

doi: 10.3788/gzxb20144306.0623002

基于二维磁性光子晶体的三端口 Y 形 铁氧体柱环行器

王勇, 张登国, 欧阳征标, 李景镇

(深圳大学 电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

摘 要:提出一种二维磁性光子晶体缺陷结构, 实现了三端口 Y 形铁氧体柱环行器。采用平面波展开法和有限元方法计算环行器外部特性, 计算结果表明: 三角晶格二维光子晶体点缺陷微腔谐振频率与相应实验结果一致。在中心频率处, 环行器传输效率最高, 在输出与输入端口之间几乎没有能量损失; 隔离度与插入损耗分别达到 23.2 dB 和 0.003 7 dB。当偏离中心频率时, 传输效率逐渐降低, 随频率偏移量增大, 环行器传输特性急剧变差。由于所设计的环行器以空气为背景, 可克服空气孔结构 Y 形环行器隔离度低的不足, 解决多个铁氧体柱带来的损耗大的问题, 因此具有一定意义。

关键词:二维磁性光子晶体; 铁氧体; 环行器; 隔离度; 插入损耗

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0623002-4

Three-port Y-Junction Optical Circulator Using a Ferrite Cylinder in Two-dimensional Magneto-photonic Crystals

WANG Yong, ZHANG Deng-guo, OUYANG Zheng-biao, LI Jing-zhen

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

Abstract: A new defect structure of two-dimensional magnetic - photonic crystal was proposed and applied to implement the three-port Y-junction circulator using a ferrite cylinder. External characteristics of the circulator were calculated by the plane wave expansion method and finite element method, the numerical results show that there is an agreement between the resonance frequency of micro-cavity constructed by a point defect in the 2D triangular lattice photonic crystal with those results of corresponding experiments. In the center frequency, the transmission efficiency of the circulator is the highest and there is no energy loss between output port and input port; the isolation and insertion loss of circulator respectively reach 23.2 dB and 0.003 7 dB. When frequency diverges from the center frequency, the transmission efficiency gradually decreases with increasing frequency offset, and the transmission characteristics of the circulator sharply deteriorated. This design of circulator with air as background, can overcome low isolation of circulator with an array of air holes, and solve the high loss from multiple ferrite cylinders, having obvious superiorities.

Key words: Two-dimensional magneto-photonic crystals; Ferrite; Circulator; Isolation; Insertion loss

OCIS Codes: 230.5298; 230.3810; 130.5296

0 引言

1987 年, 光子晶体作为一种新的折射率周期性变化的人造光学材料被首次提出^[1-2]。由于其具有光子带隙、光局域效应等特性, 被广泛应用于高品质谐振腔、

零阈值激光器、光学滤波和光子晶体光纤等光通信器件的研究, 成为当下光子学与光学工程研究中的热点。光子晶体可控制光子的运动, 被认为是未来光子器件研制的核心, 而光子器件的研制与发展直接影响光通信领域的发展, 因此光子晶体的研究具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61171006)资助

第一作者: 王勇(1986-), 男, 硕士, 主要研究方向为集成光子学与光通信器件。Email: yongw2008@yeah.net

导师(通讯作者): 张登国(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微波与毫米波器件、磁性光子晶体器件等。Email: dgzhang@szu.edu.cn

收稿日期: 2013-11-06; 录用日期: 2014-01-24

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

1997年, Inoue等^[3-4]发现多层膜结构组成的磁光介质与电介质材料具有更强的法拉第旋转效应, 随后研究^[4]的“三明治”结构, 中间是一层磁光介质薄膜, 而两边则是普通的电介质膜. 这种结构可以增强法拉第旋转效应, 但传输系数却减小了^[5]. 基于法拉第旋转效应的光隔离器^[6-7]和环行器的研究在整个光学系统中扮演着重要角色.

二维磁性光子晶体 (Two-Dimensional Magneto-Photonic Crystals, 2D MPCs) 最早是由 Wang Zheng 等人于 2005 年提出, 并将其运用于一种“风车型”二维磁性光子晶体环行器的设计^[8]. 该方案使用微扰理论和时域有限差分法 (Finite-Different Time-Domain, FDTD) 仿真模拟二维磁性光子晶体环行器, 并计算插入损耗和隔离度等外部特性参量^[9-11]. 2011年, 二维空气孔阵列缺陷结构被提出, 并被用于实现标准的 120° Y 型环行器^[12], 但这种方案设计的环行器隔离度较低且带宽很窄. 2012年, Wang Qiong 等人将正方晶格的介质柱阵列置于空气中, 在点缺陷处嵌入铁氧体柱构成二维磁性光子晶体, 并以此为基础实现了三端口 T 型环行器^[13]. 该环行器结构中设计了一个巧妙的反射腔, 明显提高了隔离度性能, 但结构中多个铁氧体柱带来了较大的插入损耗, 带宽也不理想.

