

# 可调谐光子晶体微环腔型光分叉复用器的设计\*

强则焯<sup>1</sup>, 邱怡申<sup>1</sup>, 蒋俊贞<sup>1</sup>, 陈曦曜<sup>2</sup>, 白继博<sup>1</sup>

(1 福建师范大学 激光与光电子技术研究所 光子技术福建省重点实验室, 福州 350007)

(2 闽江学院 物理学与电子信息工程系, 福州 350007)

**摘要:**提出了一种基于二维光子晶体微环腔的新型光分叉复用器,并可以通过改变环区的硅介质柱的折射率实现波长调谐.运用经典的微环自由光谱范围 FSR 和微环半径  $R$  的关系,证实新型的光子晶体微环腔也满足该关系.利用二维时域有限差分法系统分析了下路信号波长及相应效率随折射率的变化关系.结果表明,只需改变环区折射率 0.005,下路波长就可以漂移 1 nm,而有效微环半径还不足 1.4  $\mu\text{m}$ .

**关键词:**光通信;光分叉复用器;光子晶体微环腔;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(2009)12-3088-4

## 0 引言

光分叉复用器 (Optical Add/Drop Multiplexer, OADM) 作为光波分复用系统 (Wave Division Multiplexing, WDM) 中的一个关键组件<sup>[1-2]</sup>, 主要实现从光纤传输系统中下载通往本地的信号, 同时上载本地用户发往其他节点用户的信号进入传输系统, 而不影响其他波长信道的传输, 并且保持光域的透明性. 随着通信容量的急剧增长以及各种新业务的出现, 各个地区的业务上下路也变得更加频繁及复杂, 传统的固定波长的 OADM 已无法适应这种动态网络. 此外, 庞大的通信容量无疑增加了光网络的负荷, 网络故障及健康保护也成为 OADM 的一个技术新要求. 因而, 具有动态路由波长和及时替换故障件的可调光分叉复用器应运而生<sup>[3]</sup>.

光波导微环具有高 Q 值和小型性等优点, 近年来已成为基本设计模块在光通信及光传感领域中得到广泛应用<sup>[4-7]</sup>. 然为了迎合将来纳米尺度的需要, 将来的器件还需要进一步缩小尺寸, 这种传统的微环受全反射限制, 很难进一步缩小尺寸. 相反, 光子晶体是一个很好的制作纳米器件的平台, 基于光子晶体微腔 (主要是基于点缺陷及变形) 的光分叉复用器已有诸多报道<sup>[8-10]</sup>. 最近, 基于光子晶体微环的光分叉复用器也见报道<sup>[11-12]</sup>, 它们的直径约为 5 个介质波长, 这无疑为解决上述技术瓶颈提供了一个有效方案.

本文首先探讨了这种光子晶体微环的光谱自由程关系, 接着提出了通过调制微环区的硅介质柱的

折射率以实现下路信号波长可调, 并具体分析了折射率对下路效率的影响.

## 1 光子晶体微环的光谱自由程关系

传统的光波导微环的光谱自由程 (Free Spectral Range, FSR) 和微环半径  $R$  满足<sup>[13]</sup>

$$\text{FSR}(\Delta\lambda) = \frac{\lambda^2}{(n_{\text{eff}} - \lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \lambda}) \cdot 2\pi R} = \frac{\lambda^2}{n_g \cdot 2\pi R} \quad (1)$$

式中  $\lambda$  是谐振波长,  $n_{\text{eff}}$  和  $n_g$  分别是微环的有效折射率和群折射率. 此外, 群折射率还可以进一步表示为

$$n_g = c/v_g = c/(d\omega/dk) \quad (2)$$

式中  $c$  是真空中光速,  $v_g$  是群速度, 可以表示为  $d\omega/dk$ . 对于光子晶体波导, 它的群速度可以通过 L1 线缺陷波导 (移除一排光子晶体) 的色散关系  $\omega-k$  图<sup>[14]</sup> 获得, 从而就可以根据式 (2) 求得群折射率. 假定提出的光子晶体微环同样满足上述关系, 显然只要给定光子晶体微环半径, 由式 (1) 不难求得相应的光谱自由程. 如图 1(b), 根据等效面积的概念, 首先定义了光子晶体微环的有效半径为

$$R_{\text{eff}} = (m+1)a/\sqrt{\pi} \quad (3)$$

式中数值  $a$  是光子晶体晶格常量,  $m$  是包围在光子

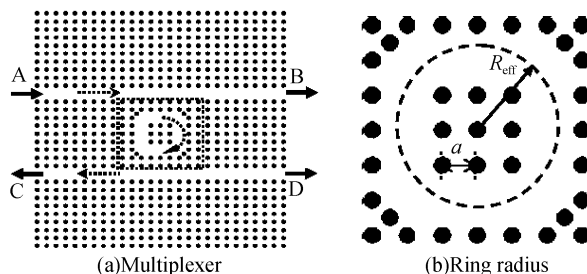


图 1 光子晶体微环分叉复用器及有效环半径  
Fig. 1 Schematic of optical add-drop multiplexer based on photonic crystal ring resonator (PCRR) and concept of effective ring radius

