

基于磁光子晶体的太赫兹滤波器和光开关

梁龙学, 张晓金*, 吴小所, 张云霞, 赵丹

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 设计了基于石榴石型铁氧体磁性材料的光子晶体滤波器和光开关。利用平面波展开(PWE)法,分析了特定半径下光子晶体的能带结构,利用时域有限差分(FDTD)法分析了磁场改变时磁性材料耦合频率的变化。结果表明,该器件在不加磁场时具有优良的选频滤波功能,各目标光信号的透射率均达 90%以上,且信道串扰小;加磁场后,耦合腔的耦合频率改变,器件处于关断状态。该器件的关断最大稳定时间达 26.7 ps,最大透射率仅为 8%,关断效果明显,具有良好的开关特性。

关键词 集成光学; 太赫兹(THz)滤波器; 平面波展开(PWE)法; 光开关; 时域有限差分(FDTD)法

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0513002

Terahertz Filter and Optical Switch Based on Magnetic-Photonic Crystals

Liang Longxue, Zhang Xiaojin, Wu Xiaosuo, Zhang Yunxia, Zhao Dan

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract The photonic crystal filter and optical switch are designed based on the garnet-type ferrite magnetic material. The band structure of the photonic crystal with a specific radius is analyzed by the plane wave expansion method (PWE), and the change of coupling frequency of magnetic materials with the magnetic field is analyzed by the finite-difference time-domain (FDTD) method. The results show that, when the magnetic field is not added, this device has excellent frequency selection and filtering functions, the transmissivity of each target light signal is above 90% and the channel crosstalk is small. After the addition of the magnetic field, the coupling frequency of the coupling cavity changes and the device is in a closed state. The maximum stable closing time of this device is 26.4 ps and the maximum transmissivity is only 8%, which indicates that the cut-off effect is obvious and it possesses a good switching characteristic.

Key words integrated optics; terahertz filter; plane wave expansion (PWE) method; optical switch; finite-difference time-domain (FDTD) method

OCIS codes 130.4815; 050.5298; 160.3820; 230.5298

1 引 言

太赫兹(THz)波泛指频率在 0.1~10 THz(波长在 0.03~3 mm)范围内的电磁波^[1],其频率处于微波和红外波频段之间,这决定了它具有很多优良特性。性能优良、易于集成的 THz 滤波器^[2]和光开关^[3]一直是 THz 波领域的热门研究方向之一。光子晶体^[4]是由两种或两种以上不同折射率材料周期性分布而成的一种人工材料,具有光子带隙^[5]和光子局域两个基本特性。利用该特性可以设计出许多

光子晶体器件,如光子晶体光纤横向应力传感器^[6]、光子晶体的偏振选择横电/横磁(TE/TM)波功率分配器^[7]和光子晶体三光波导方向耦合器^[8]等。基于 THz 波设计的光子晶体器件,有制作工艺简单,集成度高等优点,并且可以实现 THz 波的低损耗传输,有很好的应用价值。2010 年,苏坚等^[9]提出了一种基于二维硅光子晶体的新型太赫兹波调制器,它能够对太赫兹波的通、断状态进行调制。2016 年,倪媛等^[10]提出了一种基于光子晶体环形腔的四波长 THz 滤波器,通过对该滤波器进行参数调节,可

收稿日期: 2017-10-17; 收到修改稿日期: 2017-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(61366006)

作者简介: 梁龙学(1965—),男,本科,副教授,主要从事微电子技术及集成光学器件方面的研究。

E-mail: llxue@mail.lzjtu.cn

* 通信联系人。E-mail: 1217075164@qq.com

以滤出相应的四个太赫兹波长。

磁性材料可通过外加磁场来改变其光学性质^[11],因此用磁性材料制作的磁光子晶体得到了广泛关注。2016年,腾晨晨等^[12]提出了一种基于石榴石型铁氧体磁性材料的太赫兹滤波器,实现了利用点缺陷对 THz 波进行滤波的功能。2017年,甘雨莹等^[13]提出了基于二维磁光子晶体的 THz 选路光开关和分束器,实现了 THz 波的选路开关和分束功能。

本文设计了基于石榴石型铁氧体磁性材料的 THz 滤波器和光开关,利用耦合腔的耦合特性和磁性材料的特殊性,实现了对特定波长 THz 波的滤波和开关功能。该滤波器结构简单,易于控制,不需要改变晶体结构和机械转动,只需改变外加磁场大小,就能实现滤波和开关功能,在 THz 波的集成光路中具有应用价值。

