

文章编号 1004-924X(2016)05-1021-07

## 多信道二维光子晶体滤波器

刘 杰, 铁生年\*, 卢辉东

(青海大学 新能源光伏产业研究中心, 青海 西宁 810016)

**摘要:**根据光波模在光子晶体线缺陷波导和环形谐振腔之间的耦合原理,在二维三角晶格光子晶体中设计了一款由线缺陷主波导、环形谐振腔、60°弯下载波导组成的多信道下载滤波器。利用平面波展开方法计算了完整光子晶体及线缺陷波导的能带结构;基于时域有限差分方法计算了各目标频率光信号在器件中的传输特性,分析了影响器件耦合效率的因素并对其进行了改进。分析表明:通过改变环形谐振腔内介质柱的半径可以调节光子晶体环形谐振腔的谐振频率,而改变线缺陷主波导与环形谐振腔之间耦合区域中介质柱的形状以及将直下载波导改换成 60°弯下载波导可以提高线缺陷主波导、60°弯波导与环形谐振腔之间的耦合效率。计算结果显示:优化后的多信道二维光子晶体滤波器具备优良的选频功能,各目标频率光信号的透射率均达 90% 以上。与传统半导体介质材料器件相比,该器件体积较小,结构简单,易于大规模集成,很有应用前景。

**关键词:**多信道滤波器;光子晶体;线缺陷波导;平面波展开法;时域有限差分法;器件耦合

**中图分类号:**TN914.5;TN256 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162405.1021

## Multi-channel drop filter based on two-dimensional photonic crystal

LIU Jie, TIE Sheng-nian\*, LU Hui-dong

(New Energy(Photovoltaic) Industry Research Center, Qinghai University, Xining 810016, China)

\* Corresponding author, E-mail: tieshengnian@163.com

**Abstract:** On the basis of the resonant coupling principle of light wave modes between the defect modes of line-defect waveguides and the ring resonators, a multi-channel drop filter consisting of a line-defect waveguide, ring resonators and 60° bend waveguides was designed by using the two-dimension triangular lattice photonic crystals. The energy structures of a complete photonic crystal and a line-defect waveguide were calculated by the plane-wave expansion method. The transmission characteristic of the filter was investigated with the two-dimensional finite difference time domain method. Then, the effect factors on coupling efficiency of devices were analyzed and an improved method was proposed. The analysis shows that the resonance frequencies of photonic crystal ring resonator depend on the radius of dielectric rods in the resonators and the coupling efficiencies between the line-defect waveguides and the ring resonators are improved by changing the shapes of dielectric rods in coupling region and replacing the straight waveguide with a 60° bend waveguide. The simulation results show that the optimized multi-channel two dimensional photonic crystal filter has good wavelength selection frequency performance, and the transmission efficiencies of all the resonance wavelengths are above 90%. The filter is characterized by a smaller size, simple structure,

收稿日期:2015-12-09;修订日期:2016-02-01.

基金项目:青海省重点实验室发展专项基金资助项目(No. 2014-Z-Y31, No. 2015-Z-Y18)

easy integration and good application prospects.

**Key words:** multi-channel drop filter; photonic crystal; line-defect waveguide; plane-wave expansion method; finite difference time domain method; device coupling

## 1 引言

光子晶体具有光子带隙及光子局域特性<sup>[1]</sup>。选取合适的介质材料、晶体晶格类型及填充比,在完整的光子晶体中引入缺陷,可以将缺陷模引入到光子带隙中,此时与缺陷模频率一致的光信号可留在光子带隙中<sup>[1-6]</sup>。若在完整的光子晶体中引入的是线缺陷,频率位于线缺陷模上的光信号就可以沿着线缺陷的位置几乎无损耗地传播;若引入点缺陷,则在光子带隙中会出现光子态密度和品质因子  $Q$  都非常高的点缺陷模,频率位于点缺陷模上的光信号会被强烈地局域在点缺陷的位置<sup>[1-2,7,13]</sup>。选取合适的晶体参数,在光子晶体中将线缺陷和点缺陷毗邻放置,可在光子带隙中实现线缺陷模和点缺陷模的交叉,那么,线、点缺陷模之间将产生强烈的共振。根据这一性质,人们相继提出了光子晶体线缺陷波导、光纤、滤波器、解波分复用器、分束器、光缓存器等性能优异的光子晶体器件<sup>[3-10]</sup>。另外,与传统的半导体集成电路器件相比,光子晶体的晶格尺寸与所处理的光信号波长在同一数量级,因此,基于光子晶体结构制作的光子器件更加精密、更容易实现大规模集成,在未来的集成光路中扮演着极为重要的角色<sup>[6-20]</sup>。