\* 福建省自然科学基金 (F0950055, A0910028) 资助

Tel: 13675067061

Email: zx\_qiang@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-11-04

修回日期: 2009-02-02

晶体微环腔里面的介质柱或者空气孔的数目,对于图1(a), $m$ 为3,通过改变 $m$ 即可改变相应的有效半径.

以二维正方晶格光子晶体介质柱微环为例,如图1,假定介质柱由硅材料制成,折射率为3.48,相对孔径,即圆柱半径 $r$ 和光子晶体晶格常量 $a$ 的比值, $r/a$ 为0.185.如图2中 $\omega-k$ 的色散曲线,其具有很宽的单模波长范围.对于 $1.55\ \mu\text{m}$ 中心通信波长,本文选取 $a$ 为 $540\ \text{nm}$ ,则相应的波长范围为 $1\ 270\sim 1\ 740\ \text{nm}$ .由式(2)可以得到如图2的群折射率随波长变化关系.为了更好的比较及验证光子晶体微环满足式(1),固定L1线缺陷引导波导长度为 $62a$ ,约 $33.5\ \mu\text{m}$ ,引导波导外包围的光子晶体行数为14(图1(a)中为9).取 $m$ 为3,7,11,15,21和31进行分析.由于Q值和耦合效率之间存在一个最佳关系<sup>[11]</sup>,本文计算过程中,发现有效半径增加到 $2.44\ \mu\text{m}$ 以上,也就是 $m>7$ 时,耦合强度(定义为L1线缺陷引导波导和光子晶体微环之间的阵列数,图1(a)为2)需要改为3.

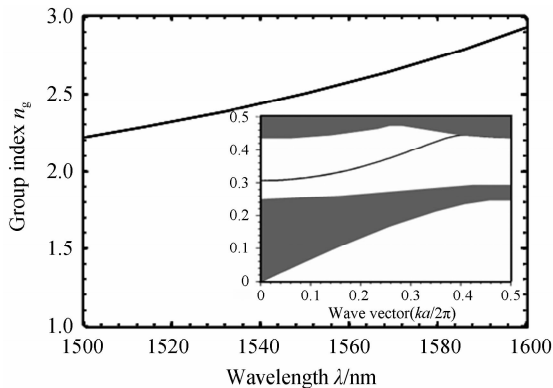
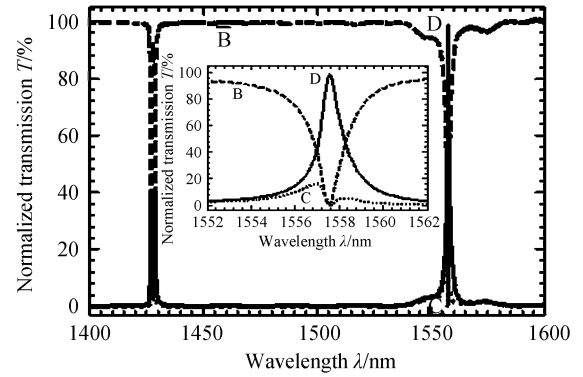


图2 光子晶体微环群折射率

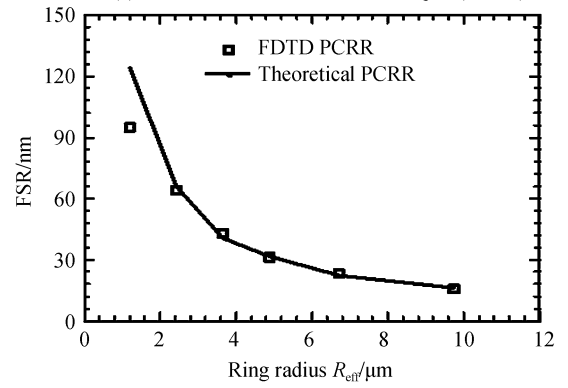
Fig.2 Group index of PCRR structures

如图1(a),在A、B、C、D四个端口分别放置功率监视器,并以A端口为输入端口,利用二维FDTD计算方法,并选用各向异性完全匹配层(Perfectly Matched Layer,PML)为吸收边界条件,注入覆盖上述感兴趣光谱范围的高斯脉冲光束,将B、C、D端口监测到的功率与输入端口A的功率相比,即可求得其它三个端口的归一化传输谱.由图3(a),发现D端口在 $1\ 557.5\ \text{nm}$ 处的传输峰值约接近100%,其他两个端口B和C基本趋于零,如图3(a)中小图.因此,D端口可以很好的用于上下信号,效率 $\eta$ 约100%(如图4(a)强度分布).值得强调的是,此时的有效半径才 $1.218\ \mu\text{m}$ .从图3(a)还可以求得光谱自由程为 $95\ \text{nm}$ ,将下路波长 $1\ 557.5\ \text{nm}$ 及有效半径代入式(1)即可求得理论上的FSR.类似地,可以得到 $m$ 为7、11、15、21和31的FSR,如图3(b).图3(b)表明,FDTD计算的结果和理论值

