

doi: 10.3788/gzxb20124108.0982

# 高下路空气孔型光子晶体环形谐振腔的设计

许晓赋, 郝小龙, 蒋俊贞, 李晖, 邱怡申, 强则焯

(福建师范大学 激光与光电子技术研究所; 福建省光子技术重点实验室;  
医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福州 350007)

**摘 要:**提出一种基于二维正方晶格光子晶体空气孔型高下路效率的环形谐振腔, 通过压缩线缺陷波导的宽度实现单模有效控制, 同时讨论内围光子晶体列数对传输场的影响, 然后运用二维时域有限差分方法数值分析了耦合强度及环区局部折射率调制对下路效率、品质因子以及下路波长等参量的影响. 结果表明: 当波导宽度为 0.7 个晶格常量, 耦合强度为 0 个晶格常量, 在信道波长为 1 528.1 nm 时, 下路效率为 99%, 品质因子  $Q$  为 379; 当耦合强度提高到 1 个晶格常量, 下路波长稍微漂移为 1 524.3 nm, 品质因子显著提高到 1 397, 而下路效率下降为 89%. 同时, 下路波长会随着环区折射率的增加呈线性红移.

**关键词:**光通信; 光子晶体微环腔; 空气孔; 时域有限差分

**中图分类号:** TN929.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)08-0982-4

## 0 引言

微型波导环形谐振腔, 又称耳语回廊模式 (Whispering Gallery Mode, WGM) 微环, 其可以提供大自由谱范围 (Free Spectral Range, FSR)、紧凑性及高光谱选择性, 已在诸如光滤波器<sup>[1-2]</sup>、激光器<sup>[3]</sup>、光电探测器<sup>[4]</sup>、传感器<sup>[5]</sup>、光开关<sup>[6-7]</sup>以及光逻辑门<sup>[8]</sup>等方面得到应用. 随着光技术在终端用户中的普及推广, 人们希望下一代光器件具有更小的尺度, 如亚波长级, 且多功能化及低功耗等特点. 而这些传统的微环受内全反射机理限制, 其传输损耗会随着尺寸的减小而剧增, 这无疑阻滞了器件的进一步小型化, 实际应用中, 环的半径极限一般在 3  $\mu\text{m}$  左右. 此外, 他们的性能敏感于表面粗糙度以及环和公共波导通道 (BUS) 间的间隙, 给实际制造带来了另一挑战<sup>[9]</sup>.

另一方面, 光子晶体由于其独特的可在波长尺度内控光能力给超小型光集成带来了希望. 近年来, 各种光子晶体环状波导谐振器屡见报道, 其中超小型光子晶体环形谐振腔 (Photonic Crystal Ring Resonator, PCRR)<sup>[9-11]</sup> 无需很长的定向耦合壁围成微环<sup>[12-13]</sup>, 具有环大小易缩放、多样的模式耦合配置等优点, 为克服传统 WGM 环的技术瓶颈提供了一个有效的解决途径, 引起了人们的青睐. 迄今为止, 见诸报道的结构大都基于介质柱型光子晶体环形谐

振腔<sup>[9-11, 14]</sup>. 这种介质柱型 PCRR 尽管存在线缺陷波导单模工作区大、模式耦合简单且效率高, 但相对制造复杂, 且在垂直方向上没有很好地限制易造成大的传输损耗. 相反, 空气孔型光子晶体相对容易制作, 但其线缺陷波导一般支持很窄的单模区, 且容易在波导拐弯处激发多模, 进而导致下路效率很低. 此外, 基于空气孔型的 PCRR 下路信道的光谱旁瓣很差<sup>[15-16]</sup>.

因此, 进一步探讨空气孔型高下路效率的 PCRR 显得尤为重要. 本文基于正方格子空气孔型光子晶体, 利用压缩线缺陷波导有效控制单模区, 分析环内光子晶体列数对传输光谱的影响, 运用二维时域有限差分方法数值分析得到一组实现高下路的 PCRR 结构参量, 同时分析了耦合强度对下路效率的影响, 最后讨论了局部折射率调制对下路波长及下路效率的影响.

