

doi: 10.3788/gzxb20134202.0176

液晶光子晶体的负折射特性研究

杨明玮, 肖峻, 李锐

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 611731)

摘 要: 可调光子晶体由于其潜在的应用价值成为现今光子晶体研究中的一个热点. 本文提出了通过光诱导液晶来调节光子晶体负折射效应的方法, 采用平面波展开法、等频图分析法和推广的斯涅尔定理分析了二维液晶正方晶格光子晶体负折射的可调节性. 提出了一种新型的液晶光子晶体结构, 数值模拟结果表明: 通过偏振光改变液晶指向矢可以调节该液晶光子晶体的负折射. 与电场调制方法相比, 该光控液晶取向技术具有响应速度快、结构简单的优点. 这种可调光子晶体可用于制作光控路由或者应用于全光网络.

关键词: 液晶; 光子晶体; 平面波展开法; 负折射

中图分类号: O436; O734+.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0176-5

Tunable Negative Refraction Photonic Crystals Filled with Liquid Crystals

YANG Ming-wei, XIAO Jun, LI Rui

(Institute of Optical Information Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Tunable negative refraction photonic crystals have attracted much attention for their potential application value. The photonic crystal with a square lattice of Si cylinders surrounded by optically controlled liquid crystals is investigated. The plane wave expansion method is used to calculate the equi-frequency surface (EFS). The General Snell's Law and EFS analysis method is used to ensure the ability of tunable refraction. A new photonic crystal filled with liquid crystal structure is designed. Numerical simulation result shows that this kind of tunable negative refraction photonic crystal filled with optically controlled liquid crystals can be achieved. Compared with electronically controlled one, this way has a faster response speed and a more simple structure, which may be used in optically controlled router and all optical networks.

Key words: Liquid crystals; Photonic crystal; Equi-frequency surface; Negative refraction effect

0 引言

光波通过两种不同折射率介质的界面传播时会发生折射, 在一般情况下入射光波和折射光波是位于法线的异侧, 但在某些特殊情况下二者会位于法线的同侧, 这种特殊的折射现象被称作负折射. 负折射的概念是由前苏联物理学家 Veselago^[1] 于 1968 年率先提出, 之后 1996 年英国科学家 J. B. Pendy 等采用谐振回路周期结构制作出能够在微波波段实现负折射的人工材料, 并提出了利用负折射

材料实现完美成像. 此后, 一些负折射介质为代表的新型材料引起了广泛的关注. 后来发现由不同折射率周期性排列的光子晶体也可以在某些频率实现负折射效应, 而且可以实现更小的损耗^[2-8]. 因此, 研究光子晶体的负折射效应是一个崭新的方向.

现阶段的光子晶体器件绝大多数是不可调的, 即制作完成后便无法对其各项参量进行修改, 可通信业的发展要求光子晶体应该具有可调性, 因此人们提供了不少实现的方法. 可行性较高的一种是在光子晶体内填充液晶^[9], 通过光、电或磁^[10-11]的方式

基金项目: 电子科技大学光电信息学院本科生研究训练计划资助

第一作者: 杨明玮(1990-), 男, 学士, 主要研究方向为光子晶体的负折射现象. Email: sunnysunny3145@yahoo.com.cn

导师(通讯作者): 肖峻(1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光子晶体与激光技术. Email: junxiao@uestc.edu.cn

收稿日期: 2012-06-28; **录用日期:** 2012-11-07

对其进行动态调节.

目前关于可调液晶光子晶体的研究大多集中在光子晶体的能带和禁带可调上^[12-13],而其中可调的能带和禁带刚好位于光子晶体的第三和第四能带,其中第三能带在某些结构中是光子晶体负折射效应产生的地方.本文在液晶光子晶体的可调负折射进行了理论上的可行性分析,提出了一种具体的可调负折射的光子晶体的结构并进行了仿真.本文利用平面波展开法(Plane Wave Expansion Method, PWM)和时域有限差分方法(Finite Difference Time Domain, FDTD),模拟研究了以 Si 材料为基底、填充液晶材料圆柱孔的二维正方晶格光子晶体,分析了通过光控改变液晶指向矢取向角度从而可控负折射现象的可能性,为进一步研究液晶光子晶体的可控负折射器件提供了理论依据.