2 结构设计及能带分析

2.1 结构设计

所设计的磁光子晶体 THz 滤波器和光开关的结构如图 1 所示。器件采用正方晶格结构,在空气中填充 41×21 个圆形硅介质柱,介质柱的折射率 $n = 3.45$,晶格常数 $a = 30 \mu\text{m}$,用平面波展开(PWE)法^[14]计算得介质柱的半径 $r = 0.2a$ 。在完整光子晶体的中部横轴方向去掉一排介质柱,形成一条直波导,左边是输入端口,右边是输出端口(output 2)。在中间波导的上侧,移除部分介质柱并且调节拐角处介质柱的位置,形成波导及输出端口(output 1),同时引入 6 个半径为 $0.3a$ 的石榴石型铁氧体磁性介质柱,构成耦合 I 区。用同样的方式,在中间波导下侧构造出波导和输出端口(output 3),并且将 6 个半径为 $0.14a$ 的石榴石型铁氧体磁性介质柱等间距地插入光子晶体中,得到耦合 II 区。THz 光信号从输入端口输入,耦合进入 I 区和 II 区的光信号

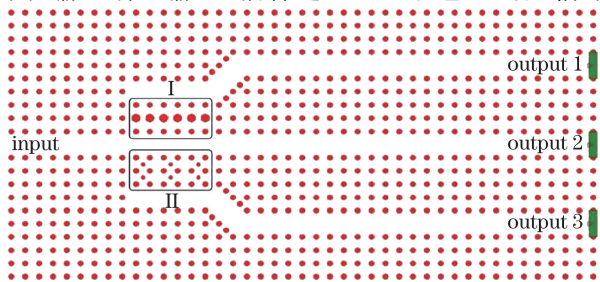


图 1 光子晶体 THz 滤波器及光开关结构图

Fig. 1 Structural diagram of THz filter and optical switch based on photonic crystals

分别从 output 1 和 output 3 输出,其他频率光信号从 output 2 输出。

2.2 能带分析

用平面波展开法对光子晶体的能带结构进行计算。平面波展开法是利用布洛赫定理将麦克斯韦方程组化成本征方程,通过求解本征方程的根,得到光子晶体的本征频率、色散关系、能带分布和模式分布。光子晶体本征方程为

$$\sum_{\mathbf{G}'} \epsilon^{-1}(\mathbf{G} - \mathbf{G}') |K + \mathbf{G}| \times |K + \mathbf{G}'| e(\mathbf{G}) = \frac{\omega^2}{c^2} e(\mathbf{G}), \quad (1)$$

式中 \mathbf{G} 和 \mathbf{G}' 为光子晶体的倒格矢, K 为展开系数, ϵ 为介电常数, e 为电场强度, ω 为变电磁场的振动角频率, c 为光速。将电磁场倒易空间以平面波形式展开得到

$$e(\mathbf{G}) = \begin{bmatrix} e_2 e'_2 & -e_2 e'_1 \\ -e_1 e'_2 & e_1 e'_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h'_1 \\ h'_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\epsilon^{-1}(\mathbf{G}) = \begin{cases} \frac{1}{\epsilon_b} + \left(\frac{1}{\epsilon_a} - \frac{1}{\epsilon_b} \right) \frac{\pi r^2}{a^2}, & |\mathbf{G}| = 0 \\ \left(\frac{1}{\epsilon_a} - \frac{1}{\epsilon_b} \right) \frac{\pi r^2}{a^2} \frac{J_1(\mathbf{G}\mathbf{R})}{|\mathbf{G}\mathbf{R}|}, & |\mathbf{G}| \neq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 e_1, e_2 为平面波磁场分量两个偏振方向的单位矢量, $e'_1 = e_1 \times e_2, e'_2 = e'_1 \times e_2, h'_1, h'_2$ 分别为平面波磁场分量在 e_1, e_2 方向上的振幅, ϵ_a 为周期圆柱的介电常数, ϵ_b 为基体材料的介电常数, a 为晶格常数, r 为介质柱半径, \mathbf{R} 为磁矢量, $J_1(\mathbf{G}\mathbf{R})$ 为贝塞尔函数。根据布洛赫定理,将光子晶体的介电常数 $\epsilon(r)$ 、电矢量大小 $R(r)$ 和磁矢量大小 $H(r)$ 展开为傅里叶级数,然后把(2)式和(3)式代入(1)式便可求出 TE 模的本征频率。