## 1 结构设计及理论分析

为了和目前报道较多的正方晶格介质柱型 PCRR 进行比较, 考察了二维正方晶格空气孔型 PCRR, 以硅为背景材料, 其对 1.55  $\mu\text{m}$  通信窗口是透明传输, 折射率为常量 3.48. 对于这种晶格排列的空气孔结构, 其 TM 模式 (电场平行于空气孔轴向) 可以比 TE 模式获得更大的带隙, 因而本文仅对 TM 模式展开讨论. 区别于点缺陷, 如图 1(a) 所示,

基金项目: 福建省教育厅基金 (No. JB10025) 资助

第一作者: 许晓赋 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光子晶体. Email: andelie12@163.com

责任作者/导师 (通讯作者): 强则焯 (1975-), 男, 研究员, 主要研究方向为光通信及纳米光子集成研究. Email: qiangzx@fjnu.edu.cn

收稿日期: 2012-02-14; 修回日期: 2012-04-14

PCRR 是由沿着  $\Gamma X$  方向移除一排空气孔围绕形成,内围几排空气孔阵列,这种简单移除的线缺陷波导  $W_1$  容易在弯角地方形成多模,为避免传输光强分布在各分支如  $a$  和  $c$  间的相互影响,首先分析了内围排数的最低要求. 图 1 (b) 为一覆盖波长  $1.3 \sim 2.2 \mu\text{m}$  的平面波经过空气孔光子晶体阵列,列数对其传输光谱的影响. 其相对孔径即空气孔半径  $r$  和光子晶体晶格常量  $a$  的比值为  $0.46$ . 显然当空气孔列数超过 4 排,即  $L_c = 3a$ ,可以看到在  $[1.5 \mu\text{m}, 1.8 \mu\text{m}]$  波长内透过率很低,即存在光子带隙,此时传输光强分布在  $a$  和  $c$  之间的传输相互影响可以忽略.

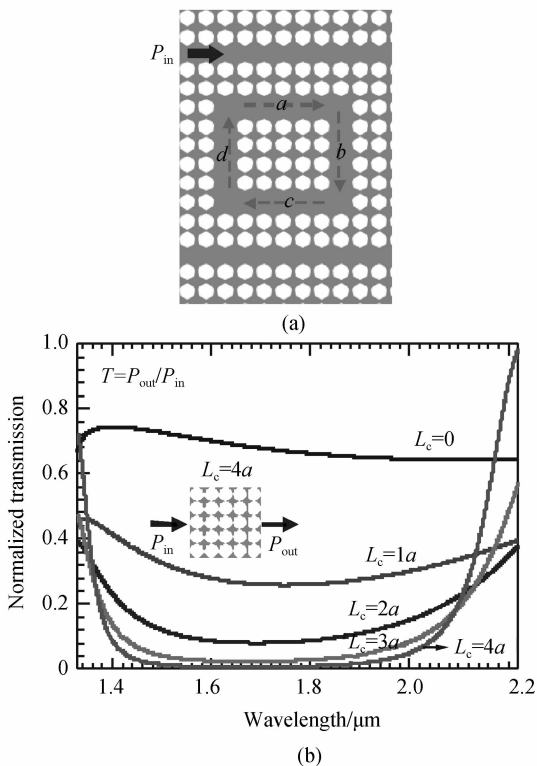


图 1 (a)PCRR 的传输光强分布和(b)光子晶体空气孔阵列数对透射谱的影响  
Fig. 1 (a) The propagating field intensity distribution of PCRR and (b) transmission spectra affected by the array of air-hole photonic crystal

为了保证在 BUS 波导中单模传输,通常通过压缩波导、波导错位以及减少折射率波导等方法实现<sup>[15]</sup>. 为简便起见,本文采用压缩波导法. 图 2 为 Bus 波导在 TM 偏振光激励下,基于平面波展开法求得的色散关系图. 图 2(a) 为标准线缺陷波导  $W_1$ , 图 2(b) 为线缺陷波导宽度压缩为  $0.7$ , 简记为  $W_{0.7}$ . 由图可知,空气孔型线缺陷波导  $W_{0.7}$  在归一化频率范围  $[0.238a/\lambda, 0.247a/\lambda]$  为单模模式,而  $W_1$  波导则不存在相应单模区,为多模模式. 故而对于  $1550 \text{ nm}$  中心通信波长,  $a$  取为  $377 \text{ nm}$ .

