

环形线缺陷光子晶体滤波器的设计与数值研究

范庆斌 李传起 张秀容 杨梦婕

广西师范大学电子工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 在光子晶体环形腔(PCRR)中把原来移除一圈介质柱改为介质柱半径减小,构成环形线缺陷,提出了一种新型的环形腔结构。运用时域有限差分法,分析了光波在环形腔中的传输特性,并进一步讨论了环形线缺陷介质柱半径变化对滤波特性的影响。结果表明,当环形线缺陷介质柱半径选取在 $0.43R\sim 0.51R$ 时,可实现单模窄带滤波,中心波长都处于第三通信窗口1550 nm附近,归一化透射率均在85%以上,脉宽都在17 nm以下,为波分复用系统中复用/解复用器的设计提供了有价值的参考。

关键词 光学器件; 光子晶体; 环形腔; 环形线缺陷; 时域有限差分法; 波分复用

中图分类号 TN256 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.012301

Design and Numerical Studies of Annular Line Defect Photonic Crystal Filter

Fan Qingbin Li Chuanqi Zhang Xiurong Yang Mengjie

Department of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract By decreasing the radius of dielectric rods rather than removing a circle of dielectric rods in the photonic crystal ring resonator(PCRR), an annular line defect is constructed. A new type of photonic crystal ring resonator is proposed. By using the finite difference time domain (FDTD), the transmission property of lightwave through the ring resonator is analyzed. Further more, by changing the radius of dielectric rods, the influences on the filtering property is discussed. The result shows that the narrowband filter with single mode can be realized when the radius of rods is in the range of $0.43R\sim 0.51R$. At the same time, the center wavelength is close to 1550 nm at the third communication window, the rates of normalized transmission are all over 85% and the bandwidths are all below 17 nm. It provides available reference for the wavelength division multiplexing (WDM) multiplexer/demultiplexer.

Key words optical devices; photonic crystal; ring resonator; annular line defect; finite difference time domain; wavelength division multiplexing

OCIS codes 230.5298; 230.4555; 160.2220; 060.1810; 260.2110

1 引言

1987年, Yablonovitch^[1]和John^[2]分别独立的提出了光子晶体的概念。由于光子晶体介电常数的周期性分布,使得它控制光子具有类似半导体周期性势场约束电子的特性。其最根本的特征就是“光子禁带”(PBG),即频率落在禁带范围内的电磁波均不能通过光子晶体。在现代光通信系统中,光滤波器是处理信号的关键器件,而由于光子晶体可以制作高品质的选频滤波器^[3-4],使得光子晶体滤波器成为众多学者的研究热点。在二维光子晶体中引入线缺陷波导和点微腔^[5-6],可以实现选频功能,但其模式单一,调节范围受限。目前研究较多的是线缺陷波导与环形腔的组合,环形腔具有多模特性,能同时产生多个窄带信号,调节参数

收稿日期: 2014-06-19; 收到修改稿日期: 2014-07-17; 网络出版日期: 2014-12-18

基金项目: 广西高校自然科学基金(201202ZD010)、桂林市科学研究与技术开发计划课题(20120104-18)

作者简介: 范庆斌(1988—),男,硕士研究生,主要从事光子晶体及其应用技术等方面的研究。

E-mail: fq880812@126.com

导师简介: 李传起(1964—),男,博士,教授,主要从事物理学及光通信技术等方面的研究。

E-mail: lcq@gxnu.edu.cn(通信联系人)

多,在光通信器件的设计上有着重要的应用前景^[7-9]。

目前,光子晶体滤波器的应用主要有以下几个方面:1)在波分复用系统(WDM)中复用/解复用器的实现^[10];2)未来可能用于军事通信和个人保密通信的光码分多址(OCDMA)技术^[11],其核心部件编解码器就是级联光纤布拉格光栅(FBGs)^[12],二维光子晶体滤波器具有制备简单,损耗极小的优点,使得它替代FBGs成为可能;3)运用于集成光路,光子晶体滤波器与其他光器件集成在一块芯片上,具有集成度高、传输速度快、控光能力强的优点。

本文在二维正方晶格光子晶体环形腔(PCRR)的基础上进行了改进,把原来移除一圈介质柱改成介质柱半径减小,形成环形线缺陷,提出了一种新的环形腔滤波器模型,运用时域有限差分法,分析了该环形腔模型的选频特性,为滤波器的设计提供重要参考。

