

doi:10.3788/gzxb20144310.1023003

一维磁光子晶体实现光隔离的应用研究

费宏明^{a,b}, 武建加^{a,b}, 杨毅彪^{a,b}, 陈智辉^{a,b}, 刘欣^{a,b}

(太原理工大学 a 新型传感器与智能控制教育部重点实验室; b 物理与光电工程学院, 太原 030024)

摘 要:采用 4×4 传输矩阵法研究了两种结构一维磁光子晶体的光隔离特性. 结构一在外加磁场与光路光轴方向呈 52.0° 时, 用 $7.96 \mu\text{m}$ 的总厚度在中心波长附近 0.95 nm 范围内实现了光隔离, 在此范围之内法拉第旋转角和透射率分别在 $45^\circ \sim 50.65^\circ$ 和 $97.01\% \sim 99.96\%$ 之间波动, 结构仅包含 43 层光学薄膜, 易于实际制备; 结构二在外加磁场与光路光轴方向呈 32.7° 时, 用 $11.54 \mu\text{m}$ 的总厚度在中心波长附近 0.85 nm 范围内实现了光隔离, 在此范围之内法拉第旋转角和透射率分别在 $45^\circ \sim 48.55^\circ$ 和 $98.85\% \sim 100\%$ 之间波动, 结构包含 73 层光学薄膜, 与结构一相比, 该结构具有更高的透射率和更平坦的光谱. 用这两种结构的一维磁光子晶体代替目前商用磁光隔离器中的块状磁光介质, 可实现磁光隔离器的集成化.

关键词:磁光隔离器; 光谱; 4×4 传输矩阵法; 一维磁光子晶体; 光隔离

中图分类号: O734

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)10-1023003-4

The Application Research of One-dimensional Magneto-photonic Crystals for Magneto-optical Isolators

FEI Hong-ming^{a,b}, WU Jian-jia^{a,b}, YANG Yi-biao^{a,b}, CHEN Zhi-hui^{a,b}, LIU Xin^{a,b}

(a Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education;

b Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024, China)

Abstract: The 4×4 transfer matrix method was used to investigate the optical isolation property of two different one-dimensional magneto-photonic crystal structures. For the first structure, when the angle between applied magnetic field and optical axis was set as 52.0° , it could realize the optical isolation around 0.95 nm with total thickness of $7.96 \mu\text{m}$, possesses Faraday rotation angle and transmittance wave were at $45^\circ \sim 50.65^\circ$ and $97.01\% \sim 99.96\%$. This structure with 43 layers is applicable in the practical application and fabrication. Regarding the other structure, when the angle between applied magnetic field and optical axis was set as 32.7° , optical isolation reached 0.85 nm broad with total thickness of $11.54 \mu\text{m}$, the Faraday rotation angle fluctuated from $45.0^\circ \sim 48.55^\circ$ and the transmittance ranged from $98.85\% \sim 100\%$. Integrable optical isolators can be accessed by using the two proposed one-dimensional magneto-photonic crystal structures instead of the bulk type magneto-optical materials in bulk type optical isolator in commerce.

Key words: Optical isolator; Spectrum; 4×4 transfer matrix method; One-dimensional magneto-photonic crystal; Isolation

OCIS Codes: 230.3810; 230.3240; 160.5298

0 引言

在一维光子晶体^[1-6]中加入磁光介质缺陷构成一维磁光子晶体, 在外加磁场作用下, 利用光子晶体的光

子禁带和光子局域特性, 可增强磁光介质的法拉第旋光效应^[7-9]. 一维磁光子晶体在实现大的法拉第旋转角的同时具有高的透射率^[10-15]. 目前用于磁光隔离器的块状磁光介质, 在厚度最少达到 $450 \mu\text{m}$ 的条件下, 法

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 11247277, 61307069, 61340053) 和山西省自然科学基金 (Nos. 2013011007-1, 2013021017-3) 资助

第一作者: 费宏明 (1982-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光子晶体理论与器件设计. Email: feihm187491@126.com

收稿日期: 2014-02-24; 录用日期: 2014-05-06

<http://www.photon.ac.cn>

拉第旋转角才可达到 45° ^[7], 无法满足磁光隔离器集成化的要求. 用一维磁光子晶体来代替目前商用磁光隔离器中的块状磁光介质做为法拉第转子, 不仅可以实现 45° 的法拉第旋转角, 还可以减小法拉第旋转器的尺寸, 同时入射光的透射率很高, 为光隔离器的集成化提供一种新思路.