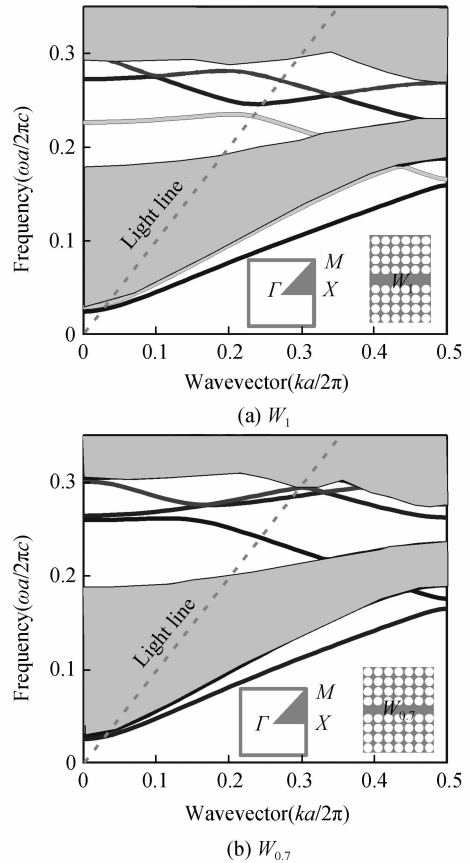


图 2 正方晶格空气孔型光子晶体的色散关系及对应波导模式图  
Fig. 2 Dispersion plot and the corresponding bus-waveguide mode of square-lattice air-hole photonic crystal

结合以上结论,为了获取高下路效率的空气孔型 PCRR, BUS 波导取  $W_{0.7}$  以保证单模传输,腔内空气孔排列取  $4 \times 5$  以有效消除腔内传输光强在不同分支上的相互影响,进而影响耦合及下路效率,如图 3 所示. 此外,为了使得光谱选择性高,将  $W_{0.7}$  波导和环形腔的外围周期数分别取为  $d = 10a$  和  $L = 25a$ ,使得本征微环腔足以提供极高的品质因子. 图中  $L_c$  为 BUS 波导和微环腔的耦合强度,  $A$  为输入端口,  $B, C, D$  为输出端口.

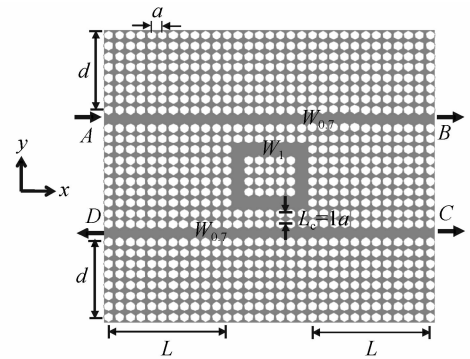


图 3 二维正方晶格空气孔型光子晶体 PCRR 结构示意图 ( $L_c = 1a$ )  
Fig. 3 Schematic of proposed two-dimensional square-lattice air-hole PCRR ( $L_c = 1a$ )

## 2 数值模拟及讨论

如图 3, 利用二维时域有限差分法 (Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 及完全匹配层 (Perfectly Matched Layer, PML) 为吸收边界条件<sup>[17]</sup>, 从输入端注入覆盖上述 BUS 波导单模光谱范围的 TM 偏振高斯脉冲光, 并在输入端和输出端分别置放功率监视器以收集输入和输出端口的功率强度, 最后将输出端与输入端的功率强度进行对比从而得到各输出端的归一化强度谱。

图 4 为耦合强度  $L_c$  分别为 0 和  $1a$  时二维正方晶格空气孔型 PCRR 输出端口的归一化强度谱, 而图中嵌入的是它们相应下路波长的传输场分布图。显然, 从输入端口 A 输入的光在下路波长时几乎完全下路到 D 端口, 如在  $L_c = 0$  时, 下路波长为  $1528.1 \text{ nm}$ , 下路效率能达  $99\%$ , 相应品质因子  $Q$  (定义为下路信道的中心波长与其半高宽  $\delta\lambda$  的比值) 为 379。当将耦合强度提高到  $L_c = 1a$  时, 下路波长稍微向短波长漂移了一些为  $1524.3 \text{ nm}$ , 尽管下路效率下降了些, 但还高达  $89\%$ , 品质因子则明显

