

应用于光隔离器的一维磁光光子晶体结构探索*

周慧, 张登国**, 欧阳征标, 李景镇

(深圳大学 电子科学与技术学院电子科学与技术系, 深圳 518060)

摘 要:采用传输矩阵方法分析了一维磁光光子晶体. 对不同结构参量下的磁光多层膜的光学性质进行了数值计算. 得到了一种新颖实用的磁光多层膜结构, 可用作实现光集成应用中的光隔离器的元件. 典型磁光材料的厚度仅为 $2.13 \mu\text{m}$, 一维磁性光子晶体的总厚度仅为 $7.03 \mu\text{m}$.

关键词:光子晶体; 光隔离器; 传输矩阵法; 法拉第旋转效应

中图分类号: TN203

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)01-0106-4

0 引言

处于发展中的集成光学以及全光网络中的密集波分多路复用(dense wave division multiplexer, DWDM)等系统要求所用的部件具有微型化的特征, 以便于集成. 而现在被广泛使用的块状光隔离器显然不符合这种要求. 因此用光子晶体实现磁光隔离器意义重大.

1997 年, M. Inoue 和 T. Fujii 等人在研究光子晶体的过程中, 发现由磁光介质和普通电介质周期性或准周期性排列构成的一维磁光光子晶体具有显著增强的法拉第效应. 该效应源于介电常量周期性排列的光子晶体具有很强的光局域性^[1-3].

随后 M. Inoue 和 T. Fujii 等人主要研究了一种中间为磁光介质(Bi: YIG), 两边为普通电介质的所谓“三明治型”结构. 这种结构能有效地增大法拉第旋转角, 但是透过率却显著下降了. Sakaguchi 和 Sugimoto 的研究发现了多缺陷结构的一维磁光光子晶体可以在不削弱法拉第旋转角的前提下提高透过率^[4]. 而据 H. Kato 等报道, 当一维磁光光子晶体工作在多层缺陷结构(两层或三层)时, 可以同时实现高达 100% 的透过率和 45° 的法拉第旋转角^[5].

目前, 不少光学工作者都在致力于研究符合光集成化需求的新型光隔离器^[6-7]. 但对这种光隔离器的研究还处在探索阶段, 存在结构不够紧凑、频谱响应也不够宽等不足. 另外, 磁光多层膜的实际制备工艺还不成熟. 本文采用传输矩阵法研究了一维磁光光子晶体, 对不同结构参量的磁光多层膜的光学性质进行了数值计算, 目的在于探索结构相对简单、频谱响应好的一维磁光光子晶体, 对可用于光集成的光隔离器的实际制作意义重大.

1 传输矩阵与理论模拟

如图 1, 入射的 TM 波的电场振动方向沿 x 轴, 其传播方向沿 z 轴垂直于多层膜, 输出光的电场振动方向相对原来入射的 TM 波的电场振动方向旋转了一个角度. 一维磁光光子晶体相当于传统光隔离器中的磁性材料部分, 用作构成 45° 法拉第旋转器.

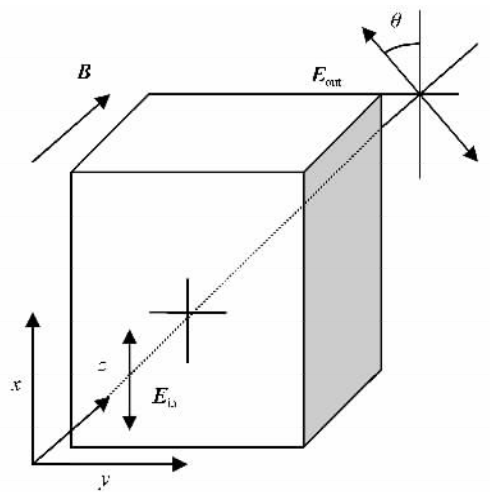


图 1 磁光多层膜系统

Fig. 1 The system of MPC films

本文分析一维磁光光子晶体特性的理论基础是麦克斯韦方程组. 采用的方法是传输矩阵方法, 并使用 4×4 的传输矩阵形式.

