光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021052001

基于磁性光子晶体的多端口环行器设计

伍振海[1,2*]，李 俊[1,2]，瞿鹏飞[3]，刘旭飞[4]

（西南石油大学 1. 理学院；2. 电气信息学院，成都 610054；
3. 重庆光电技术研究所，重庆 400060；4. 重庆工商职业学院，重庆 400052）

摘 要： 基于二维三角晶格和正方晶格光子晶体分别设计了六端口和八端口光子晶体环行器。环行器由硅介质柱光子晶体波导和铁氧体介质柱缺陷构成。所设计的六端口环行器每个波导连接处只有一个铁氧体材料，能够有效降低损耗；八端口环行器波导连接处添加了多个铁氧体材料可有效提高隔离度。使用有限元法对电磁波在环行器中的传输进行了仿真验证。计算结果表明，六端口环行器各端口的隔离度达到 22～38 dB；八端口环行器各端口的隔离度达到 21.7～40.5 dB。设计的多端口环行器具有结构简单紧凑、隔离度高、损耗低的优点。

关键词： 磁性光子晶体；铁氧体；环行器；隔离度

中图分类号： O734 **文章编号：** 1001－5868(2021)05－0652－04

Multiport Circulators Design Based on Magneto-Photonic Crystals

WU Zhenhai[1,2]，LI Jun[1,2]，QU Pengfei[3]，LIU Xufei[4]

（1. School of Sciences；2. School of Electronic Information，Southwest Petroleum University，Chengdu 610054，CHN；
3. Chongqing Optoelectronics Research Institute，Chongqing 400060，CHN；
4. Chongqing Technology and Business Institute，Chongqing 400052，CHN）

Abstract： Photonic crystal circulators with the structure of six-port and eight-port were designed based on two-dimensional triangular lattice and square lattice photonic crystals，respectively. The circulators consist of a photonic crystal waveguide composed of silicon rods and ferrite dielectric rods defects. The designed six-port circulator has only one ferrite rod at each waveguide junction，which can effectively reduce the loss；the eight-port circulator has multiple ferrite rods added at the waveguide junctions to effectively improve the isolation. The transmission of electromagnetic waves in the circulator is simulated and verified by using the finite element method. The results show that the isolation of the six-port circulator is 22～38 dB，and the isolation of the eight-port circulator is 21.7～40.5 dB. The designed multi-port circulators have the advantages of simple and compact structure，high isolation and low loss.

Key words： magneto-photonic crystals；ferrite；circulator；isolation

0 引言

光子晶体（Photonic Crystals，PC）是一种人工材料，其折射率在空间作周期性变化，从而影响光波传播，呈现出光子局域和光子带隙等独特性质。光子晶体可以很好地控制电磁波及光子的传输，因此在微波、太赫兹、光波段都得到了广泛的应用，基于光子晶体设计的滤波器、光开关、功分器、偏振分束器、环行器等光学器件也越来越多。

环行器是一种无源光学器件，在光通信、太赫兹技术、微波技术中均有着重要的应用。目前已经出现一些基于磁性光子晶体设计的环行器。1999 年，Inoue 等提出了一维磁性光子晶体（Magneto-

收稿日期：2021－05－20.
基金项目：四川省科技计划资助项目（2018JY0174）；重庆市教委科学技术研究项目（KJQN20200400）.
* **通信作者：**伍振海

Photonic Crystals，MPC)[1]。这种磁性光子晶体展现出了更强的法拉第旋转效应，在磁光方面有着多种应用。2005 年，Wang 等提出了二维磁性光子晶体[2]，并使用时域有限差分法(Finite-difference Time-Domain Method，FDTD)和微扰理论，将其运用于一种“风车型”二维磁性光子晶体三端口环行器的设计[3]。2012 年，王琼等在“风车型”、“T-型”磁性光子晶体三端口环行器的基础上，仿真设计了一种六端口的环行器，但是由于使用了较多的铁氧体介质柱，它的损耗较大且结构复杂[4]。2014 年，张登国等设计了一种“Y 型”二维磁性光子晶体三端口环行器，该结构只使用了一个铁氧体介质柱，使损耗得到降低[5]。2019 年梁昊艳等改进了“Y 型”二维磁性光子晶体，在缺陷处把圆形缺陷变为星形结构，提高了三端口环行器的隔离度与带宽[6-7]。