1 理论分析

1.1 平面波展开法

平面波展开法是研究光子晶体能带结构的一种常用方法,其原理是将光波在倒格矢空间以平面波叠加的形式展开,将麦克斯韦方程组化为本征方程,然后解得本征频率,本征频率的集合便是光波能带.

光子晶体中,由电磁场关系可得到其本征方程

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right] = \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{H}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

介电张量 $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) = \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r} + \mathbf{R})$ (\mathbf{R} 为晶格的格矢) 可按倒格矢 \mathbf{G} 展开为傅里叶级数,即

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{G}) \exp(i\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}) \quad (2)$$

由布洛赫定理将磁场 $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 按平面波展开为

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{G}) e_{\mathbf{G}} \exp[i(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}] \quad (3)$$

式中, \mathbf{k} 为晶格的布里渊区中的波矢量, $e_{\mathbf{G}}$ 定义为垂直于波矢量 $\mathbf{k} + \mathbf{G}$ 的单位方向矢量.

在当液晶指向矢在 $x-z$ 平面中(如图 1), 向列型晶体的介电张量可以表示为

$$\varepsilon_{xx}(\mathbf{r}) = \varepsilon_o(\mathbf{r}) \sin^2 \varphi + \varepsilon_e(\mathbf{r}) \cos^2 \varphi \quad (4)$$

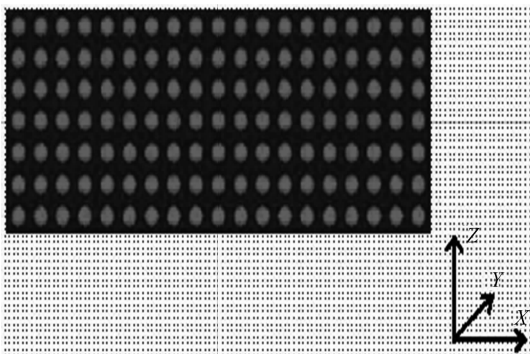


图 1 液晶光子晶体结构示意图

Fig. 1 Figure of photonic crystals filled with liquid crystals

$$\varepsilon_{xz}(\mathbf{r}) = \varepsilon_{zx}(\mathbf{r}) = [\varepsilon_e(\mathbf{r}) - \varepsilon_o(\mathbf{r})] \sin \varphi \cos \varphi \quad (5)$$

$$\varepsilon_{zz}(\mathbf{r}) = \varepsilon_o(\mathbf{r}) \cos^2 \varphi + \varepsilon_e(\mathbf{r}) \sin^2 \varphi \quad (6)$$

式中, φ 是液晶指向矢取向角度, 将式(2)和式(6)代入式(1), 乘以 $e_{\mathbf{G}}$ 后经简化可以得到

$$\sum_{\mathbf{G}'} H_{\mathbf{G}, \mathbf{G}'} h(\mathbf{G}') = \left[\frac{\omega}{c} \right]^2 h(\mathbf{G}) \quad (7)$$

于是, 上述问题便转化为求解无穷矩阵的特征值问题, 可用 Rsoft 软件进行计算模拟仿真.

1.2 光控光子晶体

目前研究中, 主要填充的液晶为 5CB 和苯乙炔(phenylacetylene), 对于填充苯乙炔(正常折射率 $N_o = 1.590$ 、反常折射率 $N_e = 1.223$) 的液晶光子晶体, 当晶格常量 $a = 1 \text{ mm}$, 正方晶格的圆孔半径 $r = 0.32a$, 在归一化频率为 0.315 2 附近可产生负折射, 当入射角小于 18.5° 时, 可以改变液晶指向矢控制负折射角. 当向液晶分子中掺入少量(约 1%) 偶氮聚合物(如偶氮苯), 用一定强度 ($> 0.7 \text{ mW/cm}^2$) 和波长(366 nm) 的线偏振紫外光照射偶氮苯化合物使之发生顺-反异构化反应, 弯曲的顺式结构转变成棒状的反式结构, 反式结构在偏振光作用下, 带动液晶分子重新取向, 新的取向垂直于控制光的偏振方向^[14], 这种光控掺杂液晶取向技术研究的已比较成熟^[15-16].

