

基于磁光效应的二维三角晶格光子晶体模分复用器

周雯 陈鹤鸣

Mode division multiplexing of two-dimensional triangular lattice photonic crystal based on magneto-optical effect

Zhou Wen Chen He-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 064210 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.064210

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064210>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

覆盖 X 和 Ku 波段的低雷达散射截面人工磁导体反射屏

A low radar crosssection artificial magnetic conductor reflection screen covering X and Ku band

物理学报.2015, 64(2): 024219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024219>

带多孔硅表面缺陷腔的半无限光子晶体 Tamm 态及其折射率传感机理

Tamm state of semi-infinite photonic crystal based on surface defect cavity with porous silicon and its refractive index sensing mechanism

物理学报.2014, 63(24): 244207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244207>

有耗色散光子晶体带隙结构的本征值分析新方法

A novel eigenvalue method for calculating the band structure of lossy and dispersive photonic crystals

物理学报.2014, 63(18): 184210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184210>

光子晶体中基于有效折射率接近零的光束准直出射

Collimating emission from photonic crystals based on the quasi-zero-effective-index

物理学报.2014, 63(17): 174204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.174204>

增益对一维周期结构慢光传输特性影响

Influence of gain on propagation properties of slow light in one-dimensional periodic structures

物理学报.2014, 63(17): 174202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.174202>

基于磁光效应的二维三角晶格光子晶体 模分复用器*

周雯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)

(2014年8月15日收到; 2014年9月23日收到修改稿)

随着全光通信的快速发展, 波分复用传输系统已不能满足大容量光网络的需求, 而模分复用技术利用有限的稳定模式作为独立信道传递信息, 可以成倍地提高系统容量和频谱效率, 是构建未来光网络的关键技术之一. 本文基于掺Bi复合稀土铁石榴石的磁光效应, 设计了1.55 μm 波段的二维三角晶格光子晶体模分复用器. 在该光子晶体结构中引入缺陷, 形成模式分束波导, 通过外加磁场改变其在不同偏振模式下的磁导率, 从而控制TE, TM模式的传输, 实现了1.55 μm 波段的模分复用. 利用平面波展开法和时域有限差分法对此模分复用器进行了能带和传输特性分析, 结果表明: TE和TM模式的透射率均高于92%, 信道隔离度分别为19.7 dB和42.1 dB. 这些特性在未来的大容量光传输系统中有着重要的应用前景.

关键词: 光子晶体, 磁光效应, 模分复用, 1.55 μm

PACS: 42.70.Qs, 42.79.Sz, 75.75.-c, 02.70.Bf

DOI: 10.7498/aps.64.064210

1 引言

磁光晶体是具有磁光效应的材料, 磁光效应包括法拉第效应、克尔磁光效应、塞曼效应和科顿-穆顿效应等. 其中, 尤以稀土石榴石性能最为突出, 已被大量应用于光纤通信系统中的器件, 如光隔离器和环行器等^[1-3]. 由李淼等^[4]提出的掺Bi复合稀土铁石榴石单晶(TbYbBiIG)材料, 在近红外波段具有法拉第增强效应和很小的光吸收损耗, 并且法拉第旋转温度系数小, 仅为 $3.92 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, 可以用于宽带光通信波段温度稳定的高性能磁光器件.

光子晶体是一种由介电常数不同的材料在空间上周期性排列形成的结构, 具有光子禁带和光子局域特性. 人们用这些特性已制作出多种光学元器件, 如光子晶体谐振腔^[5-7]、光滤波器^[8,9]、光调制器^[10,11]等. 在通信与光学传感器领域, 波分复用系统对于宽带的复用技术具有重要意义. 然而, 近

期的研究进展表明, 波分复用光传输的容量增长正在明显减速, 而且其系统实验正在快速接近非线性光纤传输的香农极限, 限制了全光通信的发展. 为了进一步提升光网络容量, 模分复用技术是一种崭新的光多输入多输出传输形式.