本文在外加直流磁场作用下, 在二维光子晶体中加入磁光介质缺陷构成二维磁性光子晶体, 将光子晶体的光子禁带和光局域特性与磁光介质的磁光特性相结合, 实现了三端口 Y 形环行器. 该环行器以空气为背景, 可克服空气孔结构 Y 形环行器隔离度低的不足, 解决多个铁氧体柱带来的损耗大的问题.

1 二维磁性光子晶体的缺陷结构

结合已有的几种环行器谐振腔与线缺陷波导的设计优点, 如图 1(a)~(c), 本文提出一种更加简单的二维磁性光子晶体缺陷结构来实现三端口 Y 形环行器, 如图 1(d). 该结构采用三角晶格介质柱周期性排列, 中心点缺陷位置嵌入铁氧体柱 ($\epsilon_r = 12.9$), 构成二维磁性光子晶体. 在外加磁场的的作用下, 此处的铁氧体柱既作谐振微腔, 又提供拉法拉第旋转角. 理论上, 任何被折射率不同介质所包围的柱体结合恰当的边界都可视为圆柱谐振腔, 与图 1(c) 相比, 这种安排将大大降低多个铁氧体柱所带来的损耗. 图中 3 个线缺陷呈 120°, 构成标准的 Y 形波导. 波导与谐振微腔边界紧密相邻 (图 1(a)~(b) 都有空气孔间隔), 不需要加入图 1(b) 虚线框内 2 个半径较小的点缺陷来增强谐振腔与波导之间的耦合效率. 因此, 整个波导中没有引入其他缺陷结构, 信号的电振幅更加稳定. 此外, 该结构可灵活改变中心铁氧体柱半径, 只要在光子禁带范围内, 可以在不同频率下实现环行功能.

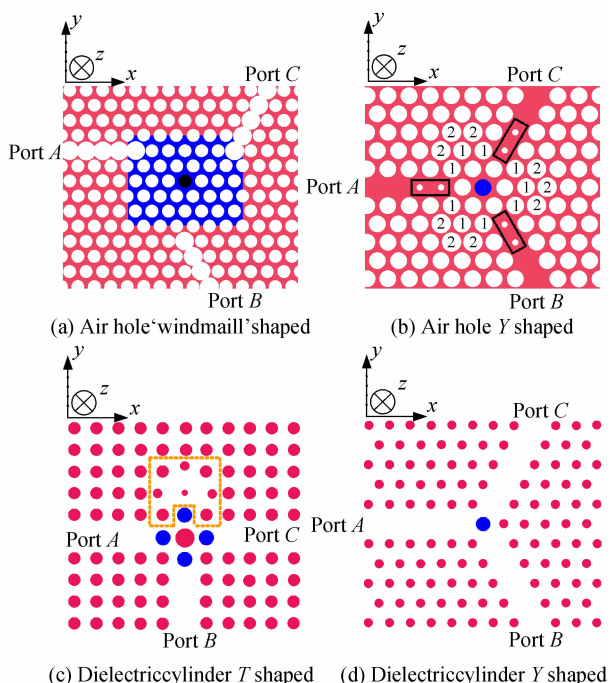


图 1 二维磁性光子晶体环行器的结构
Fig. 1 Structures of 2D-MPCs circulator

2 二维光子晶体带隙及点缺陷模场分析

为使数值计算结果更加准确可靠, 选取与文献^[13]中相同的结构参量, 晶格常量 $a = 11.25 \text{ mm}$, 介质柱阵列折射率 $n_0 = 3.4$, 半径 $r_0 = 0.18a$, 介质柱则依据文献^[14]选择损耗较低的陶瓷材料.

在没有外加磁场情况下, 采用平面波 (Plane Wave Expansion, PWE) 展开法得到光子晶体中 TE 模的带隙结构, 如图 2. 得到的光子禁带归一化频率范围为 $0.2385(2\pi c/a) \sim 0.4216(2\pi c/a)$, 其中 c 为光速. 凡在此频率范围内的电磁波进入线缺陷波导, 均会被限制在波导内稳定传播. 与文献^[13]中采用正方晶格介质柱阵列得到的光子禁带相比, 三角晶格获得了更加宽大的禁带范围.