吻合得非常好,从而证实了本文提出的光子晶体微环的光谱自由程关系也可以用式(1)表示.



(a) Normalized transmission of each port(B,C,D)



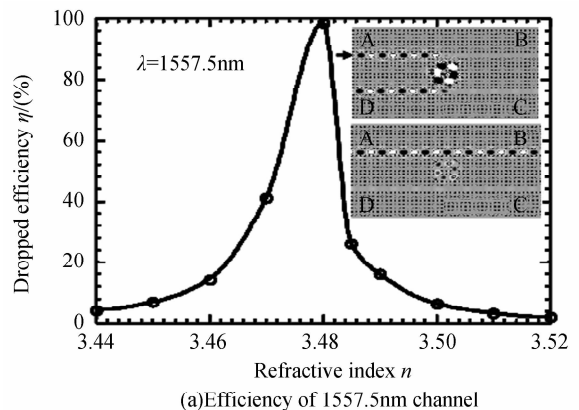
(b) Size-dependent FSR

图3 光子晶体微环的光谱特性

Fig.3 Spectral performance of PCRR

## 2 下路波长、效率随环区折射率变化

一般说来,硅的折射率可以通过载流子注入<sup>[15]</sup>和热效应<sup>[16]</sup>等方式改变.本文对图1(a)虚线框部分加上电极可改变折射率.为了实现低功耗、超小型以及散热等要求,折射率变化量不宜太大.以热效应改变硅折射率为例,假定温度从室温( $25\ ^\circ\text{C}$ )最多只能增加到 $250\ ^\circ\text{C}$ ,根据 $\Delta n/\Delta T=1.8\times 10^{-4}\ \text{K}^{-1}$ ,折射率变化量为0.0405.以此为目标,对电极部分硅介质进行折射率调制,得到结果如图4.由图4(a)可以看出,在改变环区硅的折射率后,上述工作于 $1\ 557.5\ \text{nm}$ 通道的下路效率会显著降低,如当折射



(a) Efficiency of  $1557.5\ \text{nm}$  channel

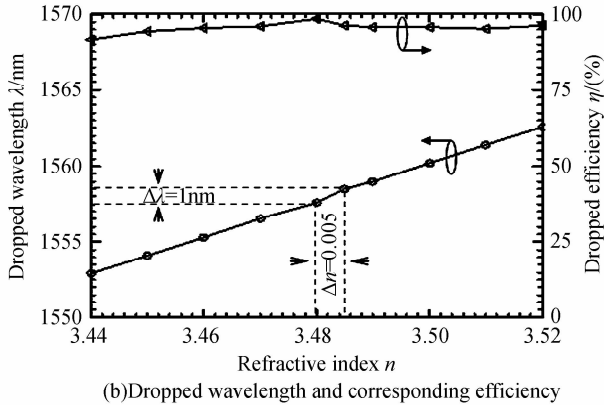


图4 光子晶体微环调制特性

Fig. 4 Modulated characteristics of PCRR affected by refractive index change

率增加到 3.52 时, 1557.5 nm 波长的光可以基本无串扰地通过 B 端口而不进入 D 端口, 如由图 4(a) 中场图. 从图 4(b), 下路波长基本上随着折射率的增加而线性增加, 且相应的效率均在 90% 以上, 从而不影响信道的正常通信. 对于 0.005 的折射率变化量, 其波长可以漂移约 1 nm.

### 3 结论

本文结合二维 FDTD 计算方法证实了光子晶体微环的自由程关系也可以用传统的光波导微环表示, 但不同于传统微环的是, 其尺寸可以进一步缩小, 可以不足  $1.4 \mu\text{m}$ . 此外, 通过在光子晶体微环区镀上电极改变折射率可以实现下路波长的动态调谐. 折射率变化量  $\Delta n$  只需为 0.005 时, 波长就可以漂移约 1 nm. 如果适当级联这种光子晶体 OADM, 并通过调整折射率, 完全可以实现多路波长的同时上下.