用一维磁光子晶体作为法拉第转子, 实现光隔离的原理与现有磁光隔离器的光隔离原理一致: 在光路中传播的光通过起偏器后变为线性偏振光, 线性偏振光在外加磁场的作用下, 通过一维磁光子晶体后偏振方向旋转 45° , 最后通过检偏器到达后面的光路中; 从光路中反射回来的光, 通过检偏器以及外加磁场作用下的一维磁光子晶体后, 偏振方向再次旋转 45° , 正好与起偏器的透光轴成 90° 夹角, 无法通过起偏器而被隔离. 2010 年, T. Goto 等利用薄膜制备技术, 制备出包含 43 层光学薄膜的双缺陷一维磁光子晶体结构^[19], 并对该结构的光谱性质进行了理论分析. 2003 年 H. Kato 制备出了包含 25 层光学薄膜的单缺陷一维磁光子晶体结构^[20], 再一次证明了用一维磁光子晶体实现光隔离的可行性. 2002 年, H. Kato 等针对 1 300 nm 的光通信波长, 设计出两种可实现近似 45° 的法拉第旋转角和近似 100% 透射率的一维磁光子晶体结构^[16]. 2012 年, M. Ghanaatshoar 和 M. Zamani 等针对 1 550 nm 的光通信波长, 在外加磁场与光路光轴方向平行时, 设计出一种可实现 87.72° 的法拉第旋转角和 100% 透射率的一维磁光子晶体结构, 利用在水平面内旋转外加磁场的方法, 可将此结构的法拉第旋转角调节到 45° ^[10-11]. 这两方案中一维磁光子晶体结构的光谱响应极窄, 只能在中心波长处实现光隔离, 而在实际应用中光源发出的光波会在中心波长附近的小范围内波动, 故两方案中的一维磁光子晶体结构不适用. 2012 年, M. Ghanaatshoar 和 M. Zamani 在一维光子晶体中合理引入多层磁光介质缺陷, 实现了最佳效果为 7.2 nm 的宽带光隔离^[17]. 该方案中的一维磁光子晶体结构可在宽带通信中实现光隔离, 也可用来实现中心波长附近小范围内的光隔离. 但该方案中最简结构也需要由 95 层光学薄膜构成, 在实际应用中不易制备, 而且制备成本较高. 2012 年, M. Ghanaatshoar 和 M. Sharifian 的研究指出, 用一维磁光子晶体来实现光隔离需要高准确度的薄膜制备技术^[10, 17-18]. 这就需要在现有薄膜制备技术之上, 寻找最优化的一维磁光子晶体结构来降低实际制备难度.

为了寻找更易制备的一维磁光子晶体结构来实现中心波长附近范围内的光隔离, 本文利用 4×4 传输矩阵法研究了两种一维磁光子晶体的光隔离器性能.

1 理论分析

选取 $\lambda_0 = 1\ 550\ \text{nm}$ 的光通信波长作为研究的中心

波长. 选取砷化镓 GaAs 作为构成光子晶体的高折射率材料, 用 H 表示; 选取二氧化硅 SiO_2 和钆镱石榴石 GGG 作为构成光子晶体的低折射率材料, 分别用 L_1 和 L_2 表示; 选取磁光介质掺铈钇铁石榴石 $\text{Ce} : \text{YIG}$ 作为缺陷层材料, 用 M 表示. 在 1 550 nm 的中心波长下, 这些电介质材料的折射率分别为: $n_{\text{GaAs}} = 3.374$ 、 $n_{\text{SiO}_2} = 1.495$ 、 $n_{\text{GGG}} = 1.926$ ^[17-18]; 由于存在外加磁场的作用, $\text{Ce} : \text{YIG}$ 的介电常量是一个三阶张量

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & i\epsilon_{2,xy} & -i\epsilon_{2,rx} \\ -i\epsilon_{2,xy} & \epsilon_1 & 0 \\ i\epsilon_{2,rx} & 0 & \epsilon_1 \end{pmatrix}$$