利用 PWE 法得到光子晶体的禁带结构如图 2 所示,其中 λ 为波长。可以看出,TE 模存在两条带隙,第一条禁带频率范围为 $0.283(a/\lambda) \sim 0.418(a/\lambda)$,对应波长为 $105.226 \sim 72.098 \mu\text{m}$;第二条禁带频率为 $0.721(a/\lambda) \sim 0.746(a/\lambda)$,对应波长为 $41.609 \sim 40.214 \mu\text{m}$ 。第一条禁带带隙宽度大,因此选第一条禁带设计光子晶体滤波器。

2.3 理论分析

在光子晶体中沿铁氧体柱的轴方向外加磁场,由于 TM 模的磁场方向与外加磁场方向平行,磁性材料的偶极矩不与外加磁场发生作用,磁光子晶体能带结构不发生变化,因此这里不讨论 TM 模。TE 模的磁场方向与外加磁场方向垂直,可以引起外磁

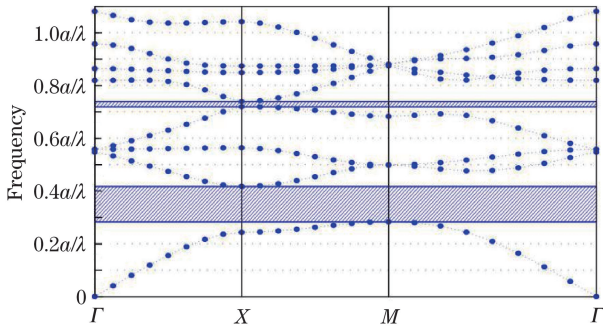


图 2 完整光子晶体 TE 能带结构

Fig. 2 TE band structure of complete photonic crystal

场磁偶极子的运动^[15],此时铁氧体材料磁导率为

$$\mu = \frac{(\omega_{\text{ex}} + \omega_{\text{m}})^2 - \omega^2}{\omega_{\text{ex}}(\omega_{\text{ex}} + \omega_{\text{m}}) - \omega^2}, \quad (4)$$

式中外磁场强度 $\omega_{\text{ex}} = \gamma B_{\text{ex}}$, 磁性材料自身磁场强度 $\omega_{\text{m}} = 4\pi\gamma M_{\text{s}}$, B_{ex} 为外感应磁场强度, M_{s} 为饱和磁化率, γ 为旋磁比^[16]。饱和铁氧体磁性材料通常取 $\omega_{\text{m}} = 1.0(2\pi c/a)$ ^[17], 将 ω 和 ω_{ex} 设为(4)式的自变量并分别取值为: $0 \leq \omega \leq 1(2\pi c/a)$, $0 \leq \omega_{\text{ex}} \leq 8(2\pi c/a)$ 。通过计算可知, 当外磁场强度较小 ($\omega_{\text{ex}} \leq 5$) 时, 磁导率 μ 随外磁场的增大而减小; 当逐渐增大磁场 ($\omega_{\text{ex}} \geq 5$) 时, 磁导率趋近于 1。因此, 磁导率随外磁场的增大而逐渐变小; 磁导率随频率变化很小, 仅当外磁场强度接近饱和磁化强度时, 磁导率才随频

率的增大而增大^[18]。对于石榴石型铁氧体磁性材料, 不加磁场时, 其磁导率 $\mu = 1$, 折射率 $n = \sqrt{\epsilon\mu} = \sqrt{12.96 \times 1} = 3.60$; 外加磁场时, $\mu = 1.5$, $n = \sqrt{\epsilon\mu} = \sqrt{12.96 \times 1.5} = 4.41$ 。由(4)式计算可得, 外磁场 $B_{\text{ex}} = 2(\gamma^{-1})$, 其值为 22.8 T。耦合区中插入的磁性介质柱的半径以及介质柱的排列决定着耦合区的耦合频率大小, 用 PWE 法计算可知, 当磁性材料介质柱半径为 $0.3a$ (耦合 I 区) 和 $0.14a$ (耦合 II 区) 时, 耦合频率在硅介质柱光子晶体禁带范围 $0.283(a/\lambda) \sim 0.418(a/\lambda)$ 内。

