

带有环形谐振器的 T 形光子晶体滤波器

吴立恒,王明红,徐明星

(聊城大学物理科学与信息工程学院,山东 聊城 252059)

摘要:提出了一种带有环形谐振器的 T 形光子晶体滤波器,利用时域有限差分法研究了滤波器传输特性,分析了光子晶体结构参数对其传输特性影响。结果表明:该结构具有可调性开关波长、传输率高及频带宽的特点,在光子晶体集成制作、光通信器件制作等方面具有潜在的应用价值。

关键词:光子晶体;环形谐振器;时域有限差分法;可调性开关波长

中图分类号:TN713+.91 **文献标识码:**A

T-shaped photonic crystal filter with a ring resonator

WU Li-heng, WANG Ming-hong, XU Ming-xing

(School of Physics Science & Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract: In this paper, a structure of T-shaped photonic crystal filter based on ring resonators is presented. We have investigated the transmission properties of the filter by using finite-difference time-domain method, and analyze the effects of photonic crystal structural parameters to its transmission properties. The results of analysis show that this structure has properties of tunable switch wavelength, high normalized transmission, and a large bandwidth. It has application value in the designs of photonic crystal integration and optical communication devices and so on.

Key words: photonic crystal; ring resonator; finite-difference time-domain method; tunable switch wavelength

1 引言

光子晶体滤波器是光路集成化的一种重要器件,该器件是通过光子晶体波导与光子晶体谐振腔的相互耦合,能够根据需要提取谐振信号,不干扰其他通频带传播的信号^[1-2]。目前已有多种类型的滤波器结构,例如布拉格光纤光栅(fiber Bragg grating),法布里-珀罗滤波器(Fabry-Perot filter),阵列波导光栅(arrayed waveguide grating)等。本文研究的滤波器使用了具有更好滤波特性的光子晶体环形谐振器,取代了点缺陷谐振腔,其工作原理是根据环形谐振器的通频滤波性和光子晶体波导与谐振器的耦合机制。该器件通过使用结构紧凑的环形谐振器,能够高效传输光子晶体带隙中的谐振频率电磁波^[3-4]。谐振器尺寸的大小可根据所需要的谐振波长和谐振器的品质因数及腔体积来决定^[3]。与点缺陷及线缺陷光子晶体谐振腔相比较,PCRRs的多模特性提供了该结构尺寸上的可测量性和模式设计

上的灵活性^[4]。本文提出了具有 3×3 结构环形谐振器的 T 形光子晶体滤波器,利用时域有限差分法研究与分析了该结构两端口电磁波传输率,及其场强分布图。

2 理论模型与计算方法

2.1 理论模型

图 1 所示的结构是一种典型的环形谐振器,其晶格常数为 a ,介质柱半径为 $r = 0.185a$ 。

为取得更好的耦合效果^[5],近来通过优化设计光子晶体谐振器,采用了一种更为适合的结构,耦合介质柱的半径取值为 $0.8r$,四个半径为 r 的相同介质柱,分别放置在环形谐振器拐角的半个晶格常数处,以减少环拐角处电磁波向后的反射。通过把环

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60871047)资助。

作者简介:吴立恒(1980-),男,在读硕士生,主要从事光子晶体方面的研究。E-mail: wulihenglctu@163.com

收稿日期:2010-11-09

形谐振器放置在移去一排介质柱形成的波导附近,在光子晶体波导中传输的谐振频率电磁波能量能够被谐振器提取,然后把局域在光子晶体谐振腔的电磁波耦合到滤波器输出波导^[6]。

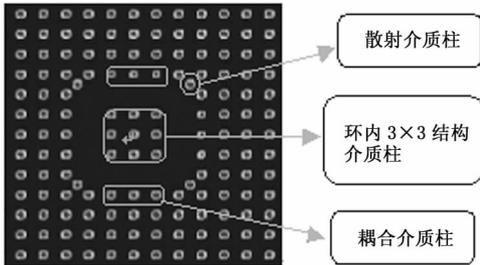


图1 具有 3×3 结构的环形谐振器

图 2 所示结构是本文提出与设计的带有 3×3 结构环形谐振器 T 形滤波器模型,该滤波器位于 35×31 结构的正方晶格中,晶格常数为 $a = 545\text{nm}$,可知该结构尺寸为 $19.075\ \mu\text{m} \times 16.895\ \mu\text{m}$ 的长方形,其中的圆圈代表半径为 $0.185a$ 介质柱,介质柱之间的区域为空气。该 CDF 的环形谐振器采用了图 1 所示的结构参数,通过把两个波导分别放置在与环形谐振器紧邻水平方向的一侧和垂直方向的一侧,并在垂直方向的波导和谐振器耦合区域上端右侧半个晶格常数处放置一个介质柱,有助于改善滤波器对电磁波传输的稳定性。由于环形谐振器与波导之间的耦合作用^[7-9],波导内传输电磁波频率落在环形谐振器的谐振频率处时,水平方向波导内传输的大部分电磁波会被耦合到垂直方向的波导内,经输出口 P_3 输出;当波导内传输电磁波频率没有落在环形谐振器的谐振频率处,水平方向波导内传输的电磁波仍会集中在水平方向传输,经输出口 P_2 输出。

