

一维磁光光子晶体多通道非互易传输特性研究

王立松¹, 高永锋¹, 赵舒程¹, 何柳¹, 冯元会¹, 陈明阳¹, 周骏²

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²宁波大学理学院物理系, 浙江 宁波 315211

摘要 构建了一种介质层与磁性层交替排列的一维磁光光子晶体, 结构中间缺陷层采用介质材料。在缺陷层两侧分别施加方向相反的磁场, 该结构能够实现电磁波的非互易性传输。运用修正后的传输矩阵法计算分析结构的透射谱, 研究表明, 当缺陷层的厚度变化时, 在一定的波长范围内, 光子晶体光子禁带中会出现多个非互易通道, 且缺陷层的厚度越大, 相邻通道的间距越小, 禁带中所能容纳的通道数目越多。当缺陷层厚度为 7500 nm 时, 光子禁带中非互易通道数可达 7。所设计的光子晶体结构有望用来制作多通道光隔离器, 在密集波分复用光通信技术以及集成光路等领域得到应用。

关键词 光学器件; 磁光光子晶体; 光隔离器; 传输矩阵法; 非互易性

中图分类号 O734

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.042301

Study on Multiple Channel Non-Reciprocal Transmission Characteristics of One-Dimensional Magneto-Optical Photonic Crystal

Wang Lisong¹, Gao Yongfeng¹, Zhao Shucheng¹, He Liu¹,
Feng Yuanhui¹, Chen Mingyang¹, Zhou Jun²

¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

² Department of Physics, Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract One-dimensional magneto-optical photonic crystals with a dielectric defect layer, which is composed of dielectric layers and magnetic layers alternately, is designed. Non-reciprocal transmission of electromagnetic wave can be achieved when the external magnetic field in opposite directions are applied to the magnetic layers existing at both sides of the defect layer. The transmission spectra of the structure are analyzed by using the modified transfer matrix method. The results show that when the thickness of the defect layer changes, multiple non-reciprocal channels will appear in the photonic crystal photonic band gap in a certain wavelength range. The larger of the thickness of the defect layer is, the smaller of the spacing between adjacent channels is, and the number of channels that can be accommodated in the forbidden band is greater. Seven non-reciprocal channels in the photonic band gap can be achieved when the thickness of the defect layer is 7500 nm. The proposed structure can be used to fabricate multi-channel optical isolators, and expected to be widely used in areas such as density wavelength division multiplexing optical communication technology and integrated optical circuit system.

Key words optical devices; magneto-optical photonic crystal; optical isolator; transfer matrix method; non-reciprocal

OCIS codes 230.3240; 160.5298; 260.2110; 310.6860

收稿日期: 2017-08-16; 收到修改稿日期: 2017-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(61320106014)、江苏省高校自然科学基金(13KJB460004)、江苏大学高级人才基金(14JDG073)

作者简介: 王立松(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光通信器件方面的研究。E-mail: 814596120@qq.com

导师简介: 高永锋(1969—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光通信器件方面的研究。

E-mail: absgyf69@163.com(通信联系人)

1 引言

光学非互易传输器件,如光二极管^[1]、光隔离器^[2]、单向吸收器^[3]等是光通信系统中的关键器件之一,它可以阻止光路中各光学元件端面产生的反射光对光源和光路系统产生不良影响。传统的非互易器件多采用块状磁光晶体结构,体积较大,不利于集成。1997~1999年,Inoue等^[4-6]发现由磁性材料和非磁性材料周期性或准周期性交替排列形成的一维磁光光子晶体^[7-8]可以明显地增强磁光法拉第旋转效应;次年,他们又利用缺陷光子晶体的光局域性来增强磁光效应,为实现非互易性功能器件提供了一种新的思路。2004年,Kahl等^[9]选用铁石榴石设计了一种中间为磁性材料、两侧为普通介质材料和磁性材料交替排列的光子晶体来增强磁光效应。2010年,Goto等^[10]利用现有的薄膜制备技术,在实验中制备出了一维磁光光子晶体结构,并对其光谱进行了理论分析,进一步证明用磁光光子晶体制备非互易器件的可行性。2011年,Zhukovsky等^[2]研究了一种非对称克尔非线性光子晶体,其结构呈现明显的单向性且具有高透射率。2012年,Zamani等^[11]提出了几种可以实现宽带光隔离的一维磁光光子晶体结构;Fang等^[12-14]对 Cotton-Mouton (Voigt)模型的磁光光子晶体结构进行研究,在获得高透射率、高隔离度的同时,降低了层数,使结构更加简单。2017年,任坤等^[15]提出一种基于石墨烯和磁光半导体材料的结构,实现非互易光传输的主动调控。但是这些结构都只能实现单一频率的电磁波非互易传输,即只有一个非互易通道,显然不能满足当前光通信领域波分复用和密集波分复用的技术要求,且一些基于 Voigt 模型的一维磁性光子晶体的磁性层并不是只在单一方向磁化,而是在两个相反的方向磁化以破坏时空反演对称性,这在纳米和亚微米尺度结构上实施难度较大。