#### 参考文献

- [1] KAMINOW P, LI T, WILLNER A E. Optical fiber telecommunications V B: systems and networks[M]. 5th ed. New York: Academic Press, 2008: 293-340.
- [2] HAN Yi-shi, QIANG Ze-xuan. Study of a novel bi-directional optical add-drop multiplexer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 697-700.  
韩一石, 强则焯. 新型双向光分插复用器结构实验[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5): 697-700.
- [3] XU Zhi-gen, LI Yan-he, ZHANG Han-yi, et al. Study on the reconfigurable multi-channel optical add/drop multiplexer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9): 1085-1089.
- [4] LIPSON M. Compact electro-optic modulators on a silicon chip[J]. *IEEE J Sel Top Quant Electron* 2006, **12**(2): 1520-1526.
- [5] PAN Jian-Xia, WANG Fan, YANG Jian-yi. Linearity of microring-assisted Mach-Zehnder optical modulators[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1511-1515.  
潘剑侠, 王帆, 杨建义. 微环辅助 Mach-Zehnder 光调制器的线性特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1511-1515.
- [6] XIA Z X, CHEN Y, ZHOU Z P. Dual waveguide coupled microring resonator sensor based on intensity detection[J]. *IEEE J Sel. Top Quant Electron*, 2008, **44**(1): 100-107.
- [7] HAN Xiu-you, PANG Fu-fei, GENG Jian-xin, et al. Investigation and fabrication of integrated waveguide racetrack resonator filter in Glass material[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1475-1477.  
韩秀友, 庞拂飞, 耿建新, 等. 跑道形玻璃波导谐振腔滤波器的研制[J]. *光子学报*, 2006, **35**(10): 1475-1477.
- [8] NOTOMI M, SHINYA A, MITSUGI S, et al. Waveguides, resonators and their coupled elements in photonic crystal slabs[J]. *Opt Exp*, 2004, **12**(8): 1551-1561.
- [9] ZHANG Z, QIU M. Compact in-plane channel drop filter design using a single cavity with two degenerate modes in 2D photonic crystal slabs[J]. *Opt Exp*, 2005, **13**(7): 2596-2604.
- [10] TAKANO H, AKAHANE Y, ASANO T, et al. In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, **84**(13): 2226-2228.
- [11] QIANG Z, ZHOU W D, SOREF R A. Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(4): 1823-1831.
- [12] CHIU W, HUANG T, WU Y, et al. A photonic crystal ring resonator formed by SOI nano-rods[J]. *Opt Express*, 2007, **15**(23): 15500-15506.
- [13] RABIEI P, STEIER W H, ZHANG C, et al. Polymer microring filters and modulators[J]. *J Lightwave Tech*, 2002, **20**(11): 1968-1975.
- [14] JEONG S H, YAMAMOTO N, SUGISAKA J, et al. GaAs-based two-dimensional photonic crystal slab ring resonator consisting of a directional coupler and bent waveguides[J]. *JOSA B*, 2007, **24**(8): 1951-1959.
- [15] SCOREF R A, BBNNETT B R. Electrooptical effects in silicon[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1987, **23**(1): 123-129.
- [16] LI J, LIU A Q, ZHANG X M, et al. Light switching via thermo-optic effect of micromachined silicon prism[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **88**(24): 243501.

## Design of Tunable Optical Add-drop Multiplexer Based on Photonic Crystal Ring Resonators

QIANG Ze-xuan<sup>1</sup>, QIU Yi-shen<sup>1</sup>, JIANG Jun-zhen<sup>1</sup>, CHEN Xi-yao<sup>2</sup>, BAI Ji-bo<sup>1</sup>

(1 *Fujian Provincial Key Laboratory of Photonic Technology, Institute of Laser & Optoelectronic Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*)

(2 *Department of Physics and Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China*)

**Abstract:** A new tunable OADM based on photonic crystal ring resonators (PCRRs) is proposed by changing the silicon rod index of ring region. The provided PCRR also satisfies the well-known relationship between free spectral range (FSR) and ring radius  $R$  of traditional micro-strip ring resonators. The effect of index change on the dropped wavelength and its corresponding efficiency are then numerically analyzed by using two-dimensional finite-difference time-domain (FDTD) technique with perfectly matched layers (PML) as absorbing boundaries. 1-nm dropped wavelength shift can be obtained with only  $0.005\text{-}\Delta n$  and less than  $1.4\ \mu\text{m}$  effective ring radius.

**Key words:** Optical communication; Optical add-drop multiplexers; Photonic crystal ring resonators; FDTD



**QIANG Ze-xuan** was born in 1975. He received his Ph. D. degree in optical engineering from Zhejiang University. He is now a research professor at Fujian Normal University. His research interests focus on the design and application of optical key components for long-haul WDM telecommunication systems based on nanophotonic platform.