

# 四端口十字型二维磁性光子晶体环行器

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** 提出一种新的二维磁性光子晶体缺陷结构, 并采用该结构使用5个铁氧体柱实现了四端口十字型铁氧体柱环行器。在得到的正方晶格二维光子晶体点缺陷微腔谐振频率与文献中相应的数值结果一致的基础上, 采用平面波展开法和有限元方法计算环行器的外部特性。数值结果表明: 在中心频率处, 环行器隔离度最高达23.49 dB, 插入损耗最低为0.0281 dB; 当偏离中心频率时, 随着偏移量的增大, 环行器的传输性能逐渐变差。设计的环行器的波导内只有一个柱体, 从而解决了已有结构中多个柱体带来的插入损耗大的问题。

**关键词** 光学器件; 二维磁性光子晶体; 环行器; 铁氧体; 插入损耗; 隔离度

**中图分类号** TN256 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1023001

## Four-Port Cross-Shaped Circulator Based on Two-Dimensional Magneto-Photonic Crystals

Wang Yong Zhang Dengguo Ouyang Zhengbiao Li Jingzhen

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

**Abstract** A new defect structure of two-dimensional magnetic-photonic crystal with dielectric cylinders is given and a four-port cross-shaped circulator using five ferrite posts is envisaged. Based on the agreements between the resonance frequency of micro-cavity constructed by a point defect in the two-dimensional (2D) square lattice photonic crystal with those numerical results of related literatures, external characteristics of the circulator are calculated by the plane wave expansion method and finite element method. The results show that at the center frequency, the isolation of circulator is up to 23.49dB and the lowest insertion loss is 0.0281 dB; when frequency diverges from the center frequency, the transmission characteristics of the circulator deteriorate gradually with increasing frequency offset. This design of circulator with only one ferrite cylinder in the waveguides, which solves the high loss from multiple cylinders.

**Key words** optical devices; two-dimensional magneto-photonic crystal; circulator; ferrite; insertion loss; isolation

**OCIS codes** 230.5298; 230.3810; 130.5296

## 1 引 言

在高速光通信系统中, 随着传输距离的不断增长, 光纤中影响传输性能的色散和非线性效应已有多种方法进行补偿和管理<sup>[1]</sup>。然而, 光波在传输过程中, 会在不同的光学界面上发生反射。当这些反射回程的能量积累达一定程度时, 就会干扰光源甚至影响整个光通信系统的正常工作。

基于法拉第旋转效应的光隔离器和环行器是光通信系统中重要的非互易无源器件。基于一维磁性光子晶体<sup>[2-4]</sup>的隔离器可阻止传输线路中的反射光信号返回输入端, 以保证相邻器件互不干扰<sup>[5-6]</sup>。环行器不同于隔离器, 它除了具有反向隔离功能外, 还可将光信号引向特定端口输出。由于其具有这种正向顺序导通而反向隔离的特性, 被广泛应用于高分辨

收稿日期: 2014-04-28; 收到修改稿日期: 2014-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(61171006)

作者简介: 王 勇(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事集成光子学与光通信器件方面的研究。

E-mail: yongw2008@yeah.net

导师简介: 张登国(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事微波与毫米波器件, 磁性光子晶体器件等方面的研究。

E-mail: dgzhang@szu.edu.cn(通信联系人)

率远程雷达、射电天文、高速数据通讯等系统中。

随着全光信息处理技术的发展,适用于大规模集成光路的光子器件已成为当下研究的热点<sup>[6-7]</sup>。一种新型的二维磁性光子晶体(2D MPC)环行器,最早由 Wang 等<sup>[7-8]</sup>于 2005 年提出。其以二维空气孔阵列为基础的“风车型”环行器具有较理想的外部特性参数<sup>[9-10]</sup>。近年,Wang 等<sup>[11]</sup>提出了一种更加紧凑的二维磁性光子晶体缺陷结构,并实现了标准 120°三端口 Y 型环行器,但这种方案隔离度和插入损耗均不理想。随后,一种基于正方晶格的 T 型环行器被提出<sup>[12]</sup>,这种环行器采用二维介质柱阵列,得到的隔离度有所改善,但插入损耗较大且带宽很窄。

