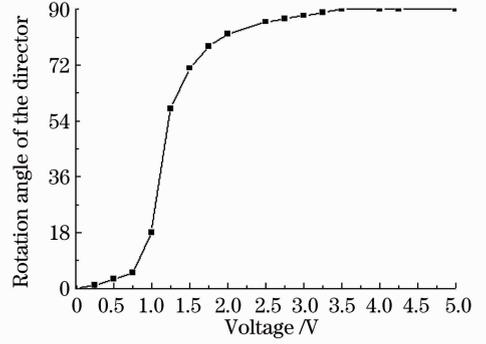


图2 液晶分子指向矢转动的角度 $\phi$ 随外电场的变化  
Fig. 2 Rotation angle of the director as a function of voltage from 0 V to 5 V

### 3 开关原理

为了研究液晶填充光子晶体光纤的传输性质,利用全矢量平面波展开法计算了它的带隙分布。图3

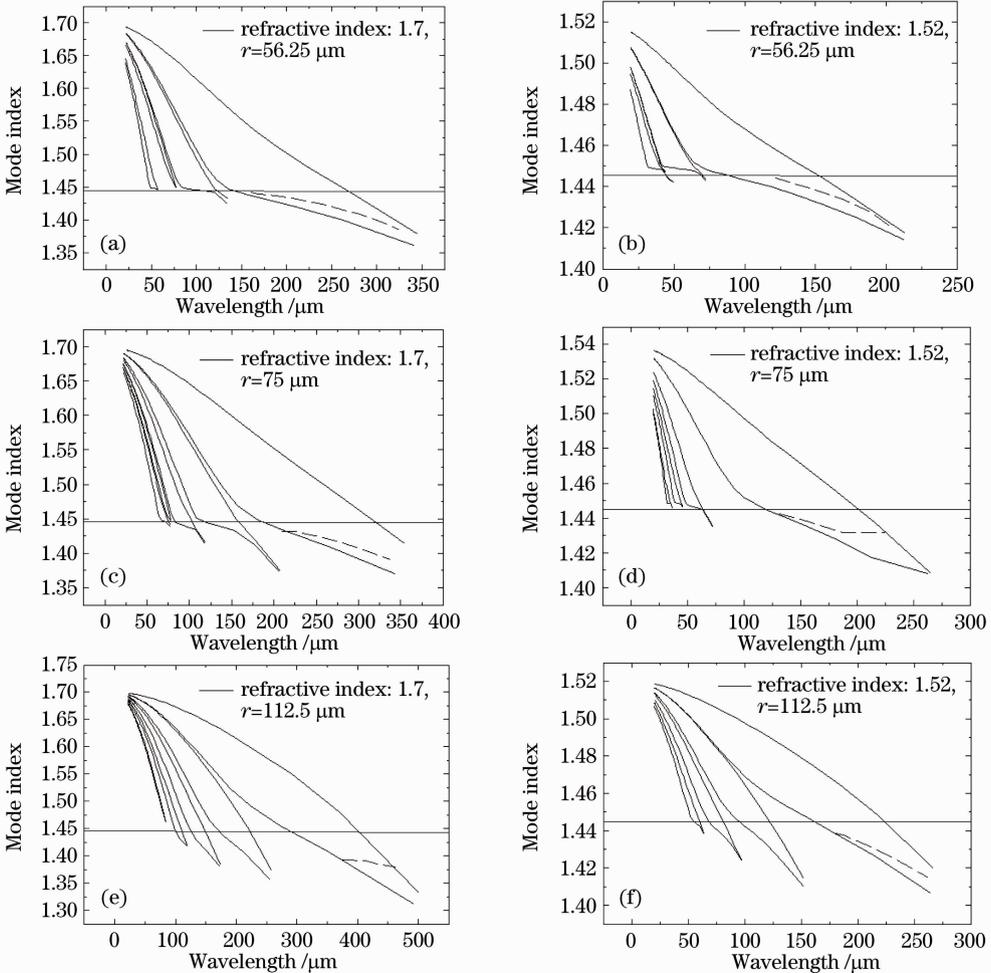


图3 不同空气孔半径对应的液晶填充光子晶体光纤带隙图。(a)和(b)  $r=56.25\ \mu\text{m}$ ; (c)和(d)  $r=75\ \mu\text{m}$ ; (e)和(f)  $r=112.5\ \mu\text{m}$