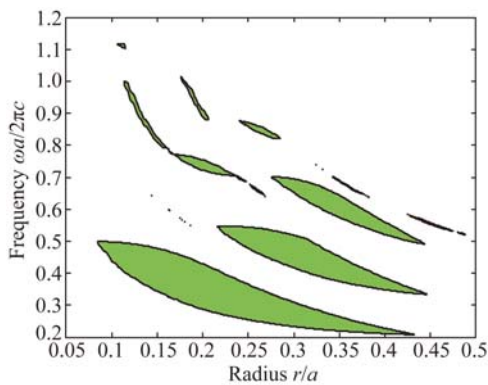
频率在线缺陷模上的光信号在光子晶体线波导中可以几乎无损耗地传播,光子晶体点缺陷谐振腔、环形谐振腔具备较好的单模属性亦可获得较高的品质因子  $Q$ ,在光子晶体中将两者组合可设计出具备优良频谱选择功能的光子器件<sup>[11-13]</sup>。近年来,基于缺陷模式之间的共振耦合原理,利用光子晶体波导、点缺陷谐振腔、环形谐振腔设计的光子晶体滤波器、波分复用器等光通信器件得到了持续关注<sup>[14-20]</sup>。余建立等人利用二维四方晶格光子晶体设计了一种由主波导、90°弯波导和点缺陷谐振腔巧妙组合而成的多信道下载滤波器,

该滤波器通过点缺陷谐振腔来反射目标频率光波<sup>[7]</sup>。李传起等人所设计的二维光子晶体多信道下载滤波器,通过增大主波导末端数排介质柱的半径来改变主波导末端的能带结构,利用主波导末端的光子带隙实现了目标频率光波 100% 的反射<sup>[10]</sup>。杨春云等人基于二维三角晶格光子晶体设计了一种由主波导、环形谐振腔、下载波导组成的三端口可调滤波器<sup>[11]</sup>。周兴平等人基于二维三角晶格光子晶体,在主波导与环形谐振腔之间增加一个点缺陷谐振腔来选频,实现了两信道的波分复用功能<sup>[18]</sup>。

本文在完整的二维三角晶格光子晶体中,设计了一款由一条线缺陷主波导、四个环形谐振腔以及 4 条 60°弯下载波导组成的多信道下载滤波器。利用平面波展开方法 (Plane-Wave Expansion Method, PWE) 计算完整光子晶体及线缺陷波导的能带结构;利用时域有限差分方法 (Finite Difference Time Domine, FDTD) 计算了该器件对各目标频率的传输特性,分析了影响器件耦合效率的因素并对其结构进行了优化设计。

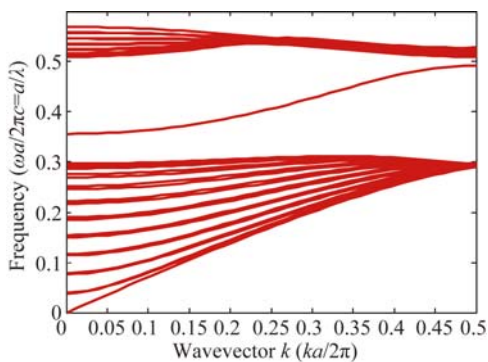
## 2 结构模型的提出及优化

对于完整的二维三角晶格光子晶体(晶格常数设为  $a$ ,介质柱材料选择硅(Si),半径为  $R$ ,折射率  $n$  为 3.4,背景材料为空气),利用 PWE 计算它在 TM 模式(横磁波)下光子带隙宽度与  $r/a$  的关系,可得图 1(a)。根据图 1(a),为获得最大的光子带隙,选取  $R=0.16a$ 。在完整的光子晶体中沿水平方向移除一排介质柱,形成线缺陷单模波导,再利用 PWE 计算其能带结构(如图 1(b)所示)。图 1(b)中上下端阴影部分为导带,中间空白区域为光子禁带,其归一化频率 ( $a/\lambda$ ) 为 0.311~0.511,禁带中的曲线即为线缺陷波导模(0.356~0.492)。频率位于线波导模上的光信号在波导中可近乎无损耗地传播。