本文运用修正的传输矩阵法^[16-17]研究了一种介质层与磁性层交替周期排列的光子晶体,其缺陷层为介质材料,整个结构仅采用了两种材料,因此,该结构更加简单、易于制备。通过调节缺陷层厚度,在一定的频率范围内,所提结构在其透射谱禁带中出现多个非互易通道,实现多通道非互易传输。同时,缺陷层厚度的增加,可以有效地抑制两个相反方向的磁场耦合。

2 结构模型和理论方法

如图 1 所示,一维磁光光子晶体的结构可以表

示为 AMAM...MBM...MAMA,其中 A 为介质层, M 为磁性层, B 为缺陷层(介质材料)。A、M、B 层的厚度分别为 d_A 、 d_M 、 d , A、B 层的相对介电常数分别为 ϵ_A 、 ϵ_B , M 层外加沿 y 轴正向的磁场,在 Voigt 模型中其相对介电张量可以表示为

$$\tilde{\epsilon}_M = \begin{bmatrix} \epsilon & 0 & -i\Delta \\ 0 & \epsilon & 0 \\ i\Delta & 0 & \epsilon \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 ϵ 为磁性材料相对介电张量的主对角元, Δ 表示由沿 y 轴的外磁场引起的介电张量变化。

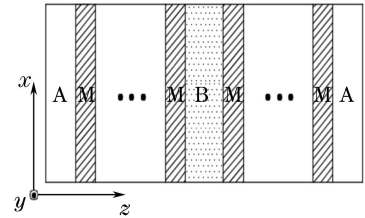


图 1 一维磁光光子晶体示意图

Fig. 1 Schematic of one-dimensional magneto-optical photonic crystal

TE 模和 TM 模在 Voigt 模型中是完全解耦的,且都具有时空反演对称性,为了方便研究,仅考虑 TM 模。设入射电磁波为 TM 波,入射面为 xoz 平面,磁场方向沿 y 轴,电场方向在 xoz 面内,光子晶体每一层中的场均为透射波与反射波的叠加,在光子晶体 j 层中传输的磁场可以表示为

$$H_{yj}(x, z) = H_{yj0}^+ \exp [i(k_{xj}x + k_{zj}z - \omega t)] + H_{yj0}^- \exp [i(k_{xj}x - k_{zj}z - \omega t)], \quad (2)$$

式中 k_{xj} 和 k_{zj} 分别为 j 层中沿 x 和 z 轴方向上的波矢量, ω 为入射电磁波的角频率, H_{yj0}^+ 和 H_{yj0}^- 分别为在 j 层中沿 z 轴正向和反向传输的电磁波的振幅。由(2)式可知 $H_{yj}(x, z) = H_{yj}^+ + H_{yj}^-$, 在光子晶体 i 层和 j 层界面处的磁场关系可以表示为

$$\mathbf{T}_i \begin{bmatrix} H_{yi}^+ \\ H_{yi}^- \end{bmatrix} = \mathbf{T}_j \begin{bmatrix} H_{yj}^+ \\ H_{yj}^- \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ M_j + N_j & M_j - N_j \end{bmatrix}$, $M_j = -ik_{xj} \Delta / \epsilon_0 \epsilon \epsilon' \omega$, $N_j = k_{zj} / \epsilon_0 \epsilon' \omega$, $\epsilon' = \epsilon^2 - \Delta^2 / \epsilon$, ϵ_0 为真空中介电常数。对于非磁性层,可令 $\Delta = 0$, $\mathbf{M}_{ji} = \mathbf{T}_j^- \mathbf{T}_i = 1/2N_j \begin{bmatrix} N_j - M_j + N_i + M_i & N_j - M_j - (N_i - M_i) \\ N_j + M_j - (N_i + M_i) & N_j + M_j + (N_i - M_i) \end{bmatrix}$, 则(3)式可以改写为

