

光子晶体环形谐振器特性研究

张红星, 潘 炜, 刘新开

(西南交通大学 信息科学与技术学院 信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)

摘要:文章采用 FDTD(时域有限差分)法,通过数值计算得到了一种新型 PCRR(光子晶体环形谐振腔)的宽带频响特性,并分析了介电常数对 PCRR 传输特性的影响。在此基础上建立了一个三波长的光子晶体分频器,结合对该模型中光场强度动态分布图的分析,实现了在 1 500、1 550 和 1 610 nm 3 个波长处的分频功能。数值结果表明:与微腔特性相比,PCRR 能同时得到多个窄频信号,并且在多波长分频器中可以减少微腔的个数;与波导耦合相比,在结构参数设计上更加灵活。

关键词:时域有限差分法;环形谐振器;透射谱;三波长分频器

中图分类号: TN252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2011)05-0045-04

Study on ring resonator characteristics of photonic crystals

Zhang Hongxing, Pan Wei, Liu Xinkai

(Center for Information Photonics & Communications, School of Information Science & Technology,
Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In this paper, using Finite Difference Time Domain (FDTD) method, we numerically obtain the broadband frequency response characteristics of a new type of the Photonic Crystal Ring Resonator (PCRR) and analyze the impact of changing the dielectric constant on the transmission characteristics of PCRR. On this basis, we establish a three-wavelength photonic crystal divider, and in connection with the analysis of the dynamic distribution of light intensity in this model, achieve the frequency division at 1 500, 1 550 and 1 610 nm. Numerical results show that compared with the transmission characteristics of micro-cavity, PCRR can simultaneously "download" multiple narrowband signals in the multi-wavelength divider, while compared with waveguide coupling, the design of its structural parameters design is more flexible.

Key words: FDTD method; ring resonator; transmission spectrum; three-wavelength divider

0 引 言

在光子晶体中引入点缺陷或环形线缺陷时,可以制作光子晶体谐振腔。光子晶体谐振腔的品质因子可以做得很高,其谐振谱很窄且能量密度高。由环形线缺陷构成的腔称为环形谐振腔^[1],它无需制作反射镜或光栅就可以实现光场的反馈,适合单片集成的工艺制作,且尺寸越做越小,品质因子越做越高。已相继出现了多种基于 PCRR(光子晶体环形谐振腔)的全新光子学器件,包括:光调制器,它能够提升器件的消光比,并降低串扰^[2];微型激光器,它产生的激光更容易与光波导耦合,在光学泵浦方面比点微腔结构更容易;上下路滤波器^[3];分频器等。这些高速、高集成度、低功耗器件在集成光路、光通信网络和信息处理等方面都有着良好的应用前景。

通过引入点缺陷形成的光子晶体微腔,其谐振模式单一,调节范围有限,当它用于多波长分频器时,由于微腔个数的增加,使得信号光波在波导中的传输损耗增大,透射率降低。而环形谐振腔具有多模特性,能够同时得到多个窄频信号,设计的多种模

式可以弥补微腔的不足。同时,谐振腔共振态辐射出来的辐射模不能在波导中传输,只能透过波导来输出,这样可以减少由于辐射模引起的辐射损耗^[4-5]。本文主要利用 FDTD(时域有限差分)法分析了光波在二维正方晶格 PCRR 结构中的传输特性,并进一步讨论了介质柱中介电常数对谐振波长的影响。利用环形谐振腔的谐振原理和波导的耦合特性,建立了三波长的光子晶体分频器。最后分析了微腔特性以及不同耦合介质柱半径对 PCRR 的谐振特性的影响。

1 基本原理

FDTD 法作为一种主要的电磁场时域计算方法,能够实时地模拟光波在光子晶体结构中的传输、分布情况,它直接将 Maxwell 方程离散成显式差分方程,通过建立时间离散的递进序列,在相互交织的网格空间中交替计算电场和磁场。与 Maxwell 方程波动方程求解相比较,计算过程得到大大简化。它的另一个优点是借助于 FFT(快速傅里叶变换),一次模拟就能获得很大频率范围内的透射率。