(a) 光子带隙与介质柱占空比示意图

(a) Gap map for a triangular lattice of dielectric rods



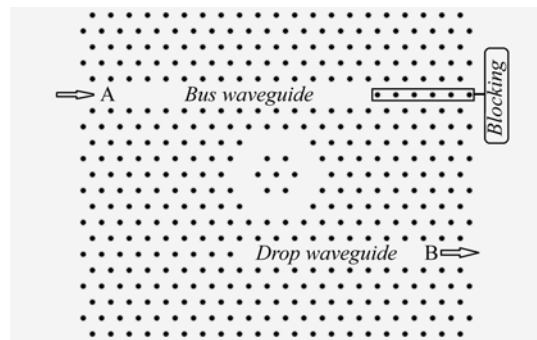
(b) 线缺陷波导能带图

(b) Dispersion relations of a line defect waveguide

图 1 光子晶体能带结构

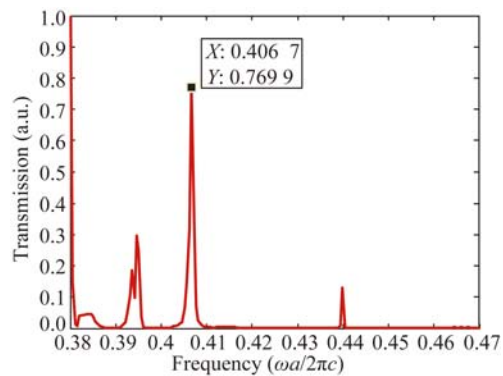
Fig. 1 Energy-band structure of photonic crystal

如图 2(a) 所示,两端口滤波器由主波导、环形谐振腔和直下载波导构成。在完整的二维光子晶体中沿水平方向移除若干介质柱,形成主波导和下载波导。在主波导和下载波导中间选取合适的位置,移除若干介质柱,构成 1 个呈正六边形的环形谐振腔(内部有 7 个中心介质柱)。主波导中,与环形谐振腔谐振频率一致的光信号通过环形谐振腔从主波导耦合到下载波导中,即实现选频滤波功能;而与环形谐振腔频率不一致的光信号则不会被耦合<sup>[11-13]</sup>。主波导末端增加了反射介质柱,可使未被耦合到环形谐振腔的光信号反射回去再次进行耦合,从而大幅提高光信号在主波导与环形谐振腔之间的耦合效率<sup>[5,7,10,13,15]</sup>。将环形谐振腔内的中心介质柱的半径设为  $r=0.16a$ 。采用 FDTD 计算图 2(a) 所示的结构(在主波导光信号输入端 A 放置归一化频率为 0.42 的高斯点光源,频带宽度为 0.1),结果如图 2(b) 所示。这里将归一化频率  $f=0.4067$  作为目标频率,与其相应的光信号的透射率达到了 77%,图 2(c) 是当  $f=0.4067$  时  $E_z$  的场分布。