本文提出一种新的二维磁性光子晶体缺陷结构,这种结构仍以正方晶格的介质柱阵列为基础。在得到的圆柱谐振腔谐振频率与文献中相应的数值结果一致的基础上,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 0.0281 dB 与隔离度 23.49 dB 均与资料上的结果相比有明显改善。所设计的环行器结构中,只在中心位置引入一个点缺

陷,而波导内再无其他介质柱,这样能大大降低多个柱体带来的损耗。

## 2 二维磁性光子晶体的缺陷结构

已有文献<sup>[7, 11-12]</sup>中报道了几种环行器,如图 1 所示。图 1(a)是三端口“风车型”环行器,图 1(b)是可旋转 120°的 Y 型环行器,这两种结构都是以三角晶格的二维空气孔阵列分布于磁光材料(BIG)中构成二维磁性光子晶体。

图 1(c)中的第三种结构采用正方晶格的介质柱阵列置于空气中,中心处以较大半径介质柱引入点缺陷,在点缺陷周围嵌入 4 个铁氧体柱构成二维磁性光子晶体,详细结构如图 2(a)所示。虚线框中半径大小不同的介质柱围成的反射腔,可以将入射的光波原路反射回去,从而实现三端口 T 形铁氧体柱环行器。数值计算得到的环行器外部特性参数较前两种结构有较大改善,其中隔离度参数达到 25 dB,但损耗较大。

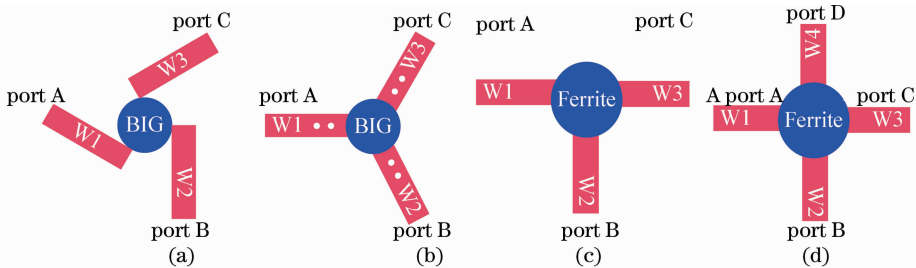


图 1 几种二维磁性光子晶体环行器。(a)空气孔“风车型”;(b)空气孔 Y 型;(c)介质柱 T 型;(d)介质柱“十”字型  
Fig. 1 Structures of 2D MPCs circulator. (a) Air hole ‘windmill’ shaped; (b) air hole Y shaped; (c) dielectric cylinder T shaped; (d) dielectric cylinder cross-shaped

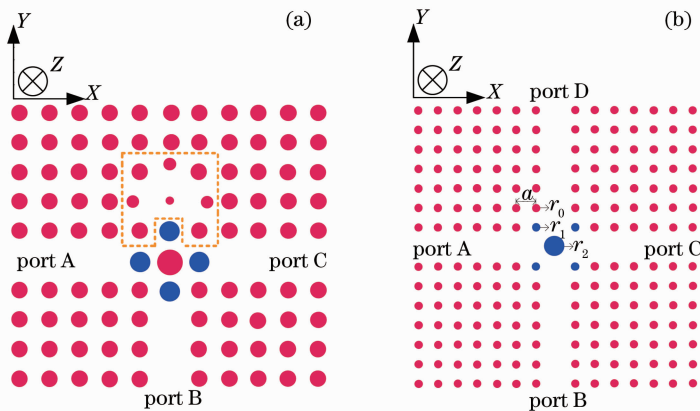


图 2 二维磁性光子晶体环行器的详细结构。(a)三端口 T 型;(b)四端口十字型

Fig. 2 Detailed structures of 2D MPCs circulator. (a) Three-port T shaped; (b) four-port cross-shaped

