

文章编号: 0258-7025(2008)12-1906-04

非互易波导光栅的滤波特性与应用

刘仕景 周海峰 杨建义 王明华 江晓清

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 根据磁光材料的非互易特性和波导光栅的滤波特性,介绍了一种磁光波导光栅的非互易滤波特性及其应用。该磁光波导光栅采用法拉第旋转系数为 $4800^\circ/\text{cm}$ 的掺铈钇铁石榴石(Ce:YIG)材料、单模的脊型补偿墙截面结构和 cosine 型变迹光栅结构的设计。利用有限差分法和等效折射率法模拟该磁光波导光栅非互易效应的大小,同时结合耦合模理论和转移矩阵法对该磁光波导光栅的非互易滤波特性进行分析。结果表明,对于 TE 模和 1550 nm 波段,该磁光波导光栅正反向传输的中心波长偏移 0.8 nm,带宽 0.4 nm(-20 dB)。这种非互易滤波特性可以用来实现波长选择光隔离器和光分插复用器(OADM)等集成光学器件。

关键词 集成光学;非互易滤波特性;等效有效折射率;磁光波导光栅

中图分类号 O 436.3;O 436.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083512.1906

Filtering Characteristic and Application of the Nonreciprocal Waveguide Grating

Liu Shijing Zhou Haifeng Yang Jianyi Wang Minghua Jiang Xiaoqing

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract According to the nonreciprocal characteristic of magneto-optic material and the filtering characteristic of waveguide grating, the nonreciprocal filtering characteristic and the application of magneto-optic waveguide grating are presented. YIG crystal doped by Ce (Ce:YIG) with Faraday rotation angle (θ_F) of $4800^\circ/\text{cm}$, rib section of compensation wall of single mode and apodizer grating of cosine type are chosen to design the magneto-optic waveguide grating. The method of finite-difference and equivalent effective index are used to simulate the intensity of the nonreciprocal effect of the magneto-optic waveguide grating. Besides, coupled-mode theory and transfer matrix method are also used to analyze the nonreciprocal filtering characteristics of the magneto-optic waveguide grating. The result indicates that for transverse electric (TE) mode and the wave band of 1550 nm, the forward center-wavelength of the magneto-optic grating is shifted by 0.8 nm relative to the backward center-wavelength and the bandwidth is 0.4 nm (-20 dB). This kind of nonreciprocal filtering characteristic can be applied to integrated optical devices such as nonreciprocal isolator and optical add-drop multiplexer (OADM).

Key words integrated optics; nonreciprocal filtering characteristic; equivalent effective index; magneto-optic waveguide grating

1 引言

众所周知,目前广泛应用于光纤通信领域的体材料型隔离器利用了磁光材料的非互易特性。随着新一代光纤通信系统的不断完善,在光通信系统中具有十分重要作用的体材料磁光器件逐渐暴露出其成本高、体积大、损耗大、机械稳定性差、难以集成等缺点,因而,波导型非互易器件吸引了大量关注。人

们已经把磁光非互易效应引入到各种结构和器件中(如传统波导结构马赫-曾德尔干涉仪(MZI)、多模干涉耦合器(MMI)、微环等)来实现相应的非互易功能,具有尺寸小、结构紧凑等特点。近年来,对波导光栅的研究趋于成熟^[1~3],人们把磁光效应与波导光栅结合起来研究,如分析了带缺陷的光子带隙结构对法拉第旋转角的影响^[4],研究了啁啾磁光布

收稿日期:2008-01-22;收到修改稿日期:2008-04-30

基金项目:国家 973 计划(2007CB613405)和国家自然科学基金(60777015)资助项目。

作者简介:刘仕景(1984—),男,安徽人,硕士研究生,主要从事磁光波导器件方面的研究,E-mail:lsjcmz@zju.edu.cn

导师简介:江晓清(1959—),男,浙江人,教授,博士生导师,主要从事集成光学器件、光电子与激光技术应用方面的研究。

E-mail:iseejxq@zju.edu.cn

拉格光栅的光谱特性^[5]。本文把磁光效应引入波导光栅,基于耦合模理论,利用转移矩阵法、有限差分法和等效折射率法分析了磁光波导光栅的非互易滤波特性,利用该非互易特性,可构成具有非互易功能的光隔离器和光分插复用器(OADM)等集成光学器件。