由麦克斯韦方程组和 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t}$, $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_0 e^{-i\omega t}$ 得到

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E}(z) &= i\omega\mu_0 \mathbf{H}(z), \\ \nabla \times \mathbf{H}(z) &= -i\omega\epsilon_0 [\epsilon] \mathbf{E}(z) \end{aligned} \quad (1)$$

在磁性介质中, $[\epsilon]$ 取为

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & i\epsilon_2 & 0 \\ -\epsilon_2 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{bmatrix}$$

在磁光多层膜中解式(1)可以得到多层膜的传输矩阵 P . 多层膜的传输特性可由入射端面 ($z = z_0$) 的电磁波和输出端面 ($z = z_0 + D$) 的电磁波比较

* 国家自然科学基金(60471048)资助

** Tel: 0755-83477603 Email: dg4zhang@hotmail.com

收稿日期: 2006-07-27

给出. 入射波如图 1, 则输出的电磁波为

$$P \begin{pmatrix} C_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & -C_4 & 0 \\ C_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{ik(z-z_0-D)} \\ e^{-ik(z-z_0-D)} \\ e^{ik(z-z_0-D)} \\ e^{-ik(z-z_0-D)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 \\ 1 & -C_1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{ik(z-z_0)} \\ e^{-ik(z-z_0)} \\ e^{ik(z-z_0)} \\ e^{-ik(z-z_0)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中的 $C_1 - C_4$ 分别与反射、透射的振幅相关的待定常量, 可以通过求解线性方程组(2)来得到. 则透过率为

$$T = |C_3|^2 + |C_4|^2 \quad (3)$$

定义 $\chi_F = C_3/C_4$, 则法拉第旋转角为

$$\theta_F = 2^{-1} \tan \frac{2\text{Re}(\chi_F)}{1 - |\chi_F|^2} \quad (4)$$

据此, 利用 MATLAB 软件编写了相应的程序, 并且用这些程序模拟了文献[5]中的磁光多层膜的光学特性, 得到了与文献报导相一致的结论.

图 2 是模拟文献[5]中双缺陷结构参量下的一维磁光光子晶体的光学特性得到的结果.

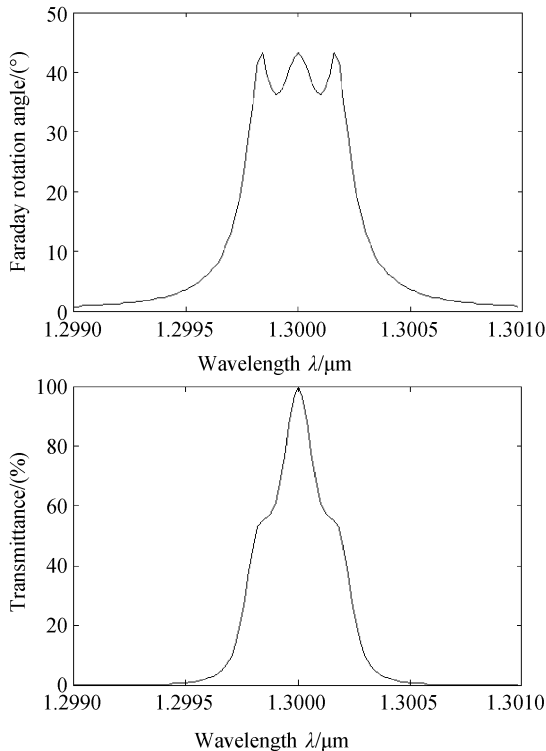


图 2 当 $n=8$ 时双缺陷结构光学特性随波长的变化曲线
Fig. 2 Optical properties of double-cavity structure versus wavelength λ with $n=8$

2 结构模型和数值计算

一维磁性光子晶体的典型结构是单缺陷结构 $(N_2/N_1)^n/M/(N_1/N_2)^n$, 其中 n 为周期数, M 是磁

光介质, N_1 和 N_2 分别是两种折射率不同的电介质. 单缺陷结构的一维磁性光子晶体的光学性能不能满足光隔离器的要求^[5], 而由对称性构造出的一些多缺陷结构的一维磁性光子晶体, 其光学性能能很好地满足光隔离器的要求.

本文研究的一维磁性光子晶体为双缺陷结构如图 3. 这种结构可以描述为: $(N_2/N_1)^n/M/(N_1/N_2)^n/N_1/(N_2/N_1)^n/M/(N_1/N_2)^n$, 其中 n 为周期数, M 是磁光介质, N_1 和 N_2 分别是两种折射率不同的电介质. 选用的材料分别是磁光介质 Bi: YIG, 高折射率电介质 GaAs, 低折射率电介质 SiO_2 .