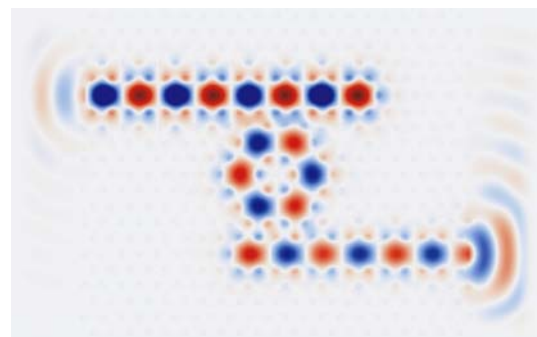
(a) 两端口滤波器结构示意图

(a) Configuration of two-port channel drop filter



(b) 两端口滤波器的透射谱

(b) Transmission spectrum of two-port channel drop filter



(c) 目标频率  $f=0.4067$  时  $E_z$  场的分布图

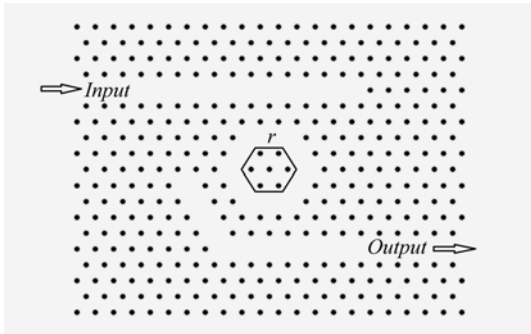
(c) Field distribution of  $E_z$  at target frequency of 0.4067

图 2 两端口滤波器及其性能

Fig. 2 Two-port channel drop filter and its properties

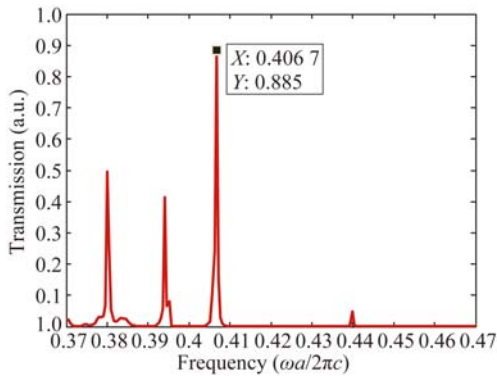
目标频率光信号在下载波导端的透射率的高低取决于环形谐振腔与上下两侧波导之间的耦合区域的耦合效率<sup>[11,13,16]</sup>。为了进一步增强目标频率光信号在环形谐振腔与下载波导之间的耦合效率,本文根据晶体的晶格类型提出了如图 3(a) 所示的新型两端口光子晶体滤波器。与图 2(a) 相比,原来的直下载波导改换成  $60^\circ$  弯下载波导。取环形谐振腔内介质柱半径  $r=0.16a$ ,利用 FDTD 对改进后的结构进行计算。目标频率光信

号的透射率达到 88.5% (见图 3(b)), 比结构改进前提高了将近 12 个百分点, 图 3(c) 是目标频率光信号 ( $f=0.4067$ ) 的  $E_z$  场分布。对比两种结构的透射谱及同一目标频率光信号的场分布图可知, 由于引入了  $60^\circ$  弯波导, 使得环形谐振腔与下载波导之间的耦合区域比原先增加了一倍, 耦合效率得到增强, 目标频率光信号在  $60^\circ$  弯波导滤波器的下载波导端的透射率得到了提高。



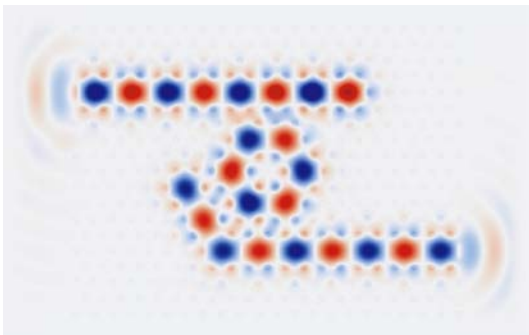
(a)  $60^\circ$  弯下载波导滤波器结构

(a) Structure of  $60^\circ$  bend drop waveguide filter



(b)  $60^\circ$  弯下载波导滤波器的透射谱

(b) Transmission spectrum of  $60^\circ$  bend drop waveguide filter



(c) 目标频率  $f=0.4067$  时的  $E_z$  场分布图

(c) Field distribution of  $E_z$  at target frequency of 0.4067

图 3  $60^\circ$  弯下载波导滤波器及其性能

Fig. 3 Two-port channel  $60^\circ$  bend drop waveguide filter and its properties