目前, 关于少模光纤的模分复用技术^[12-14]研究较多, 所用模分复用器主要基于硅基波导, 而基于光子晶体的模分复用器件少有研究. 本文设计了一种基于磁光效应的二维光子晶体模分复用器, 在三角晶格硅(Si)光子晶体平板中引入TbYbBiIG介质柱, 形成缺陷. 基于TbYbBiIG晶体的磁导率在外加磁场下的偏振特性, 缺陷的折射率随着外磁场的改变而变化, 从而实现1.55 μm 波段TE, TM模式的模分复用. 传统的光子晶体偏振分束器, 如孙露露等^[15]提出的空气孔型光子晶体偏振分束器以及范飞等^[16]提出的基于磁光晶体的THz波段偏振分束器虽然透射率较高, 但没有设计TE, TM模

* 国家自然科学基金(批准号: 61077084)和江苏省普通高校研究生科研创新计划(批准号: CXLX13_451)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chhm@njupt.edu.cn

的模式输出信道, 而周飞等^[17]提出的高效光子晶体偏振分束器可以高效地将 TE, TM 模式从分束波导输出, 其偏振消光比仅为 13.3 dB 和 20.8 dB, 限制了其在模分复用系统的应用. 本文提出的基于磁光效应的介质柱型光子晶体模分复用器可将不同模式的光通过分束信道输出, 具有尺寸小、透射率高、信道隔离度大等特点, 为光传输系统中增加了一种新的复用维度, 大幅度提升了系统容量, 在未来模分复用光通信系统中有着巨大的潜力和广阔的应用.

2 结构模型和模分理论

本文设计的器件可在绝缘硅的基板上实现, 结构为 27×23 方形 Si 介质柱组成的二维三角晶格光子晶体, 在其完整结构的基础上引入线缺陷形成输入主波导 A, 在波导 A 的右侧引入 1×17 TbYbBiIG 介质柱, 形成 TE 模输出波导 B, 并且在波导 A 的上侧引入 11×3 TbYbBiIG 介质柱, 形成 TM 模输出波导 C, 其截面如图 1(b) 所示. 晶格常数 $a_1 = 1.309 \mu\text{m}$, 方形介质柱边长 $\text{width}_1 = 0.44 \mu\text{m}$, 旋转角度 $\theta = 49^\circ$, 波导 B 中 TbYbBiIG 介质柱尺寸 $\text{width}_2 = 0.44 \mu\text{m}$, 晶格常数 $a_2 = 0.92 \mu\text{m}$, 而波导 C 中 TbYbBiIG 介质柱的尺寸和晶格常数均与 Si 介质柱相同, 基底为空气 (折射率为 1). 上下端面设置磁极, 在波导 B 处施加沿铁氧体柱 z 轴向上的可调磁场 B_z , 在波导 C 处施加沿 y 轴向上的可调磁场 B_y .

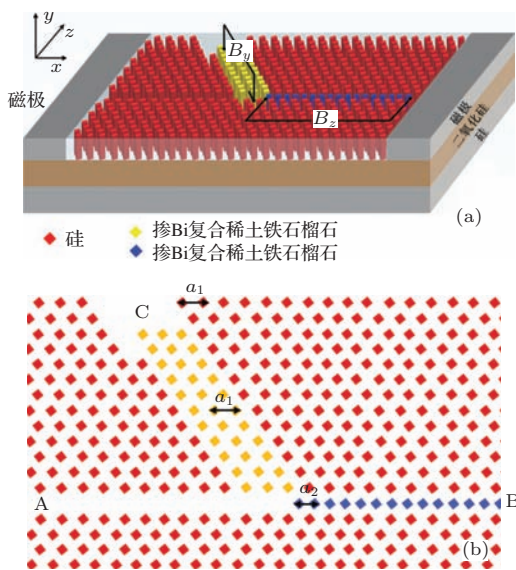


图1 (网刊彩色) 模分复用器件 (a) 结构模型; (b) 截面结构

当给二维铁氧体材料光子晶体施加外磁场时, 由于磁光效应, 导致磁导率发生改变, 进而引起折射率的变化^[18]. 对于 TE 模式, 外磁场方向沿 y 方向时, 因为磁场方向与 TE 模的磁场分量 H_z 方向垂直, 引起周围磁偶极子的运动, 磁导率发生改变. 相反, 对于 TM 模式, 外磁场 y 方向与磁场分量 H_y 平行, 不与材料的偶极矩发生作用, 其能带结构不发生变化, 只有当外磁场沿 z 轴方向时, 磁导率才随着磁场的改变而变化. 磁光材料分别在沿 y, z 方向的外加磁场控制下的磁导率张量为^[19]

$$[\mu_y] = \begin{bmatrix} \mu_y & 0 & -jk \\ 0 & \mu_0 & 0 \\ jk & 0 & \mu_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$[\mu_z] = \begin{bmatrix} \mu_z & jk & 0 \\ -jk & \mu_z & 0 \\ 0 & 0 & \mu_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