因此, 从大的负折射角度调制和实现光控的目的, 选用了苯乙炔作为填充液晶.

1.3 等频面方法和推广的斯涅尔定理

应用平面波展开方法可以计算和观察各种晶体结构的能带分布和等频面分布情况, 再结合等频面方法和推广了的斯涅尔定律, 就可以定性判断折射光波的群速度方向.

等频面是在 k 空间中对频率相同的点组成的曲面. 斯涅尔定律则是用于判断光波穿过两种不同介质的界面时, 通过两种介质的等频面来判断折射情况的方法. 一般的斯涅尔定律只适用于一般折射, 但是对于负折射效应, 需要推广一下斯涅尔定律, 应用于光子晶体的分析. 具体规则如下:

- 1) 波矢 k 沿界面的切向分量在折射中守恒;
- 2) 某一点的群速度 V_g 的方向垂直于该点处的等频面, 且由频率较低的等频面指向频率较高的等频面;
- 3) 在光子晶体中光能量的传播方向由群速度方向决定, 所以群速度的方向应该指向远离光源的方向, 即与入射光方向的夹角为锐角.

由以上三规则可确定群速度 V_g 的方向. 如图 2 所示, 下部分是一束向上偏右斜入射的光波波矢及其入射介质的等频面, 上部分是一个外凸、频率分布

由内到外依次递减的等频面,因折射光波波矢需满足上四个条件可推出:折射光是 V_{g_2} 方向,发生了负折射.

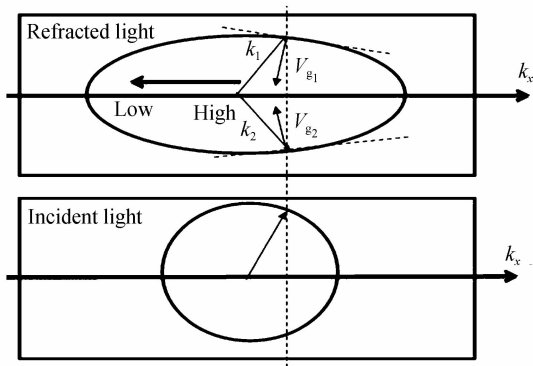


图2 利用等频面方法确定折射光方向的示意图
Fig. 2 Figure of the refracted light direction determined by the equi-frequency surfaces(EFS) analysis method

光子晶体的等频面不像单一介质一样是圆形或椭圆形等外凸图形,而是更加复杂,还有可能是内凹的.一般来说光子晶体的等频面满足以下两种情况就可以发生负折射:1)等频面外凸,频率分布由内到外依次递减;2)等频面内凹,频率分布由内到外依次递增.

2 数值模拟

本文先是比较了液晶光子晶体在不同晶格形状、不同晶格常量、不同液晶材料、不同填充率下对光子晶体能带分布和等频图的影响,然后,从负折射的易于发生、工艺的实现和应用的角度的角度选取了具体参量,进行下一步的研究和分析.

2.1 不同参量的影响

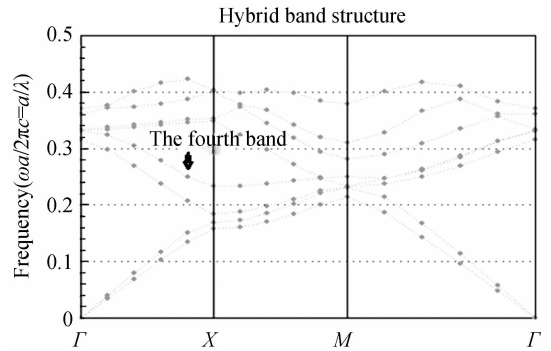
经软件仿真了一系列的各种参量下的能带图和等频图之后,发现:

1)相比较于三角晶格,正方晶格的液晶光子晶体在不同指向矢下的能带图变化比较少,利于观察和利用;

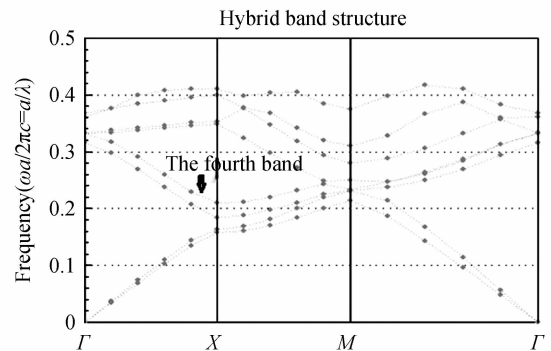
2)正方晶格在转换液晶指向矢之后,其他能带均无明显变化,但在可能发生负折射的第四能带有明显区别(见图3(a)和(b)),再比较对应的等频图(见图4(a)和(b))之后确认了这种区别;而三角晶格变化较为复杂;

3)正方晶格的第四能带的等频图呈长方形或椭圆形分布,变换液晶指向矢可改变长方形较长边或者椭圆长轴的方向(如图4(a)和(b));增大液晶的正常折射率和反常折射率差之后可以增加正方形的长短边差或者椭圆的长短轴差即增大等频图的扁平程度;

4)增大填充率也会增大等频图的扁平程度,但是当增大填充率超过 $0.34^2\pi$ 时会发生畸变,由椭圆

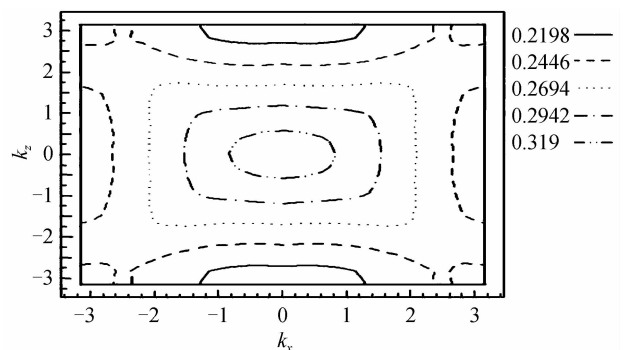


(a) $a=1, r=0.32a, \phi=90^\circ$ (ϕ means the liquid crystal director angle)

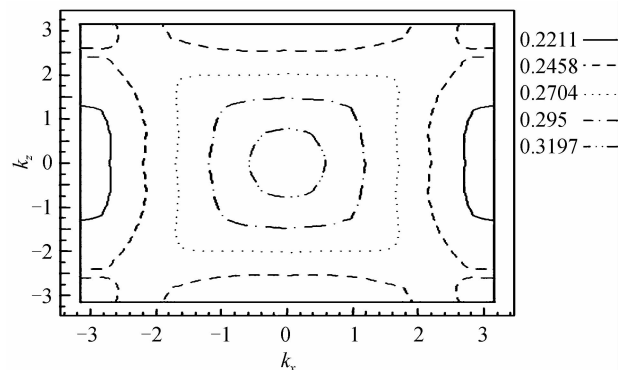


(b) $a=1, r=0.32a, \phi=0^\circ$

图3 正方晶格圆柱孔液晶光子晶体的能带图
Fig. 3 The energy band diagrams of the photonic crystal with a square lattice of Si cylinders surrounded by phenylacetylene



(a) $a=1, r=0.32a, \phi=90^\circ$



(b) $a=1, r=0.32a, \phi=0^\circ$

图4 正方晶格圆柱孔液晶光子晶体的第四能带等频图
Fig. 4 The EFS contour of the fourth energy band of the photonic crystal with a square lattice of Si cylinders surrounded by phenylacetylene

变成类十字型。

2.2 参量的选取

为了便于观察和研究负折射,经过上述的比较,选用的材料参量和原因为:

1)选用正方晶格的光子晶体,尽管现在很多关于填充液晶的光子晶体的研究中都选用了三角晶格,但是由于三角晶格的能带分布较为复杂,在应用于能级的移动等其他方面时虽有一定的优势,但是出于利于负折射的角度考虑,正方晶格更加合适;

2)选用目前研究中正常折射率、反常折射率相差最大的苯乙炔,(正常折射率 $N_o=1.590$,反常折射率 $N_e=1.223$)为填充液晶,这样可以对负折射角的变化有更大的范围;

3)基于等频图形状光滑的考虑,选用晶格常量为 $a=1$,圆孔半径 $R=0.32a$ 的正方晶格结构的光子晶体。

经仿真检验证明,当入射光的切向分量大于对应频率的等频面切向最大值时,光波能量大部分会散射和反射出去,无法观察到明显的负折射现象,因此,对于取该参量下的波长 $\lambda=a/0.3152$ (a 为晶格常量)的入射光,入射角小于 18.5° 时可以产生负折射。

3 填充液晶的光子晶体的负折射

3.1 负折射的产生

先分析该参量材料的等频图,由图 4(a)或(b)可知:等频图呈椭圆形,且频率由内至外逐层递减,符合负折射产生的基本条件。

首先,先假设一从空气中向上偏右斜入射至光子晶体的光波.如图 5 所示,根据波矢沿界面的切向分量在折射中守恒的原则,可在右侧做一垂线 L 代表入射光的波矢的切向分量,垂线 L 在等频图中对应光波频率(归一化频率 $\tilde{\omega}=\omega d/c=0.3152$)的等频面的 a 、 b 上下两点,在 a 、 b 两点处做等频面的切线,根据折射光群速度方向由频率比较低的等频面指向频率较高的等频面可在 a 、 b 两点分别确定一个可能的群速度方向,再根据折射光方向与入射光方向的夹角应为锐角的原则,可以确认 a 点处的群速度是不可能的.至此,可以确认折射光的群速度方向即是图中所示 V_g 的方向.由此可知当光波以一定偏折角入射时,折射光位于法线的同侧,即发生了负折射.而且当改变液晶指向矢取向角度时,等频图会发生改变,折射角也会随之改变,进一步确认了会有调制效果出现.用 R-soft 软件利用 FDTD 方法进行仿真也进一步证实了理论分析正确,见图 6(a)或(b).

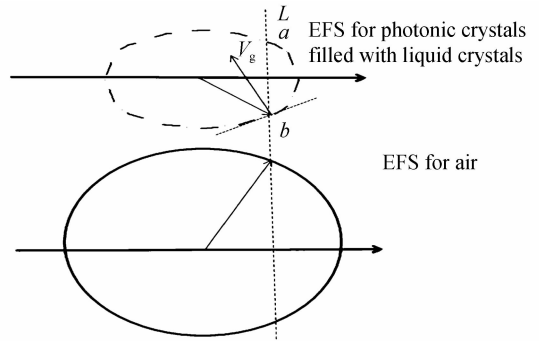
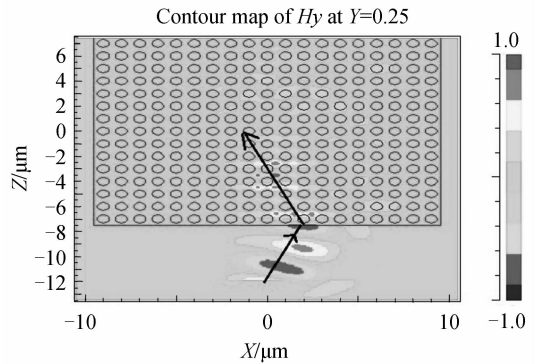
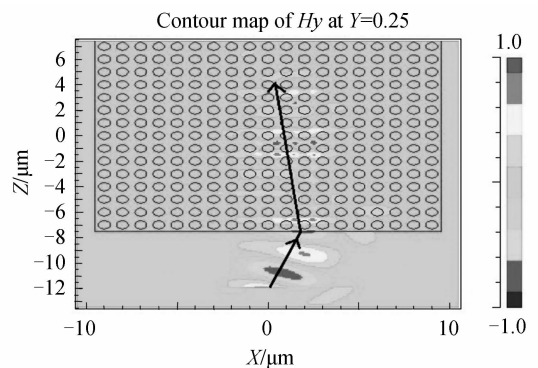