2 光子晶体滤波器模型的设计与改进

采用高折射率介质柱周期性的排列在空气(折射率为1)中,构成完整 21×21 的二维正方晶格光子晶体。介质柱材料选用折射率 $n=3.58$ 的GaAs,晶格常数 $a=550 \text{ nm}$,半径 $R=0.185a$ 。运用平面波展开法计算其禁带,如图1所示,只有横电(TM)模(电场方向平行于介质柱轴方向)存在两条带隙,第一条禁带从 $0.286(a/\lambda) \sim 0.430(a/\lambda)$,对应波长范围从 $1279 \sim 1923 \text{ nm}$,第二条禁带从 $0.718(a/\lambda) \sim 0.745(a/\lambda)$,对应的波长范围从 $738 \sim 766 \text{ nm}$,第一条禁带覆盖了第二和第三通信窗口,且带隙宽度大,由此选用第一条禁带设计光子晶体滤波器。

在该完整的二维光子晶体中移除一行介质柱形成单模光子晶体波导。采用平面波展开法,选取合适的超原胞,计算该波导的色散曲线。如图2所示,可以看出在结构中引入线缺陷,光子禁带被破坏,在 $0.305(a/\lambda) \sim 0.432(a/\lambda)$ 之间只存在一种传播模式。

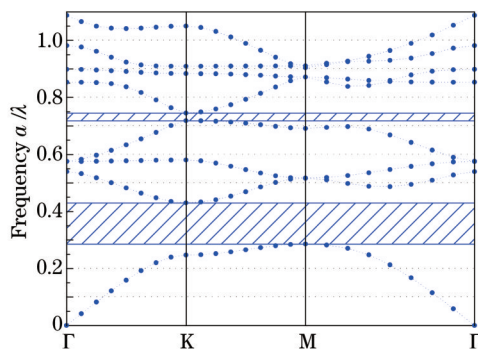


图1 二维正方晶格光子晶体的TM模式频带结构

Fig.1 Band structure of TM modes for 2D square lattice photonic crystal

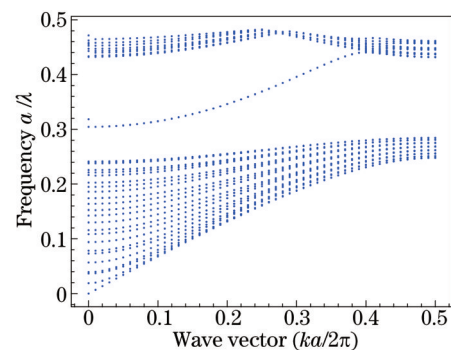


图2 线缺陷波导频带结构

Fig.2 Band structure of the line defect waveguide

设计的光子晶体滤波器由两条相互垂直的波导和一个环形腔组成,传统环形腔滤波器如图3(a)、(c)所示,与其分别进行对照的改进型滤波器如图3(b)、(d)所示。

图3(a)为直接移除环形线缺陷介质柱形成的正方形环形腔,波导和环形腔之间只有一行耦合柱,腔内部为 3×3 阵列的介质柱,被称为内部柱。图3(b)把原来移除环形线缺陷介质柱改为介质柱半径减小,即环形线缺陷介质柱半径 $r_{\text{defect}} \neq 0$,这个改进可以抑制环形腔的多模特性,提高环形腔的滤波效率。图3(c)在正方形环形腔的4个角上各增加一根介质柱,这4根柱子被称为散射柱^[13],能够降低传输模式在环形腔中的损耗。图3(d)为环形线缺陷介质柱半径 $r_{\text{defect}} \neq 0$,且在4个角增加散射柱的环形腔结构。

3 数值模拟与分析

采用时域有限差分法(FDTD),并用完全匹配层(PML)作为吸收边界条件对光子晶体环形腔进行数值计算。网格尺寸选用 $\Delta x = \Delta y = a/18$,时间步长为 Δt 。为了使麦克斯韦旋度方程按Yee氏网格所导出的差分方程的解收敛且稳定,需要满足Courant稳定条件: $\Delta t \leq 1/c \sqrt{1/(\Delta x)^2 + 1/(\Delta y)^2}$,其中 c 为真空中的光速。