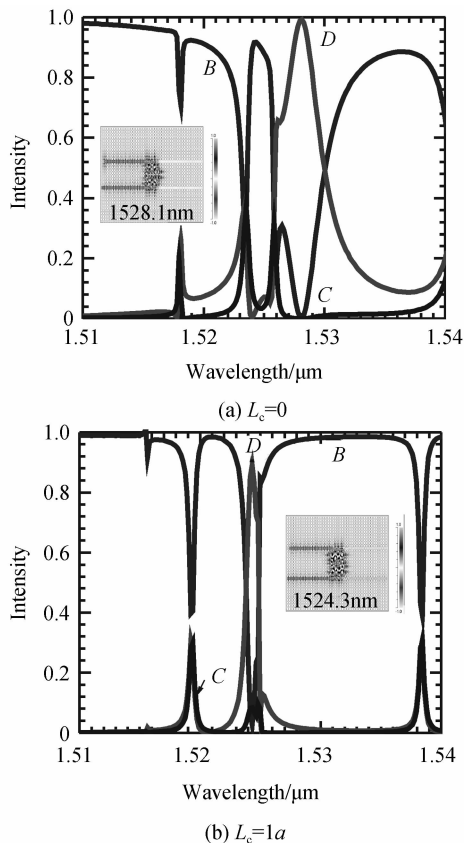


图 4 不同耦合强度下二维正方晶格空气孔型光子晶体 PCRR 输出端口的归一化强度谱及相应下路传输场图  
Fig. 4 Normalized intensity of proposed two-dimensional square-lattice air-hole PCRR at each output port as well as corresponding field distribution at dropping wavelength with different coupling strength

地提高到 1397, 且相应的消光比更高。这再一次证明了通过提高耦合强度  $L_c$  可以改善光谱品质因子, 即光谱选择性, 但其下路效率会下降, 和先前介质柱 PCRR 预期的结论完全一致。

传统微环腔是形成光调制器、动态分叉复用器等光器件的基本组件, 因此, 本文还进一步讨论了提出的空气孔 PCRR 在外围周期  $d = 10a$ ,  $L = 25a$ , 耦合强度  $L_c$  为  $1a$  时, 局部改变中心环区折射率对 D 端口下路效率和下路波长的影响, 如图 5 所示。随着调制区折射率从  $n = 3.45$  (变化量为  $-0.03$ ) 到  $n = 3.50$  (变化量为  $0.02$ ) 的改变, 下路波长向长波长漂移, 漂移量为  $200 \text{ nm/RUI}$ 。下路效率先随着折射率的增加而减少, 而随着折射率减少则是先增加后减少, 在环区折射率为 3.47 时其下路效率达到最高值约  $98\%$ 。

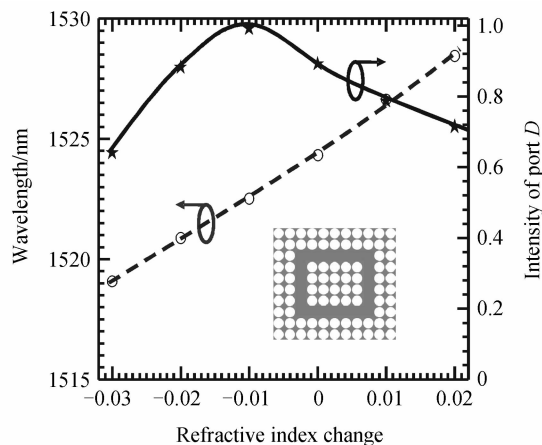


图 5 局部折射率改变对下路波长及相应下路效率的影响  
Fig. 5 The impact of localized refractive index change on the dropping wavelength and dropping efficiency

## 3 结论

本文基于二维正方晶格光子晶体设计了高下路空气孔型 PCRR, 应用二维 FDTD 模拟得到, 在  $d = 10a$ ,  $L = 25a$ , 耦合强度  $L_c = 0$  时, 下路波长为  $1528.1 \text{ nm}$ , 相应下路效率及品质因子分别为  $99\%$  和 379。提高耦合强度为  $L_c = 1a$  时, 下路波长稍微偏移为  $1524.3 \text{ nm}$ , 品质因子提高到 1397, 而下路效率下降到  $89\%$ , 与先前报道的介质柱 PCRR 完全一致。此外通过调整环区局部折射率, 可以实现下路波长的调谐, 漂移量为  $200 \text{ nm/RUI}$ 。这些发现对有效解决空气孔型 PCRR 下路效率低的设计有指导作用, 也为光子晶体环形谐振腔未来作为超小型波分复用部件及未来光集成电路提供理论基础。

### 参考文献

- [1] LI Shuai, WU Yuan-da, YIN Xiao-jie, *et al.* Tunable filters based on SOI microring-resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1143-1148.