$$\begin{bmatrix} H_{yi}^+ \\ H_{yi}^- \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{ji} \begin{bmatrix} H_{yj}^+ \\ H_{yj}^- \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对于置于空气背景中的光子晶体结构 AMAM...MBM...MAMA, 传输矩阵可以表示为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{01} \mathbf{P}_1 \mathbf{M}_{12} \mathbf{P}_2 \cdots \mathbf{P}_i \mathbf{M}_{ij} \mathbf{P}_j \cdots \mathbf{P}_n \mathbf{M}_{n0}, \quad (5)$$

式中 $\mathbf{P}_j = \begin{bmatrix} \exp(-ik_{zj}d_j) & 0 \\ 0 & \exp(ik_{zj}d_j) \end{bmatrix}$ 为第 j 层传输波和反射波的相位变化, d_j 为第 j 层的厚度, 则:

$$\begin{bmatrix} H_{in}^+ \\ H_{in}^- \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} H_{out}^+ \\ H_{out}^- \end{bmatrix}, \quad (6)$$

由于整个光子晶体结构置于空气背景中, 因此, 最后空气层的反射波 $H_{out}^- = 0$ 。整个系统的透射系数可表示为

$$T = \left| \frac{H_{out}^+}{H_{in}^+} \right| = \left| \frac{1}{\mathbf{M}(1,1)} \right|, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{M}(1,1)$ 为传输矩阵 \mathbf{M} 中第一行第一列的元素。

3 计算结果和仿真分析

光子晶体缺陷层两侧介质层与磁性层交替排列的周期数都取 13, 在缺陷层的两侧沿 y 轴方向施加相反方向的磁场, 分别用 M 和 M' 表示两侧的磁性层, M 层处施加的磁场沿 y 轴正向, M' 层处的磁场沿 y 轴反向, 其相对介电张量为

$$\epsilon_{M'}^{\approx} = \begin{bmatrix} \epsilon & 0 & i\Delta \\ 0 & \epsilon & 0 \\ -i\Delta & 0 & \epsilon \end{bmatrix}, \quad (8)$$

则光子晶体结构可以表示为 $[A/M]_{13} [B] [M'/A]_{13}$,

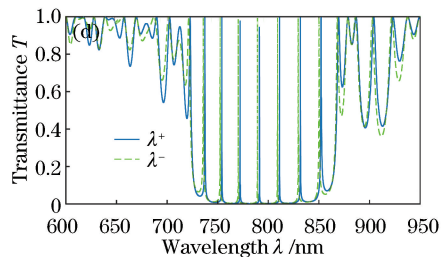
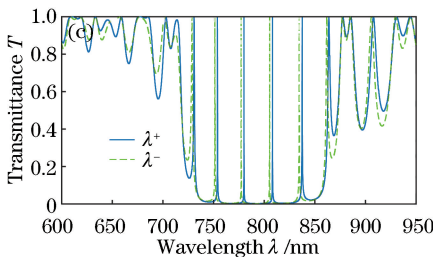
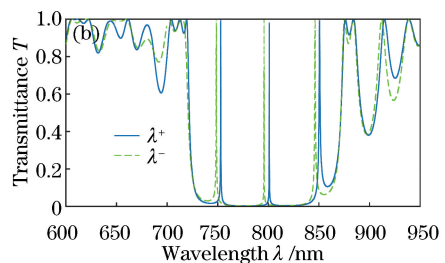
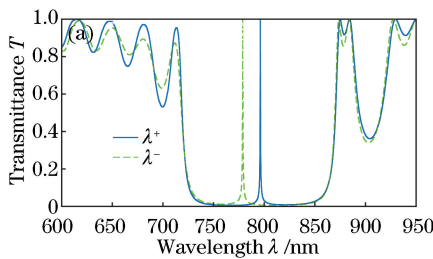


