

# 光子晶体信道分路滤波器特性的研究

吴立恒 王明红\*

聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059

**摘要** 为使不同频带的电磁波沿着各自的信道传输,在二维介质柱正方格光子晶体中设计了3种典型的信道分路滤波器(CDF)结构。利用时域有限差分法研究了其特性,得到了各个输出端口对应的传输特性曲线。各信道分路输出信号在其通带中心频率处强度最大,随远离中心频率向高频或低频移动各信道输出信号强度将迅速衰减。该类CDF结构各信道分路具有选频性能强,频带中心频率串扰弱,工作波长范围宽等特性,可用作设计窄带通滤波器、或带阻滤波器等微型器件。因此,在光子晶片上的光路设计、波分复用光通信系统设计等方面存在潜在的应用价值。

**关键词** 光学器件;光子晶体信道分路滤波器;弱串扰;时域有限差分法;中心频率;工作波长范围宽

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0505003

## Investigation on the Characteristics of Photonic Crystal Channel Drop Filter

Wu Liheng Wang Minghong

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

**Abstract** In order to make different frequency bands propagate along their own channels, three typical structures of channel drop filter (CDF) are designed in a 2-dimension dielectric rod square photonic crystal structure. Their performance characteristics are investigated by the finite-difference time-domain method, and transmission efficiency graphs of the their output ports are obtained. The maximal transmission power ratio of every channel is at a central frequency of pass-band, and the power ratios will decay swiftly when the frequency shifts towards higher or lower than the central one. These structures of CDF have the characteristics of excellent frequency selectivity, weak crosstalk among central frequencies of different bands, broad operating wavelength ranges, etc. They can be used to design micro devices such as narrow band-pass filter or band-stop filter. Therefore, the CDF has important application value in the design of optical path on a photonic crystal chip and wavelength division multiplexed optical communication systems, etc.

**Key words** optical devices; photonic crystal channel drop filter; weak crosstalk; finite-difference time-domain method; central frequency; broad operation wavelength range

**OCIS codes** 130.7408; 130.1750; 130.3120; 130.5296

## 1 引 言

光子晶体信道分路滤波器(CDF)是一类重要的光学元件,其结构可实现许多光子晶体元件的功能,例如光波分复用器(WDM)、滤波器、分束器、波导、直接耦合器等<sup>[1-6]</sup>。无论光的极化还是传输方向如何,光子晶体不允许某一频率范围的光在其结构中传播,这一频率范围被叫做完全光子带隙(PBG)<sup>[7]</sup>。光子晶体中能获取到横磁(TM)波或横电(TE)波的PBG结构<sup>[7-10]</sup>,在理想介质柱阵列光子晶体中,可以通过改变某个或某些介质柱的介电常数(折射率)或调节其半径大小、或者直接取出某个或某些介质柱引入缺陷,PBG中将产生一个或

收稿日期:2014-12-24;收到修改稿日期:2014-12-28

基金项目:国家自然科学基金(11375081)

作者简介:吴立恒(1980—),男,硕士,讲师,主要从事微波理论与技术研究。E-mail: wulihenglctu@163.com

\*通信联系人。E-mail: wangminghong@lcu.edu.cn

多个传输模式<sup>[1,6]</sup>。本文通过在理想光子晶体中调节单个介质柱半径或将其取出引入光子晶体缺陷形成微型谐振器结构,设计了3种CDF结构,研究分析了各自的工作特性和结构改变对其工作特性的影响。

## 2 计算方法分析

在二维正方格介质柱光子晶体结构中设计了3种CDF结构,其晶格常数为  $a$ ,将每一晶格40等分,  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别代表沿着  $x$ 、 $y$  方向相邻格点的增量,采用时域有限差分(FDTD)法<sup>[11]</sup>研究了TM波在其结构中的传播特性,将麦克斯韦方程组差分离散,使其数值计算满足 Courant 稳定性条件<sup>[12]</sup>:  $c\Delta t \leq 1/\sqrt{[1/(\Delta x)^2]+[1/(\Delta y)^2]}$ ,其中  $\Delta t$  代表时间增量, $c$  代表真空光速。为模拟无限大真空条件,在结构周围设置了完全匹配层(PML)以吸收透射波<sup>[13]</sup>。在计算中为得到CDF结构的频域传输谱,采用傅里叶变换将时域电磁场变换到频域电磁场,其频域电磁波平均能流密度公式为