2 磁光波导的非互易特性

在磁场或磁矩作用下,物质的电磁特性(如磁导率、介电常数、磁化强度、磁畴结构、磁化方向等)会发生变化,因而使通向该物质的光的传输特性也随之发生变化。磁光效应就是指光通过磁场或磁矩作用下的物质时,其传输特性的变化。传统磁光材料主要是指稀土磁光材料,稀土元素由于4*f*电子层未填满,因而产生未抵消的磁矩,这是强磁性的来源,4*f*电子的跃迁是光激发的起因,导致强的磁光效应。磁光科顿-穆顿(Cotton-Mouton)效应^[6]:在与光传播方向垂直的外加磁场作用下,光在透过磁光材料时,传播常数会发生变化,有效折射率(n_{eff})随之变化。

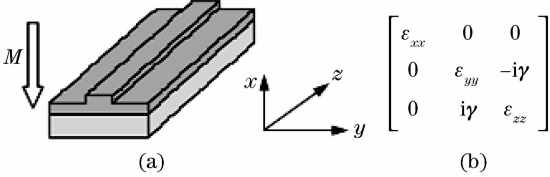


图1 (a) 磁光波导;(b) 外加磁场下的介电常数

Fig. 1 (a) Magneto-optical waveguide; (b) dielectric constant in external magnetic field

图1(a)中白色箭头表示外加磁场方向,光在透过磁光波导时,介电常数张量(y, z)分量不再为零,即产生了非零回转矢量 γ ,如图1(b)所示

$$\gamma = n\lambda\Theta_F/\pi, \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \Theta_F = FHL, \quad (2)$$

式中 n 为磁光材料的折射率, λ 为传播波长, Θ_F 为单位长度的法拉第旋转角, H 为磁场强度, L 为材料长度, F 为材料的贾尔德系数。

同时,正反向传播常数会发生变化,即产生所谓的非互易相移(NPS)。由微扰理论可得到 NPS 表达式^[7,8],对 TE 模, TM 模分别有

$$\delta\beta_{\text{TE}} = \frac{\omega \epsilon_0}{N\beta_{\text{TE}}} \iint \gamma_x E_y^* \partial_y E_y dx dy, \quad (3)$$

$$\delta\beta_{\text{TM}} = -\frac{\omega \epsilon_0}{N\beta_{\text{TM}}} \iint \gamma_y E_x^* \partial_x E_x dx dy, \quad (4)$$

$$\text{其中} \quad N = \frac{1}{2} \iint [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^* + \mathbf{E}^* \times \mathbf{H}]_z dx dy.$$

3 磁光波导光栅结构的设计

设计了脊型的补偿墙截面结构,如图2(a),(b)所示,为保证单模传输,避免器件在多模条件下性能恶化,脊型结构在单模传输条件下可以使用大截面^[9],这有利于增大工艺制作容差,降低光栅特性对工艺条件的敏感度。图2中 Ce:YIG 的折射率为 2.225;上包层为空气;衬底为 SiO₂, 其折射率为 1.455。