式中 $\epsilon_{2,xy} = \epsilon_2 \cos \phi$ 、 $\epsilon_{2,rx} = \epsilon_2 \sin \phi$, ϕ 为外加磁场与光路光轴方向所呈夹角, 而 $\epsilon_1 = 4.884$ 、 $\epsilon_2 = 0.009$, 也由于 ϕ 具有可调性, 故此介电张量会随 ϕ 的改变而改变^[11, 17-18]; 这四种材料的光学吸收都可忽略不计^[17-18]. 设定电介质砷化镓、二氧化硅和钆镱石榴石薄膜层的光学厚度为 $\lambda_0/4$, 磁光介质缺陷掺铈钇铁石榴石薄膜层的光学厚度为 $\lambda_0/2$. 采用 4×4 传输矩阵法^[17, 20]来描述线性偏振光通过一维磁光子晶体的透射率和所产生的法拉第旋转角.

2 结果分析

2.1 结构一的光隔离特性

选取 L_1 做为低折射率材料, 结构 $(\text{H}/L)^3/\text{M}/(\text{L}/\text{H})^7/\text{M}/(\text{H}/L)^7/\text{M}/(\text{L}/\text{H})^3$ 在外加磁场与光路光轴方向平行即 $\phi = 0^\circ$ 时, 可同时实现大的法拉第旋转角和高的透射率, 其光谱如图 1, 将此结构记为 S_1 , 共包含 43 层光学薄膜, 总厚度为 $7.96\ \mu\text{m}$. 从图 1 可知, 在中心波长处, 法拉第旋转角 $\theta_F = 75.26^\circ$ 、透射率 $T = 99.20\%$, 该结构可在中心波长附近的小范围内实现光隔离.

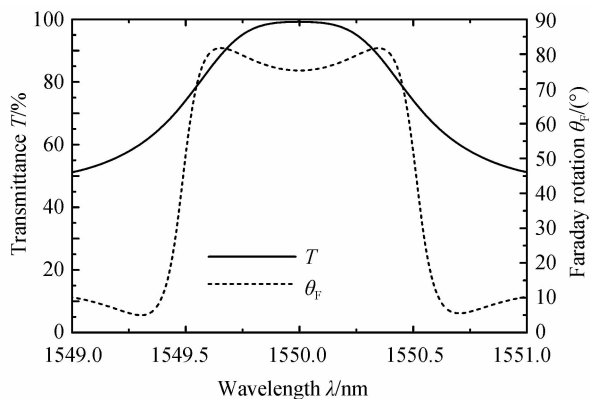


图 1 当 $\phi = 0^\circ$ 时, 结构 S_1 的透射率和法拉第旋转角随波长变化的曲线

Fig. 1 The transmittance and Faraday rotation of the structure S_1 as functions of wavelength when $\phi = 0^\circ$

在磁光介质的介电张量中, 组元 $\epsilon_{2,xy}$ 和 $\epsilon_{2,rx}$ 会随着外加磁场与光路光轴方向所呈夹角 ϕ 的变化而改变.

在实际应用中,可通过旋转外加磁场改变 ϕ 的大小来改变磁光介质的介电张量,从而调节法拉第旋转角到 45° 以满足光隔离的要求.图 2 分析了在外加磁场作用下,结构 S_1 可实现的法拉第旋转角和透射率随外加磁场与光路光轴方向所呈夹角 ϕ 变化的取值变化图.由图可知,当 $\phi = 52.0^\circ$ 时,中心波长处的法拉第旋转角被精确调整到 45° .