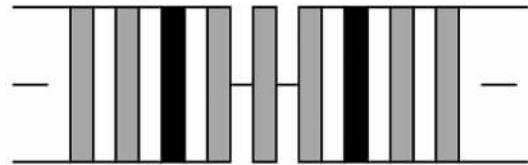


图 3 具有双缺陷结构的一维磁性光子晶体
Fig. 3 One-dimensional magneto-phonic crystal with double-cavity structure

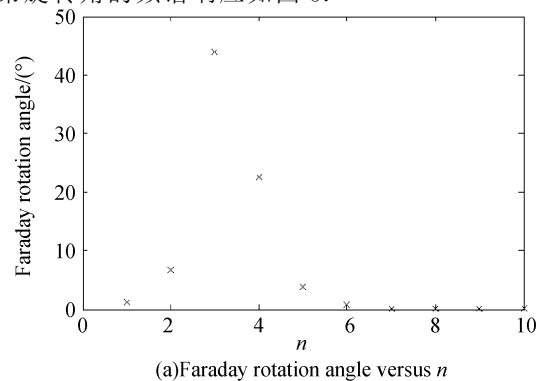
取入射的平面单色波波长为 1550 nm . 在这个波长, SiO_2 和 GaAs 的相对介电常量分别为 $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 2.05$, $\epsilon_{\text{GaAs}} = 11.36$; Bi: YIG 的相对介电常量为 $\epsilon_1 = 4.75$, $\epsilon_2 = 0.00269$. SiO_2 和 GaAs 层的光学厚度均取为 $1/4$ 的光学波长; Bi: YIG 层的光学厚度取为 $3/2$ 的光学波长. 在 1550 nm 这个波长, Bi: YIG、GaAs 和 SiO_2 材料的吸收都可以忽略不计.

3 结果与讨论

$(N_2/N_1)^n/M/(N_1/N_2)^n/N_1/(N_2/N_1)^n/M/(N_1/N_2)^n$ 结构的一维磁性光子晶体, 其磁光特性随周期数的变化如图 4. 由图中可以看出, 当周期数 $n=3$ 时, 中心波长处的法拉第旋转角接近 45° , 同时透过率也近似 100% .

此时, 磁光材料的厚度为 $2.13 \mu\text{m}$, 一维磁性光子晶体的总厚度为 $7.03 \mu\text{m}$.

$(N_2/N_1)^3/M/(N_1/N_2)^3/N_1/(N_2/N_1)^3/M/(N_1/N_2)^3$ 结构的一维磁性光子晶体, 其透过率和法拉第旋转角的频谱响应如图 5.



(a) Faraday rotation angle versus n

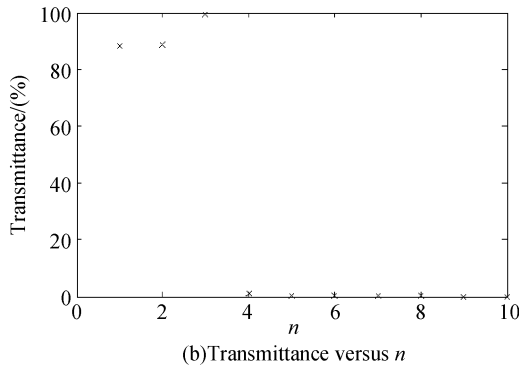


图4 在 $\lambda=1550\text{ nm}$ 时法拉第旋转角与透过率随周期数的变化

Fig. 4 Faraday rotation angle and transmittance as a function of repetition number at $\lambda=1550\text{ nm}$