结合前几种环行器谐振腔与线缺陷波导的设计优点,提出一种更加简单的二维磁性光子晶体缺陷结构来实现四端口十字型环行器,如图 1(d)所示。采用正方晶格介质柱阵列周期性排列,中心点缺陷位置嵌入一个半径较大的铁氧体柱( $\epsilon_r = 12.9$ ),构成二维磁性光子晶体。在外加直流磁场的作用下,此处的铁氧体柱,既作谐振微腔,又提供拉法第旋转角,详细结构如图 2(b)所示。已在文献[13]中提出一种由介质柱构成的三角晶格的二维光子晶体缺陷结构,并实现三端口 Y 形铁氧体柱环行器,但隔离度不高。为了提高环行器隔离性能,设计的结构在中心铁氧体柱周围嵌入 4 个半径较小的铁氧体柱起辅助偏转作用,如图 2(b)所示,半径为  $r_1$ 。与图 2(a)不同,此时线缺陷光波导内只有一个铁氧体柱,这种安排将大大降低环行器插入损耗。

### 3 光子晶体带隙结构及模场分析

#### 3.1 二维正方晶格介质柱阵列带隙结构

图 2(b)为环行器详细结构,为使数值计算结果更加准确可靠,设计的环行器结构参数与文献[12]中相同,晶格常数  $a = 11.25 \text{ mm}$ ,介质柱阵列依据文献[14]选择损耗较低的陶瓷材料,折射率  $n_0 = 3.4$ ,半径  $r_0 = 0.18a$ 。

在没有外加磁场的情况下,采用平面波展开法(PWE)得到正方晶格光子晶体的横电(TE)模的带隙结构,如图 3 所示。使用 Rsoft 软件中 Bandsolve 模块来进行计算,得到与文献[12]中相同的光子禁带归一化频率范围为  $0.3265 (2\pi c/a) \sim 0.4622 (2\pi c/a)$ ,其中  $c$  为光速。在上述结构参数下,可得到 TE 模式宽大的禁带范围,凡在此频率范围内的电磁波进入线缺陷光波导,均会被限制在波导内稳定传播。

#### 3.2 圆柱谐振腔模式分析

理论上,任何被不同介质包围的圆柱体均可视为圆柱谐振腔。文献[15-16]已报道了两种光子晶体点缺陷微谐振腔的设计。使用 Comsol 软件的模场分析功能,基于有限元方法来计算圆柱谐振腔内模式,如图 4 所示。中心圆形区域的铁氧体柱(半径  $r_2 = 1.6r_0$ )视为圆柱谐振腔,计算时采用散射边界条件(SBC),外层空气介质可视为无限大。

数值计算结果表明,在中心频率  $a/\lambda = 0.4132$  处,二维磁性光子晶体点缺陷微腔内有一对旋转简并模式,其电场强度  $E_z$  分布如图 4 所示,图 4(a)为奇模,图 4(b)为偶模。这对简并模式偏振方向互相

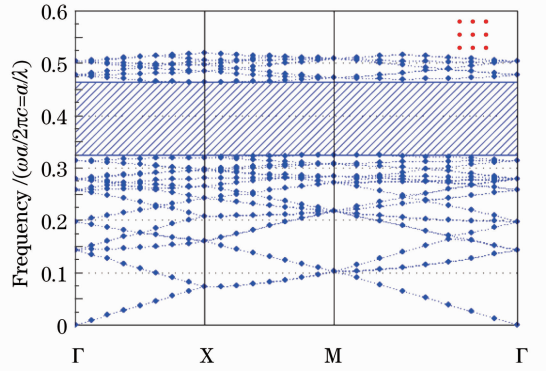


图 3 正方晶格光子晶体 TE 模式带隙结构  
Fig. 3 TE mode band gap structure for square lattice photonic crystals

