

doi: 10.3788/gzxb20154410.1023004

大入射角一维磁光子晶体宽带光隔离器

徐海燕¹, 陈鹤鸣²

(1 南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210023)

(2 南京邮电大学 贝尔英才学院, 南京 210023)

摘 要:采用 4×4 传输矩阵法研究了复合一维磁光子晶体隔离器的特性, 当外加磁场与光路光轴方向夹角为 19.95° 时, 用 $20.16 \mu\text{m}$ 的总厚度实现了中心波长附近 3.1 nm 的宽带光隔离, 当光线入射角为 3.9° 时, 仍可实现 1.06 nm 的宽带滤波, 且其透射谱平坦性良好. 该光隔离器可以同时满足隔离宽度、透射谱平坦性以及光线入射角宽容性的要求, 在实际运用中具有重要的实用价值.

关键词:传输矩阵法; 一维磁光子晶体; 磁光隔离器; 斜入射

中图分类号: O734

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)10-1023004-6

Broad-band Optical Isolator with Wide-angle Based on One-dimensional Magneto-optical Crystals

XU Hai-yan¹, CHEN He-ming²

(1 College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Communications, Nanjing 210023, China)

(2 Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Communications, Nanjing 210023, China)

Abstract: A composite optical isolator of one-dimensional magneto-photonic crystals was presented. The 4×4 transfer matrix method used to investigate the optical isolation property of this isolator. When the angel between applied magnetic field and optical axis of optical path is 19.95° , with the total thickness of $20.16 \mu\text{m}$, it can realize the optical isolation around 3.1 nm . When the incident angle is 3.9° , it can also realize the optical isolation around 1.06 nm with flat-top responses. The structure can realized broadband isolation, flat-top responses and has great tolerance of incident angle at the same time. It has a high valuation in practical application.

Key words: Transfer matrix method; One-dimensional magneto-photonic crystal; Optical isolator; Oblique incidence

OCIS Codes: 230.3240; 230.3810; 160.5298

0 引言

光隔离器是只允许光单向传输、抑制反向光的无源器件. 光隔离器已成为现代许多光电子技术领域中不可缺少的关键器件之一, 高性能光隔离器的研究也受到广泛重视^[1-4]. 相较于传统的块状磁光介质光隔离器, 基于一维光子晶体的光隔离器不仅能够精确实现 45° 法拉第旋转角^[5-6], 具有很高的光透射率^[7-10], 而且

极大地降低了法拉第转子的尺寸^[11-12]. 2007 年李国俊、李永平等人提出了一种多缺陷反射型结构^[3], 该结构的克尔旋转角在中心波长附近可实现宽带光隔离, 且对入射角具有较好的宽容性, 但其透射谱并不平坦. 2012 年, M. Zamani 和 M. Ghanaatshoar 提出了在一维磁光子晶体中引入多层磁光介质的方案^[1] 实现了 7.2 nm 的宽带光隔离, 但在其宽带范围内, 光谱平坦性较差且不具备对入射角度的宽容性. 2014 年, 费宏明

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61077084, 61571237)资助

第一作者: 徐海燕(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光通信与光波技术. Email: xhy886379@126.com

导师(通讯作者): 陈鹤鸣(1958-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光纤通信与光波技术、光通信与光信息处理等. Email: chhm@njupt.edu.cn

收稿日期: 2015-06-29; 录用日期: 2015-08-25

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

和武建加等人对该方案进行改进,设计了一种可实现 0.85 nm 的宽带光隔离器^[2],该结构具有更高的透射率和更平坦的光谱,但宽带隔离范围较小,且同样不具有对入射角度的宽容性,限制了在光路传输系统中的应用。

本文提出了一种一维复合磁光子晶体光隔离器,可实现大角度入射的光隔离.当光线以 3.9° 角入射时,仍可实现 1.06 nm 的宽带滤波,且其透射谱具有良好的平坦性.利用 4×4 传输矩阵法仿真分析了该器件的光隔离特性,结果表明该结构能够同时满足光隔离器对光隔离宽度、光谱平坦性以及光线入射角度宽容性的需求,具有很高的可靠性以及稳定性,在光纤通信、光信息处理系统、光纤传感以及精密光学测量系统中具有重要的作用。