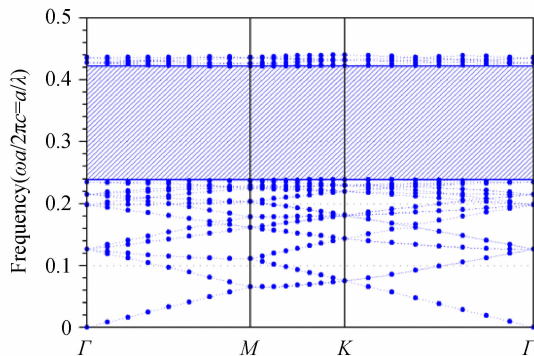


图 2 三角晶格光子晶体 TE 模式带隙结构
Fig. 2 Band gap for triangular lattice photonic crystals

同样, 在没有外加磁场情况下, 采用有限元方法计

算圆柱谐振腔内模式.如图3所示,中心圆形区域的铁氧体柱(半径 $r_1=1.6r_0$)视为圆柱谐振腔,计算时采用散射边界条件(Scattering Boundary Conditions, SBC),外层空气介质可视为无限大.

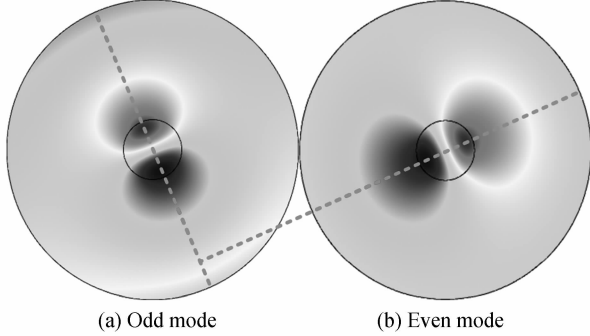


图3 点缺陷微腔中简并模式电场 E_z 分布

Fig. 3 E_z field distribution for the doubly degenerate modes in micro-cavity formed by a point defect

数值计算结果表明,在与文献[13]相同的归一化频率 $0.4132(2\pi c/a)$ 处,二维磁性光子晶体点缺陷微腔内有一对偏振方向互相垂直的旋转简并模式,其电场强度 E_z 分布如图3.图中虚线代表各自的偏振方向,与文献[13]中所得到的结果一致.

3 低损耗Y形2D-MPCs环行器

当点缺陷微腔谐振频率与文献[13]结果一致时,环行器中心频率 $0.4132(2\pi c/a)$ 恰好在光子禁带 $0.2385(2\pi c/a) \sim 0.4216(2\pi c/a)$ 的频率范围内,满足电磁波在光子晶体波导中的传输条件.

3.1 Y型2D-MPCs环行器

在微波波段,外加 z 方向直流磁场,磁光材料的旋磁特性用张量磁导率 μ 表示

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_r & i\kappa & 0 \\ -i\kappa & \mu_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

考虑材料有损耗的情况,式中的元素 μ_r 和 κ 均为复数形式.其中,非对角元素 κ 的符号是由外加直流磁场的方向决定,法拉第旋磁效应的强弱由品质因素 $Q=\kappa/\mu$ 的大小来衡量.在外加 $H_0=2.905 \times 10^5$ A/m直流磁场的作用下,考虑损耗系数 $\alpha=3 \times 10^{-5}$,采用希尔伯特型^[15],张量磁导率中各元素表示为

$$\mu_r = \frac{1 + \omega_m(\omega_0 + i\alpha\omega)}{[(\omega_0 + i\alpha\omega)^2 - \omega^2]} \quad (2)$$

$$\kappa = \omega_m\omega / [(\omega_0 + i\alpha\omega)^2 - \omega^2] \quad (3)$$

$$\omega_0 = \mu_0 \gamma H_0 \quad (4)$$

$$\omega_m = \mu_0 \gamma M_s \quad (5)$$

式中,旋磁比 $\gamma = |e/m| = 1.759 \times 10^{11}$ C/kg,饱和磁化强度 $M_s = 2.39 \times 10^5$ A/m.