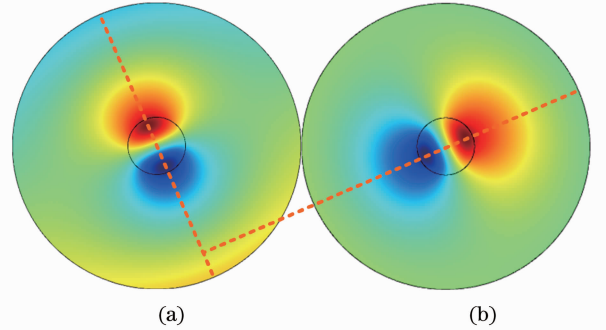


图 4 点缺陷微腔中简并模式电场  $E_z$  分布。(a)奇模;  
(b)偶模  
Fig. 4  $E_z$  field distribution for the doubly degenerate modes in micro-cavity formed by a point defect.  
(a) Odd mode; (b) even mode

垂直,图中虚线代表各自的偏振方向,与文献[12]中结果一致。

### 4 环行器功能及外部特性

#### 4.1 四端口十字型二维磁光子晶体环行器

在计算之前,有必要回顾一下铁氧体的基本特性。在微波波段,外加  $z$  方向恒定磁场  $H_0 = 3.2 \times 10^5 \text{ A/m}$  时,铁氧体的旋磁特性用张量磁导率  $\boldsymbol{\mu}$  表示,如下:

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

考虑材料有损耗的情况,故(1)式中的元素  $\mu_r$  和  $\kappa$  均为复数形式。其中,非对角元素  $\kappa$  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  $Q = \kappa/\mu_r$  的大小来衡量。损耗系数  $\alpha = 3 \times 10^{-5}$ ,此时,采用希尔伯特型近似形式<sup>[17]</sup>,张量磁导率中各元素表示如下:

$$\mu_r = 1 + \omega_m(\omega_0 + i\alpha\omega) / [(\omega_0 + i\alpha\omega)^2 - \omega^2], \quad (2)$$

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

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

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

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

为了验证环行器的功能,采用有限元方法在中心频率  $0.4132(2\pi c/a)$  处,模拟电场  $E_z$  在环行器内的传播情况,如图 5 所示。在大约 11.2 万个网格单元中计算电磁波的分布情况,边界条件选择散射边界条件。发现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  $90^\circ$  的法拉第偏转角,电磁波传播方向与波导轴向形成完美匹配,从而实现环行功能。如图 5(a) 所示,端口 A、B、C、D 分别表示十字型环行器 4 个端口,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 和 D 被隔离,以此类推,如图 5(b)~(d) 所示,环行器实现正向顺序导通,而反向隔离。