1 理论分析

1.1 传输矩阵

本文采用 4×4 传输矩阵^[13-16]法来描述光在电介质层和磁光介质层中的传播.图 1 为一种简单的一维磁光子晶体结构,可表述为 (H/L)ⁿ/M/(L/H)ⁿ,其中 n 为膜层重复数, H 和 L 为电介质层, M 为磁光介质层。

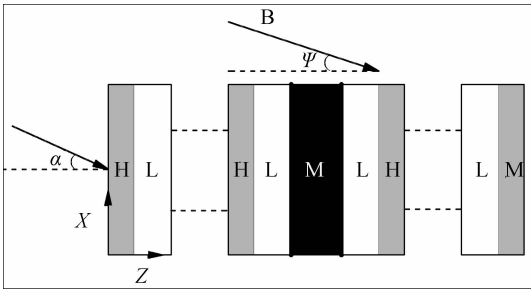


图 1 由磁介质层与电介质层构成的多层膜结构示意图
Fig.1 Schematic drawing of the multilayer film composed of magnetic and dielectric layers

对于电介质层,其相对介电常数的形式为

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_D & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_D & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_D \end{pmatrix}$$

对 Maxwell 方程组求解,得光在电介质层中的传输矩阵为^[13-16]

$$\Phi_D = \begin{pmatrix} \cos \delta & 0 & 0 & \frac{i}{\gamma_D} \sin \delta \\ 0 & \cos \delta & -\frac{i}{\gamma_D} \sin \delta & 0 \\ 0 & -i\gamma_D \sin \delta & \cos \delta & 0 \\ i\gamma_D \sin \delta & 0 & 0 & \cos \delta \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 $\delta = \frac{\omega}{c} \gamma_D d_D$ 为相位因子, $\gamma_D = \sqrt{\epsilon_D - \sin^2 \alpha}$, α 为光线入射角, ϵ_D 和 d_D 分别为电介质层的相对介电常数和

厚度。

对于磁介质层,在有外加磁场的条件下,其相对介电常数的形式为^[2]

$$\bar{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & i\epsilon_{2,xy} & -i\epsilon_{2,zx} \\ -i\epsilon_{2,xy} & \epsilon_1 & 0 \\ i\epsilon_{2,zx} & 0 & \epsilon_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中 $\epsilon_{2,xy} = \epsilon_2 \cos \varphi$, $\epsilon_{2,zx} = \epsilon_2 \sin \varphi$, φ 为外加磁场与光路光轴之间的夹角.由光在磁光介质中的传播形式结合连续性边界条件,可以求得光在磁光介质层中的传输矩阵为^[13-16]

$$\Phi_M = \begin{pmatrix} \Phi_{11}^M & \Phi_{12}^M & \Phi_{13}^M & \Phi_{14}^M \\ \Phi_{21}^M & \Phi_{22}^M & \Phi_{23}^M & \Phi_{24}^M \\ \Phi_{31}^M & \Phi_{32}^M & \Phi_{33}^M & \Phi_{34}^M \\ \Phi_{41}^M & \Phi_{42}^M & \Phi_{43}^M & \Phi_{44}^M \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 $\Phi_{11}^M = \frac{1}{2} (\cos \delta_p + \cos \delta_n)$,

$$\Phi_{12}^M = \frac{i}{2} (\cos \delta_p - \cos \delta_n),$$

$$\Phi_{13}^M = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma_p} \sin \delta_p - \frac{1}{\gamma_n} \sin \delta_n \right),$$

$$\Phi_{14}^M = \frac{i}{2} \left(\frac{1}{\gamma_p} \sin \delta_p + \frac{1}{\gamma_n} \sin \delta_n \right),$$

$$\Phi_{21}^M = \frac{i}{2} (\cos \delta_p - \cos \delta_n),$$

$$\Phi_{22}^M = \frac{1}{2} (\cos \delta_p + \cos \delta_n),$$

$$\Phi_{23}^M = -\frac{i}{2} \left(\frac{1}{\gamma_p} \sin \delta_p + \frac{1}{\gamma_n} \sin \delta_n \right),$$

$$\Phi_{24}^M = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma_p} \sin \delta_p - \frac{1}{\gamma_n} \sin \delta_n \right),$$

$$\Phi_{31}^M = -\frac{1}{2} (\gamma_p \sin \delta_p - \gamma_n \sin \delta_n),$$