为了增强目标频率光信号在主波导与环形谐振腔之间的耦合效果, 将主波导与环形谐振腔之间的耦合区域的圆形介质柱换成横截面面积相同的椭圆形介质柱 (见图 4(a) 所示)<sup>[13]</sup>。令椭圆在水平方向上的长度为  $x$ , 在垂直方向上的长度为  $y$ , 即有:

$$S_{\text{eu}} = \frac{1}{4} \pi x y = \pi r^2 = S_{\text{cir}}. \quad (1)$$

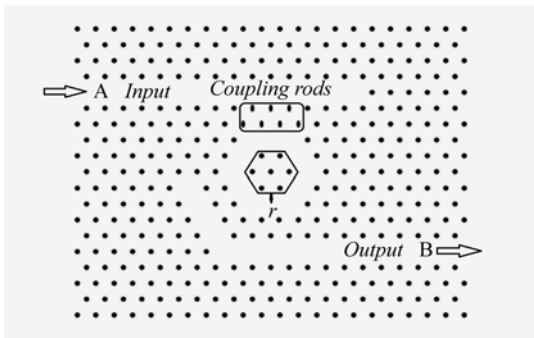
其中:  $S_{\text{eu}}$ ,  $S_{\text{cir}}$  分别为椭圆形介质柱和圆柱形介质柱的横截面面积。当  $r=0.16a$  时,  $x=0.20a, 0.24a, 0.26a, 0.28a, 0.30a, 0.32a, 0.34a, 0.36a, 0.38a, 0.40a$ , 那么,  $y=0.5120a, 0.4266a, 0.3938a, 0.3658a, 0.3414a, 0.3200a, 0.3012a, 0.2844a, 0.2694a, 0.256a$ 。其他计算参数保持不变, 取环形谐振腔内介质柱半径  $r=0.16a$ , 再次利用 FDTD 对改进后的结构 (如图 4(a) 所示) 进行计算, 结果如表 1 所示。当椭圆长轴方向垂直于水平方向时 ( $x$  为  $0.20a \sim 0.30a$ ), 目标频率光信号 ( $f=0.4067$ ) 的透射率逐渐下降 ( $x=0.20a, y=0.5120a$  除外, 因环形谐振腔的谐振频率发生了变化), 透射率最高为 92.8% (图 4(b)), 图 4(c) 是其  $E_z$  场分布。当椭圆长轴方向平行水平方向时 ( $x$  为  $0.34a \sim 0.40a$ ), 目标频率光信号的透射率最高为 58.8%。计算结果说明, 在介质柱横截面面积保持不变的情况下, 缺陷模在主波导与环形谐振腔之间的耦合效果可通过改变其耦合区域介质柱的形状来优化; 进一步地, 若耦合区域的介质柱采用长轴方向垂直于水平方向的椭圆形介质柱, 则可提高缺陷模在主波导与环形谐振腔之间的耦合效率。

根据以上分析, 原来的直下载波导被改成  $60^\circ$  弯下载波导, 主波导与环形谐振腔之间的耦合区域的圆形介质柱 ( $r=0.16a$ ) 被改成长轴方向垂直于主波导延伸方向的椭圆形介质柱 ( $x=0.24a, y=0.4266a$ )。

表 1 主波导与环形谐振腔之间耦合区域介质柱的参数优化结果

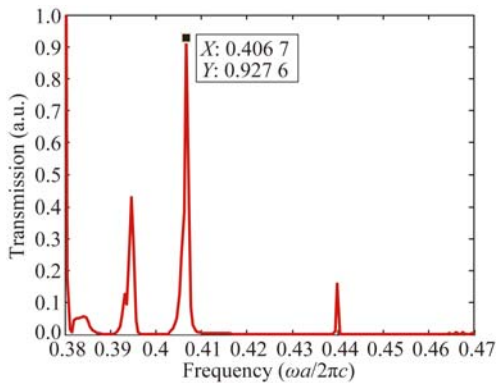
Tab. 1 Results of parameter optimization of dielectric rods in line-defect waveguides and ring resonator

$x$	$y$	Resonant frequency	Transmission/%
$0.20a$	$0.5120a$	0.4072	93.7
$0.24a$	$0.4266a$	0.4067	92.8
$0.26a$	$0.3938a$	0.4067	87.5
$0.28a$	$0.3658a$	0.4067	86.1
$0.30a$	$0.3414a$	0.4067	83.4
$0.32a$	$0.3200a$	0.4067	77.0
$0.34a$	$0.3012a$	0.4067	58.8
$0.36a$	$0.2844a$	0.4067	46.7
$0.38a$	$0.2694a$	0.4067	50.2
$0.40a$	$0.2560a$	0.4067	41.8