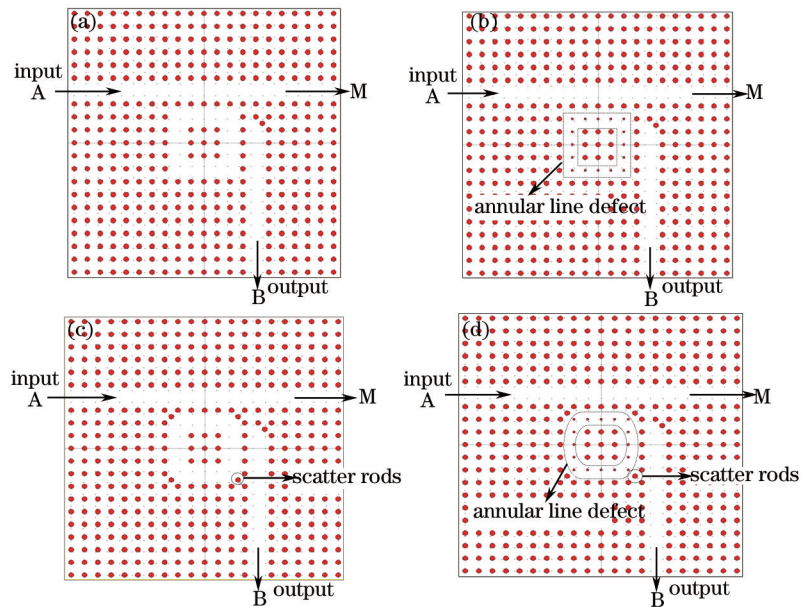


图3 光子晶体环形腔结构的设计。(a) 无散射柱, $r_{\text{defect}}=0$; (b) 无散射柱, $r_{\text{defect}}\neq 0$; (c) 增加散射柱, $r_{\text{defect}}=0$;
(d) 增加散射柱, $r_{\text{defect}}\neq 0$

Fig.3 Schematic structural design of PCRR. (a) Without scatter rods, $r_{\text{defect}}=0$; (b) without scatter rods, $r_{\text{defect}}\neq 0$;
(c) add scatter rods, $r_{\text{defect}}=0$; (d) add scatter rods, $r_{\text{defect}}\neq 0$

3.1 改进型环形腔与传统环形腔仿真结果的对比和分析

取环形线缺陷介质柱半径 $r_{\text{defect}}=0.5R$, 高斯脉冲光信号从 A 端口输入, 在 B 端口放置监测器, 采用时域有限差分法计算, 经过快速傅里叶变换 (FFT) 在 B 端口得到透射谱。

由图 4(a)、(b) 透射谱分析可以得出, 若直接移除环形腔介质柱, 由于环形腔具有多模特性, 在滤波器输出端口 B 测得多个窄带信号, 峰值不高, 脉宽较大, 且旁瓣比较多, 用于通信比较容易引起用户间的干扰。若环形线缺陷介质柱半径取 $0.5R$ 时, 环形腔的模式受到抑制, 只有与此时环形腔谐振的频带才能输出, 但由于在正方形环形腔中 4 个角会产生后向反射, 传输模式在拐弯处的损耗比较大, 所以环形腔谐振频率的耦合效率不高。

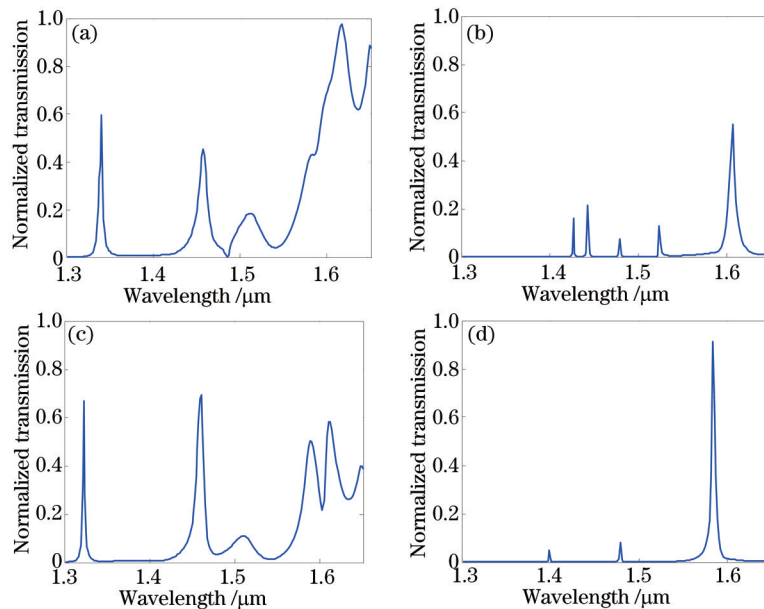


图4 光子晶体环形腔归一化透射谱。(a) 无散射柱, $r_{\text{defect}}=0$; (b) 无散射柱, $r_{\text{defect}}=0.5R$; (c) 增加散射柱, $r_{\text{defect}}=0$;
(d) 增加散射柱, $r_{\text{defect}}=0.5R$