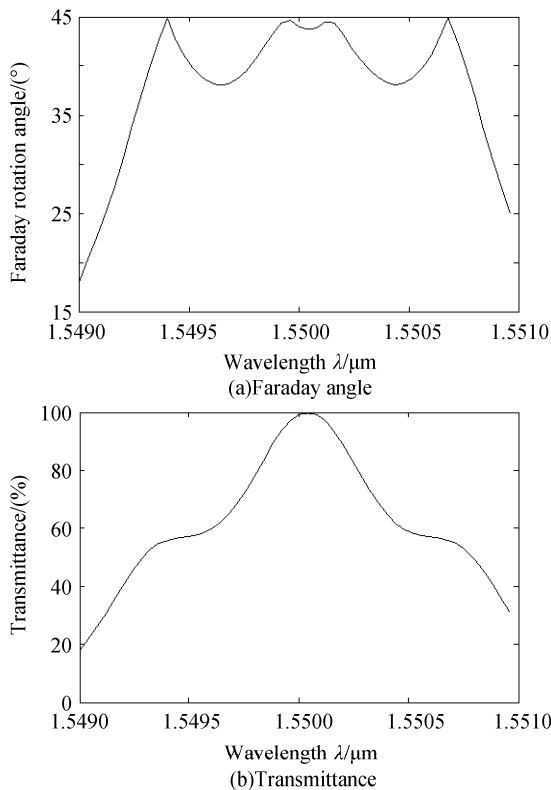


图5 法拉第旋转角与透过率的频谱响应

Fig. 5 Spectrum response of Faraday angle and transmittance

由图5可以看出,与文献[5]报道的相比,频谱响应得到了很大的改善.

4 结论

数值计算结果表明,结构为 $(N_2/N_1)^3/M/(N_1/N_2)^3/N_1/(N_2/N_1)^3/M/(N_1/N_2)^3$ 的一维磁性光子晶体,在 $\lambda=1550\text{ nm}$ 时其光学性能能很好的满足光隔离器的要求(透过率 $T>95\%$ 和法拉第旋转角 $\theta_F=45^\circ$),而且法拉第旋转角与透过率的频谱响应范围也很宽.此时,磁光材料的厚度仅为 $2.13\text{ }\mu\text{m}$,一维磁性光子晶体的总厚度也只有 $7.03\text{ }\mu\text{m}$.而单独的一块磁性材料,要产生 45° 的法拉第旋转角,则至少需要 $450\text{ }\mu\text{m}$.文献[5]中双缺陷结构的一维磁性光子晶体的总厚度也要 $12.95\text{ }\mu\text{m}$.

参考文献

- [1] INOUE M, FUJII T. A theoretical analysis of magneto-optical effect of YIG films with random multilayer structures[J]. *J Appl Phys*, 1997, **81**(4):5659-5661.
- [2] INOUE M, FUJII T. Huge enhancement of the magneto-optical effect of films with disordered multilayer structures supposing the localization of light[J]. *J Magn Soc Jpn*, 1997, **21**:187-192.
- [3] INOUE M, ARAI K, FUJII T, et al. Magneto-optical properties of one-dimensional photonic crystals composed of magnetic and dielectric layers[J]. *J Appl Phys*, 1998, **83**(6):6768-6770.
- [4] SAKAGUCHI S, SUGIMOTO N. Transmission properties of multilayer films composed of magneto-optical and dielectric materials[J]. *J Lightwave Technol*, 1999, **17**(6):1087-1092.
- [5] KATO H, MATSUSHITA T, TAKAYAMA T, 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.
- [6] 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, 安鹤男, 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.
- [7] WEN Xiao-wen, LI Guo-jun, QIU Gao-xin, et al. The working stability of the reflection-mode magneto-optical multilayer film isolators[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(4):1847-1853.
温晓文, 李国俊, 仇高新, 等. 反射型磁光多层膜隔离器工作稳定性的研究[J]. 物理学报, 2005, **54**(4):1847-1853.

Structure Research on One-dimensional Magneto-photonic Crystals Used in Optical Isolator

ZHOU Hui, ZHANG Deng-guo, OU-YANG Zheng-biao, LI Jing-zhen

(*Department of Electronic Science and Technology, College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China*)

Received date: 2006-07-27

Abstract: Transfer matrix method is used to analyze the one-dimensional (1-D) magneto-photonic crystals (MPCs). Properties of one-dimensional magneto-photonic crystals are simulated numerically for various structure parameters. A new type of multilayer film composed of alternating layers of magneto-optical and dielectric materials is obtained, which can be used as Faraday rotation of an isolator in optical integrated circuits. The typical thicknesses of the garnet films and the entire film are $2.13 \mu\text{m}$ and $7.03 \mu\text{m}$, respectively.

Key words: Photonic crystal; Optical isolator; Transfer matrix method; Faraday rotation effect

ZHOU Hui was born in 1982. She is a master degree student at present. Her current interest is the theory and application of photonic crystals in optical communication devices and optical integrated circuits.