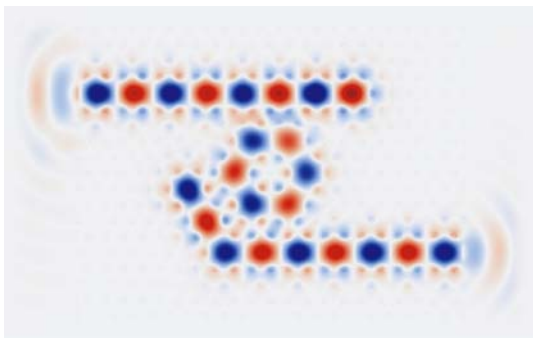
(a) 优化后的两端口滤波器

(a) Optimized two-port channel drop filter



(b) 优化后两端口滤波器的透射谱

(b) Transmission spectrum of optimized two-port channel drop filter



(c) 目标频率  $f=0.4067$  时的  $E_z$  场分布图

(c) Field distribution of  $E_z$  at target frequency of 0.406 7

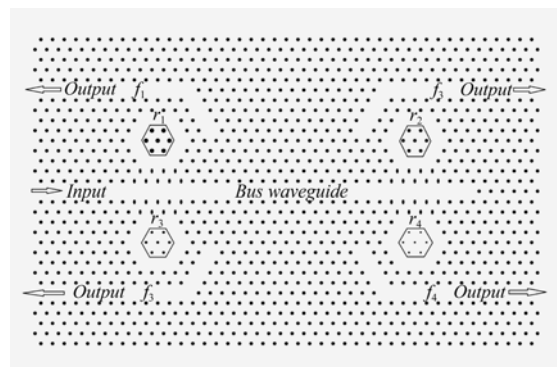
图 4 优化后的两端口滤波器及其性质

Fig. 4 Optimized two-port channel drop filter and its properties

### 3 多通道滤波器设计

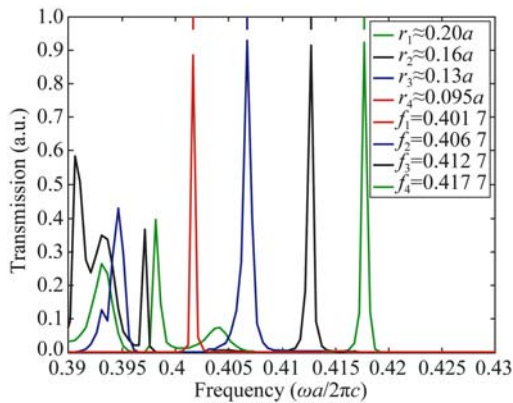
结合优化后的两端口滤波器,本文提出一种多通道二维光子晶体滤波器模型,如图 5(a)所示。该模型由 1 条主波导、4 个环形谐振腔以及 4 条  $60^\circ$  弯下载波导构成。在完整的二维三角晶格光子晶体

中沿水平方向移除一排介质柱形成主波导,并在其末端放置若干介质柱。在主波导的上下两侧共有 4 个环形谐振腔,位于主波导和  $60^\circ$  弯下载波导之间。环形谐振腔内的 7 个介质柱的半径决定着环形谐振腔的谐振频率,实际上只需改变环形谐振腔内介质柱的半径就可以达到调制谐振腔谐振频率的目的。4 个环形谐振腔内介质柱的半径分别取  $r_1=0.20a, r_2=0.16a, r_3=0.13a, r_4=0.095a$ ,  $a$  是晶格常数。利用 FDTD 再次计算 4 个  $60^\circ$  弯波导端的透射谱,结果如图 5(b)所示,各下载波导端的透射率均超过 90%。4 个环形谐振腔所对应的归一化谐振频率依次为:  $f_1=0.4017, f_2=0.4067, f_3=0.4127, f_4=0.4177$ 。随着环形谐振腔内介质柱半径的减小,环形谐振腔内的等效介电常数亦减小,根据电磁变分原理,谐振频率会发生蓝移。若取  $a=650\text{ nm}$ ,则环形谐振腔的谐振频率所对应的光波波长分别为:  $\lambda_1=1618.12\text{ nm}, \lambda_2=1598.23\text{ nm}, \lambda_3=1574.99\text{ nm}, \lambda_4=1556.14\text{ nm}$ 。图 5(b)中,在光子带隙之内存在着 4 个锐利的透射峰,它们的波峰间距分别为: 19.89, 23.24, 18.85 nm,这说明所设计的四信道二维光子晶体滤波器可实现优良的选频功能。图 5(c)是波长  $\lambda_2=1598.23\text{ nm}$  所对应的光信号的  $E_z$  分布图。从图 5(c)可以看出,  $\lambda_2$  对应的光信号的光子能量主要集中在主波导、 $r_2=0.16a$  的环形谐振腔以及邻近的  $60^\circ$  弯下载波导中,而在其他的环形谐振腔及其下载波导中,该频率的光子能量分布可忽略不计。  $\lambda_1, \lambda_3$  以及  $\lambda_4$  对应的光波也均在各自的下载波导中实现了高效输出。