多端口环行器有着广泛的应用需求，一般可以使用已有的三端口环行器组合形成更多端口的环行器，但是这将增加器件间连接的耦合损耗，并使得器件变得复杂，系统尺寸也将极大地增加。本文分别基于三角晶格和正方晶格二维光子晶体，利用其对称性特点，设计了六端口和八端口磁性光子晶体环行器，设计的环行器具有结构简单、尺寸紧凑、损耗低、隔离度高的优点。

1　六端口光子晶体环行器设计与分析

根据三角晶格光子晶体的对称性特点，设计了一种六端口光子晶体环行器。在空气背景(折射率 $n_0=1$)中按三角晶格均匀分布着圆形硅介质柱(折射率 $n_1=3.4$)。介质柱半径为 $r=0.18a$，其中 $a=11.25$ mm 为光子晶体的晶格常数，即每个介质柱间的距离。然后去除一些介质柱，形成线缺陷波导，如图 1 所示。在波导的每个 Y 形交叉点处引入半径 $r_0=1.6r=0.288a$ 的铁氧体缺陷，其相对介电常数 $\varepsilon=12.9$，如图 1 中的红色圆点区域所示。

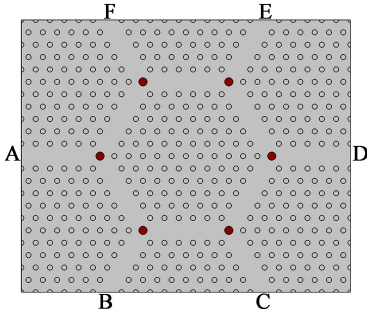


图 1　六端口光子晶体环行器结构图

磁光材料的旋磁特性可以用介质的张量磁导率 $\boldsymbol{\mu}$ 表示：

$$\boldsymbol{\mu}=\begin{bmatrix}\mu_r & \mathrm{i}\kappa & 0\\ -\mathrm{i}\kappa & \mu_r & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{1}$$

当材料有损耗时，式中的元素 μ_r 和 κ 均为复数形式。其中，κ 的符号受外加电流方向影响。法拉第旋磁效应的大小由品质因数 $Q=\kappa/\boldsymbol{\mu}$ 来衡量。由希尔伯特型，磁导率张量中的元素表示为[5-9]

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

$$\kappa=\omega_m/[(\omega_0+\mathrm{i}\alpha\omega)^2-\omega^2] \tag{3}$$

$$\omega_0=\mu_0\gamma H_0 \tag{4}$$

$$\omega_m=\mu_0\gamma M_s \tag{5}$$

其中，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ T·m/A 为真空磁导率，ω 为角频率，ω_0 和 ω_m 是外加磁场的拉莫尔频率，$H_0=2.095\times10^5$ A/m 为 z 方向外加直流磁场强度，$\gamma=1.759\times10^{11}$ C/kg 为旋磁比，$M_s=2.39\times10^5$ A/m 为饱磁化强度，$\alpha=3\times10^{-5}$ 为损耗系数。

使用平面波展开法计算得到光子晶体的 TM 模能带图如图 2 所示。可以看到，频率在(0.298～0.483)c/a 之间为该结构的光子带隙，其中 c 为真空中光速，a 为光子晶体的晶格常数。