图 5 利用等频面方法确定折射光方向的示意图
Fig. 5 Schematic of the direction of refracted light by the EFS analysis method



(a) $\lambda=a/0.3152, \Phi=17^\circ, \phi=0^\circ$ by FDTD method
(λ means the wavelength of incident light,
 Φ means the angle of incidence)



(b) $\lambda=a/0.3152, \Phi=17^\circ, \phi=90^\circ$ by FDTD method

图 6 FDTD 法液晶光子晶体负折射仿真图

Fig. 6 Patterns of refraction of the photonic crystal with a square lattice of Si cylinders surrounded by phenylacetylene

需要指出的是,因为在选取的参量下,该频段的等频面是椭圆形,等频面的椭圆长轴方向是和填充的液晶指向矢平行,具体分析见下一部分。

3.2 改变指向矢的影响

先进行等频图分析,如图 5,由前面的方法可知,改变了液晶指向矢的方向后,椭圆的等频面长轴位置旋转 90° ,对于入射角相同的入射光波,等频面与切向分量守恒的垂线 L 的交点处的法线方向必不同,因此折射光的群速度会改变,即发生了可控负折射。

同时用 R-soft 软件,模拟仿真了改变液晶指向矢时的负折射情况,也证实了折射角会改变的预测结果(见图 6(a)和(b)).由图可知,对于相同入射角的入射光波,负折射角度是明显不同的,估算结果是折射角改变范围是 $12.8^{\circ}\sim 29.74^{\circ}$.同时分别仿真了负折射角角度随液晶指向矢取向角度变化的曲线如图 7,可见折射角和液晶指向矢取向角度基本呈一个线性变化的关系,从而可以实现连续可调.

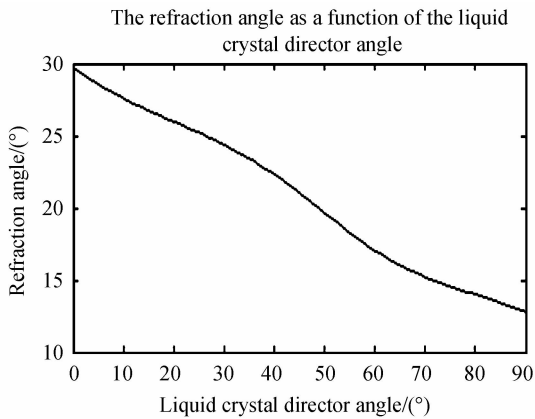


图 7 负折射角随液晶指向矢取向角度变化曲线

Fig. 7 The refraction angle as a function of the liquid crystal director angle

4 结论

在应用方面,基于液晶光子晶体可以实现入射角小于 18.5° 的入射光的连续可变负折射调制,因此利用该材料的光控负折射效应可以制作很多相关的光控负折射原理器件.

本文提出了一种新的光控连续可调负折射的方法:在硅基底打正方晶格的圆孔,填充液晶后,通过线偏振紫外光照射偶氮苯化合物使之发生顺-反异构化反应,弯曲的顺式结构转变成棒状的反式结构,带动液晶分子重新取向,从而改变该液晶光子晶体中某频率的等频面,改变负折射的折射角,从而对光子晶体的负折射光进行连续的调制.采用平面波展开法对二维正方形圆孔液晶光子晶体进行数值分析,模拟结果证实,这种类型的光子晶体在 17° 的入射光下,可以实现在 $12.8^{\circ}\sim 29.74^{\circ}$ 范围连续调制负折射角.这种光调制方法较之电调控方法具有响应速度快、结构简单、更易制作及易与其他光子器件进行集成等优点.可用于制作很多光控负折射器件,例如可制作可变焦的完美成像光子晶体平板透镜和光控路由,对于全光网络的发展也有一定的参考意义.