(a) 多信道光子晶体下载滤波器的结构示意图

(a) Structure of photonic crystal multi-channel drop filter



(b) 多信道光子晶体下载滤波器的透射谱  
(b) Transmission spectrum of photonic crystal multi-channel drop filters



(c) 目标频率  $f=0.4067$  时的  $E_z$  场稳态分布图  
(c) Field distribution of  $E_z$  at target frequency of 0.4067

图 5 多信道光子晶体下载滤波器及其性能

Fig. 5 Photonic crystal multi-channel drop filter and its properties

## 4 结 论

本文利用光子晶体环形谐振腔缺陷模与线缺陷模之间的共振耦合原理,设计了一款 4 信道光子晶体下载滤波器。该器件由 1 条主波导、4 个环形谐振腔以及 4 条  $60^\circ$  弯下载波导组成。主波导末端放置若干反射介质柱,环形谐振腔位于主波导与  $60^\circ$  弯下载波导之间。利用 FDTD 对器件各下载波导输出端的透射谱进行了计算。各环形谐振腔固有的谐振频率可以通过改变环形谐振腔内 7 个介质柱的半径来调节。主波导与环形腔的耦合效率可通过将主波导与环形谐振腔之间耦合区域的圆形介质柱改换成椭圆长轴垂直水平方向的椭圆形介质柱来提高;此外,将直下载波导改换成  $60^\circ$  弯波导增加了环形谐振腔与下载波导的耦合区域,增强了耦合效果。优化后的多信道光子晶体滤波器具备优良的选频功能,可将波长分别为:  $\lambda_1 = 1\,618.12\text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 1\,598.23\text{ nm}$ ,  $\lambda_3 = 1\,574.99\text{ nm}$ ,  $\lambda_4 = 1\,556.14\text{ nm}$  的入射光信号高效地耦合到相应的  $60^\circ$  弯下载波导中,其透射率均可达 90% 以上。相比于传统的半导体介质材料器件,该器件的尺寸仅为  $28\ \mu\text{m} \times 17\ \mu\text{m}$ , 体积较小、结构简单、易于大规模集成,在未来的全光通信领域具有潜在的应用价值。

## 参考文献:

- [1] JOANNOPOULOS J D, JOHNSON S G, WINN J N, *et al.*. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* [M]. Princeton University Press, 2011.
- [2] FAN S, VILLENEUVE P, JOANNOPOULOS J, *et al.*. Channel drop filters in photonic crystals [J]. *Optics Express*, 1998, 3(1):4-11.
- [3] SHARKAWY A, SHI S, PRATHER D W. Multi-channel wavelength division multiplexing with photonic crystals [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(14): 2247-2252.
- [4] AKOSMAN A E, MUTLU M, KURT H, *et al.*. Compact wavelength de-multiplexer design using slow light regime of photonic crystal waveguides [J]. *Optics Express*, 2011, 19(24):24129-24138.
- [5] KUO C W, CHANG C F, CHEN M H, *et al.*. A new approach of planar multi-channel wavelength division multiplexing system using asymmetric super-cell photonic crystal structures [J]. *Optics Express*, 2007, 15(1):198-206.
- [6] AKAHANE Y, ASANO T, TAKANO H, *et al.*. Two-dimensional photonic-crystal-slab channel drop filter with flat-top response [J]. *Optics Express*, 2005, 13(7):2512-2530.
- [7] 余建立, 沈宏君, 叶松, 等. 一种新型高效光子晶体多信道下载滤波器的设计 [J]. *光学学报*, 2012, 32(11):1106003-1-6.  
YU J L, SHEN H J, YE S, *et al.*. Design of novel highly efficient photonic crystal multi-channel drop filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1106003-1-6. (in Chinese)
- [8] NIEMI T, FRANDBSEN L H, HEDE K K, *et al.*. Wavelength-division demultiplexing using photonic crystal waveguides [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 18(1):226-228.