$$\Phi_{32}^M = -\frac{i}{2} (\gamma_p \sin \delta_p + \gamma_n \sin \delta_n),$$

$$\Phi_{33}^M = \frac{1}{2} (\cos \delta_p + \cos \delta_n),$$

$$\Phi_{34}^M = \frac{i}{2} (\cos \delta_p - \cos \delta_n),$$

$$\Phi_{41}^M = \frac{i}{2} (\gamma_p \sin \delta_p + \gamma_n \sin \delta_n),$$

$$\Phi_{42}^M = \frac{1}{2} (\gamma_p \sin \delta_p - \gamma_n \sin \delta_n),$$

$$\Phi_{43}^M = -\frac{i}{2} (\cos \delta_p - \cos \delta_n),$$

$$\Phi_{44}^M = \frac{1}{2} (\cos \delta_p + \cos \delta_n).$$

式中 $\delta_p = k_p d_M$ 和 $\delta_n = k_n d_M$ 分别为左旋和右旋圆偏振光的相位因子, $k_p = \frac{\omega}{c} \gamma_p$ 和 $k_n = \frac{\omega}{c} \gamma_n$ 分别为左旋和右旋圆偏振光的波数, $\gamma_p = \sqrt{\epsilon_p - \sin^2 \alpha}$, $\gamma_n = \sqrt{\epsilon_n - \sin^2 \alpha}$, $\epsilon_p = \epsilon_1 + \epsilon_{2,xy}$, $\epsilon_n = \epsilon_1 - \epsilon_{2,xy}$, d_M 为磁光介质

层厚度.

根据式(1)、(3)并结合所设计的一维磁光子晶体的结构,可以得到光通过一维磁光子晶体时的传输矩阵 $\Phi = \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 \cdots \Phi_N$.

1.2 透射率和法拉第旋转角

设光线以 α_0 角 ($\alpha_0 = 0^\circ$ 时为垂直入射) 入射到 $Z = Z_0$ 平面,入射的 TM 波振幅为 1,当 $Z \leq Z_0$ 时,光的态矢量可表示为入射的 TM 波和反射回来的 TE、TM 波的叠加,即

$$\tau(Z) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{ik(z-z_0)} + C_1 \begin{pmatrix} \cos \alpha_0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} e^{-ik(z-z_0)} + C_2 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \cos \alpha_0 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-ik(z-z_0)} \quad (4)$$

式中 C_1 和 C_2 分别表示反射的 TE 波和 TM 波的振幅.

当 $Z \geq Z_0 + D$ 时,光的态矢量表示为透射出的 TE 波和 TM 波的叠加,即

$$\tau(Z) = \left\{ C_3 \begin{pmatrix} \cos \alpha_0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + C_4 \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -\cos \alpha_0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} e^{ik(z-z_0-D)} \quad (5)$$

式中 C_3 和 C_4 分别表示透射的 TE 波和 TM 波的振幅.

根据电磁场在各界面切向分量的连续性可得

$$\tau(Z_0 + D) = \Phi \tau(Z_0) \quad (6)$$

由式(6)可求得 $C_1 \sim C_4$ 的值,则光通过一维磁光子晶体后的透射率和法拉第旋转角为

$$T = T_{TM} + T_{TE} = |C_3|^2 + |C_4|^2 \quad (7)$$

$$\theta_F = \arctan \left(\operatorname{Re} \left(\frac{C_4}{C_3} \right) \right) \quad (8)$$

1.3 透射谱平坦性

透射谱平坦性是用于描述宽带光隔离器在其宽带范围内工作稳定性的一个重要参量,定义^[1]

$$R_T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \text{ 和 } R_F = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min}}{\theta_{\max} + \theta_{\min}} \quad (9)$$

来描述宽带光隔离器透射谱的平坦性. 其中, T_{\max} 、 T_{\min} 、 θ_{\max} 和 θ_{\min} 分别表示透射率和法拉第旋转角在宽带光隔离范围内的最大值和最小值.