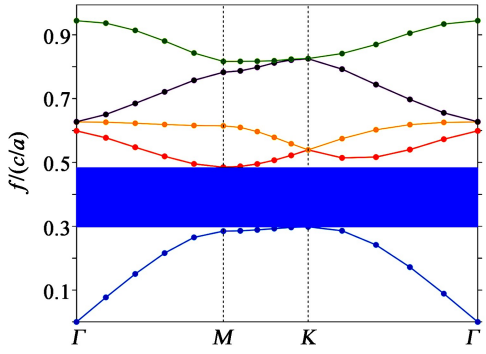
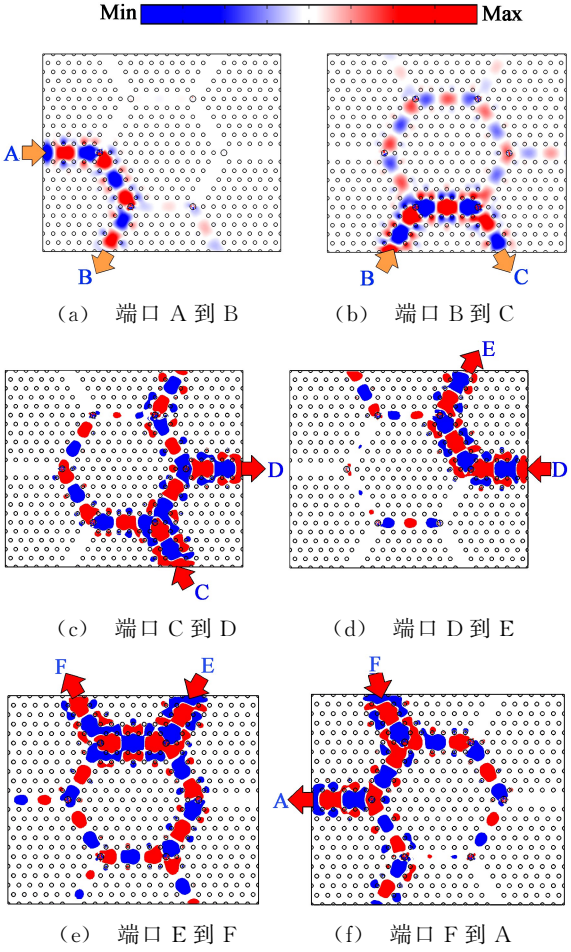


图 2　六端口环行器光子晶体 TM 模能带图

设计的六端口环行器相邻的波导间夹角为 120°。A～F 为对应的六个端口。本文中设计的环行器工作频率为 10.492 GHz。由于以上设计让整个结构具有很好的对称性，所以只需要改变铁氧体柱半径，且在光子禁带范围内，就可以在不同频率下实现环行功能。

为了验证环行器的性能，我们使用有限元法(Finite Element Method，FEM)进行仿真计算。在未加磁场($\kappa=0$)的情况下，会发现电磁波不会耦合偏转，被平均分配到各个端口，即没有旋磁效应。

在外加磁场强度为 $H_0=2.095\times10^5$ A/m 的直流磁场情况下，仿真得到电磁波在环行器中传输时的电场(E_z)分布，如图 3 所示。可以看到，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，从端口 B 出射，端口 C～F 被隔离，以此类推。图 3(a)～(f)分别表示电磁波从端口 A 到 B，B 到 C，C 到 D，D 到 E，E 到 F，F 到 A 环行时的电场分布。



(a) 端口 A 到 B　(b) 端口 B 到 C　(c) 端口 C 到 D　(d) 端口 D 到 E　(e) 端口 E 到 F　(f) 端口 F 到 A

图 3 外加磁场时六端口环行器中的电场分布

电磁波从其中一个端口输入，在其他端口输出，就可以计算得到每个端口的隔离度和损耗。由于对称性，这里以 A 端口入射、B 端口出射为例，仿真计算得到 C～F 端口的隔离度分别为 22，32，32 和 38 dB，隔离度较高。同时，仿真计算显示，其损耗极低，为 0.48 dB。仿真结果表明，设计的器件具有很好的隔离度与极低的损耗。