Fig.4 Normalized transmission spectrum of PCRR. (a) Without scatter rods, $r_{\text{defect}}=0$; (b) without scatter rods, $r_{\text{defect}}=0.5R$;
(c) add scatter rods, $r_{\text{defect}}=0$; (d) add scatter rods, $r_{\text{defect}}=0.5R$

图4(c)由于环形线缺陷半径为0,多模效应仍然存在,但环形腔4个角分别增加了散射柱,使得耦合效率提高的同时旁瓣也有所降低。图4(d)在有散射柱的基础上再增加环形线缺陷介质柱,此时基本实现单纵模传输,几乎不存在旁瓣,脉宽窄,耦合效率高,而且处于第三通信窗口附近,有利于制作高效的滤波器件。

3.2 环形线缺陷介质柱半径变化对滤波特性的影响

在图3(d)所示的环形腔滤波器结构中,改变环形线缺陷介质柱半径观察负载波导B端口的透射谱。环形线缺陷介质柱半径 r_{defect} 取值分别为 $0.4R$ 、 $0.5R$ 、 $0.6R$,图5为它们在B端口的透射谱。

如图(5)所示,长虚线表示当 $r_{\text{defect}}=0.4R$ 时,仍然出现多个窄带,多模效应只受到微弱的抑制。短虚线表示当 $r_{\text{defect}}=0.5R$ 时,环形腔对多模效应抑制比较强,几乎只剩下一个与环形腔谐振的窄带,且谐振频率的耦合效率得到提高。实线表示当 $r_{\text{defect}}=0.6R$ 时,环形线缺陷介质柱半径过大导致对多模效应的抑制过强,耦合效率降低,故只有几个微弱的窄带出现。

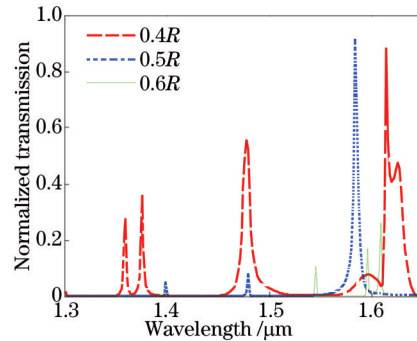


图5 透射谱随环形线缺陷介质柱半径改变的变化曲线

Fig.5 Curves of transmission spectrum change varies with the changed radius of the annular line defect dielectric rods

环形腔滤波器是一个有机整体,可调节参数多,主要有:环形线缺陷介质柱、散射柱、耦合柱、内部柱,通过调节这些介质柱的折射率及半径大小,可以提高环形腔的滤波效率。基于以上的分析,为了使其多模效应得到有效抑制,同时提高谐振频率的耦合效率,选取环形线缺陷介质柱半径分别为: $0.43R$ 、 $0.44R$ 、 $0.45R$ 、 $0.46R$ 、 $0.47R$ 、 $0.48R$ 、 $0.49R$ 、 $0.50R$ 、 $0.51R$,研究光子晶体滤波器的中心波长、透射率、脉宽及品质因子($Q=\lambda/\Delta\lambda$,其中 λ 为中心波长, $\Delta\lambda$ 为半峰全宽)。表1为环形线缺陷介质柱、耦合柱、散射柱的调整情况,只有各个部分之间相互协调作用,才能有效提高环形腔的滤波效率。

表1 对环形线缺陷介质柱、耦合柱、散射柱的调整情况

Table 1 Adjustment of the annual line defect dielectric rods, coupling rods and scatter rods

Radius of annual line defect dielectric rods /nm	Radius of coupling rods /nm	Top right corner of the annual line defect dielectric rods radius /nm	Top left corner of scatter rods radius /nm
$0.43R$	$0.95R$	$1.04 \times 0.43R$	-
$0.44R$	$0.96R$	$1.04 \times 0.44R$	-
$0.45R$	$0.95R$	$1.04 \times 0.45R$	-
$0.46R$	$0.95R$	$1.04 \times 0.46R$	-
$0.47R$	$0.95R$	$1.04 \times 0.47R$	-
$0.48R$	$0.96R$	-	-
$0.49R$	-	-	-
$0.50R$	-	-	-
$0.51R$	-	-	$1.27R$

(Note: the top right corner of the annual line defect dielectric rods, that is, the nearest annual line defect dielectric rods away from the top right corner of scatter rods)