在外加直流磁场作用下,采用有限元方法,在约

10.5万个网格单元中计算电磁波的传播情况,边界条件选择完美匹配层(Perfectly Matched Layer, PML).此时两个简并模式在铁氧体区域发生耦合,在波前产生了一个 120° 的法拉第偏转角,电磁波传播方向与耦合波轴向形成完美匹配,从而实现环行功能.图4为归一化频率 $0.4132(2\pi c/a)$ 处,三端口Y形环行器的模拟结果,A、B、C分别表示环行器三个端口.图4(a)中在没有外加磁场情况下($\kappa=0$),电磁波从端口A被平均分配到端口B、C,波前没有发生耦合偏转.图4(b)中,在外加直流磁场情况下,由于法拉第旋转效应,当电磁波从端口A入射,在波导中传输,经铁氧体柱时发生偏转,从端口B流出,而端口C被隔离,以此类推,如图4(c)、(d)所示.

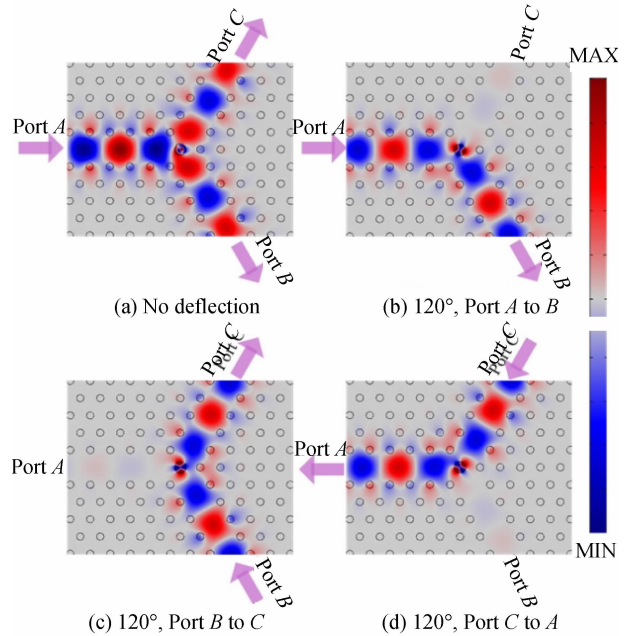


图4 环行器中电磁场传播情况

Fig. 4 Electromagnetic propagation in 2D MPCs circulator

3.2 环行器外部特性计算

信号源从三个端口(A、B、C)其中一个输入,在另外两个端口处搜集能量,比较输出与输入端口之间的能量变化,并计算传输效率、隔离度和插入损耗等参量,结果如图5.

数值结果表明,在中心频率处,环行器传输效率最高,在输出与输入端口之间几乎没有能量损失,隔离度与插入损耗分别达到23.2 dB和0.0037 dB.当偏离中心频率时,传输效率逐渐降低,随频率偏移量增大,环行器传输特性急剧变差.从图5可以看到,中心频率两侧,变化趋势明显不同,大于中心频率时,频率逐渐接近光子禁带的上边界,性能参量急剧变差;而小于中心频率变化时,有宽大的禁带空间,参量变化缓慢,隔离度大于10 dB,插入损耗小于0.5 dB的频率区域形成一个较大的工作带宽.

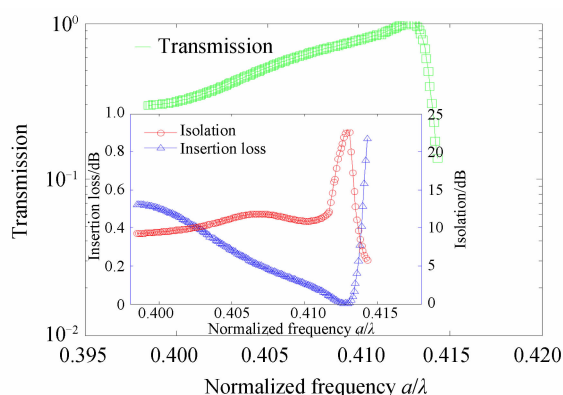


图5 环行器外部特性参数

Fig. 5 External characteristics of the circulator

计算得到的隔离度和插入损耗等参量随频率整体变化趋势与文献[13]中结果相符,如图6. 差异之处在于:当入射电磁波频率偏离中心频率增大时,本文中隔离度和插入损耗变化急剧,而文献[13]中相应参量的变化趋势、中心频率两侧基本相同. 原因在于晶格结构不同,本文采用三角晶格结构的二维光子晶体,得到的禁带范围与文献[13]不同,当频率增加时,接近禁带上边界,光局域效应丧失导致环行器性能急剧变差;而文献[13]中,中心频率两侧有较大禁带空间,参量变化趋势相当. 从隔离度和插入损耗的峰值来看,本文隔离度最大值达到 23.2 dB 低于文献[13]最理想的第三种传输路径,但高于其第一种传输路径的 23 dB;并获得非常低插入损耗 0.003 7 dB,且在较大频率范围内小于 0.5 dB,原因在于文献[13]中 4 个铁氧体柱和中心点缺陷会带来更多的能量损失.