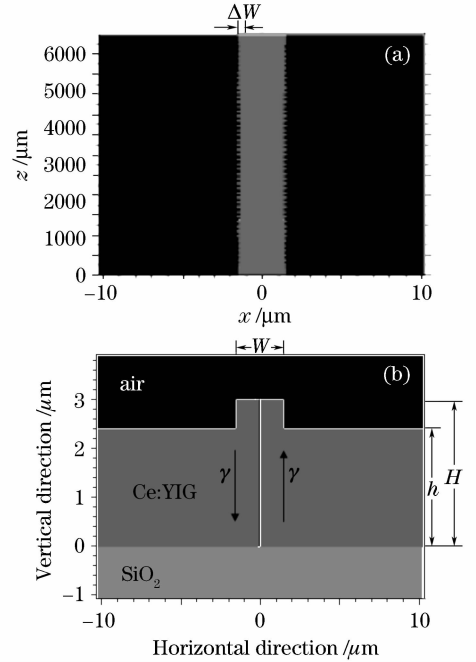


图2 (a) 光栅俯视图;(b) 光栅截面图

Fig. 2 (a) Planform of the grating; (b) cross-section of the grating

由(3),(4)式,采用有限差分法计算该波导的有效折射率变化量(Δn_{eff})。计算步长为 $0.05 \mu\text{m}$,窗口 $16 \mu\text{m} \times 4.5 \mu\text{m}$,采用透明边界条件。通过扫描 Δn_{eff} 随 $W/H = (0.4 \sim 1.2)$, $h/H = (0.4 \sim 0.9)$ 的变化,如图3(a)所示,确定得到较大 Δn_{eff} 的截面各参数: $H = 3 \mu\text{m}$, $h = 1.4 \mu\text{m}$, $W = 1.4 \mu\text{m}$, $L = 6000 \mu\text{m}$,周期为 $0.355 \mu\text{m}$, $\Delta W = 0.05 \mu\text{m}$, $\gamma = 0.0091$,切趾类型:余弦,剖面类型:矩形,得到 $\Delta n_{\text{eff}} = 1.12 \times 10^{-3}$,图3(b)为在此参数下脊型截面的 TE 模的电场分布。

4 非互易特性模拟与分析

4.1 正向传输特性

利用耦合模理论和转移矩阵法分析光栅,使用 Grating Mode 模拟软件,该光栅在以上参数下的正向传输频谱特性如图4所示,光栅中心波长约

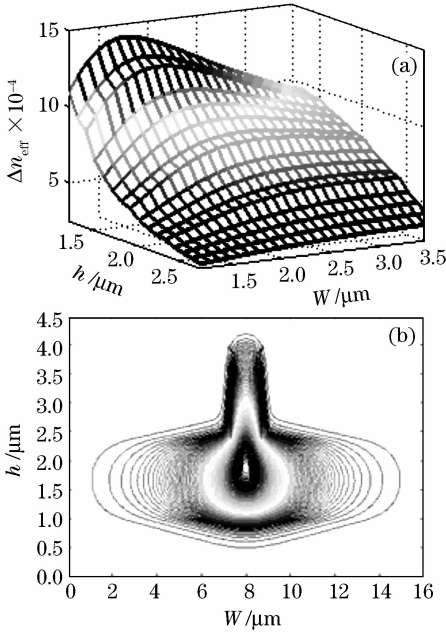


图3 (a) Δn_{eff} 与 W 及 h 的关系; (b) TE 模电场分布
Fig. 3 (a) Relation among Δn_{eff} , W and h ; (b) electric field distribution of TE mode