2 模型与讨论

选取 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 作为研究的中心波长,分别选取硅(Si)和二氧化硅(SiO_2)作为高折射率和低折射率材料(以下分别用 H 和 L 表示);选取磁光介质掺铈钇石榴石(Ce:YIG)作为磁光材料(以下用 M 表示). 取电介质层 H 和 L 的光学厚度为 $\lambda_0/4$,磁光介质层 M

的光学厚度为 $\lambda_0/2$. 在中心波长 1550 nm 条件下,上述电介质材料的折射率分别为: $n_{\text{Si}} = 3.48$ 、 $n_{\text{SiO}_2} = 1.495$;磁光介质层 $\epsilon_1 = 4.884$ 、 $\epsilon_{21} = 0.009$;各材料的吸收均可忽略不计^[2].

本文将结构 $(\text{H/L})^x/\text{M}/(\text{L/H})^y/\text{M}/(\text{H/L})^z/\text{M}/(\text{L/H})^2/\text{M}/(\text{H/L})^y/\text{M}/(\text{L/H})^x$ 作为研究的基本结构,将高折射率材料、低折射率材料和磁光介质缺陷置于该结构中,得到基本结构 S_1 .

2.1 基本结构 S_1 的光隔离特性

通过分析可以得到:当膜层重复数 $x = 2$ 、 $y = 5$ 、 $z = 4$ 时,该结构在外加磁场与光路光轴方向平行(即 $\varphi = 0^\circ$)的条件下,在中心波长处可实现 23.84° 的法拉第旋转角和 99.99% 的高透射率,其透射谱如图 2. 从图中可以看出,该结构的透射谱具有一定的宽带范围,但由于法拉第旋转角未达到 45° ,故无法实现光隔离.

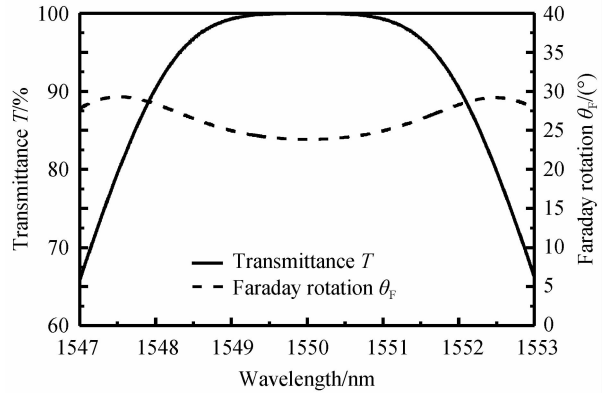


图 2 基本结构 S_1 当 $x = 2$ 、 $y = 5$ 、 $z = 4$ 时法拉第旋转角和透射率在中心波长附近的波动曲线

Fig.2 The faraday rotation and transmittance of basic structure S_1 as functions of wavelength when $x = 2$ 、 $y = 5$ 、 $z = 4$

2.2 复合结构 S_{11} 的光隔离特性

将 S_1 作为基本结构进行叠加,构成复合结构 $S_{11} = S_1/\text{M}/S_1$,该结构共有 99 层膜,总厚度为 $20.16 \mu\text{m}$,其中心波长处法拉第旋转角大于 45° . 图 3 为当外加磁场方向与光轴方向平行(即 $\varphi = 0^\circ$)时的透射谱. 从图中可以看出,此时在中心波长处 $\theta_F = 47.9^\circ$ 、 $T = 99.97\%$. 再通过调整外加磁场与光路光轴之间的夹角,将中心波长处的法拉第旋转角精确调整至 45° ,以便满足光隔离器的要求. 图 4 为该结构中心波长处的透射率和法拉第旋转角随外加磁场与光路光轴之间夹角逐渐增大时的变化曲线. 由图中可以看出,当 $\varphi = 19.95^\circ$ 时,该结构中心波长处 $\theta_F = 45^\circ$. 图 5 为 $\varphi = 19.95^\circ$ 时的透射谱图. 从图 5 中可以看出,此时中心波长处的透射率高达 99.98% . 复合结构 S_{11} 可在中心波长附近实现 3.1 nm 的宽带光隔离,在宽带范围内,法拉第旋转角在 45° 至 50.03° 之间变化,即 $R_F = (\theta_{\max} - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} + \theta_{\min}) = 0.05293$,透射率在 99.35% 至 99.98% 之间波动,即