- [9] TAKANO H, SONG B S, ASANO T, *et al.*. Highly efficient multi-channel drop filter in a two-dimensional hetero photonic crystal [J]. *Optics Express*, 2006, 14(8):3491-3496.
- [10] 李传起,范庆斌,陆叶,等. 多信道异质结构光子晶体滤波器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2171-2177.  
LI CH Q, FAN Q B, LU Y, *et al.*. Multi-channel heterophotonic crystal filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8):2171-2177. (in Chinese)
- [11] 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, 60(1): 710-714.  
YANG CH Y, XU X M, YE T, *et al.*. The modulation of a novel photonic crystal ring resonator filter[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011, 60(1): 710-714. (in Chinese)
- [12] WU Y D, SHIH T T, LEE J J. High-quality-factor filter based on a photonic crystal ring resonator for wavelength division multiplexing applications [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(25):F24-F30.
- [13] 沈宏君,刘杰,李婷,等. 四通道二维光子晶体解波分复用系统[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 692-699.  
SHEN H J, LIU J, LI T, *et al.*. Four-channel WDM system based on two-dimensional photonic crystal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 692-699. (in Chinese)
- [14] 吴立恒,王明红. 光子晶体信道分路滤波器特性的研究[J]. 中国激光, 2015(5):168-172.  
WU L H, WANG M H. Investigation on the characteristics of photonic crystal channel drop filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2015(5):168-172. (in Chinese)
- [15] 吴斌,王庆康. 带反射回馈的高效光子晶体多路滤波器[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8):1208-1214.  
WU B, WANG Q K. Highly efficient photonic crystal based multichannel drop filters with reflection feedback [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1208-1214. (in Chinese)
- [16] 周兴平,疏静,卢斌杰,等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. 光学学报, 2013, 33(1):211-215.  
ZHOU X P, SHU J, LU B J, *et al.*. Two-wavelength division demultiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1):211-215. (in Chinese)
- [17] 张佳,徐旭明,何灵娟,等. 基于光子晶体共振耦合的四波长波分复用/解复用器[J]. 物理学报, 2012, 61(5):228-234.  
ZHANG J, XU X M, HE L J, *et al.*. Four-wavelength multiplexer/demultiplexer based on photonic crystal resonant coupling [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(5):228-234. (in Chinese)
- [18] SHEN G, TIAN H, JI Y. Ultracompact ring resonator microwave photonic filters based on photonic crystal waveguides [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6):1218-1225.
- [19] LIU W, YANG D, TIAN H, *et al.*. Optimization transmission of photonic crystal coupled cavity and design of demultiplexer for wavelength division multiplexing application [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(8):084002-1-6.
- [20] LIU S, LIU Y G, LIUR Y, *et al.*. All-fibre flat-top comb filter based on high-birefringence photonic crystal fibre loop mirror [J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(1):64-69.

## 作者简介:



刘杰(1986—),男,山西长治人,硕士,助教,2015于宁夏大学获得硕士学位,主要从事新能源材料及光子晶体性质的研究。E-mail: jetliu1986@163.com

## 通讯作者:



铁生年(1965—),男,教授,1987年于青海师范大学获得学士学位,2003年到清华大学作访问学者,2004年到中科院过程所访问学者,2008年到新西兰奥克兰大学访问学者,主要从事新能源材料设计和加工的研究。E-mail: tieshengnian@163.com