(1)—(2) 式中张量的矩阵元为

$$\mu_{y,z} = \mu_0 \left(1 + \frac{w_0 w_m}{w_0^2 - w^2} \right), \quad (3)$$

$$k = \mu_0 \frac{w w_m}{w_0^2 - w^2}, \quad (4)$$

式中, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ W}\cdot\text{A}^{-1}\cdot\text{M}^{-1}$, 为真空中的磁导率; w 为传输光的角频率; $w_m = 4\pi\gamma M_s$, $w_0 = \gamma B_0$, B_0 为外加磁场的磁场强度, $\gamma = 1.759 \times 10^{11} \text{ C}\cdot\text{kg}^{-1}$, 为磁旋比.

当外磁场方向沿 y 方向时, TE 模对应的磁导率 μ_{TE} 由 (1), (3), (4) 式可得

$$\mu_{\text{TE}} = \frac{\mu_y^2 - k^2}{\mu_y} = \frac{(w_{ey} + w_m)^2 - w^2}{w_{ey}(w_{ey} - w_m) - w^2}, \quad (5)$$

当外磁场方向沿 z 方向时, TM 模对应的磁导率 μ_{TM} 由 (2)—(4) 式可得

$$\mu_{\text{TM}} = \frac{\mu_z^2 - k^2}{\mu_z} = \frac{(w_{ez} + w_m)^2 - w^2}{w_{ez}(w_{ez} - w_m) - w^2}, \quad (6)$$

式中 $w_{ey} = \gamma B_{ey}$, $w_{ez} = \gamma B_{ez}$. B_{ey} 和 B_{ez} 分别为沿 y, z 方向的外磁场的磁场强度.

本文使用的铁氧体材料为 TbYbBiIG 晶体^[4], 在近红外通信波段 ($0.7\text{--}2.5 \mu\text{m}$) 的吸收损耗很小, 可以忽略, 其饱和磁化强度为 $4\pi M_s = 6 \times 10^5 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$. 各种稀土石榴石材料的折射率覆盖的范围大 ($1.8\text{--}2.5$)^[20], 取折射率 $n = 2.3$. TbYbBiIG 晶体在外磁场控制下的磁导率如图 2(a) 所示.

从图 2(a)可知, TbYbBiIG 材料在外加磁场的控制下, 磁导率随着 w_0 的增长而减小, 直至趋近于 1. 当光传输的归一化频率 w 较大趋近于 1 时, μ 较大, 接近于 5, 并且 μ 随着 w 的减小而减小. 本文设计的模分复用器在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段适用, 此时 $w = 0.845 \cdot 2\pi ca^{-1}$. 在 $1.55 \mu\text{m}$ 波段下的磁导率与外磁场的磁场强度的关系如图 2(b)所示. 材料的折射率为 $n = \sqrt{\epsilon\mu}$, 当外磁场的方向沿 y 方向时, TE 模式对应的折射率 $n_{\text{TE}} = \sqrt{\epsilon\mu_{\text{TE}}}$, 而 μ_{TM} 不发生改变, TM 模式对应的折射率 $n_{\text{TM}} = 2.3$. 同理, 当外磁场的方向沿 z 方向时, $n_{\text{TM}} = \sqrt{\epsilon\mu_{\text{TM}}}$ 随着磁场强度的改变而变化, 而 n_{TE} 的值不变, 为 2.3. 在不同方向的外磁场 B_{ez} 和 B_{ey} 下, TE, TM 模式对应的 TbYbBiIG 材料折射率如图 3 所示.

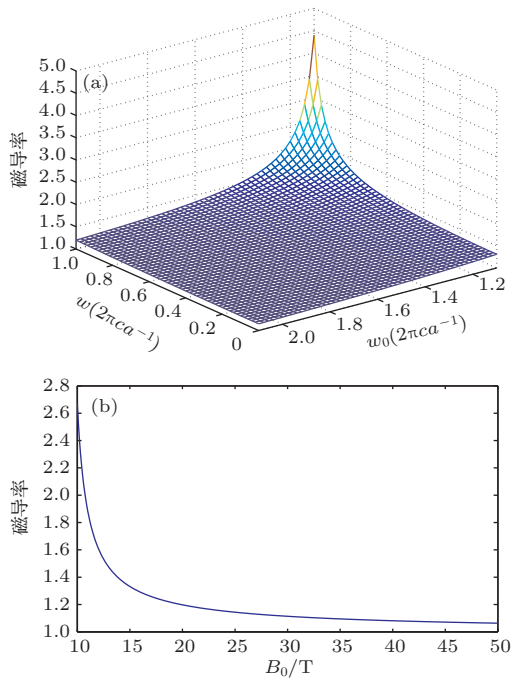


图 2 (网刊彩色)(a) 在外加磁场控制下磁导率的变化; (b) 归一化频率 $w = 0.845 \cdot 2\pi ca^{-1}$ 时磁导率随磁场强度的变化