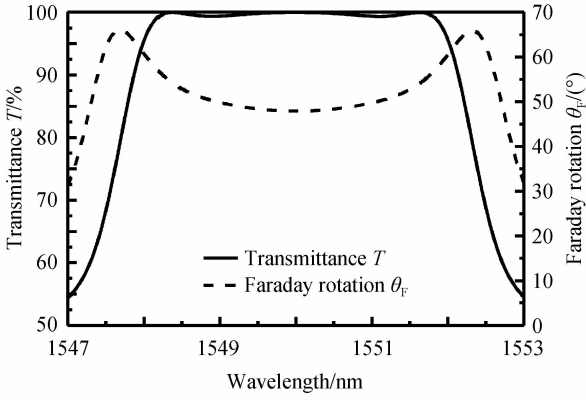


图3 当 $\varphi=0^\circ$ 时复合结构 S_{11} 的法拉第旋转角和透射率在中心波长附近的波动曲线图
Fig.3 The magneto-optical spectra of the structure S_{11} before adjusting to a perfect magneto-optical as function of wavelength

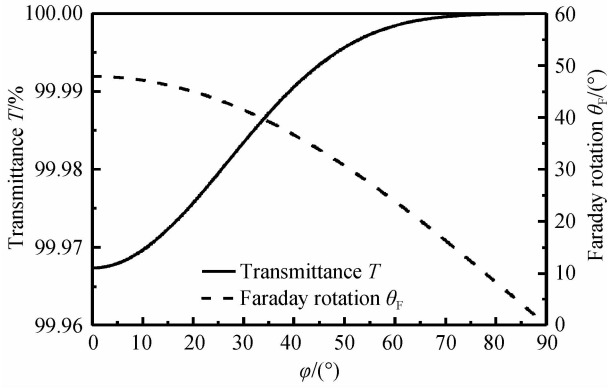


图4 复合结构 S_{11} 的法拉第旋转角和透射率随外加磁场旋转角的变化情况
Fig.4 The faraday rotation and transmittance of the structure S_{11} as function of φ

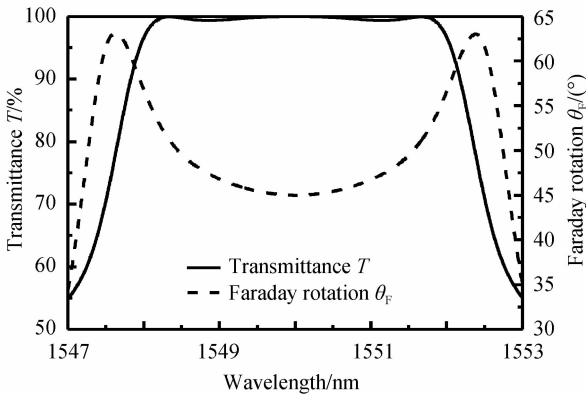
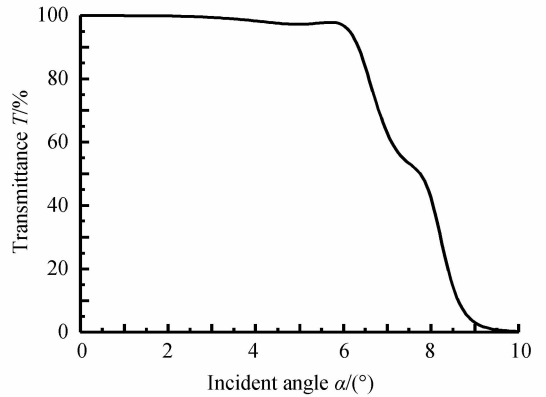


图5 当 $\varphi=19.95^\circ$ 时复合结构 S_{11} 的法拉第旋转角和透射率,在中心波长附近的波动曲线图
Fig.5 The magneto-optical spectra of the structure S_{11} after adjusting to a perfect magneto-optical as function of wavelength