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E}(\omega) \times \mathbf{H}^*(\omega)]. \quad (1)$$

根据(1)式对波导横截面能流密度进行面积分,得电磁波的传输功率表达式:

$$P = -\int_s \vec{S} \cdot \hat{u} ds, \quad (2)$$

式中  $s$  表示波导的横截面面积,  $\hat{u}$  表示波导横截面的法向单位矢量。由(2)式计算出该波导的输入端口的传输功率及输出端口的传输功率,进而可根据输出端口的传输功率与输入端口的传输功率比值计算得到该输出端口的传输率。

## 3 光子晶体CDF结构设计与工作特性的研究

在晶格常数为  $a = 551 \text{ nm}$  的  $34 \times 23$  理想正方格光子晶体中设计了3种CDF结构,在设计CDF时为了充分利用空间使该器件结构更为紧凑,在其主波导两侧都引入了微型谐振器结构,其示意图如图1(a)、图2(a)、图3(a)所示(在各输出端口的波导内传输中心波长已标出),图中微型谐振器结构中心的介质柱用黑色的椭圆圈标出,其中引入了介质柱缺陷,3种结构中除引入的缺陷不同外,均使用相同介质柱。图中蓝色的区域代表空气,相对介电常数  $\epsilon_r$  大约为1。紫色的圆斑代表介质柱,其半径为  $r = 0.2a$ ,相对介电常数  $\epsilon_r$  为12。图1(b)、图2(b)、图3(b)分别给出了这3种光子晶体CDF工作时其输出端口传输特性曲线。图中横坐标表示正规化频率  $a/\lambda$  (即晶格常数  $a$  与波长  $\lambda$  比值),取值范围为:  $0.315 \leq a/\lambda \leq 0.390$ ,对应的波长范围在1413~1749 nm;纵坐标表示信号衰减强度分贝(dB),取值范围在0~100 dB。曲线描述了信号从CDF输入端口到各个输出端口强度衰减分贝随正规化频率变化的关系(CDF各端口的传输特性曲线,图中已用对应颜色的大写英文字母标出),各信道输出信号在其中心频率处强度最大,随远离中心频率向高频或低频移动各信道输出信号强度将迅速衰减,可知CDF结构各信道具有强的选频特性。

### 3.1 第1种光子晶体CDF

图1(a)所示光子晶体  $1 \times 9$  CDF 结构中有1个输入端口A和9个输出端口(其中有8个信道下载输出端口B、C、D、E、G、H、I、J,和1个主波导输出端口F)。信道下载输出端口处临近的微型谐振器中心介质柱(用黑色的椭圆圈在图中已经标出)半径依次为  $r_B = 0.3a$ 、 $r_C = 0.309a$ 、 $r_D = 0.066a$ 、 $r_E = 0.1a$ 、 $r_G = 0$ 、 $r_H = 0.345a$ 、 $r_I = 0.05a$ 、 $r_J = 0.33a$ 。

图1(b)给出了CDF主波导输出端口及其信道下载输出端口的信号强度与输入端口处的信号强度衰减分贝的关系图。CDF的8个信道下载端口能用作窄带滤波输出端口,输出通频带的中心频率从小到大依次为0.3237、0.3279、0.3320、0.3492、0.3553、0.3612、0.3665、0.3771,信道下载端口输出的中心频率信号强度与输入端口处的信号强度衰减分贝依次为-1.995 dB、-1.802 dB、-7.178 dB、-5.088 dB、-2.126 dB、-4.081 dB、-4.323 dB、-3.947 dB;其主波导用于传输输入信号,并将各个信道下载后的信号将集中于主波导末端口F输出,既能用作带阻滤波输出端口,也能用于信道下载后的其他频段信号输出。从图(b)可知当该CDF工作于正规化频率  $a/\lambda = 0.3553$  时,D端口传输率为61.26%,输出波长为  $\lambda_D \approx 1551 \text{ nm}$ ,正处于第三通信窗口1550 nm附近,其中心频率可根据公式  $\omega = 0.3553 \times \frac{2\pi c}{a}$  得:  $\omega \approx 1.215 \times 10^{15} \text{ rad/s}$ 。分析图1(b)可知:该结