图 2 缺陷层厚度不同时磁光光子晶体的透射谱。(a) $d = d_0$; (b) $d = 10d_0$; (c) $d = 20d_0$; (d) $d = 30d_0$
Fig. 2 Transmission spectra of magneto-optical photonic crystals with different thicknesses of defect layer.
(a) $d = d_0$; (b) $d = 10d_0$; (c) $d = 20d_0$; (d) $d = 30d_0$

磁性层 M 与 M' 厚度相同, 即 $d_M = d_{M'} = 69.3$ nm, 设置 $\epsilon = 1.96, \Delta = 0.4, d_A = 152.8$ nm, 缺陷层 B 的初始厚度为 $d_0 = 250$ nm。且 A 层与 B 层为相同材料, $\epsilon_A = \epsilon_B = 4$, 结构的各层材料均为各向同性且无光的吸收, 忽略电磁波频率的变化对材料介电常数的影响。整个光子晶体仅采用了两种材料, 因此, 所设计的磁光光子晶体结构更易于制备。

图 2(a) 为电磁波以 22.5° 入射角分别由正向和反向斜入射到光子晶体表面的透射谱, 图中 λ^+ 和 λ^- 分别表示电磁波正反方向入射时出现透射峰时的峰值波长, 两条曲线在禁带中的透射峰明显分离, 正向传输时的透射峰值波长为 796.3 nm, 反向传输时为 778.9 nm。 796.3 nm 的电磁波正向传输透射率接近 1, 反向入射时则几乎截止; 而 778.9 nm 的电磁波反向传输时透射率接近 1, 而正向入射时截止。这表明外加相反方向的磁场破坏了结构时空反演对称性, 使结构能实现非互易传输, 但此时仅有一个非互易通道, 为了能够实现多个非互易通道, 需要改变缺陷层的厚度。

将缺陷层的厚度 d 增加到 2500 nm, 此时光子晶体结构的透射谱如图 2(b) 所示, 此时正反两个方向入射电磁波的透射谱在其禁带中分别出现 3 个高透射峰, 且 3 个高透射峰均相互分离, 表明禁带中的 3 个通道均是非互易的。当 $d = 5000$ nm 时, 光子晶体结构的透射谱如图 2(c) 所示, 结果表明随着结构缺陷层厚度的增加, 非互易通道数也随之增加, 此时, 结构能够实现 6 个非互易通道。当 $d = 7500$ nm 时, 如图 2(d) 所

示,结构具有 7 个非互易通道,但是缺陷层的厚度较大,正反两个传输谱透射峰的分度较小,这说明增大缺陷层的厚度能够增加非互易通道的数量,但是会降低非互易传输效果。

缺陷层厚度的变化是连续的,非互易通道数是离散的,且非互易通道的出现与消失并没有明确的界限,因此并不能十分精确地研究缺陷层厚度与非互易通道数的关系,但两者之间依然存在一定联系,如图 3 所示。随着缺陷层厚度的增大,相邻两个透射峰之间的间距减少,光子禁带所能容纳的通道数增加,且透射峰向长波方向移动,在禁带长波边缘处的非互易通道会逐渐移出禁带,禁带短波边缘处逐渐形成新通道,但是也会出现禁带长波边缘处通道消失而短波边缘的新通道尚未形成的情况,导致出现缺陷层厚度增大、非互易通道数减少的情况(图 3)。但就整体而言,随着缺陷层厚度的增大,非互易通道数呈现增加趋势。

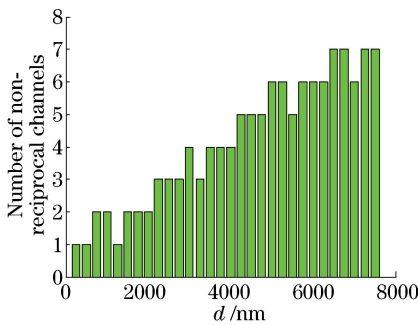


图 3 非互易通道数与缺陷层厚度关系图

Fig. 3 Relationship between the number of non-reciprocal channels and the thickness of the defect layer