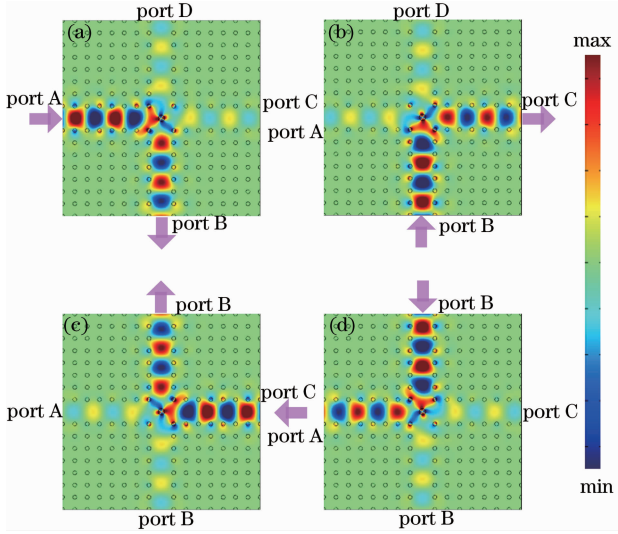


图 5 环行器中  $E_z$  的传播情况

Fig. 5  $E_z$  field propagations in circulator

#### 4.2 环行器外部特性参数

4.1 节中,环行器功能已经实现,接下来改变入射波的频率,并讨论外部特性参数的变化情况。信号源从 4 个端口(A、B、C、D)其中一个输入,在另外三个端口处搜集能量,比较输出与输入端口之间的能量变化,并计算隔离度和插入损耗等参数,结果如图 6 所示。

数值结果表明,中心频率处,隔离度与插入损耗分别达到 23.49 dB 和 0.0281 dB,是环行器的最佳工作状态。当偏离中心频率时,环行器传输特性逐

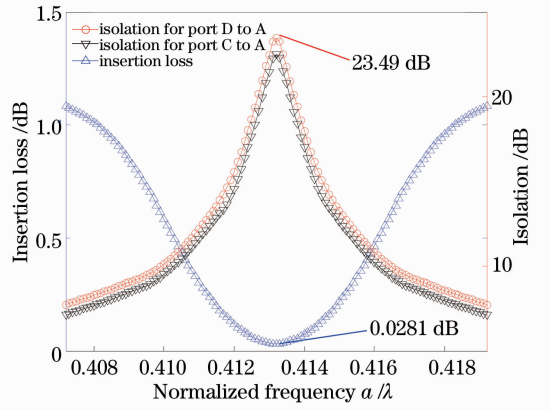


图 6 环行器外部特性参数

Fig. 6 External characteristics of the circulator

渐变差。与三端口环行器不同,四端口环行器工作时[以图 5(a)为例],光波从输入端 A 输入,经传输端 B 输出,而其他两个端口均处于隔离状态。两个隔离端 C、D 的隔离度变化趋势相同,但数值一般不相等,如图 6 所示。

得到的隔离度和插入损耗等参数随频率整体变化趋势与文献[12]相应结果一致,如图 7 所示,下三角实心线和正方形实心线,分别表示文献[12]第三种情况下得到的插入损耗和隔离度。从隔离度和插入损耗的峰值来看,隔离度最大值达到 23.49 dB 低于文献[12]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;并获得非常低的插入损耗 0.0281 dB。原因在于设计的环行器的波导内只有一个铁氧体柱,起辅助作用的 4 个半径为  $r_1 = 1.029r_0$  的铁氧体小柱均嵌于晶体结构中;而文献[12]中 4 个铁氧体柱和中心介质柱体均位于波导内,这样会带来更多的能量损失。

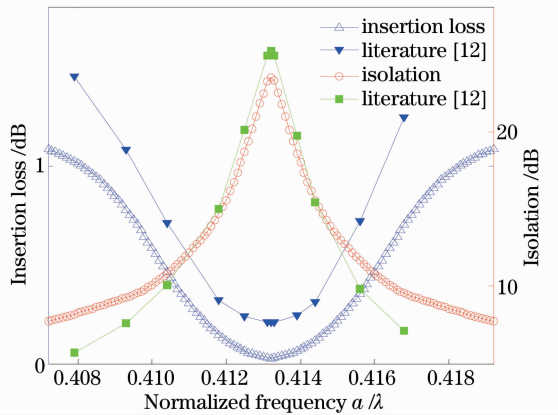


图 7 数值计算得到的隔离度与插入损耗与文献[12]对比

Fig. 7 Insertion loss and isolation of numerical calculation compared with those in reference [12]

## 5 结 论

综上所述,提出一种新的二维磁性光子晶体缺陷结构,并采用该结构实现了四端口十字型铁氧体柱环行器。在得到的正方晶格二维光子晶体带隙结构及点缺陷微腔谐振频率与相应的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资料上的结果相比有明显改善。