3 仿真结果与分析

利用时域有限差分(FDTD)法^[19]仿真了有、无磁场时该结构的电场分布, 并得到了输出端口的透射率。用 Rsoft 软件进行扫描可知, 耦合 I 区有两个模式适合滤波器纵向传播, 归一化频率分别为 $0.347(a/\lambda)$ 和 $0.361(a/\lambda)$, 现将归一化频率为 $0.361(a/\lambda)$ (对应波长 $\lambda_1 = 83.102 \mu\text{m}$) 的波加在该结构的输入端, 观察三个波导的输出情况及端口透射率。该波在加磁场和不加磁场时的电场分布和输出端口透射率曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 当不加磁场时, 目标光信号进入耦合 I 区, 并从端口 output 1

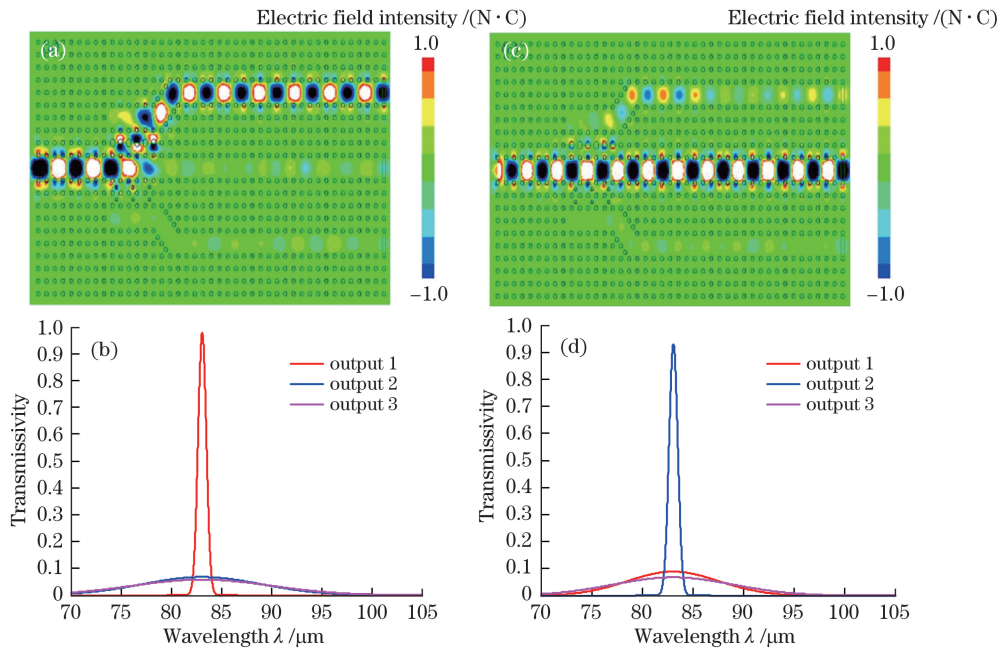


图 3 波长为 $82.102 \mu\text{m}$ 的光信号的电场分布及输出端口透射率。(a)未加磁场电场分布;

(b)未加磁场透射率;(c)加磁场电场分布;(d)加磁场透射率

Fig. 3 Electric field distribution and transmissivity at output port for optical signal with wavelength of $82.102 \mu\text{m}$.

(a) Electric field distribution without magnetic field; (b) transmissivity without magnetic field;

(c) electric field distribution with magnetic field; (d) transmissivity with magnetic field

以 98% 的透射率输出;当加磁场时,目标光信号只有少量进入耦合 I 区,端口 output 1 的透射率仅为 8%。

耦合 II 区有三个模式适合滤波器纵向传播,归一化频率分别为 $0.323(a/\lambda)$, $0.332(a/\lambda)$, $0.337(a/\lambda)$ 。用归一化频率为 $0.323(a/\lambda)$ (对应波

长 $\lambda_2 = 92.879 \mu\text{m}$) 的波进行仿真,仿真结果如图 4 所示。不加磁场时,目标光信号进入耦合 II 区,且以 95% 的透射率从端口 output 3 输出;而加磁场时,目标光信号也只有少量进入耦合 II 区,端口 output 3 的透射率仅为 6%。