- 李帅, 吴远大, 尹小杰, 等. 基于绝缘硅的微环谐振可调谐滤波器[J]. 光子学报, 2011, **40**(8): 1143-1148.
- [2] LIU Xin, KONG Mei, WANG Xue-ping. Influence of loss on filtering characteristics of series coupled two-microring resonators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 247-250.  
刘鑫, 孔梅, 王雪萍. 损耗对串联双微环谐振器滤波特性的影响[J]. 光子学报, 2011, **40**(2): 247-250.
- [3] LIANG D, FIORENTINO M, SRINIVASAN S, *et al.* Low threshold electrically-pumped hybrid silicon microring lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, **17**(6): 1528-1533.
- [4] CHO S Y, JOKERST N M. Integrated thin film photodetectors with vertically coupled microring resonators for chip scale spectral analysis [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**: 101105.
- [5] NITKOWSKI A, CHEN L, LIPSON M. Cavity-enhanced on-chip absorption spectroscopy using microring resonators[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(16): 11930-11936.
- [6] WEN Y H, KUZUCU O, HOU T, *et al.* All-optical switching of a single resonance in silicon ring resonators[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(8): 1413-1415.
- [7] YAN Xin, MA Chun-sheng, WANG Xiao-yin, *et al.* Simulation and optimization of polymer electro-optic microring resonator switches[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2374-2378.  
闫欣, 马春生, 王现银, 等. 聚合物微环电光开关的模拟和优化[J]. 光子学报, 2008, **37**(12): 2374-2378.
- [8] FERERA M, PARK Y, RAZZARI L, *et al.* On-chip CMOS-compatible all-optical integrator[J]. *Nature Communications*, 2010, **1**(29): 1-5.
- [9] QIANG Z, ZHOU W, SOREF R A. Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(4): 1823-1831.
- [10] QIANG Z, SOREF R A, ZHOU W. Photonic crystal ring resonators: characteristics and applications[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2010, **10**(3): 1495-1507.
- [11] WU Li-heng, WANG Ming-hong, XU Ming-xing. Broadband photonic crystal add-drop filter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(4): 623-629.  
吴立恒, 王明红, 徐明星. 宽带光子晶体插分滤波器[J]. 应用光学, 2011, **32**(4): 623-629.
- [12] KUMAR V D, SRINIVAS T, SELVARAJAN A. Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits [J]. *Photonics and Nanostructures: Fundamentals and Applications*, 2004, **2**(3): 199-206.
- [13] JEONG S H, SUGISAKA J I, YAMAMOTO N, *et al.* Resonant characteristics in a two-dimensional photonic crystal ring resonator with a triangular lattice of air holes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, **46**(22): L534-L536.
- [14] CHIU W Y, HUANG T W, WU Y H, *et al.* A photonic crystal ring resonator formed by SOI nano-rods[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(23): 15500-15506.
- [15] OGUSU K, TAKAYAMA K. Optical bistability in photonic crystal microrings with nonlinear dielectric materials [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10): 7525-7539.
- [16] MA Z, OGUSU K. Channel drop filters using photonic crystal Fabry-Perot resonators[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(5): 1192-1196.
- [17] OSKOOI A F, ROUNDY D, IBANESCU M, *et al.* Meep: A flexible free-software package for electromagnetic simulations by the FDTD method [J]. *Computer Physics Communications*, 2010, **181**(3): 687-702.

## Design of High-drop Hole-type Photonic Crystal Ring Resonators

XU Xiao-fu, HAO Xiao-long, JIANG Jun-zhen, LI Hui, QIU Yi-shen, QIANG Ze-xuan

(*Institute of Laser and Optoelectronics Technology; Fujian Provincial Key Laboratory for Photonics Technology; Key Laboratory of Optoelectronic Science and Technology for Medicine (Ministry of Education), Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*)

**Abstract:** A high-drop air-hole-type photonic crystal ring resonator (PCRR) was proposed based on two-dimensional square lattice configuration. The single mode operation can be realized by compressing the width of bus waveguide. The impact of number of rows of holes on the propagating field intensity distribution was also analyzed. The physical parameters, such as dropping wavelength, dropping efficiency and spectral quality factor ( $Q$ ) affected by changing the localized refractive index of inner ring and coupling strength between bus waveguide and PCRR, were numerically demonstrated based on two-dimensional (2D) finite-difference time-domain (FDTD) technique. It shows that 99% dropping efficiency and 379  $Q$  can be obtained at 1 528.1 nm signal channel when the width of bus-waveguide and coupling strength are 0.7-periodicity and 0-periodicity, respectively. On the other hand, when the coupling strength increases to 1 periodicity, the  $Q$  can be improved by 1 397 with the decreased dropping efficiency by 89%. Besides, the dropping wavelength can be linearly increased with the increase of localized refractive index of inner ring.

**Key words:** Optical communications; Photonics crystal ring resonators; Air-hole; Finite-Difference Time-Domain (FDTD)