当沿 y, z 轴方向的外磁场的磁场强度均为 10.5 T 时, $n_{\text{TE}}, n_{\text{TM}}$ 均可达到 3.4. 目前, 已经产生了 90 T 的超强磁场, 因此强度为 10.5 T 的外磁场是可以实现的. 二维三角晶格光子晶体中的硅介质柱折射率为 3.4, 当方形介质柱旋转角度达到 49° 时, 归一化频率完全带隙达到最大值为 $0.05(2\pi c \cdot a^{-1})$, w 的范围为 $0.843(2\pi c \cdot a^{-1}) - 0.893(2\pi c \cdot a^{-1})$, 如图 4(a)所示. 当波导 B 处于沿 z 轴方向, 磁场强度为 10.5 T 的外加磁场中, 其带隙如图 4(b), (c)所示, 归一化频率为 $w = 0.845 \cdot 2\pi ca^{-1}$ 的 TE 模式处于通带, 而 TM 模式位于禁带. 相反地, 当波导 C 处于沿 y 轴方向的外加磁场中时, 其能带如图 4(d), (e)所示, TE 模式位于带隙之中, 而 TM 模式可以通过波导 C.

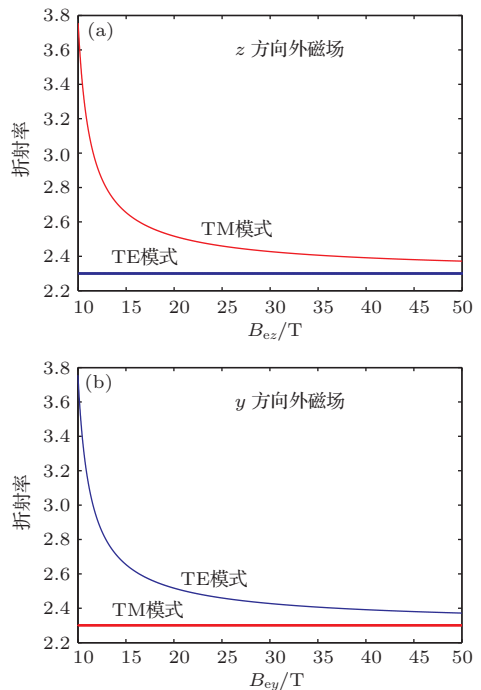


图 3 TbYbBiIG 材料在不同偏振模式下的折射率 (a) 磁场沿 z 方向; (b) 磁场沿 y 方向

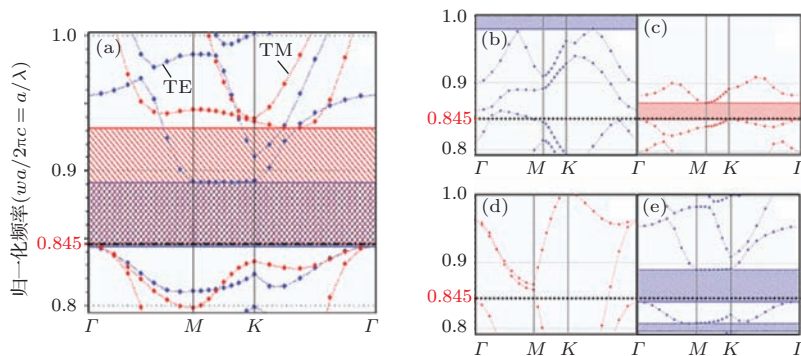


图 4 (网刊彩色)(a) Si 介质柱完整结构完全带隙图; 波导 B 结构处于 z 轴方向外磁场时 (b) TE 能带图, (c) TM 能带图; 波导 C 结构处于 y 轴方向外磁场时 (d) TM 能带图, (e) TE 能带图

3 仿真结果与分析

分别在光子晶体模分复用器的波导B, C处施加沿 y, z 方向, 磁场强度为10.5 T的外磁场, 波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 的TE, TM光从波导A入射, 在波导B和C处分别放置探测器, TE, TM模式解复用的稳态场强分布以及时域稳态如图5所示.