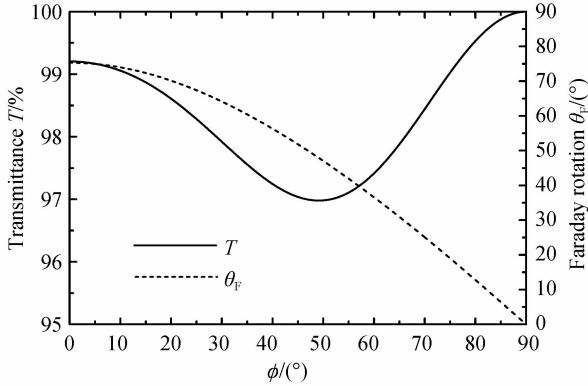


图 2 结构 S_1 的透射率和法拉第旋转角随 ϕ 逐渐增大时的曲线

Fig. 2 The transmittance and Faraday rotation of the structure S_1 as functions of ϕ

图 3 是外加磁场与光路光轴方向所呈夹角 $\phi = 52.0^\circ$ 时的光谱图,可知中心波长处的法拉第旋转角被精确调整到 45° ,对应的透射率为 97.01% ;结构 S_1 可在中心波长附近 0.95 nm 范围内实现光隔离;在中心波长附近 0.95 nm 范围内,法拉第旋转角在 45° 到 50.65° 范围内波动,即 $R_F = (\theta_{\max} - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} + \theta_{\min}) = 0.059$;在中心波长附近 0.95 nm 范围内,透射率在 97.01% 到 99.96% 范围内波动,即 $R_T = (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} + T_{\min}) = 0.015$.

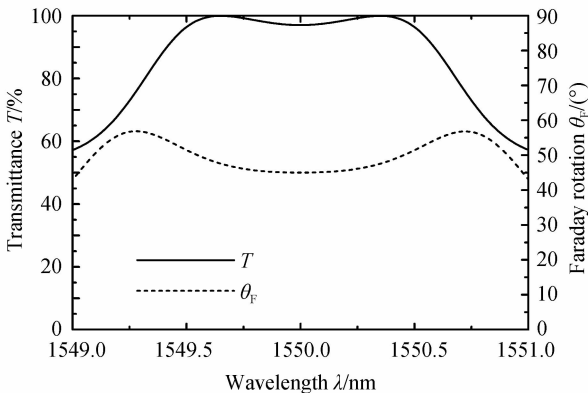


图 3 当 $\phi = 52.0^\circ$ 时,结构 S_1 的透射率和法拉第旋转角随波长变化的曲线

Fig. 3 The transmittance and Faraday rotation of the structure S_1 as functions of wavelength when $\phi = 52.0^\circ$

通过对结构 S_1 的分析,可知:该结构可改善一维磁光子晶体实现光隔离的光谱,在中心波长附近 0.95 nm 范围内实现光隔离,当光源发出的光在此范围

内波动时,均可实现光隔离;该结构仅包含 43 层光学薄膜,易于实验制备,2010 年 T. Goto 的报道为该结构目前在实验上的制备提供了可能性;该结构的厚度仅 $7.96 \mu\text{m}$,可提高磁光隔离器的集成度.

2.2 结构二的光隔离特性

为了提高中心波长附近范围内光隔离的稳定性,选取 L_2 做为低折射率材料,研究了结构 $S_2 = (H/L)^4 / M / (L/H)^9 / M / (H/L)^4 / M / (L/H)^4 / M / (H/L)^9 / M / (L/H)^4$ 的光隔离特性.该结构共包含 73 层光学薄膜,总厚度为 $11.539 \mu\text{m}$.

当外加磁场与光路光轴方向平行即 $\phi = 0^\circ$ 时,结构 S_2 的光谱如图 4.在中心波长处,法拉第旋转角 $\theta_F = 53.85^\circ$,透射率 $T = 99.12\%$,该结构可在中心波长附近的小范围内实现光隔离.图 5 给出了当 ϕ 逐渐增大时,透射率和法拉第旋转角的变化曲线,当 $\phi = 32.7^\circ$ 时,结构 S_2 的法拉第旋转角 $\theta_F = 45^\circ$.图 6 为外加磁场与光路光轴方向所呈夹角 $\phi = 32.7^\circ$ 时,结构 S_2 的光谱图.中心波长处的法拉第旋转角被精确调整到 45° ,对应的透射率为 98.85% ,结构 S_2 可在中心波长附近