对于一些基于 Voigt 效应的光子晶体结构模型,实现非互易传输需要在结构的磁性材料上施加相反方向的磁场,若两个方向的磁场距离较近,则很容易发生磁耦合,产生相互干扰,因此,在实际中很难得到理想的非互易传输效果。而所设计的结构将磁性层置于缺陷层的两侧,通过增加缺陷层的厚度实现多个非互易通道,这不仅解决了以往磁光光子晶体非互易器件只有单个通道的限制,同时能有效抑制两个方向相反的磁场的磁耦合。

缺陷层厚度分别为 d_0 、 $10d_0$ 、 $20d_0$ 、 $30d_0$ 时,结构的通道数不一样,但传输特性较为类似,因此,为了便于研究,仅分析缺陷层厚度为 d_0 时电磁波入射角 θ 对结构传输特性的影响。分析不同入射角时 λ^+ 和 λ^- 的位置变化规律,结果如图 4 所示,电磁波的入射角增大,正反方向入射的透射峰均向短波长方向移

动,电磁波入射角的变化尽管改变了非互易通道的位置,但是峰值透射率始终能保持在 0.99 以上。

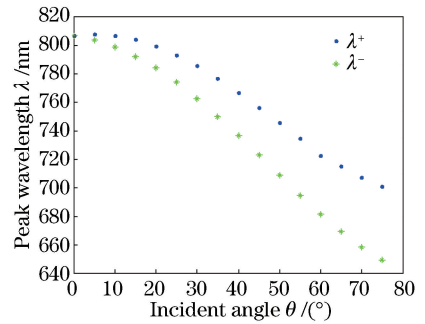


图 4 正反方向入射时的透射峰值波长随入射角的变化
Fig. 4 Variation of transmission peak wavelength versus incident angles with forward and backward directions

结构缺陷层的厚度在 250 nm 附近变化时,透射峰的波长与缺陷层厚度之间的关系如图 5 所示,随着缺陷层厚度增加,两个方向的峰值波长均向长波长方向移动。在相同的缺陷层厚度下,电磁波正向传输的峰值波长始终大于反向传输的峰值波长。

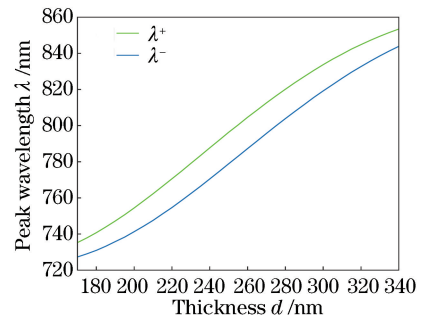


图 5 正反方向入射时的透射峰值波长随缺陷层厚度的变化
Fig. 5 Variation of transmission peak wavelength versus the thickness of the defect layer with forward and backward directions

为了验证计算结果,同时使通道的非互易效果可视化,利用有限元软件 Comsol 对光波在图 1 结构中的传输进行仿真模拟,采用图 2(a)的结构参数,即 $d_0 = 250$ nm,波长为 796.3 nm 的电磁波以 22.5° 的角度分别由正向和反向斜入射到光子晶体表面,光场分布的结果如图 6 所示,可以看出电磁波正向入射时在缺陷层附近发生强烈共振,最终光波能全部从光子晶体透射,如图 6(a)所示。反向入射时,入射光和反射光在光子晶体的同一侧产生干涉,电磁波被完全截止,如图 6(b)所示。结果表明理论计算与仿真结果完全一致。

4 结 论

设计了一种介质层与磁性层交替排列的磁光光子晶体结构,结构中引入一层介质层作为缺陷层。

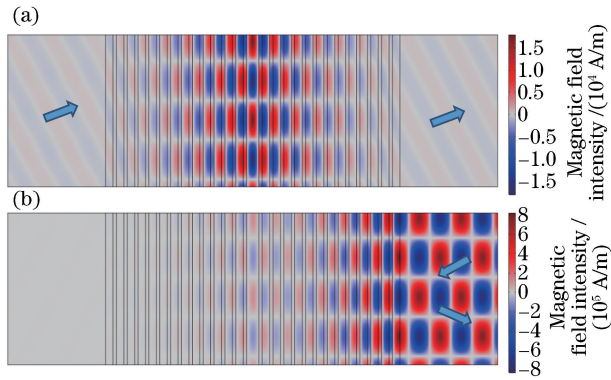


图 6 正反方向入射时磁光光子晶体中的磁场分布。

(a)正向入射;(b)反向入射

Fig. 6 Out-of-plane magnetic field profiles of the incident lights with forward and backward directions in the magneto-optical photonic crystal. (a) Forward incidence; (b) backward incidence