参考文献

[1] PENDRY J B. Focus issue: negative refraction and metamaterials [J]. *Optics Express*, 2003, **11**(7): 639-639.
 [2] LI Zhi-yuan, ZHANG Dao-zhong. Photonic crystal and metamaterials[J]. *China Basic Science*, 2005, **7**(6): 7-14.

李志远,张道中.光子晶体和负折射介质材料[J].中国杰出科学·科学前沿,2005,**7**(6):7-14.
 [3] ZHANG Xiang-dong. Image resolution depending on slab thickness and object distance in a two-dimensional photonic-crystal-based superlens [J]. *Physical Review B*, 2004, **70**(19): 195110-1-195110-9.
 [4] LI Zhi-yuan, LIN Lan-lan. Evaluation of lensing in photonic crystal slabs exhibiting negative refraction [J]. *Physical Review B*, 2003, **68**(24): 245110-1-245110-7.
 [5] BERRIER A, MULOT M, SWILLO M, et al. Negative refraction at infrared wavelengths in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**(7): 073902-1-073902-4.
 [6] LUO Chi-yan, JOHNSON STEVEN G, JOANNOPOULOS J D, et al. All-angle negative refraction without negative effective index [J]. *Physical Review B*, 2002, **65**(20): 201104-1-201104-4.
 [7] CUBUKCU E, AYDIN K, OZBAY E, et al. Negative refraction by photonic crystals[J]. *Nature*, 2003, **423**(6940): 604-605.
 [8] WANG X, REN Z F, KEMPA K. Unrestricted superlensing in a triangular two-dimensional photonic crystal [J]. *Optics Express*, 2004, **12**(3): 2919-2924.
 [9] WANG Dong-dong, WANG Yong-sheng, ZHANG Xi-qing, et al. Tunable band gaps in photonic crystals [J]. *Physics*, 2003, **32**(11): 757-761.
 王东栋,王永生,张希清,等.可调光子晶体研究进展[J].物理,2003,**32**(11):757-761.
 [10] REN Guang-jun, YAO Jian-quan, LI Guo-hua, et al. A study of magnetism controlled polarization of liquid crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(1): 152-155.
 任广军,姚建铨,李国华,等.液晶磁控偏光特性的研究[J].光子学报,2007,**36**(1):152-155.
 [11] REN Guang-jun, YAO Jian-quan, WANG Peng, et al. Research of magneto-optical rotation of liquid crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 994-998.
 任广军,姚建铨,王鹏,等.液晶磁致旋光的研究[J].物理学报,2007,**56**(2):994-998.
 [12] LIU Chen-yang, CHEN Lien-wen. Tunable field-sensitive polarizer using hybrid conventional waveguides and photonic crystal structures with nematic liquid crystals [J]. *Optics Communication*, 2005, **256**(1-3): 114-122.
 [13] LIU Chen-yang, CHEN Lien-wen. Tunable band gap in a photonic crystal modulated by a nematic liquid crystal [J]. *Physical Review B*, 2005, **72**(B1): 45133-1-45133-5.
 [14] WANG Jian, XIANG Ying, LIN Zi-yang, et al. Magnetic-field-induced freedericksz transition of a nematic liquid crystal doped with double-azo[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(24): 2610-2613.
 王坚,项颖,林子扬,等.双偶氮苯掺杂液晶在光场下的Freedericksz转变[J].科学通报,2000,**45**(24):2610-2613.
 [15] FENG Ya-yun, SONG Yu-long, LIU Shao-jin, et al. Azodyes with high dichroic ratio for LCD[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, **20**(5): 388-391.
 冯亚云,宋玉龙,刘绍锦,等.液晶器件用高二向色性偶氮染料的研究[J].液晶与显示,2005,**20**(5):388-391.
 [16] DENG Luo-gen, LUO Li-yuan. Light-induced molecular reorientation in dye-doped nematic liquid crystals[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, **20**(6): 481-487.
 邓罗根,罗丽媛.染料掺杂液晶中光致分子重新取向问题的研究进展[J].液晶与显示,2005,**20**(6):481-487.