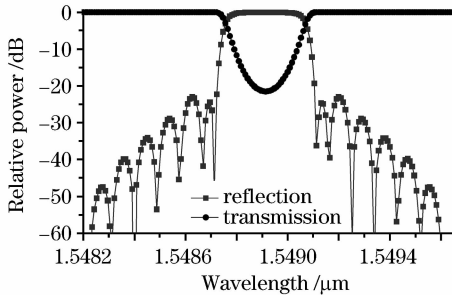


图4 正向传输的频谱特性
Fig. 4 Spectrum of the forward transmission

1548.9 nm, 带宽约 0.4 nm (-20 dB), 此时, $n_{\text{eff}} = 2.18157$ 。

4.2 反向传输特性

当反向传输时, 非互易效应产生的等效折射率变化 Δn_{eff} 可达 1.12×10^{-3} (等效的非互易相移等于 $2\pi \times \Delta n_{\text{eff}} / \lambda$)。由布拉格方程 $\lambda = 2 \times \Lambda \times n_{\text{eff}}$, λ 为中心波长, Λ 为光栅周期, 若 n_{eff} 发生变化 Δn_{eff} , 相应地会引起中心波长变化 $\Delta \lambda$ 。用等效折射率法来模拟磁光光栅的反向频谱特性, 即通过调整芯层磁光材料的等效折射率从而改变整个光栅的有效折射率来等效磁光效应带来的改变。模拟结果表明, 光栅的频谱向右发生了约 0.8 nm 的偏移 (如图 5), 中心波长偏移至波长 1549.7 nm 波段, 带宽也约为 0.4 nm (-20 dB)。

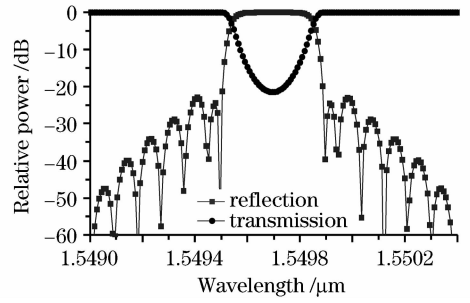


图5 反向传输的频谱特性
Fig. 5 Spectrum of the backward transmission

5 应用举例

5.1 波长选择隔离器

采用如图 2 所设的光栅结构参数, 若外加磁场保持恒定, 正反向频谱特性如图 6 所示, 方块组成的曲线表示正向传输, 波段 ($1548.7 \text{ nm} < \Delta \lambda_1 < 1549.1 \text{ nm}$) 是高反射区, 波长 1549.7 nm 的反射率小于 -40 dB, 圆点组成的曲线表示反向传输, 波长 1549.7 nm 波段 ($1549.5 \text{ nm} < \Delta \lambda_2 < 1549.9 \text{ nm}$) 为高反射区, 反射率接近 0 dB。由此可知, 此光栅可以让波长为 1549.7 nm 的正向光传输时基本通过, 而反射光被光栅基本隔离。

还可以根据需要, 在可调范围内, 通过调节外加磁场强度的大小和方向, 相应选择对不同波段的反射光隔离。

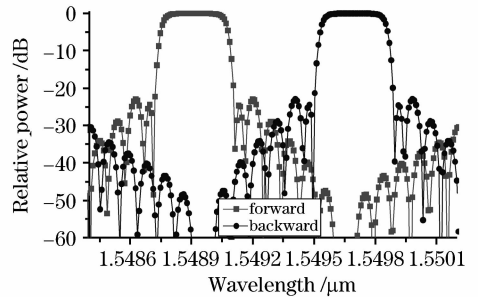


图6 正反向的非互易滤波特性
Fig. 6 Nonreciprocal filtering characteristics of the forward and the backward direction

5.2 非互易光分插复用器

由(1)~(4)式, 外加磁场强度 H 通过 Θ_F 决定回转矢量 γ , 因此通过调节 H 可以调节回转矢量 γ 和 Δn_{eff} , 从而达到调节中心波长非互易量 $\Delta \lambda$ 的目的。不同磁场下, 相应地获得不同的正向传输反射频谱特性 (如图 7), $|\gamma|$ 为回转矢量的大小, $H > 0$ 和 $H < 0$ 分别表示外加磁场方向向上或向下。可调波长范围为 1548.9 ~ 1549.7 nm, 包括三个波段 λ_1 ,