1.1 FDTD 方程

以二维光子晶体的 TM 模为例,建立差分方程,进行编程处理,搭建计算程序模型。对于 TM 波, $E_x=E_y=H_z=0$,含 H_x 、 H_y 和 E_z 3 个分量的 Maxwell 差分方程形式如下:

$$\begin{aligned} H_x(i,j) &= H_x(i,j) + \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} [E_z(i,j+1) - E_z(i,j)] \\ H_y(i,j) &= H_y(i,j) + \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} [E_z(i+1,j) - E_z(i,j)] \\ E_z(i,j) &= E_z(i,j) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \left[\frac{H_y(i,j+1) - H_y(i,j)}{\Delta x} - \frac{H_x(i+1,j) - H_x(i,j)}{\Delta y} \right], \end{aligned} \tag{1}$$

式中, E_x 、 E_y 和 E_z 分别为电场在空间各方向的分量; H_x 、 H_y 和 H_z 分别为磁场在空间各方向的分量; μ 为磁导系数; ϵ 为介质介电常数; Δt 为时间步长; Δx 、 Δy 分别为空间步长。

根据 Courant 稳定性条件,文中取 $\Delta x = \Delta y$ 且 $\Delta t = \Delta x / (2c)$, c 为自由空间中的光速。

1.2 吸收边界条件和激励源

为了模拟开域电磁过程,本文采用 PML(完美匹配层)吸收边界,它通过在 FDTD 区域截断边界处设置一种特殊的介质层(这种介质层的波阻抗与相邻介质波阻抗完全匹配),使入射波无反射地穿过分界面进入 PML 并迅速衰减^[6]。PML 反射系数与其层厚度有关,在此计算中设置 PML 为 8 个网格长度。

激励源采用对时间呈脉冲函数形式的调制高斯脉冲,这种脉冲源的频谱通常具有一定带宽,便于分析光子晶体的禁带频率分布特性。信号源时域表达式为

$$S = \cos(\omega t) \exp \left[-4\pi \frac{(t - t_0)^2}{T^2} \right], \tag{2}$$

式中,右边第 1 项为基波表达式,且中心频率为 $f_0 = \omega / 2\pi$;第 2 项为高斯函数, T 决定了高斯脉冲的宽度, t_0 为时间偏移,本文将其设置为 $T = 1 \times 10^{-14} \text{ s}$, $t_0 = 0.85T$ 。

1.3 建立 PCRR 模型

基于波导与环形谐振腔之间的耦合机制,以及环形谐振器的共振机制,在此建立二维正方晶格的 PCRR 模型。环大小的选择取决于所需的共振波长和品质因子之间的权衡。

在仿真结构中,晶格常数 $a = 588 \text{ nm}$, a 是距离最近的两个圆柱棒之间的距离;介质柱选用 GaAs(砷化镓)材料,其折射率 $n = 3.4$;圆柱半径为

$0.2a$,它由空气背景包围,通过增加 4 个额外的角落柱使其构成一个完美的二维正方晶格的散射环,如图 1 所示。

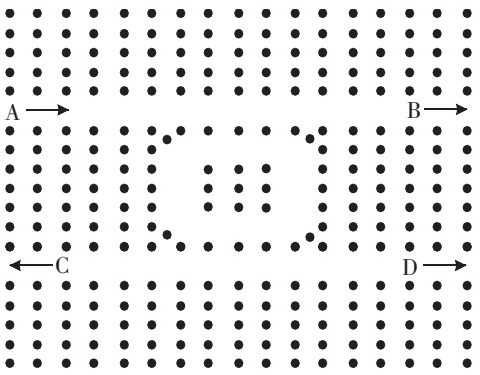


图 1 正方晶格的 PCRR 模型图

当 TM 偏振模式的调制高斯脉冲从 A 端口入射时,电磁波将沿着缺陷传输,利用二维 FDTD 法和 PML 吸收边界,可以模拟出光波在 3 个输出端口的传输特性。