构

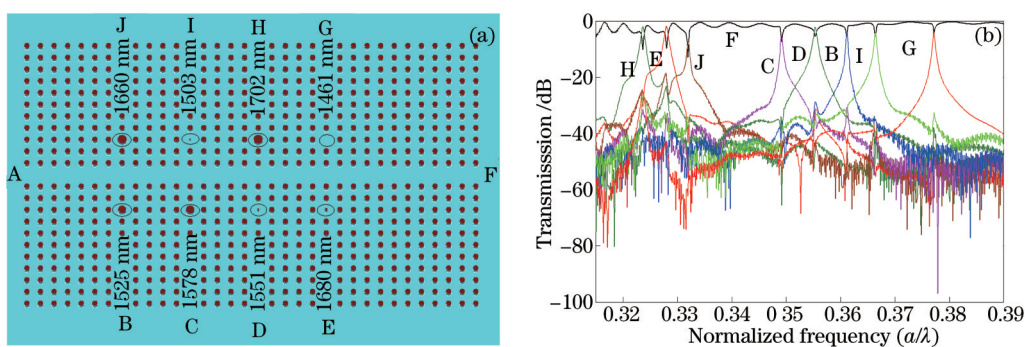


图 1 (a) 光子晶体 CDF 结构(No.1); (b) CDF 输出端口传输特性(No.1)

Fig.1 (a) CDF structure of photonic crystal (No.1); (b) output character of the CDF (No.1)

工作时各端口输出提取的通带中心频率信号之间串扰弱,信号分离传输特性优异。

### 3.2 第 2 种光子晶体 CDF

图 2(a)所示 1×8 CDF 结构由图 1(a)所示结构直接将主波导末端用一行介质柱堵住得到,而缺陷介质柱的半径及位置都不变。图 2(b)给出了 CDF 信道下载输出端口传输特性图,可知 CDF 的 8 个信道下载输出端口传输通频带的中心频率从小到大依次为 0.3237、0.3278、0.3317、0.3492、0.3553、0.3612、0.3663、0.3771,对应的信号强度衰减分贝依次为 -0.8617 dB、-0.3357 dB、-1.516 dB、-1.028 dB、-0.4976 dB、-0.1967 dB、-0.3383 dB、-0.3296 dB。由传输特性图 1 和图 2 可知:结构改变后输入端口到输出端口的窄带通中心频率信号强度衰减大幅度减小,其中 D 端口处输出中心波长(1551 nm)传输率提高到 89.17%。

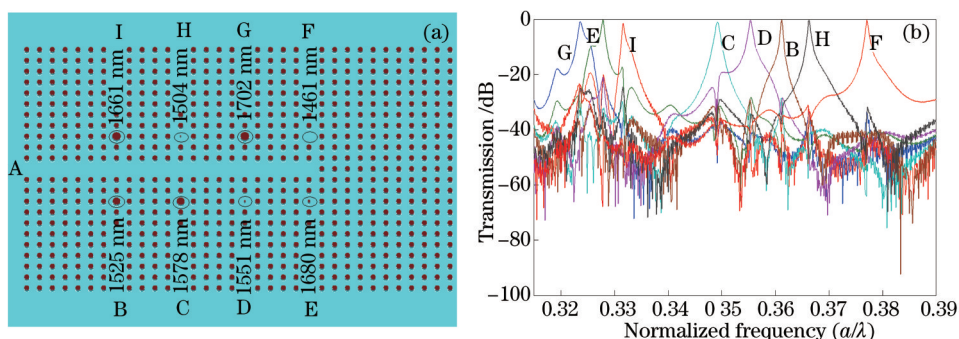


图 2 (a) 光子晶体 CDF 结构(No.2); (b) CDF 输出端口传输特性(No.2)