Fig. 3 Bandgaps maps of LCPCF when (a) and (b)  $r=56.25\ \mu\text{m}$ ; (c) and (d)  $r=75\ \mu\text{m}$ ; (e) and (f)  $r=112.5\ \mu\text{m}$

展示了不同空气孔半径下的带隙分布情况。随着空气孔半径  $r$  的增大,带隙位置向长波方向移动,带隙宽度变窄。当  $r$  从  $56.25\ \mu\text{m}$  变化到  $75\ \mu\text{m}$  时,e 光条件下的主带隙宽度由  $170\sim 325\ \mu\text{m}$  ( $0.84\ \text{THz}$ ) 缩小到  $210\sim 337.5\ \mu\text{m}$  ( $0.55\ \text{THz}$ ),o 光条件下的主带隙宽度由  $122\sim 204\ \mu\text{m}$  ( $0.99\ \text{THz}$ ) 缩小到  $132\sim 220\ \mu\text{m}$  ( $0.89\ \text{THz}$ )。每幅图中都有多条带隙,但只能利用长波方向的带隙来实现开关功能,因为在短波方向上,无论是否有外加电场,光纤都能导光,无法进行调谐。当  $r=56.25\ \mu\text{m}$  时,光纤具有最宽的带隙和调谐范围,所以着重研究此时的带隙分布情况。图 3(b)为没加外电场时,液晶填充光子晶体光纤的带隙分布图。此时,由于活性测试对液晶分子的锚定作用,指向矢方向垂直于电场方向,液晶表现出 o 光特性,折射率为 1.52。图中模式折射率为 1.445 的直线是光纤中传输模式与泄漏模式的分界线,直线以下的部分是导模,能够在光纤缺陷中传输。直线以上的模式虽然也存在于带隙中,却不满足传输条件,能量会从包层中衰减出去。图中最宽的一条主带隙为  $122\sim 204\ \mu\text{m}$  ( $1.47\sim 2.46\ \text{THz}$ )。图 3(a)为加入外电场后光纤的带隙分布情况。此时,液晶分子指向矢的方向转动了  $90^\circ$ ,与电场方向平行,液晶表现出 e 光特性,折射率为 1.70。光纤主带隙的位置向长波方向移动,使光纤在  $170\sim 325\ \mu\text{m}$  ( $0.92\sim 1.76\ \text{THz}$ ) 的波长范围内可以导光。比较两图中的带隙宽度,发现 e 光条件下的主带隙更宽,这与液晶和基质之间折射率差变大密切相关。因为所设计的器件工作的中心频率为  $1\ \text{THz}$ ,所以选择  $0.92\sim 1.47\ \text{THz}$  的带隙范围实现开关功能。调谐宽度达到  $0.55\ \text{THz}$ ,远远高于一般的一维和二维光子晶体开关。

#### 4 模拟结果与讨论

根据以上的理论分析,利用光束传播法进行了模拟验证。选择入射光波的频率为  $1\ \text{THz}$ ,对应波长  $300\ \mu\text{m}$ 。此时开关在 o 光条件下关闭而在 e 光条件下导通。图 4(a)为 e 光条件下模式的传输图。如图所示,在  $1\ \text{cm}$  的长度范围内,太赫兹波被很好地限制在纤芯中传输,在包层中仅有少部分的能量泄漏,此时对应于开关的开状态。与此相反,图 4(b)中的太赫兹波由于入射频率不满足带隙要求,不能在纤芯中传输,所以很快就从包层中衰减掉了,此时对应于开关的关状态。这与前面的理论分析相当吻合。据此,计算了开关两种状态下的损耗

系数和消光比。

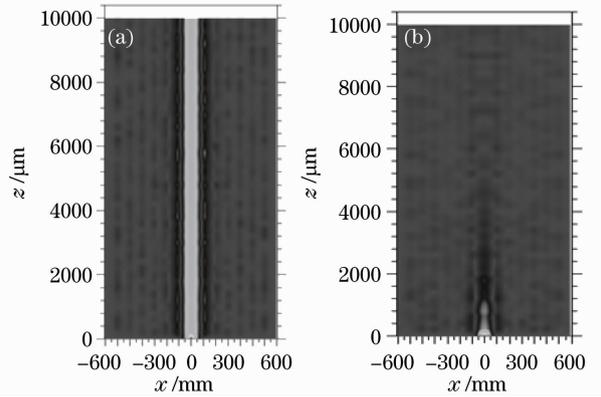


图 4 光纤空气孔半径  $r=56.25\ \mu\text{m}$  时开关器件的电场分布图; (a) e 光条件下; (b) o 光条件下

Fig. 4 Distribution of electric field in the fiber core when  $r=56.25\ \mu\text{m}$ . (a) When the switching is in open state; (b) when the switching is in shut state