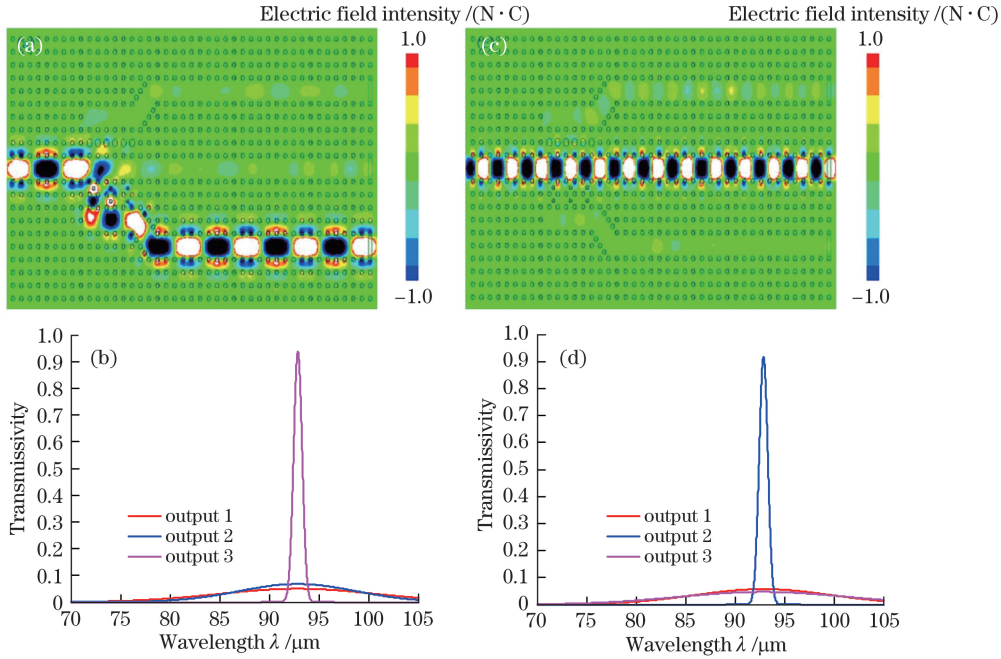


图 4 波长为 $92.879 \mu\text{m}$ 的光信号的电场稳态分布及输出端口透射率。(a)未加磁场电场分布;(b)未加磁场透射率;(c)加磁场电场分布;(d)加磁场透射率

Fig. 4 Electric field distribution and transmissivity at output port for optical signal with wavelength of $92.879 \mu\text{m}$.

(a) Electric field distribution without magnetic field; (b) transmissivity without magnetic field; (c) electric field distribution with magnetic field; (d) transmissivity with magnetic field

滤波器的信道隔离度 I_c 是反映滤波器各滤波通道之间的抗串扰能力,通常表示为 $I_c = 10 \lg(P_1/P_2)$, 其中 P_1 为耦合腔中的光功率; P_2 为主波导中的光功率。信道隔离度越大表示滤波器性能越好^[10]。该结构的性能参数见表 1, 其中输出端口 output 1 处的光信号波长为 $83.102 \mu\text{m}$, 输出端口 output 3

处的光信号波长为 $92.879 \mu\text{m}$ 。可以看出,该结构的两个输出端口 output 1 和 output 3 在滤波时的透射率高且信道隔离度大,而在关断时透射率低,且最大关断时间短,该结构可以同时作为两个不同频率太赫兹波的滤波器和光开关,实现滤波功能和开关功能。

表 1 滤波器和光开关的性能参数

Table 1 Performance parameters of filter and optical switch

Output port	Transmissivity		Channel isolation I_s	Closing time t / ps
	(with magnetic field) / %	(without magnetic field) / %		
Output 1	98	8	16.90	25.3
Output 3	95	6	12.79	26.7

4 结 论

设计了一种 THz 滤波器及光开关,该滤波器由一个输入波导、两个耦合腔和三个输出波导组成。在耦合腔局部位置加入半径不同的石榴石型铁氧体

磁性介质柱,使得在加磁场和不加磁场时耦合 I 区和 II 区都能达到最佳状态。利用 PWE 法和 FDTD 法分别得到完整光子晶体的禁带结构和三个输出端的电场分布。研究结果表明,当耦合区不加磁场时,波长为 $83.102 \mu\text{m}$ 和 $92.879 \mu\text{m}$ 的光信号分别高效