Fig.2 (a) CDF structure of photonic crystal (No.2); (b) output character of the CDF (No.2)

### 3.3 第 3 种光子晶体 CDF

图 3(a)所示 1×9 CDF 结构是在图 1(a)结构的主波导输出端引入一新的微型谐振器(其中心使用的缺陷介质柱半径为 0.08a)结构得到,而其他缺陷柱的半径及位置都不变。

由图 3(b)所示的 CDF 信道下载输出端口传输特性图可知:工作时其 9 个通频带的中心频率从小到大依次为 0.3237、0.3279、0.3317、0.3375、0.3492、0.3553、0.3612、0.3663、0.3771,对应信号强度衰减分贝依次为 -0.8684 dB、-0.3365 dB、-1.682 dB、-0.5999 dB、-1.035 dB、-0.4930 dB、-0.1917 dB、-0.3391 dB、-0.3286 dB。由传输特性图 1(b)和图 3(b)可知:结构改变后信道下载输出端口传输的窄带通中心频率信号强度衰减大幅度减小,其中 D 端口处输出中心波长(1551 nm)传输率提高到 89.27%。图 3(a)与图 2(a)所示 CDF 结构相比较,多出了 1 个下载信道,使其信道下载结构更加紧凑,且对其他信道传输特性影响甚小。

上述设计好的 CDF 结构中,继续调节其缺陷介质柱半径,产生对应的微腔谐振模式,以便在 CDF 中设置更多的信道下载结构,来增加总传输信息流量。结果表明:CDF 结构工作时,因光子晶体 PBG 频率宽度一定,其信道下载结构越密集,利于信息流量增加,但是相邻中心频率间隔有变小的趋势,微腔之间谐振频率越接近,其谐振器之间提取信号时相互影响就越强,这会造成更强的信号串扰,就给它稳定的滤波传输带来影响;反之,微腔之间谐振频率偏离越远离,越利于各个微型谐振器吸收其谐振频率波长处的能量以提高信



道传输率、削弱信号串扰,然而要减少下载信道数量,使传输信息流量下降。在此前提下设计CDF结构时,应使其各个信道通带中心频率向高频或低频移动时输出信号强度迅速衰减,且使相邻通带间有较宽的波长间隔,这是设计CDF结构,提高其各路传输信号分辨率的有效措施。

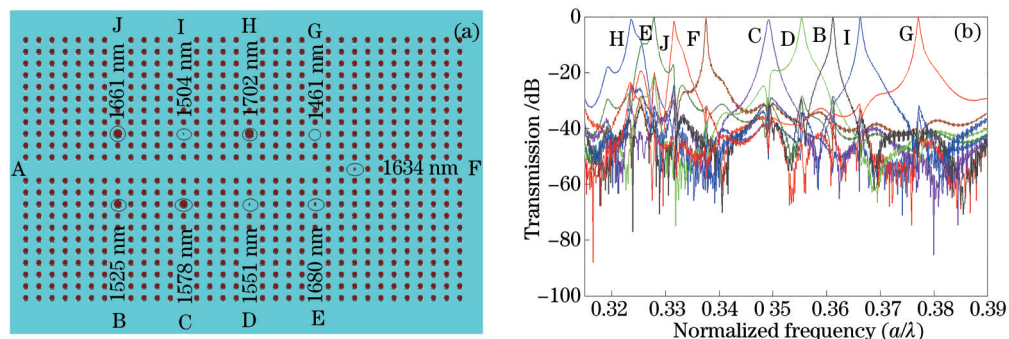


图3 (a) 光子晶体CDF结构(No.3); (b) CDF输出端口传输特性(No.3)

Fig.3 (a) CDF structure of photonic crystal (No.3); (b) output character of the CDF (No.3)