2 分析和讨论

2.1 数值模拟

在二维 FDTD 法仿真模型中取 $\Delta x = a / N$,其中 N 为一个晶格中的网格个数。当在图 1 所示的输入端口入射激励源时,通过 FDTD 法计算 3 个输出端口的电场值,再将电场值经过 FFT,得到 3 个输出端口的透射谱曲线图,如图 2 所示。

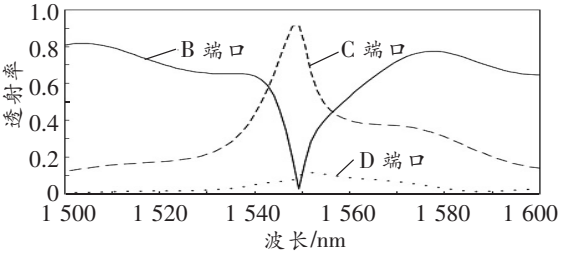
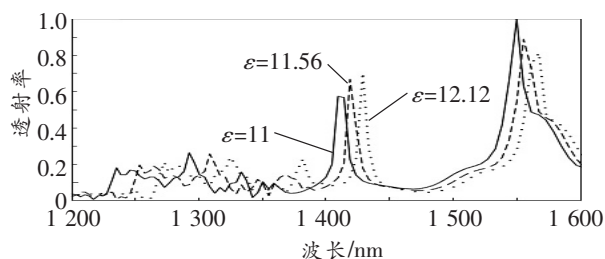


图 2 3 个端口的输出特性曲线图

由图 2 可知,在 1550 nm 波长处(C 端口处)的透射率出现较大值,即光场能量大部分通过共振耦合到环形腔中,最后从 C 端口波导输出;而 B 端口和 D 端口处的能量输出很小(或者几乎为零)。4 个角落柱中的上边两个散射柱使得光波耦合到 PCRR 中,从而降低了 B 端口处的输出能量;下边两个散射柱使光耦合到 C 端口处,从而降低 D 端口处的输出能量。

2.2 介质介电常数 ϵ 对传输特性的影响

对于不同的 ϵ , C 端口透射率与波长之间的关系如图 3 所示。

图3 不同 ϵ 时的传输特性图

从图3可知,当 ϵ 分别为11、11.56和12.12时,中间频带的中心波长分别为1410、1420和1430 nm,此时取耦合柱半径为 $0.2a$,即共振的中心波长随 ϵ 的增大(或减小)而逐渐向长波长(或短波长)方向移动。同时也可以观察到透射率与 ϵ 之间的关系,在中频带,当中心波长有10 nm左右移动时,透射率将改变5%左右。

2.3 三波长光子晶体分频器

利用光子晶体的禁带特性,建立了一个三波长的光子晶体分频器,如图4所示。

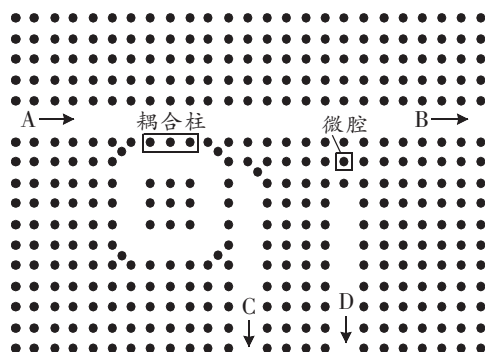


图4 三波长光子晶体分频器

图中,B端口处波导称为水平波导,C和D端口处波导称为下路波导。在波导旁边放置一个环形谐振腔,它可以耦合到波导在其共振频率的电磁波,将其能量陷在局部的PCRR中,并从下路波导中输出。而引入缺陷处的微腔也可以将其谐振频率的波下载到腔内。