开关特性参数如表 1 所示。在开状态下,基模的有效折射率虚部为  $1.4095\times 10^{-6}$ ,远小于关状态下的数值。然而,有效折射率虚部的数值和光纤的损耗是相互对应的,这就使得关状态下的模式损耗大大增加了。依据公式  $\alpha = -10\log(P_{\text{off}}/P_{\text{on}})$  计算,此光纤器件的消光比为  $30.78\ \text{dB}$ 。

表 1 开关的特性参数

Table 1 Characteristic parameters of the switch

Switch status	Imaginary part of effective refractive index	Loss coefficient / (dB/cm)
On	$1.4095\times 10^{-6}$	$9.6153\times 10^{-3}$
Off	0.001689	11.522

#### 5 偏振控制器原理分析

液晶是一种各向异性的材料,具有特殊的光学性质。所以研究了液晶分子指向矢转动的角度  $\phi$  对带隙和模场的影响,同时利用有限时域差分法计算了当  $\phi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  时基模有效折射率的变化情况。选择太赫兹波的入射频率为  $1\ \text{THz}$ ,光纤端面空气孔半径  $r=56.25\ \mu\text{m}$ 。通过对比发现有效折射率的最大值与最小值之间相差很小,大约  $0.00003$ 。这说明  $\phi$  值的变化不会改变模式的有效折射率。由于液晶的特殊光学性质,o 光条件下的折射率 1.52 小于 e 光条件下的折射率 1.70,基模的两个偏振状态会发生分离,导致  $x$  偏振带隙向短波方向移动, $y$  偏振带隙向长波方向移动。本文的设计主要利用了长波方向的带隙(即  $y$  偏振带隙),在此条件下,带隙范围内只有  $y$  偏振模式存在,从而实现了单偏振传

输。如图5所示,此时模场的偏振方向与液晶分子指向矢转动的角度 $\phi$ 相互对应。可以通过调节 $\phi$ 的

大小来改变模场的偏振方向,实现保偏的功能。

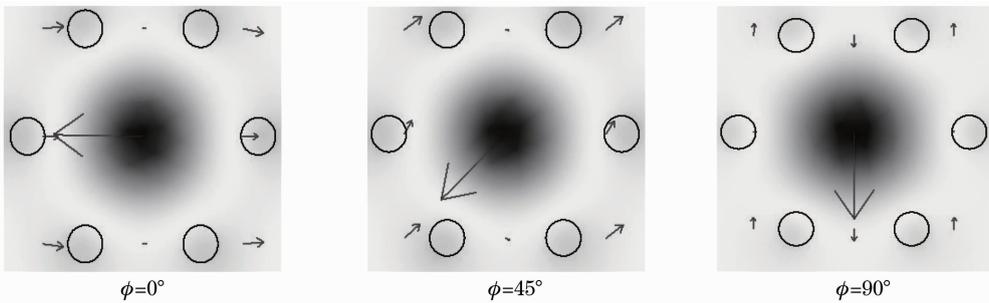


图5 光纤的模场和电场随液晶指向矢转动角度 $\phi$ 的变化关系

Fig.5 Mode profile and transverse electric field distribution evolution as the rotation angle  $\phi$

## 6 结 论

设计了一种新颖的基于液晶填充光子晶体光纤结构的太赫兹多功能器件,通过调节外电场的大小使光纤带隙发生了移动。实现了宽带调谐开关的功能,调谐范围0.55 THz。理论分析和模拟结果相互吻合,显示该器件可以实现大于30 dB的消光比。此外,当太赫兹波的入射频率满足光纤的单模单偏振条件时,它还能作为偏振控制器件,调节模式的偏振状态,实现在波导中保偏的功能。本文中所设计的器件也存在一些不足,例如,用液晶做开关器件,一般的调谐时间为几毫秒,比常用的电子器件要慢。如果能用铁电液晶<sup>[20,21]</sup>代替5 CB进行填充,调谐时间会大大降低。但是在太赫兹波段,许多材料的特性还没有被完全了解,这也是我们进一步研究的重点。