通过在缺陷层两侧分别施加相反方向的磁场使系统的时空反演对称性破裂,实现电磁波的非互易传输。通过改变缺陷层的厚度,实现多个非互易通道,当缺陷层的厚度约为 7500 nm 时,结构可以实现 7 个非互易通道,缺陷层厚度的增加也能有效抑制两侧方向相反磁场的磁耦合,同时,非互易通道的位置可以通过改变电磁波的入射角来调节,且始终保持接近 1 的透射率。整个结构仅采用两种材料,便于制造。所设计的磁光光子晶体结构可以用来实现多通道光隔离器,有望在密集波分复用光通信技术以及集成光路等领域得到应用。

参 考 文 献

- [1] Hu J F, Liu B, Liang H Q, *et al.* Achieving nonreciprocal transmission by breaking symmetry of nonlinear Fano cavity structure in photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0323002.
胡金凤, 刘彬, 梁红勤, 等. 打破光子晶体非线性 Fano 腔结构对称性实现单向传输 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0323002.
- [2] Zhukovsky S V, Smirnov A G. All-optical diode action in asymmetric nonlinear photonic multilayers with perfect transmission resonances [J]. *Physical Review A*, 2011, 83(2): 1293-1304.
- [3] Ma R K, Tang Y M, Wang J J, *et al.* One-way absorber based on coupling of magnetic surface plasmonic resonance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0117001.
马荣坤, 汤月明, 王纪俊, 等. 基于磁表面等离子体共振耦合的电磁波单向吸收器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0117001.
- [4] Inoue M, Fujii T. A theoretical analysis of magneto-optical Faraday effect of YIG films with random multilayer structures [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(8): 5659-5661.
- [5] Inoue M, Arai K, Fujii T, *et al.* Magneto-optical properties of one-dimensional photonic crystals composed of magnetic and dielectric layers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(11): 6768-6770.
- [6] Inoue M, Arai K, Fujii T, *et al.* One-dimensional magnetophotonic crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(8): 5768-5770.
- [7] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [8] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [9] Kahl S, Grishin A M. Enhanced Faraday rotation in all-garnet magneto-optical photonic crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(9): 1438-1440.
- [10] Goto T, Baryshev A V, Tobinaga K, *et al.* Faraday rotation of a magnetophotonic crystal with the dual-cavity structure [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(9): 09A946.
- [11] Zamani M, Ghanaatshoar M. Adjustable magneto-optical isolators with flat-top responses [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24524-24535.
- [12] Fang Y T, Chen L K, Zheng J, *et al.* Nonreciprocal channels of light through the coupling of two nonsymmetric Tamm magnetoplasmon polaritons [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 1-11.
- [13] Fang Y T, Han L, Gao Y F. Nonreciprocal optical tunnelling through evanescently coupled Tamm states in magnetophotonic crystals [J]. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 2015, 70(4): 205-211.
- [14] Tang Y M, Fang Y T, Lü C H, *et al.* Nonreciprocal transmission based on nonsymmetric coupling of magnetic microcavity in photonic crystal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0606003.
汤月明, 方云团, 吕翠红, 等. 光子晶体磁性微腔非对称耦合的非互易传输 [J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0606003.
- [15] Ren K, Fan J Y, Ren X B. Active control of nonreciprocal optical transmission direction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0726003.
任坤, 范景洋, 任晓斌. 非互易光传输方向的主动调控 [J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0726003.

- [16] Biancalana F. All-optical diode action with quasiperiodic photonic crystals[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104(9): 093113.
- [17] Ma R K, Wang J J, Fang Y T, *et al.* Transfer matrix method of one-dimensional photonic crystal composed of gyromagnetic materials [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(1): 011601.
- 马荣坤, 王纪俊, 方云团. 基于旋磁材料一维光子晶体传输矩阵算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 011601.