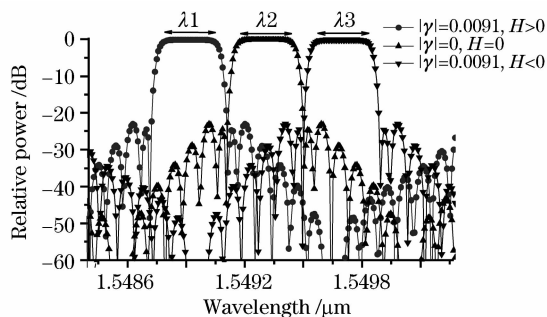


图 7 不同外加磁场下对应的正向反射频谱特性

Fig. 7 Forward reflective spectrum at different external magnetic fields

λ_2, λ_3 。反向传输时, λ_1 和 λ_3 正好互换。

利用可调非互易特性, 结合一个磁光光栅与两个环路器可构成波长可控的非互易光分插复用器, 如图 8 所示。工作原理: 在可调范围内, 通过调节外加磁场 M 的大小和方向, 选择让某一频段的光束通过或被反射, 相应地选择下载和上载的信号波段。例: 若需要下载波段 λ_1 , 只需使外加磁场方向向上 ($H > 0$), $|\gamma| = 0.0091$, 那么这一波段的光束从主干光路 main input 输入, 经过环路器后被光栅反射再经过环路器从 download 支路下载; 同时, 可以上载波段 λ_3 , 信号从 upload 支路经环路器上载后被光栅反射再经环路器从主干光路 main output 输出。同常规的光栅构成的 OADM 相比, 其特点是可以上载与下载波长不同的信号波段。

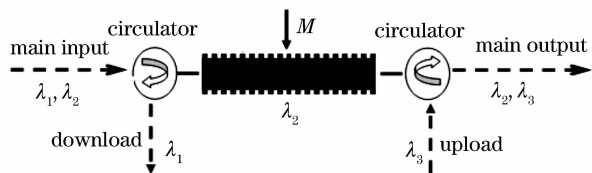


图 8 基于非互易滤波特性的 OADM

Fig. 8 OADM based on nonreciprocal filtering characteristic

6 结论

介绍了基于磁光效应的非互易光栅滤波特性及

其应用, 结合单模脊型截面, 互补墙结构, cosine 型变迹得到良好的频谱特性和 0.8 nm 的中心波长偏移量。理论模拟结果表明, 在波长 1549.7 nm 附近 0.4 nm 带宽内正向光基本通过, 而反向光基本被反射。此外, 可以通过调节外加磁场强度的大小和方向得到一定的波长调节范围, 这种可调非互易滤波特性可应用于光隔离器和 OADM 等, 其 OADM 特点是可以上载与下载波长不同的信号波段。

参 考 文 献

- Huang Huamao, Liu Wen, Huang Dexiu. Analytical solutions for the temperature stability of central wavelength in arrayed waveguide gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1725~1729
黄华茂, 刘文, 黄德修. 阵列波导光栅中心波长温度稳定性的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10):1725~1729
- Lu Ping, Nie Mingju, Liu Deming *et al.*. Fabricating waveguide material of arrayed waveguide grating using ion beam assisted deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):679~682
鲁平, 聂明局, 刘德明等. 离子束辅助沉积真空镀膜技术制备阵列波导光栅波导材料[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):679~682
- Li Wang, Bai Chen, Jialin Chen *et al.*. A simple method to fabricate phase-shifted fiber grating [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(Suppl.):82~83
- F. Jonsson, C. Flytzanis. Spectral windowing with chirped magneto-optical Bragg gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(1):293~298
- M. J. Steel, M. Levy, R. M. Osgood *et al.*. Photonic bandgaps with defects and the enhancement of Faraday rotation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(9):1297~1308
- O. Zhuromskyy. Simulation of Magneto-Optical Devices [D]. Fachbereich Physik der University. Osnabruck, 2000. 27~28
- O. Zhuromskyy, H. Dotsch, M. Lohmeyer *et al.*. Magneto-optical waveguides with polarization-independent nonreciprocal phase shift [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(2):214~221
- O. Zhuromskyy, H. Dotsch, M. Lohmeyer *et al.*. Analysis of polarization independent Mach-Zehnder type integrated optical isolator [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7):1200~1205
- S. P. Pogossian, L. Vescan, A. Vonsovici *et al.*. The single-mode condition for semiconductor rib waveguides with large cross section [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(10):1851~1853