为了能够清晰地观察光波在光子晶体分频器中电磁场强度的动态分布,在此采用周期性的正弦波作为激励源,该正弦波为单频源。将波长为1500、1550和1610 nm的信号分别从A端口入射,当入射光波完全通过光子晶体分频器模型并稳定下来时,3束不同波长的光波在分频器各输出端口的光场强度分布情况分别如图5~图7所示。

由图5~图7可知,环形谐振腔可以将1550 nm的光波从上路波导谐振耦合到腔中,并通过C端口处的下路波导输出;微腔能够将共振

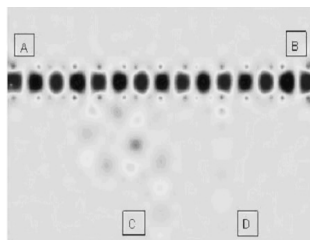


图5 1500 nm 光场分布图

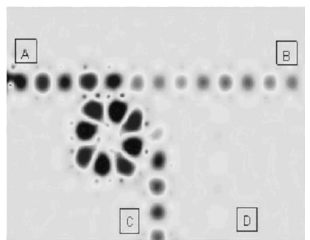


图6 1550 nm 光场分布图

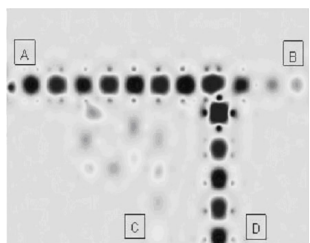


图7 1610 nm 光场分布图

频率为1610 nm的光波局限在腔中,并通过D端口处的下路波导输出;而1500 nm的光波则沿水平波导B端口输出,最终实现了3个波长的分频作用。

在图4的结构中,微腔半径 $r = 0.0495a$,其传输特性曲线如图8所示。

比较图3和图8可知,PCRR可得到多个窄带信号,微腔只能得到与微腔共振频率相等的有限个窄频信号。图4结构的多波长分频器与多个微腔构成的分频器相比,在模式设计上

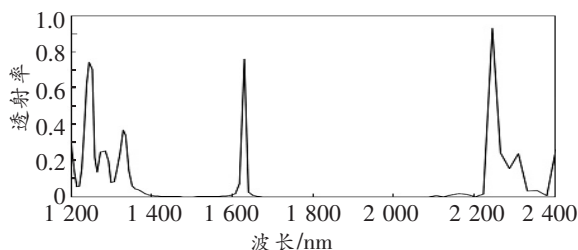
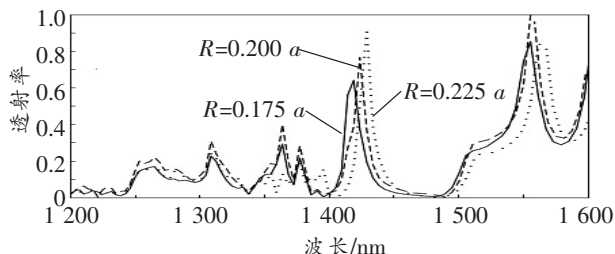


图8 光子晶体微腔特性曲线图

可扩展性更好,同时还可以减小由于微腔个数增多带来的传输损耗。

我们还可以通过改变图4结构中环形腔的耦合柱半径 R 来实现不同波长的分频,如图9所示。

图9 不同耦合柱半径 R 时的传输特性图

当耦合柱半径 $R=0.175a$ 、 $0.200a$ 和 $0.225a$ 时,在中频带,PCRR 的共振波长随 R 的增大向长波长方向移动,即对光波波长的可调谐性好。还可以通过调整散射柱半径、PCRR 内部介质柱半径等参数来任意调节波长和带宽的大小,与微腔和波导耦合分频器相比,此结构在参数设计上更加灵活。