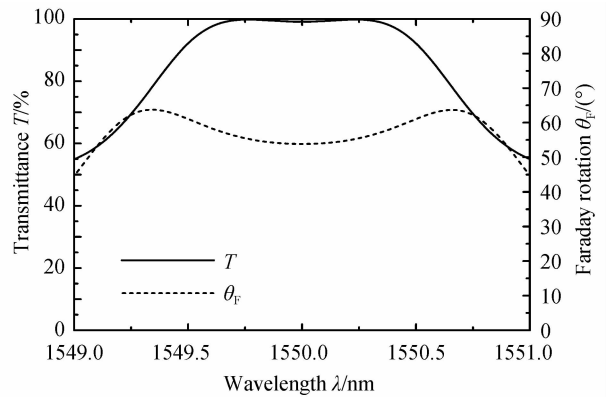


图 4 当 $\phi = 0^\circ$ 时,结构 S_2 的透射率和法拉第旋转角随波长变化的曲线

Fig. 4 The transmittance and Faraday rotation of the structure S_2 as functions of wavelength when $\phi = 0^\circ$

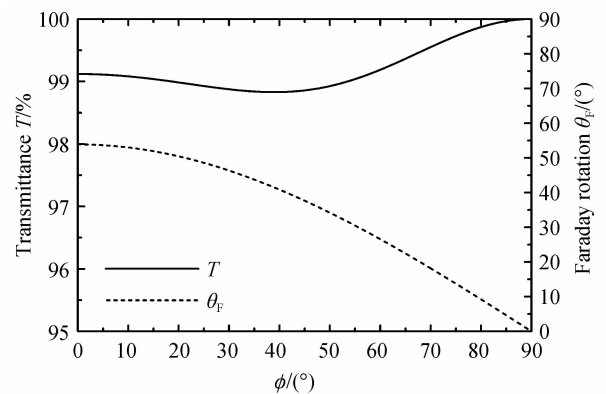


图 5 结构 S_2 的透射率和法拉第旋转角随 ϕ 逐渐增大时的曲线

Fig. 5 The transmittance and Faraday rotation of the structure S_2 as functions of ϕ

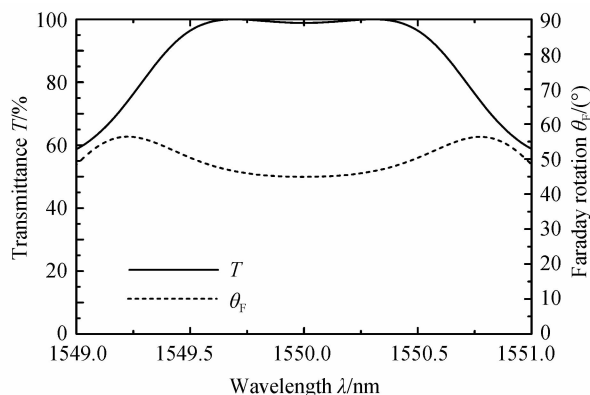


图6 当 $\phi = 32.7^\circ$ 时,结构 S_2 的透射率和法拉第旋转角随波长变化的曲线图

Fig. 6 The transmittance and Faraday rotation of the structure S_2 as functions of wavelength when $\phi = 32.7^\circ$

0.85 nm范围内实现光隔离。在中心波长附近0.85 nm范围内,法拉第旋转角在 45° 到 48.55° 范围内波动,即 $R_F = 0.038$;在中心波长附近0.85 nm范围内,透射率在98.85%到100%范围内波动,即 $R_T = 0.006$ 。

分析结构 S_2 的光隔离性能可知该结构可在中心波长附近0.85 nm范围内实现光隔离,与结构 S_1 相比,有更高的透射率,可实现更平坦的光谱,提高了光隔离的稳定性。另外,对比图5和图2可得当外加磁场与光路光轴方向所呈夹角 ϕ 在确定的精确值附近波动时,结构 S_2 具有更高的稳定性。

3 结论

本文分析了两种一维磁光子晶体的光隔离特性。结构 S_1 包含43层光学薄膜,用 $7.96 \mu\text{m}$ 的总厚度在中心波长附近0.95 nm范围内实现了光隔离,包含光学薄膜层数较少,易于实验制备;结构 S_2 包含73层光学薄膜,用 $11.54 \mu\text{m}$ 的总厚度在中心波长附近0.85 nm范围内实现了光隔离,与结构一相比,具有更高的透射率和更平坦的光谱。将这两种结构的一维磁光子晶体用于磁光隔离器,可实现磁光隔离器的集成化。