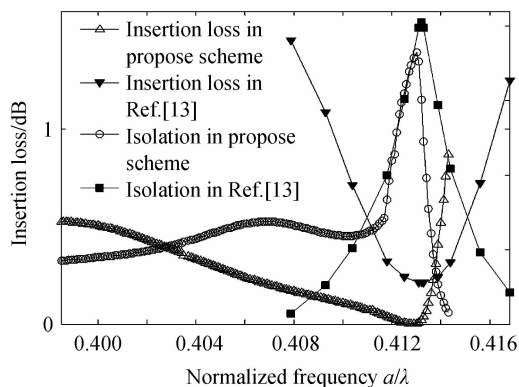


图6 数值计算得到的隔离度与插入损耗与文献[13]对比

Fig. 6 Isolation and insertion loss compared with those in Ref. [13]

4 结论

提出一种二维磁性光子晶体缺陷结构,并采用该结构实现了三端口 Y 形铁氧体柱环行器. 在得到的三角晶格二维光子晶体点缺陷微腔谐振频率与相应实验结果一致的基础上,采用平面波展开法和有限元方法计算环行器外部特性,得到的插入损耗与隔离度均与

现有研究相比有明显改善.

数值结果表明,提出的环行器结构既克服了文献[8,12]中空气孔结构隔离度低的不足,也解决了文献[13]中多柱体带来的损耗大的问题. 其特点为:1)结构相对简单,工艺上易于实现;2)中心只需要一个铁氧体柱,既作谐振腔,又提供法拉第旋转,在不降低隔离度 23.2 dB 的基础上,大大降低插入损耗,最低可达 0.003 7 dB;3)宽频带,在较大频率范围内隔离度大于 10 dB,且插入损耗小于 0.5 dB;4)光子禁带范围内,可灵活改变铁氧体柱半径,从而改变环行器工作频率.

参考文献

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**: 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**: 2486-2489.
- [3] INOUE M, ARAI K, FUJII T, et al. One-dimensional magneto-phonic crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, **85**(8): 5768-5770.
- [4] KATO H, INOUE M. Reflection-mode operation of one-dimensional magneto-phonic crystals for use in film-based magneto-optical isolator devices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **91**(10): 7017-7019.
- [5] SAKAGUCHI S, SUGIMOTO N. Transmission properties of multilayer films composed of magneto-optical and dielectric materials[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(6): 1087-1092.
- [6] ZHANG Deng-guo, NI Na, AN He-nan, et al. Electromagneticfield analysis and numericalcalculation of one-dimensionalmagneto-phonic 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] ZHOU Hui, ZHANG Deng-guo. Structure research on one-dimensional magneto-phoniccrystals used in optical isolator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 106-109. 周慧,张登国. 应用于光隔离器的一维磁光光子晶体结构探索[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 106-109.
- [8] WANG Zheng, FAN Shan-hui. Magneto-optical defects in two-dimensional photonic crystals[J]. *Applied Physics B*, 2005, **81**: 369-375.
- [9] JALALI AA, FRIBERG A T. Faraday rotation in a twodimensional photonic crystal with a magneto-optic defect [J]. *Optics Letter*, 2005, **30**: 1213-1215.
- [10] WANG Zheng, FAN Shan-hui. Optical circulators in twodimensional magneto-optical photonic crystals[J]. *Optics Letters*, 2005, **15**(30): 1989-1991.
- [11] FAN Shan-hui, WANG Zheng. An ultra-compact circulator using two-dimensional magneto-optical photonic crystals[J]. *Journal of Physical Society of Japan*, 2006, **30**: 641-645.
- [12] WANG Qiong, OUYANG Z B. Multiport photonic crystal circulators created by cascading magneto-optical cavities[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, **28**: 703-708.
- [13] WANG Qiong, OUYANG Z B. T-shaped optical circulator based on coupled magneto-optical rods and a side-coupled cavity in a square-lattice photonic crystal[J]. *Physics Letters A*, 2012, **376**: 646-649.
- [14] SEBASTIAN M T, JANTUNEN H. Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review[J]. *International Materials Reviews*, 2008, **53**(2): 57-59.
- [15] ZHANG Deng-guo. A survey of waveguide circulator[M]. Beijing: Scientific Press, 1998.