表2为经调整后环形腔滤波器的中心波长、透射率、脉宽及品质因子。可以看出,环形线缺陷介质柱半径的变化有很好选频功能,在 $0.43R \sim 0.51R$ 时,对应的中心波长范围从 $1505.9 \sim 1599.5$ nm,都处于第三通信窗口 1550 nm附近,归一化透射率均在85%以上,脉宽都在 17 nm以下,且品质因子都大于 220 ,适合用于光子晶体滤波器的设计。

表2 各线缺陷介质柱半径所对应的中心波长、归一化透射率、脉宽及品质因子

Table 2 Center wavelength, normalized transmission, bandwidth and quality factor of different line defect dielectric rods radius

Radius of annual line defect dielectric rods /nm	Center wavelength /nm	Normalized transmission /%	Bandwidth /nm	Quality factor /Q
0.43R	1505.9	85.5	16.4	228
0.44R	1518.9	85.8	13.2	257
0.45R	1530.3	96.3	13.3	312
0.46R	1540.3	96.1	14.0	285
0.47R	1552.2	86.3	14.8	232
0.48R	1562.5	87.9	14.5	274
0.49R	1574.6	97.7	12.0	366
0.50R	1583.4	91.2	13.5	352
0.51R	1599.5	94.0	10.5	320

4 结 论

通过保留环形线缺陷介质柱,设计了新的环形腔结构。通过改变环形线缺陷介质柱半径的大小,可以控制环形腔对多模效应抑制的强弱。当环形线缺陷介质柱半径较小时,多模效应只受到微弱抑制;当半径较大时,对多模效应的抑制过于强烈,耦合效率也降低。通过取合适的环形线缺陷介质柱半径,可以抑制环形腔的多模特性,同时提高谐振频率的耦合效率。当半径选取在 $0.43R\sim 0.51R$ 时,适当调节耦合柱、散射柱的半径大小,使得中心波长都在第三通信窗口范围内,归一化透射率均在85%以上,脉宽都在17 nm以下,且品质因子都大于220,为波分复用系统中复用/解复用器的设计提供了有价值的参考。

参 考 文 献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 2 John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 3 Liu Qineng. The theoretic study of a novel kind of tunable filter based on 1-D photonic crystal[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2007, 18(5): 574-577.
刘启能. 一种新型可调谐光子晶体滤波器的理论研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18(5): 574-577.
- 4 Yu Haixia, Du Chunmei, Liang Guangdong. Tunable wavelength filter based on photonic crystal with complex periodical structure[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(3): 44-48.
于海霞, 杜春梅, 梁广东. 复周期结构光子晶体波长可调谐滤波器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(3): 44-48.
- 5 Ren H, Jiang C, Hu W, *et al.*. Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity [J]. Opt Express, 2006, 14(6): 2446-2458.
- 6 Wang Haisong, Li Kang, Kong Fanmin, *et al.*. Design and simulation of high effective multi-channel photonic crystal filters[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 37(6): 1122-1125.
王海松, 李 康, 孔凡敏, 等. 高效多信道光子晶体滤波器的设计与仿真[J]. 光学学报, 2008, 37(6): 1122-1125.
- 7 M Koshiba. Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers[J]. Lightwave Technology, 2001, 19(12): 1970-1975.
- 8 Yun M J, Wan Y, Liang J, *et al.*. Multi-channel biosensor based on photonic crystal waveguide and microcavities[J]. Optik, 2012, 123(21): 1920-1922.
- 9 M Djavid, A Ghaffari, F Monifi, *et al.*. T-shaped channel-drop filters using photonic crystal ring resonators[J]. Physica E, 2008, 40(10): 3151-3154.
- 10 S Bouamami, R Naoum. Compact WDM demultiplexer for seven channels in photonic crystal[J]. Optik, 2013, 124(16): 2373-2375.
- 11 Li Chuanqi, Li Xiaobin. Optical Fiber Communication OCDMA System[M]. Beijing: Science press, 2008. 24.
李传起, 李晓滨. 光纤通信 OCDMA 系统[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 24.

- 12 Li Chuanqi, Zhu Yingchun, Zhou Xu. Tunable encoder/decoder for optical code division multiple access networks[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 1901-1905.
李传起, 朱迎春, 周 谔. 光码分多址系统可调谐编/解码器研究[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1901-1905.
- 13 Qiang Zexuan, Zhou Weidong, Soref Richard A. Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators[J]. Opt Express, 2007, 15(4): 1823-1831.

栏目编辑: 韩 峰