从图5(a), (b)中可知, TE, TM两个模式有效地解复用并通过信道输出. 从图5(c), (d)中可知TE的透射率为93%, TM的透射率为92.4%, 透射

率均高于92%. 在多路模分复用通信系统中, 信道隔离度为相邻信道之间模式能量的串扰程度. 本文设计器件的信道隔离度为

$$S^B = 10 \lg \frac{T_{TE}^B}{T_{TM}^B}, \quad (7)$$

$$S^C = 10 \lg \frac{T_{TE}^C}{T_{TM}^C}. \quad (8)$$

因此, TE模分束波导的信道隔离度为19.7 dB, 而关于TM模分束的信道隔离度高达42.1 dB, 有效地实现了 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的模分复用功能.

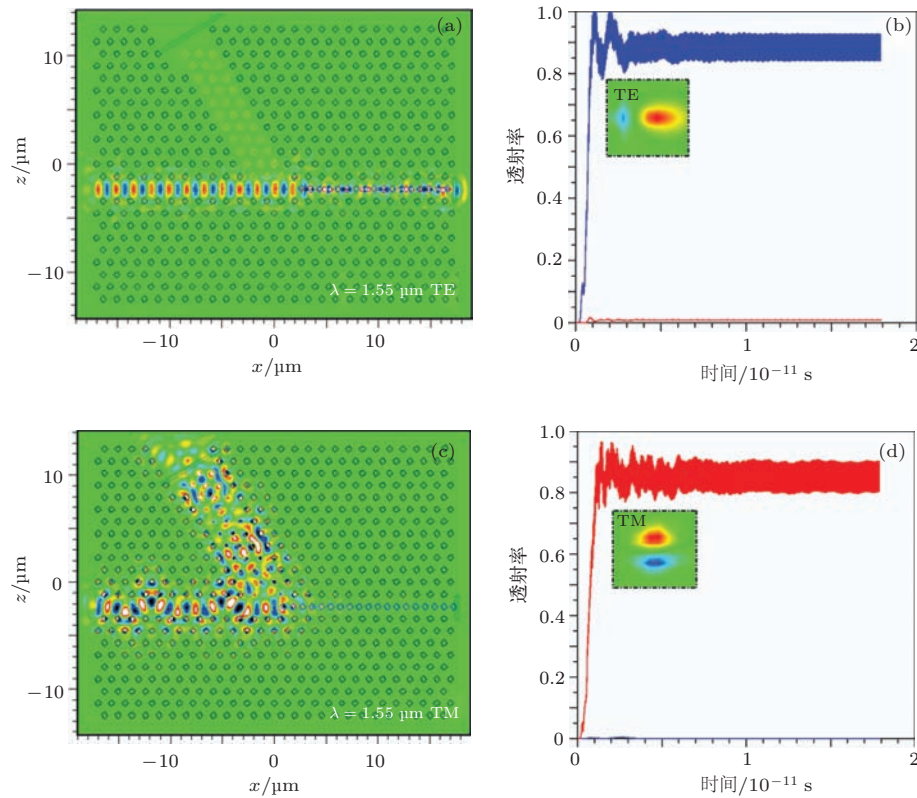


图5 (网刊彩色) 当入射波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, TE 模的 (a) 解复用稳态场强分布, (b) 模场分布以及时域稳态图; TM 模的 (c) 解复用稳态场强分布, (d) 模场分布以及时域稳态图

4 结 论

本文提出了一种基于磁光效应的二维光子晶体模分复用器, 在Si光子晶体平板中引入铁氧体材料TbYbBiIG, 其折射率在外加磁场的控制下会发生改变, 进而引起TE, TM模式在波导中传播特性的变化. 利用这一特性, 实现了 $1.55 \mu\text{m}$ 波段的模分复用. 利用时域有限差分法分析了其性能指标, 结果表明该器件模式透射率高, 信道隔离度大, 器件尺寸仅为 $35 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 有效地提升了光网络通信的容量, 为光子晶体模分复用器件的设计提供

了一种新思路, 在未来光通信领域有着巨大的潜力和广阔的应用.