地耦合到耦合 I 区和 II 区,实现了两个输出端透射率均达 90% 以上的滤波效果,并且两输出通道的信道隔离度分别为 16.90 和 12.79,信道串扰较小;通过控制耦合区的外加磁场以改变其耦合频率,使目标光信号在两个输出端的透射率低于 8%,且实现“通”与“断”的最大稳定时间为 26.7 ps,实现了光开关功能。该滤波器可以实现滤波与光开关功能,并且仿真结果与数值计算结果较一致,因此其在 THz 频段光波信号的控制与滤波方面具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Fleming J W. High-resolution sub millimeter-wave Fourier-transform spectrometry of gases[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1974, 22(12): 1023-1025.
- [2] Yu H X, Du C M, Liang G D. Tunable wavelength filter based on photonic crystal with complex periodical structure[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(3): 44-48.
于海霞, 杜春梅, 梁广东. 复周期结构光子晶体波长可调谐滤波器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(3): 44-48.
- [3] Li L, Liu G Q, Chen Y H. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123002.
黎磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123002.
- [4] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physics Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [5] Khan M M. Nano structure based power splitter design by using 2D photonic crystals[J]. Journal of Modern Science and Technology, 2013, 1(1): 176-187.
- [6] Lü J T, Wang C M, Zhu C H, *et al.* Dual-core photonic crystal fiber transverse-stress sensor based on surface plasmon resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0828002.
吕健滔, 王春明, 朱晟昇, 等. 基于表面等离子体共振的双芯光子晶体光纤横向应力传感器[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0828002.
- [7] Lin M, Qiu W B, Xi X, *et al.* Polarization selective power splitters for TE and TM waves based on two-dimensional photonic crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1223001.
林密, 邱文标, 郗翔, 等. 基于二维光子晶体的偏振选择 TE/TM 波功率分配器[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1223001.
- [8] Su K, Wang Z M, Liu J J. Three waveguides directional coupler based on two dimensional square lattice photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0323002.
苏康, 王梓名, 刘建军. 二维正方晶格光子晶体三光波导方向耦合器[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0323002.
- [9] Su J, Chen H M. Terahertz wave modulator based on liquid-crystal-filled photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2710-2713.
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.
- [10] Ni Y, Ji K, Wang J L, *et al.* Four-wavelength THz filter based on photonic crystal ring resonator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(10): 103101.
倪媛, 季珂, 汪静丽, 等. 光子晶体环形腔的四波长 THz 滤波器[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(10): 103101.
- [11] Zhang H W, Li J, Su H, *et al.* Development and application of ferrite materials for low temperature co-fired ceramic technology[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(11): 12-32.
- [12] Teng C C, Zhou W, Zhuang Y Y, *et al.* Low loss and narrow-band THz filter based on magnetic photonic crystals[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 024210.
滕晨晨, 周雯, 庄煜阳, 等. 基于磁光子晶体的低损耗窄带 THz 滤波器[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 024210.
- [13] Gan Y Y, Li P L, Zhang Y F, *et al.* THz routing switch and beam splitter based on magnetic photonic crystals[J]. Study on Optical Communications, 2017, 199(1): 44-46.
甘雨莹, 李培丽, 张元方. 基于磁光子晶体的太赫兹选路开关和分束器[J]. 光通信研究, 2017, 199(1): 44-46.
- [14] Baboly M G, Soliman Y, Su M F, *et al.* Enhanced plane wave expansion analysis for the band structure of bulk modes in two-dimensional high-contrast solid-solid phononic crystals[J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications, 2014, 12(5): 487-492.
- [15] Kee C S, Kim J E, Park H Y, *et al.* Two-dimensional tunable magnetic photonic crystals[J]. Physical Review B, 2000, 61: 15523.
- [16] Sodha M S, Srivastava N C. Microwave propagation in ferrimagnetics[M]. Boston: Springer, 1981: 52-55.
- [17] Bi H X, Zhou Y S, Zhao L M, *et al.* Magnetron photonic switching circuit in photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5718-5721.
毕海星, 周云松, 赵丽明, 等. 光子晶体中的磁控光子开关线路[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5718-

- 5721.
- [18] Guo Z, Fan F, Bai J J, *et al.* Magnetically tunable magnetic photonic crystal for terahertz switch and filter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 074218.
郭展, 范飞, 白晋军, 等. 基于磁光子晶体的磁控可调谐太赫兹滤波器和开关 [J]. *物理学报*, 2011,
- 60(7): 074218.
- [19] Manzanares-Martinez J, Castro-Garay P. Modeling the tuning of lasing in liquid crystal based one-dimensional photonic crystals using the finite difference time-domain method[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Application*, 2010, 24(14/15): 1867-1875.