以图3(a)所示CDF结构为例,图4给出了TM波在其各个下载通带的中心频率处传输电场强分布,对应传输波长在图3(a)中已标出。通过调节微型谐振器结构中心介质柱半径或取出中心介质柱改变其微型谐振结构,来产生了不同的微腔谐振模式,在波导与微型谐振器耦合作用下,主波导内不同的频带信号传输方向偏折90°或沿原方向从其信道下载分路波导输出,最后被设置在周围的PML层吸收掉。

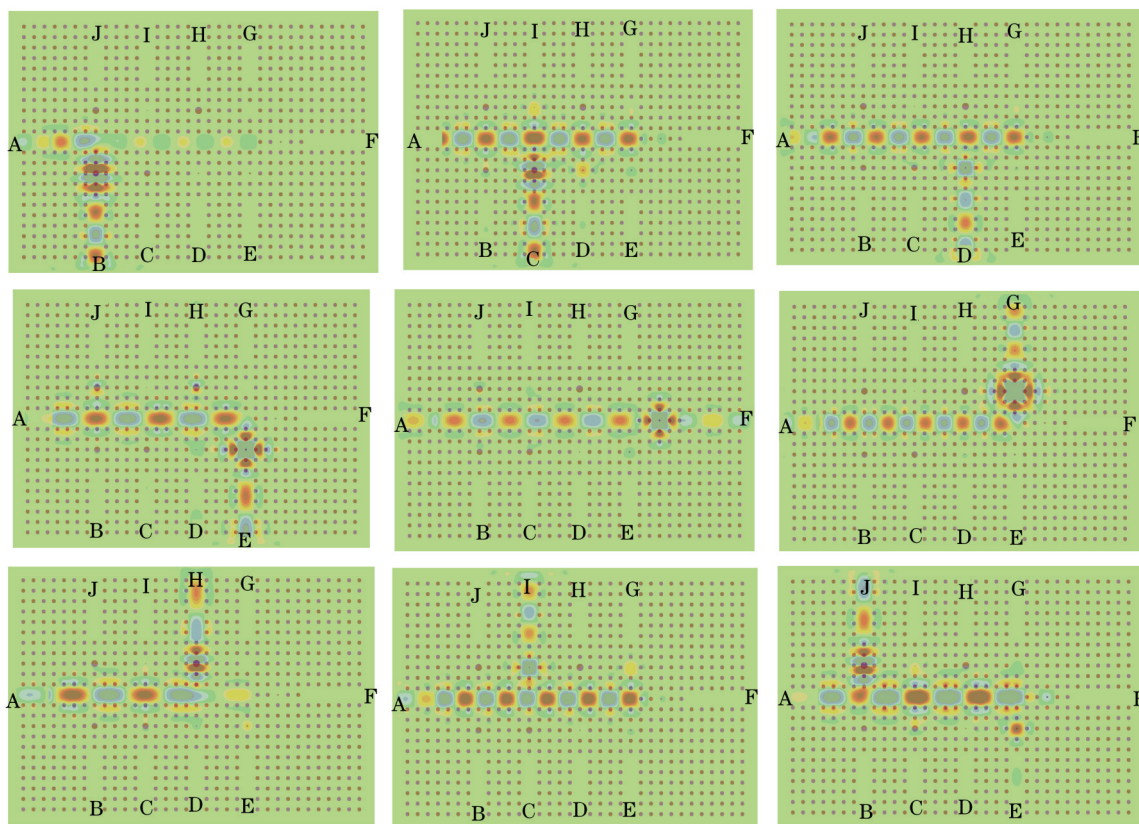


图4 在CDF结构中不同频带的中心频率传输电场强分布(No.3)

Fig.4 Electric-field intensity patterns at central frequencies of different frequency bands in the CDF structure (No.3)