2 八端口光子晶体环行器设计与分析

采用上面类似的思路，根据正方晶格的对称性特点，我们设计了基于一种二维磁性正方晶格光子晶体的八端口环行器，其结构如图 4 所示。

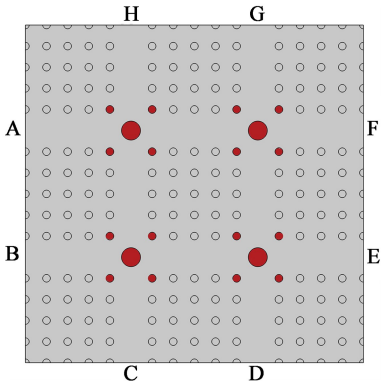


图 4 八端口光子晶体环行器结构图

同样在空气背景中按正方晶格均匀分布着圆形硅介质柱。介质柱半径为 $r=0.18a$，其中 $a=11.25$ mm 为光子晶体的晶格常数。然后去除一些介质柱，形成线缺陷波导。在波导的十字形交叉点引入半径 $r_0=2.5r=0.45a$ 的铁氧体缺陷。同时，为了取得更好的隔离效果，将与其相邻的周围 4 个硅介质柱也改为铁氧体介质柱，半径保持 $r=0.18a$ 不变。铁气体缺陷如图 4 中的红色圆点区域所示。铁氧体的材料参数与六端口环行器中的保持一致。外加直流磁场强度为 $H_0=3.2\times10^5$ A/m。

使用平面波展开法计算得到光子晶体的 TM 模能带图，如图 5 所示。可以看到，该结构具有较大的带隙，其带隙频率范围为$(0.287\sim0.439)c/a$。

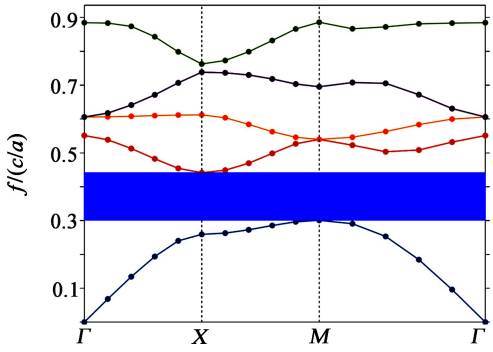
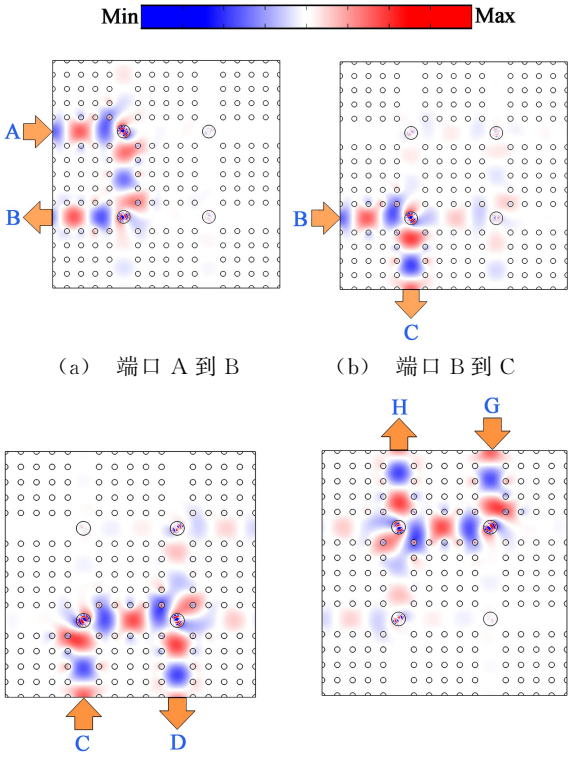


图 5 八端口环行器光子晶体 TM 模能带图

在外加磁场强度为 $H_0=3.2\times10^5$ A/m 的直流磁场情况下，仿真得到电磁波在环行器中传输时的电场(E_z)分布，如图 6 所示。图 6(a)～(d)分别表示电磁波从端口 A 到 B，B 到 C，C 到 D 以及 G 到 H 环行时的电场分布。因为结构极高的对称性，其他四种情况与之相似。可以看到，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，从端