3 结束语

本文针对 PCRR 结构,首先采用 FDTD 法数值仿真了其禁带频响特性,并通过调节介质柱介电常数实现了不同谐振频率光波信号的输出。接下来,利用 PCRR 结构建立了一个三波长光子晶体分频器,模拟显示它能够较好地 对波长为 1 500、1 550 和 1 610 nm 的信号进行分频。最后,与微腔特性进行了数值比较,环形腔可以实现多种设计模式,可扩展性更好,而且通过对不同耦合柱半径的分析发现,PCRR 的参数可调谐性更强,结构设计更灵活。PCRR 的多模特性对光子器件的研究有着重要意义,还可以设计光子晶体分插器件来减小损耗,实现大的自由光谱范围。

参考文献:

[1] Qiang Z, Zhou W, Soref R A. Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators [J]. Opt Express, 2007, 15(4):1823-1831.

[2] 王帆. 硅基的环形谐振腔光调制器和光开关的研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2009.

[3] 杨春云, 徐旭明, 叶涛, 等. 一种新型可调制的光子晶体环形腔滤波器 [J]. 物理学报, 2011, 15(4): 017807(1-5).

[4] Zheng Yu, Li Shuping, Kang Junyong. Two dimensional photonic crystal channel filter based on ring resonator [J]. IEEE Photonics and Optoelectronics, 2009, (8):14-16.

[5] Djavid M, Ghafari A, Monifi F, et al. Coupled-mode analysis of photonic crystal add-drop filters based on ring resonators [J]. IEEE Opt Soc Am, 2008, 25 (11):1829-1832.

[6] Ren C, Tian J, Feng S, et al. High resolution three-port filter in two dimensional photonic crystal slabs [J]. Opt Express, 2006, 14(21): 10014-10020.

(上接第 30 页)

[2] Renaudier J, Bertran-Pardo O, Mardoyan H, et al. Performance comparison of 40 and 100Gbps coherent PDM-QPSK for upgrading dispersion-managed legacy systems [A]. OFC 2009 [C]. San Diego, California, America:OSA,2009. NWD5.

[3] Sun Han, Wu Kuang-Tsan, Robbers kim. Real-time measurements of a 40Gbps coherent system [J]. Opt Express, 2008, 16(2): 873-879.

[4] Jansen S L. 121. 9-Gb/s PDM-OFDM transmission with 2-b/s/Hz spectral efficiency over 1000 km of SSMF [J]. Lightwave Technol, 2009, 27:177-188.

[5] Yoshida Tsuyoshi, Sugihara Takashi, Sawada Kazushige, et al. Polar Coordinate Transformation based Dual Binary-Drive QPSK Modulation [A]. OFC 2010 [C]. San Diego, California, America: OSA, 2010. OMK4.

[6] Ly-Gagnon D S, Tsukamoto S, Katoh K, et al. Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation [J]. Lightwave Technology, 2006,24: 12-21.

[7] Fatadin I, Savory S J, Ives D. Compensation of quadrature imbalance in an optical QPSK coherent receiver [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 20(20):1733-1735.

[8] Zhou Xiang, Yu Jianjun, Qian Dayou, et al. High-Spectral-Efficiency 114-Gb/s Transmission Using Pol-Mux-RZ-8PSK Modulation Format and Single-Ended Digital Coherent Detection Technique [J]. Lightwave Technology, 2009,27, 146-152.

[9] Zhang Shaoliang, Xu Lei, Yu Jianjun, et al. Experimental Demonstration of Decision-Aided Maximum Likelihood Phase Estimation in 8-Channel 42.8-Gbit/s DWDM Coherent PolMux-QPSK System [A]. OFC 2010 [C]. San Diego, California, America: OSA, 2010. OMK1.

[10] Fujitsu Microelectronics Europe GmbH. 56Gb/s ADC: Enabling 100GbE [A]. OFC 2010 [C]. San Diego, California, America: OSA,2010. OThT6.