该CDF结构工作时传输波长 $\lambda$ 范围在1413~1749 nm内,可用于提取传输单模光纤S波段(1460~1530 nm)、C波段(1530~1565 nm)、L波段(1565~1625 nm)、U波段(1625~1675 nm)的电磁波信号。其结构可用作设计窄带带通滤波器、或带阻滤波器等微型器件,在其工作的中心频率处能使不同的输入信号分路输出,适宜平面高密度型光路互联,可应用于光子晶体片上的集成光路设计、WDM光通信系统设计等领域。

## 4 结 论

在二维方格子介质柱光子晶体结构中通过调节有点缺陷形成的微型谐振器结构,以产生不同的微腔谐振模式,优化设计了3种典型的CDF结构。利用时域有限差分法研究了其结构工作特性,给出了各个信道输出端口传输特性图,分析了3种结构各自的滤波特性,及通频带中心频率处传输场强分布的示例图。研究表明:设计的CDF结构通频带中心频率传输具有信号间串扰弱、频率选择性强、工作波段范围宽、信号局域传输方向强等特性,可用于传输提取单模光纤S波段、C波段、L波段、U波段的电磁波信号,其结构还具有设计紧凑简单等优点。CDF结构作为一类微型光学元件,在光通讯、平面光路集成等领域有潜在应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Mohammad Ali Mansouri-Birjandi, Mohammad Reza Rakhshan. Wavelength demultiplexer using heterostructure ring resonators in triangular photonic crystals[J]. *Telkomnika*, 2013, 11 (4): 1721-1724.
- 2 Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun. Filter with one-dimensional photonic crystal quantum well possessing high-quality filtering functions[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1006001.  
苏 安, 蒙成举, 高英俊. 实现高品质滤波功能的一维光子晶体量子阱滤波器[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1006001.
- 3 Zhou Xingping, Shu Jing. Novel  $1 \times 3$  splitter based on photonic crystal self-collimation effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33 (4): 0423002.  
周兴平, 疏 静. 基于光子晶体自准直效应的新型 $1 \times 3$ 分束器[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0423002.
- 4 Chen Zhiyong, Hao Xiaolong, Zheng Yanmin, *et al.*. Large-angle polarization-independent broadband filters based on silicon photonic crystal slabs[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305002.  
陈志勇, 郝小龙, 郑彦敏, 等. 大角度偏振无关硅膜光子晶体宽带滤波器[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305002.
- 5 Li Xin, Yang Ming, Guo Shiliang, *et al.*. Characteristics of photonic-crystal waveguides with random media[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 39(10): 1006001.  
李 欣, 杨 明, 郭士亮, 等. 含随机介质的光子晶体波导特性[J]. *中国激光*, 2013, 39(10): 1006001.
- 6 PoYi Lee, ChihHsien Huang, WenFeng Hsieh. Design of photonic directional couplers as phase selectors[J]. *Opt Soc Am B*, 2013, 30(6): 1631-1636.
- 7 Min B K, Kim J E, Park H Y. Channel drop filters using resonant tunneling processes in two-dimensional triangular lattice photonic crystal slabs[J]. *Optics Communications*, 2004, 237(1): 59-63.
- 8 Moghimi M, S Mirzakuchaki, N Granpayeh, *et al.*. Modification of photonic crystals for obtaining common band gaps for TE and TM waves[J]. *Canadian J Phys*, 2012, 90(2): 175-180.
- 9 Md Masruf Khan. Nano structure based power splitter design by using 2D photonic crystals[J]. *Modern Science and Technology*, 2013, 1(1): 176-187.
- 10 Mehdi Saffari, Mohammad Ali Mansouri-Birjandi, Mohammad Reza Rakhshani. Tuning of photonic crystal ring resonators for application in analog to digital converter systems[J]. *Intl Res J Appl Basic Sci*, 2013, 4(12): 4242-4247.
- 11 Zhu Z, Brown T G. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. *Opt Express*, 2002, 10(17): 853-864.
- 12 Goldberg M. Stability criteria for finite difference approximations to parabolic systems[J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2000, 33 (1-4): 509-515.
- 13 J P Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves[J]. *Comput Phys*, 1994, 114(2): 185-200.

栏目编辑: 韩 峰