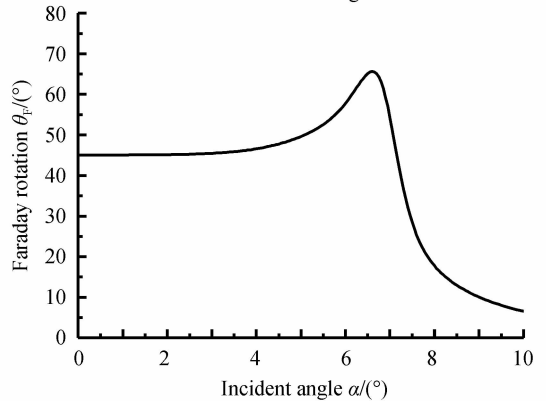
$R_T = (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} + T_{\min}) = 0.00316$. 该结构不仅可满足光隔离器对光隔离宽度的要求,且在宽带范围内具有平坦的透射谱.这是由于:线偏振光在进入磁光介质时,可表示为左右旋圆偏振光之和,在通过具有外加磁场的磁光介质层后,合成波为发生一定方向偏转的线偏振光,且三者的振幅关系仍满足光进入磁光晶体时的情况^[17].由于构成线偏振光的左右旋圆偏振光在通过上述结构时均可实现宽带光隔离,因此两者合成的线偏振波也具有宽带光隔离特性.

2.3 复合结构 S_{11} 对入射角的宽容性

对于复合结构 S_{11} ,当光线以 α_0 斜入射至 $Z=Z_0$ 平面时,结合集成磁光隔离器对透射率和法拉第旋转角的要求,由图 6(a)、(b)可以看出,当光线以 $0\sim 6^\circ$ 范围内角入射时,复合结构 S_{11} 可正常工作,在此范围内,透射率在 96.83%至 99.98%之间波动,法拉第旋转角在 45° 至 57.74° 之间波动.



(a) The transmittance of the structure S_{11} as function of incidence angle.



(b) The faraday rotation of the structure S_{11} as function of incidence angle

图6 复合结构 S_{11} 的透射率和法拉第旋转角随光线入射角变化的关系

Fig.6 The transmittance and faraday rotation of the structure S_{11} as function of incidence angle

图7为当入射光线以 3.9° 角入射时的透射谱图。从图中可以看出,此时中心波长处 $\theta_F = 46.77^\circ$, $T = 98.41\%$,复合结构 S_{11} 仍可实现中心波长附近1.06 nm的宽带光隔离器。在光隔离宽带范围内,法拉第旋转角在 44.98° 至 49.14° 之间波动($R_F = 0.0442$),透射率在 98% 至 98.81% 之间波动($R_T = 0.0041$)。

表1为本文中所设计的光隔离器与参考文献中各光隔离器性能参量的对比情况^[1-3]。从表1中可以看出,相比于参考文献[1-3]中的结构,本文所设计的磁光隔离器虽然厚度较大,但在中心波长处具有更高的透射率及精准的法拉第旋转角,并可同时满足实际运用中对光隔离器隔离宽度、透射谱平坦性和对入射角宽容性的需求,在实际运用中具有更高的价值。

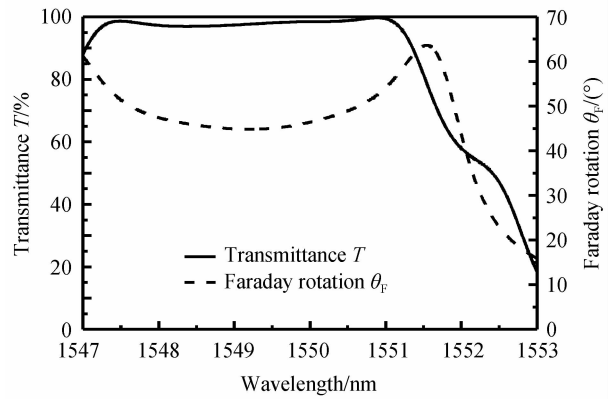


图7 S_{11} 当 $\alpha_0 = 3.9^\circ$, $\varphi = 19.95^\circ$ 时复合结构的法拉第旋转角和透射率在中心波长附近的波动曲线
Fig. 7 The magneto-optical spectra of structure S_{11} when $\alpha_0 = 3.9^\circ$ and $\varphi = 19.95^\circ$

表1 本文与参考文献中光隔离器性能参量对比表
Table 1 Comparison table of optical isolator performance parameters in the references and the proposed