参考文献

- [1] Scott G B, Laklison D E 1976 *IEEE Trans. Magn.* **12** 292
- [2] Tamaki T, Kaneda H, Kawanmura N 1991 *Appl. Phys.* **70** 4581
- [3] Matsuda K, Minemoto H, Kamada O 1987 *IEEE Trans. Magn.* **23** 3479
- [4] Li M, Xu Z C, Huang M, Yan M, Zhang Z L 2006 *Infrared Millim. Waves* **25** 101 (in Chinese) [李森, 徐志成, 黄敏, 严密, 张志良 2006 红外与毫米波学报 **25** 101]

- [5] Ying J F, Yi S L, Sheng D L 2013 *Opt. Lett.* **38** 4915
- [6] Wang D, Cui K Y, Feng X, Huang Y D 2013 *Chin. Phys. B* **22** 094209
- [7] Jiang B, Zhang Y J, Zhou W J, Chen W, Liu A J, Zheng W H 2011 *Chin. Phys. B* **20** 024208
- [8] Zhao X X, Zhu Q F, Zhang Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2864
- [9] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese) [陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [10] Chen H M, Su J, Wang J L, Zhao X Y 2011 *Opt. Express* **19** 3599
- [11] Zhang X Y, Hosseini A, Charkravarty S 2013 *Opt. Lett.* **38** 4931
- [12] Han J W, Zhang J, Zhao Y L, Gu W Y 2013 *Optik* **124** 1287
- [13] Guillaume L C, Yves Q, Antoine L R 2013 *Opt. Express* **21** 31646
- [14] Yao S C, Fu S N, Zhang M M, Tang M, Shen P, Liu D M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 144215 (in Chinese) [姚殊畅, 付松年, 张敏明, 唐明, 沈平, 刘德明 2013 物理学报 **62** 144215]
- [15] Sun L L, Shen Y F, Wang J, Zhou J 2010 *Acta Photon. Sin.* **39** 1796 (in Chinese) [孙露露, 沈义峰, 王娟, 周杰 2010 光子学报 **39** 1796]
- [16] Fan F, Guo Z, Bai J J, Wang X H, Chang S J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 084219 (in Chinese) [范飞, 郭展, 白晋军, 王湘晖, 常胜江 2011 物理学报 **60** 084219]
- [17] Zhou F, Fei H M, Yang Y B, Wu J J 2014 *Infrared Millim. Waves* **33** 155 (in Chinese) [周飞, 费宏明, 杨毅彪, 武建加 2014 红外与毫米波学报 **33** 155]
- [18] Chul S K, Jae E K, Hae Y P 2000 *Phys. Rev. B* **61** 15523
- [19] Pozar D M 2011 *Microwave Engineering* (4th Ed.) (Wiley: John Wiley & Sons, Inc.) p477
- [20] Wang W, Lan Z W, Ji H, Wang H C 2002 *Electron. Compon. Mater.* **21** 23 (in Chinese) [王巍, 兰中文, 姬洪, 王豪才 2002 电子元件与材料 **21** 23]

Mode division multiplexing of two-dimensional triangular lattice photonic crystal based on magneto-optical effect*

Zhou Wen¹⁾ Chen He-Ming^{2)†}

1) (Department of Opto-Electronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

2) (Department of Bell, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

(Received 15 August 2014; revised manuscript received 23 September 2014)

Abstract

With the rapid development of all-optical communication, the wavelength division multiplexing transmission system cannot meet the requirements of high capacity in optical networks, while mode division multiplexing uses the limited stability modes as independent channels to transmit information, improving the system capacity and spectrum efficiency, which is one of the key technologies in the construction of future optical network. In this paper, a mode division multiplexer of two-dimensional triangular lattice photonic crystal in 1.55 μm band based on the magneto-optic effect of Bi-doped compound rare earth iron garnet bulk single crystal is proposed. The defects of TbYbBiIG medium are introduced as mode splitting waveguides in photonic crystal, of which the permeability changes with the applied magnetic field in different polarization modes. Therefore, mode division multiplexing in 1.55 μm band can be achieved by controlling the propagations of TE and TM mode. The band and transmission characteristics of this device can be analyzed by using the plane wave expansion and finite difference time domain method. The results show that the transmission rates of TE and TM modes both exceed 92% and channel segregation degrees reach 19.7 dB and 42.1 dB respectively. These features indicate the important application prospect in the future high-capacity optical transmission system.

Keywords: photonic crystal, magneto-optic effect, mode division multiplexing, 1.55 μm

PACS: 42.70.Qs, 42.79.Sz, 75.75.-c, 02.70.Bf

DOI: 10.7498/aps.64.064210

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61077084), and the Colleges and Universities in Jiangsu Province Plans for Graduate Research and Innovation, China (Grant No. CXLX13_451).

† Corresponding author. E-mail: chhm@njupt.edu.cn