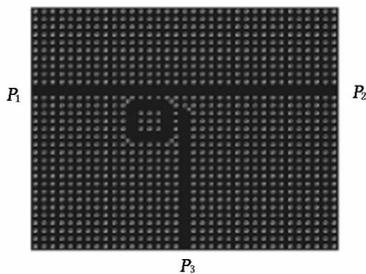


图2 具有环形谐振器的 T 形滤波器

2.2 计算方法

为计算在该 CDF 电磁波传输性能,本文基于 Yee 元胞利用时域有限差分法,将麦克斯韦方程组 $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \nabla \cdot \vec{D} = 0, \nabla \cdot \vec{B} = 0$ 离散化^[10],其中 ϵ_0 和 μ_0 分别是真空介电常数和磁导率常数, $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}, \vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ 。与频域电磁波对应

的平均能流密度公式为 $\vec{S} = \frac{1}{2} \text{Re} (\vec{E}(\omega) \times \vec{H}^*(\omega))$,通过该公式面积分,进一步计算得到电磁波的传输率。对于二维光子晶体波导的情况,数值计算所需要满足的 Courant 稳定性条件^[11]为 $c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2}}}$,其中 c 为真空光速; Δx 和 Δy 表

示计算所使用的距离步长。由于我们计算的区域为有限空间区域,为了模拟无限大空间区域的条件,使用了 PML 层吸收边界条件^[12]。

3 模拟结果与分析

我们利用时域有限差分法研究了 T 形滤波器对 TM 波的滤波性能,给出了该结构输出端口电磁波传输率随正规化频率 (a/λ) 变化的曲线,及其传输场强分布图。图 3 描述了该滤波器整个结构介质柱相对介电常数为 13.4 时两输出端口电磁波传输率,其中实线表示 P_2 端口传输率,点划线表示 P_3 端口传输率,图的横坐标表示正规化频率,取值范围在 $0.3420 \sim 0.3650$ 之间,可知与其对应的传输波长在 $1493 \sim 1594\ \text{nm}$,纵坐标表示该滤波器对电磁波的传输率,当两个传输率曲线相交于一点时,滤波器两输出端口传输率相等,我们把该点对应的电磁波波长叫做开关波长。如图 3 所示的开关波长正规化频率为 0.3504,可知与其对应电磁波开关波长为 $1555\ \text{nm}$,在开关波长处滤波器两端口总传输率为 84%;当正规化频率为 0.3450 时, P_2 端口、 P_3 端口输出电磁波波长为 $1580\ \text{nm}$,其传输率分别为 1%, 82%;当正规化频率为 0.3600 时, P_2 端口、 P_3 端口输出电磁波波长为 $1514\ \text{nm}$,其传输率分别为 89%, 6%。可知该结构具有宽频带、高传输效率,能够适用于第三通信窗口(中心波长 $1550\ \text{nm}$)的分频滤波。

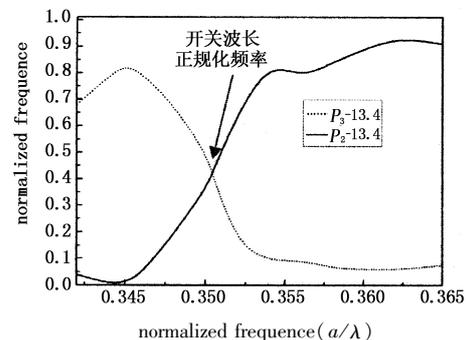


图3 T形滤波器两个输出端口电磁波传输率

图 4 描述了该滤波器整个结构介质柱相对介电常数分别为 12.9, 13.4, 13.9 时,其输出端口 P_2 和 P_3 对应的三组传输率曲线,分别为曲线组 1 和 2、曲

线组3和4、曲线组5和6,可知随着滤波器整个结构介质柱相对介电常数增加,其开关波长向长波方向移动。我们能够利用电光材料的电光效应,或利用热光材料的热光效应,以获取介质材料的不同相对介电常数,因此该结构可以实现可调性滤波器、或电光开关等多功能微型器件,在光子晶体集成制作、光通信器件制作等方面具有潜在的应用价值。