	Ref. [1]	Ref. [2]	Ref. [3]	The proposed
Thickness/ μm	19.42	11.54	12.23	20.16
T or R /(%)	96.01	98.85	97.02	99.98
θ_F or θ_K /($^\circ$)	45	45	44.71	45
Bandwidth/nm	7.2	0.85		3.1
R_T	0.019	0.006	None	0.003
R_F	0.205	0.038		0.052
Tolerance of incident angle	None	None	Only θ_K can work in the range of $0\text{-}10^\circ$	Both T and θ_F can work in the range of $0\text{-}6^\circ$
Performance analysis	1) Wide isolation bandwidth 2) Bad flatness of transmission spectrum 3) Without the tolerance of incident angle	1) Narrow isolation bandwidth 2) Good flatness of transmission spectrum 3) Without the tolerance of incident angle	1) Without the isolation bandwidth 2) Without the flatness of transmission spectrum 3) Only θ_K has good tolerance of incident angle	1) Modest isolation bandwidth 2) Better flatness of transmission spectrum 3) Good tolerance of incident angle

3 结论

本文分析了一种复合一维磁光子晶体的光隔离特性。该结构共包含99层薄膜,总厚度为 $20.16 \mu\text{m}$,当外加磁场与光路光轴夹角为 19.95° 时,在中心波长附近可实现 3.1 nm 的宽带光隔离,且法拉第旋转角和透射率分别在 $45^\circ \sim 50.03^\circ$ 和 $99.35\% \sim 99.98\%$ 之间波动(即 $R_F = 0.05293$, $R_T = 0.00316$),即在光隔离宽带范围内可实现稳定的光隔离。此外该结构对入射角具有一定的宽容性:当光线入射角在 $0 \sim 6^\circ$ 范围内时,该结构可正常工作。当光线以 3.9° 角入射时,仍可实现 1.06 nm 的宽带滤波,且在宽带范围内法拉第旋转角和透射率分别在 $44.98^\circ \sim 49.14^\circ$ 和 $98\% \sim 98.81\%$ 之间波动(即 $R_F = 0.0442$, $R_T = 0.0041$)。该结构同时满足了光隔离器对光隔离宽度、透射谱平坦性以及

对入射角宽容性的要求,且其膜层数较少,在实际运用中具有重要的实用价值。

参考文献

- [1] ZAMANI M, GHANAATSHOAR M. Adjustable magneto-optical isolators with flat-top responses[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(22): 24524-24535.
- [2] FEI Hong-ming, WU Jian-jia, YANG Yi-biao, et al. The application research of one-dimensional magneto-phonic crystals for magneto-optical isolators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1023003.
费宏明, 武建加, 杨毅彪, 等. 一维磁光子晶体实现光隔离的应用研究[J]. *光子学报*, 2014, **43**(10): 1023003.
- [3] LI Guo-jun, KANG Xue-liang, LI Yong-ping, et al. Frequency response and tolerance of reflection-mode magneto-optical multi-layer film isolator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(5): 2945-2950.
李国俊, 康学亮, 李永平, 等. 反射型磁光多层膜隔离器的频率响应及宽容性研究[J]. *物理学报*, 2007, **56**(5): 2945-2950.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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): 106-108.
周慧, 张登国, 欧阳征标等. 应用于光隔离器的一维磁光光子晶体结构探索, 光子学报, 2008, **37**(1):106-108.
- [8] 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.
- [9] ZAMANI M, GHANAATSHOAR M, ALISAFEE H. Compact one-dimensional magnetophotonic crystals with simultaneous large Faraday rotation and high transmittance [J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, **59**(2): 126-130.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] LEVY M, YANG H C, STEEL M J, *et al.* Flat-top response in one-dimensional magnetic photonic bandgap structures with faraday rotation enhancement [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **19**(12): 1964-1969.
- [13] 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.
- [14] YIN Cheng-ping, WANG Tong-biao, WANG He-zhou, *et al.* Research on optical properties of one-dimensional magnetophotonic crystals [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 1997, **81**(8): 5659-5661.
尹承平, 王同标, 汪河洲. 一维磁光光子晶体的光学特性研究 [J]. 量子光学学报, 2010, **16**(3): 202-208.
- [15] 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.
- [16] ZHANG Deng-guo, NI Na, AN He-nan, *et al.* Electromagnetic field analysis and numerical calculation of one-dimensional magneto-photonic crystals [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.
- [17] KATO H, MATSUSHITA T, TAKAYAMA A, *et al.* Coexistence of large Faraday rotation and high transmittance in magnetophotonic crystals with multi-cavity structures [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, **272**(22): E1327-E1329.