## 参 考 文 献

- 1 L. Xu, X. C. Zhang, D. H. Auston. Terahertz beam generation by femtosecond optical pulses in electro-optic materials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(15): 1784~1786
- 2 M. Tonouchi. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature. Photonics.*, 2007, **1**(1): 97~105
- 3 Q. Wu, X. C. Zhang. Free-space electro-optic sampling of terahertz beam [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(24): 3523~3525
- 4 P. Y. Han, G. C. Cho, X. C. Zhang. Time-domain transillumination of biological tissues with terahertz pulse [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 242~244
- 5 S. Yokoyama, R. Nakamura, M. Nose *et al.*. Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 13052~13061
- 6 W. L. Chan, J. Deibel, D. M. Mittleman. Imaging with terahertz radiation [J]. *Repts Prog. in Phys.*, 2007, **70**(8): 1325~1335
- 7 D. M. Mittleman, M. Gupta, R. Neelamani *et al.*. Recent advance in terahertz imaging [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics.*, 2007, **68**(6): 1085~1094
- 8 J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang. THz imaging and

- sensing for security applications-explosives, weapons and drugs [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, **20**(7): 266~280
- 9 Z. Ghattan, T. Hasek, R. Wilk *et al.*. Sub-terahertz on-off switch based on a two-dimensional photonic crystal infiltrated by liquid crystal [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(18): 4623~4625
- 10 H. Zhang, P. Guo, S. J. Chang *et al.*. Liquid-crystal-filled photonic crystal for terahertz switch and filter [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2009, **26**(1): 101~106
- 11 Fan Fei, Guo Zhan, Chang Shengjiang. Magnetically tunable magneto-photonic crystals for multifunctional terahertz polarization controller [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(8): 358~364
- 范飞, 郭展, 常胜江. 多功能磁光子晶体太赫兹可调偏振控制器件 [J]. *物理学报*, 2011, **60**(8): 358~364
- 12 R. Wilk, N. Vieweg, O. Kopschinski *et al.*. Liquid crystal based electrically switchable Bragg structure for THz waves [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(9): 7377~7382
- 13 G. D. Reyes, A. Quema, C. Ponseca *et al.*. Low loss single mode terahertz waveguiding using cytop [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(21): 211119
- 14 R. T. Bise, R. S. Windeler, K. S. Kranz *et al.*. Tunable photonic band gap fiber [J]. *Optical Fiber Communication*, 2002, **70**(6): 466~468
- 15 F. Du, Y. Q. Lu, S. T. Wu. Electrically tunable liquid-crystal photonic crystal fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(12): 2181~2183
- 16 Wu Ben, Zhang Hui, Chang Shengjiang *et al.*. Magnetically tunable liquid crystal terahertz switch based on Bragg fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 1838~1843
- 吴奔, 张会, 常胜江等. 磁场调谐液晶填充布拉格光纤太赫兹器件 [J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 1838~1843
- 17 S. Ertman, T. R. Wolinski, R. Buczynski *et al.*. Low loss propagation and continuously tunable birefringence in high-index photonic crystal fibers filled with nematic liquid crystals [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 19298~19310
- 18 T. T. Alkeskjold, A. Bjarklev. Electrically controlled broadband liquid crystal photonic bandgap fiber polarimeter [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1707~1709
- 19 Wang Ning, Li Guohua, Yun Maojin. Voltage-dependent birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(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, **A29**(12): 1064~1066
- 20 Wang Bingkui, Wang Zaijing, Wang Rong *et al.*. Study of nonlinear optic properties of novel ferroelectric liquid crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(11): 923~928

王炳奎, 王再江, 汪 熔 等. 新型铁电液晶的非线性光学性质的研究[J]. 中国激光, 1994, **A21**(11): 923~928

21 Shen Hao, Xiao Sheng'an, Xu Ke. Preparation and study of electrooptic bistability of a ferroelectric liquid crystal cell [J].

*Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(11): 904~908

沈 浩, 肖胜安, 徐 克. 铁电液晶电池的制备与电光开关的特性研究[J]. 中国激光, 1994, **A21**(11): 904~908

栏目编辑:殷建芳