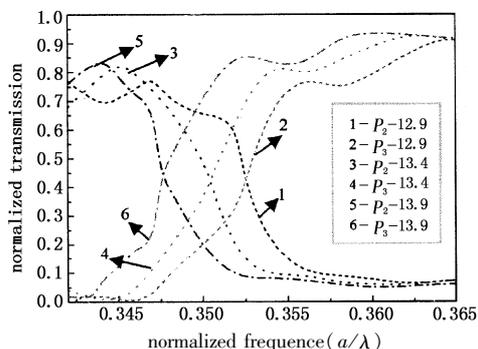


图4 改变T形滤波器结构相对介电常数改变对其两端口速率的影响

以图3为例,图5显示了三个不同波长分别在该滤波器结构中传播形成的场强分布,在图所示的背景上都存在轻微的波纹,这是电磁波在此结构传输泄露产生的结果,最后泄露的这部分电磁波将被PML层吸收掉。图5(a)显示了该滤波器工作于1555 nm开关波长处的电磁波传输场强分布;图5(b)显示了环形谐振器非谐振时,该结构水平方向集中传输波长为1514 nm的电磁波场强分布;图5(c)显示了环形谐振器谐振时,该结构的垂直方向集中传输波长为1580 nm的电磁波场强分布。

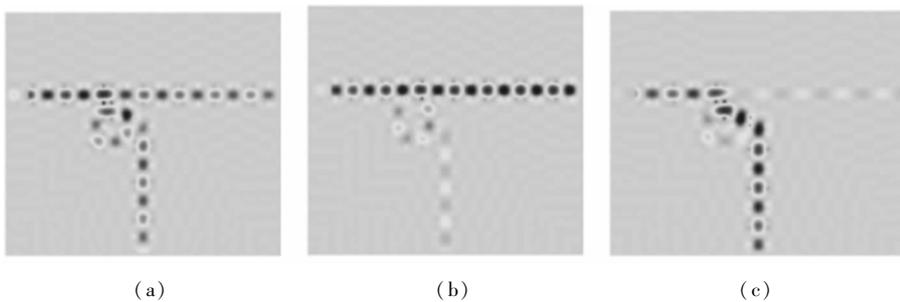


图5 TM波在T形滤波器中传播场强分布

4 结论

本文利用时域有限差分法研究了带有环形谐振器T形光子晶体滤波器结构对TM波的滤波特性,主要包括该滤波器两端口电磁波传输率及电磁波在该结构传输场强分布图,并分析了整个结构介质柱相对介电常数改变对其开关波长的影响。研究结果表明:该结构具有可调性开关波长、宽频带、高传输率、结构紧凑、体积小等优点,可以实现开关波长可

调性滤波器或电光开关等多功能微型器件。因此该结构在光子晶体集成制作、光通信器件制作等方面具有潜在的应用价值。

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] Qiang Z, Weidong Zhou, Soref, R A. Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators [J]. Optics Express, 2007, 15(4):1823-1831.
- [4] Manolatu C, Khan M J, Fan S, et al. Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters [J]. IEEE J Quantum Electron, 1999, 35(9):1322-1331.
- [5] Ghafari A, Javid M, Monifi F, et al. A numeric analysis of photonic crystal tunable add-drop filters based on ring resonators [C]. IEEE. LEOS Annual Meeting Florida, USA, 2007:351-352.
- [6] Dinesh V, Kumar, Srinivas T, et al. Investigation of ring resonators in photonic crystal circuits [J]. Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications. 2004, 2(3):199-206.
- [7] Djavid M, Monifi F, Ghaffari A, Abrishamian M S. A new broadband L-shaped bend based on photonic crystal ring resonators [C]//PIERS Proceedings, Hangzhou, China, 2008:1097-1099.
- [8] Djavid M, Ghaffari A, Monifi F, et al. A novel heterostructure photonic crystal add-drop filter with three outputs [C]//IEEE/LEOS 20th Annual Meeting, FL, USA, 2007:202-203.
- [9] Djavid M, Ghaffari A, Monifi F, et al. Photonic crystal power dividers using L-shaped bend based on ring resonators [J]. Opt. Soc Am B, 2008, 25:1231-1235.
- [10] Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers [J]. Opt. Express, 2002, 10(17):853-864.
- [11] Goldberg M. stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems [J]. Applied Numerical Mathematics, 2000, 33(1-4):509-515.
- [12] Berenger J P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves [J]. Comput Phys. 1994, 114(2):185-200.