参考文献

- [1] CHEN Z H, HELLSTROMB S, YU Z Y, *et al.* Comb-shaped photonic crystal structure for efficient broadband light diffraction and funnelling in solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 99(1): 316-320.
- [2] CHEN Z H, HELLSTROMB S, YU Z Y, *et al.* Time-resolved photocurrents in quantum well/dot infrared photodetectors with different optical coupling structures[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(4): 043502.
- [3] FEI H M, JIANG Y K, LIANG J Q, *et al.* Resonance tunneling of photons through multiple-well structures in two-dimensional photonic crystals with various well-media[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical physics*, 2009, 42(5): 055401.
- [4] LIU Qi-neng, LIU Qin. Dispersion characteristics of total reflection tunnel in 1D photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(5): 611-614.

- 刘启能,刘沁. 一维光子晶体全反射隧穿的色散特性[J]. *光子学报*, 2013, 42(5): 611-614.
- [5] ZHANG Deng-guo, NI Na, AN He-nan, *et al.* Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional magneto-photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(8): 1007-1010.
张登国,倪娜,安鹤南,等. 一维磁性光子晶体的电磁场分析和数值计算[J]. *光子学报*, 2004, 33(8): 1007-1010.
- [6] CHEN Y Y, FANG Y, HUANG S H, *et al.* Surface Tamm states in one-dimensional photonic crystals containing anisotropic indefinite metamaterials [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(6): 061602.
- [7] 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.
- [8] INOUE M, YAMAMOTO T, ISAMOTO K, *et al.* Effect of structural irregularity on propagation properties of optical waves in discontinuous magneto-optical media with one dimensional quasirandom array structures [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(8): 5988-5990.
- [9] INOUE M, ARAI K I, 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.
- [10] ZAMANI M, GHANAATSHOAR M, ALISAFABE H. Compact one-dimensional magnetophotonic crystals with simultaneous large Faraday rotation and high transmittance [J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, 59(2): 126-130.
- [11] ZAMANI M, GHANAATSHOAR M, ALISAFABE H. Adjustable magneto-optical isolators with high transmittance and large Faraday rotation[J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2011, 28(11): 2637-2642.
- [12] ZHOU Hui, ZHANG Deng-guo, OU-YANG Zheng-biao, *et al.* Structure research on one-dimensional magneto-photonic crystals used in optical isolator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(1): 106-109.
周慧,张登国,欧阳征标,等. 应用于光隔离器的一维磁光子晶体结构探索[J]. *光子学报*, 2008, 37(1): 106-109.
- [13] SUN T T, LUO J, XU P, *et al.* Independently tunable transmission-type magneto-optical isolators based on multilayers containing magnetic materials[J]. *Physics Letters A*, 2011, 375(1): 2185-2188.
- [14] YIN C P, WANG T B, WANG H Z. Magneto-optical properties of one-dimensional conjugated magnetophotonic crystals heterojunctions [J]. *The European Physical Journal B*, 2012, 85(1): 104.
- [15] BAI G Y, DONG L J, FENG S, *et al.* Faraday effects in one-dimensional magneto-optical photonic crystals [J]. *Optical Materials*, 2012, 35 (1): 252-256.
- [16] KATO H, MATSUSHITA T, TAKAYAMA A, *et al.* Properties of one-dimensional magneto-photonic crystals for use in optical isolator devices [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, 38(5): 3246-3248.
- [17] ZAMANI M, GHANAATSHOAR M. Adjustable magneto-optical isolators with flat-top responses[J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 24524-24535.
- [18] SHARIFIAN M, GHADIRI H, ZAMANI M, *et al.* Influence of thickness error on the operation of adjustable magneto-optical isolators [J]. *Applied Optics*, 2012, 51 (20): 4873-4878.
- [19] TAICHI G, ALEXANDER V B, KAZUMA T, *et al.* Faraday rotation of a magnetophotonic crystal with the dual-cavity structure[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107 (9): 09A946.
- [20] KATO H, MATSUSHITA T, TAKAYAMA A, *et al.* Theoretical analysis of optical and magneto-optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(7): 3906-3911.