数值结果表明,提出的环行器结构既克服了文献[11]中空气孔结构隔离度低的不足,也解决了文献[12]中多柱体带来的损耗大的问题。同时,具有以下特点: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 23.49 dB 的基础上,大大降低插入损耗,最低可达 0.0281 dB;3)宽频带,在较大频率范围内隔离度大于 15 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 Cao Wenhua, Wang Yong, Liu Songhao, *et al.*. Dispersion and nonlinearity compensation in optical fiber communication systems by optical phase conjugation incorporated pulse prechirp [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0906005.  
曹文华, 王 勇, 刘颂豪, 等. 光纤通信系统中基于光学相位共轭和预啁啾的色散及非线性补偿研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0906005.
- 2 M Inoue, K Arai, T Fujii, *et al.*. One-dimensional magneto-photonic crystals [J]. *J Appl Phys*, 1999, 85(8): 5768–5770.
- 3 H Kato, M Inoue. Reflection-mode operation of one-dimensional magneto-photonic crystals for use in film-based magneto-optical isolator devices [J]. *J Appl Phys*, 2002, 91(10): 7017–7019.
- 4 S Sakaguchi, N Sugimoto. Transmission properties of multilayer films composed of magneto-optical and dielectric materials [J]. *J Lightwave Technol*, 1999, 17(6): 1087–1092.
- 5 Zhang Dengguo, Ni Na, An Henan, *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.
- 6 Zhou Hui, Zhang Dengguo, Ouyang Zhengbiao, *et al.*. Structure research on one-dimensional magneto-photonic crystals used in optical isolator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(1): 106–109.  
周 慧, 张登国, 欧阳征标, 等. 应用于光隔离器的一维磁光子晶体结构探索[J]. *光子学报*, 2008, 37(1): 106–109.
- 7 Z Wang, S Fan. Magneto-optical defects in two-dimensional photonic crystals [J]. *Appl Phys B*, 2005, 81(2-3): 369–375.
- 8 A A Jalali, A T Friberg. Faraday rotation in a two dimensional photonic crystal with a magneto-optic defect [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(10): 1213–1215.
- 9 Z Wang, S Fan. Optical circulators in two dimensional magneto-optical photonic crystals [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(15): 1989–1991.
- 10 Fan Shanhuai, Wang Zheng. An ultra-compact circulator using two-dimensional magneto-optical photonic crystals [J]. *Journal of Physical Society of Japan*, 2006, 30(6-2): 641–645.
- 11 Q Wang, Z B Ouyang, Q Liu. Multiport photonic crystal circulators created by cascading magneto-optical cavities [J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(4): 703–708.
- 12 Q Wang, Z B Ouyang, K Tao, *et al.*. 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.
- 13 Wang Yong, Zhang Dengguo, Ouyang Zhengbiao, *et al.*. Three-port Y-junction optical circulator using a ferrite cylinder in two-dimensional magneto-photonic crystals [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 0623002.  
王 勇, 张登国, 欧阳征标, 等. 基于二维磁性光子晶体的三端口 Y 形铁氧体柱环行器[J]. *光子学报*, 2014, 43(6): 0623002.
- 14 M T Sebastian, H Jantunen. Low loss dielectric materials for LTCC applications: a review [J]. *International Materials Reviews*, 2008, 53(2): 57–90.
- 15 Cui Naidi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu, *et al.*. Photonic crystal single channel side-coupled waveguide with parallel resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0223001.  
崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 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): 0223001.
- 16 Zhou Xingping, Shu Jing, Lu Binjie, *et al.*. Two-wavelength division de-multiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123001.  
周兴平, 疏 静, 卢斌杰, 等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123001.
- 17 Zhang Dengguo. *A Survey of Waveguide Circulator* [M]. Beijing: Science Press, 1998.  
张登国. *波导环行器概论*[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

栏目编辑: 韩 峰