口 B 出射，端口 C～H 被隔离，以此类推。

以电磁波从 A 端口入射，B 端口射为例，计算得到 C～H 端口的隔离度分别为 21.7，22.3，25，28.5，29 和 40.5 dB，具有很好的隔离度。同时仿真计算表明，其损耗为 3.7 dB，小于 4 dB，比六端口环行器损耗略高。这是因为在每个波导十字交叉点附近，多加了 4 个小铁氧体介质柱，因此增加了一些损耗。由于多端口环行器具有很好的对称性，所以从其他端口输入时可以得到相同的结果。



（a）　端口 A 到 B　　（b）　端口 B 到 C

（c）　端口 C 到 D　　（d）　端口 G 到 H

图 6　外加磁场时八端口环行器中的电场分布

3　结论

通过在三角晶格光子晶体和正方晶格光子晶体中引入线缺陷波导，在波导交叉点中引入铁氧体缺陷，使用平面波展开法对结构参数进行了优化，分别设计了工作于 10.492 GHz 的六端口和八端口光子晶体环行器。

设计的六端口环行器具有高达 38 dB 的隔离度，大于文献[10]的隔离度，同时其插入损耗低至 0.48 dB，也要小于文献[10]的 4.3 dB。原因在于文献[10]中 4 个铁氧体柱和中心点缺陷会带来更多的能量损失。为了增加隔离度，设计的八端口环行器在波导交叉点铁氧体柱周围添加 4 个小铁氧体柱，使其隔离度可以达到 40.5 dB，其损耗略有增加，但仍在 4 dB 以内。

仿真结果表明，设计的多端口环行器具有较高的隔离度和较小的损耗，而且其结构更加简单，尺寸小，可以在通信技术中得到广泛应用。

参考文献：

[1] Inoue M, Arai K, Fujit T, et al. One dimensional magneto-photonic crystals[J]. J. Appl. Phys., 1999, 85(8): 5768-5770.

[2] Wang Z, FAN S. Magneto-optical defects in two-dimensional photonic crystals[J]. Appl. Phys. B, 2005, 81(2/3): 369-375.

[3] Fan S, Wang Zheng. An ultra-compact circulator using two-dimensional magneto-optical photonic crystals[J]. J. Phys. Soc. Japan, 2006, 30(6): 641-645.

[4] Wang Q, Ouyang Z. T-shaped optical circulator based on coupled magneto-optical rods and a side-coupled cavity in a square-lattice photonic crystal[J]. Phys. Lett. A, 2012, 376(4): 646-649.

[5] 王　勇，张登国. 基于二维磁性光子晶体的三端口 Y 形铁氧体住环行器[J]. 光子学报，2014(6)：89-92.
Wang Y, Zhang D G. Three-port Y-junction optical circulator using a ferrite cylinder in two-dimensional magneto-photonic crystals[J]. Acta Photonica Sinica, 2014(6): 89-92.

[6] 梁吴艳，陈德媛，谷云斌. 基于磁性光子晶体的宽频带低损耗环行器[J]. 半导体光电，2019，40(2)：176-180.
Liang W Y, Chen D Y, Gu Y B. A wide-band low loss circulator based on magnetic photonic crystals [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(2): 176-180.

[7] Sebastian M T, Jantunen H. Low loss dielectric materials for LTCC applications: A review[J]. Int. Mater. Rev., 2008, 53(2): 57-59.

[8] 崔乃迪，梁静秋. 并联谐振腔光子晶体单通道侧面耦合波导[J]. 光学学报，2012，32(2)：294-300.
Cui N D, Liang J Q. Photonic crystal single channel side-coupled waveguide with parallel resonators[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 294-300.

[9] 张登国. 波导环行器概论[M]. 北京：科学出版社，1998：2-18.
Zhang D G. A Survey of Waveguide Circulator[M]. Beijing: Scientific Press, 1998: 2-18.

[10] Wang Q, Ouyang Z. Multiport photonic crystal circulators created by cascading magneto-optical cavities[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2011, 28(4): 703-708.

作者简介：

伍振海(1977－)，男，四川营山人，博士，副教授，研究生导师，主要研究方向为纳米光学、光子晶体及器件设计。