

文章编号 1004-924X(2015)03-0692-08

## 四通道二维光子晶体解波分复用系统

沈宏君\*, 刘杰, 李婷, 李新兰

(宁夏大学物理电气信息学院, 宁夏银川 750021)

**摘要:**利用光子晶体环形腔缺陷模与线缺陷波导之间的共振耦合原理,设计了一种由主波导、环形腔和 $60^\circ$ 弯波导组成的四通道二维三角晶格光子晶体解波分复用系统。通过平面波展开法计算线缺陷波导的能带结构;利用时域有限差分法(FTDT)计算了不同频率的光波在该系统中的传输特性。最后,分析了影响输出效率和品质因子的因素并对该系统进行了改进。分析表明:改变环形腔内介质柱的半径可调节谐振频率,而在主波导末端增加反射介质柱以及改变耦合区域中介质柱的形状可提高各通道的谐振频率光波的透射率。计算结果显示:该系统较好地实现了4个波长的解波分复用,透射率均达90%以上。另外,该系统结构简单,便于加工制造,且体积小,有利于大规模集成。

**关键词:**二维光子晶体;时域有限差分法;共振耦合;解波分复用器

**中图分类号:** TN914.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0692

## Four-channel WDM system based on two-dimensional photonic crystal

SHEN Hong-jun\*, LIU Jie, LI Ting, LI Xin-lan

(School of Physics and Electrical Information, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

\* Corresponding author, E-mail: shenhongj2004@126.com

**Abstract:** Based on the resonant coupling principle between the defect mode of a ring resonator and the line-defect waveguide, a four-channel Wavelength Division Multiplexing (WDM) system was designed by using the 2D triangular lattice photonic crystal. This system was composed of a line-defect waveguide, ring resonators and  $60^\circ$  bend waveguides. The band structure of the line waveguide was investigated by the plane-wave expansion method. The transmission characteristics of light wave with different frequencies in the system were simulated by the finite difference time domain method, the effects of factors on output efficiency and quality factor were analyzed and the system was improved. The analysis shows that the resonance frequencies depend on the radius of the dielectric rods. It is demonstrated that the transmission efficiencies of the system is improved greatly by changing the shapes of dielectric rods in the coupling region and adding the reflection dielectric rods at the end of bus waveguide. The numerical results indicate that the system has the ability to achieve the WDM for different wavelengths, and the transmission efficiencies of all the resonance wavelengths are still above 90%. The system is a simple structure and easy to be fabricated and processed. Moreover, it has a smaller size, and could be large-scale integration.

**Key words:** 2D photonic crystal; finite difference time domain method; resonant coupling; wavelength division multiplexing system

收稿日期:2014-08-04;修订日期:2014-10-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61167002)

## 1 引言

光子晶体是一种电介质材料在空间按一定周期排列的人工晶体材料,具有光子带隙及光子局域性<sup>[1-2]</sup>。在合适的晶格常数和介电常数的条件下,完整的光子晶体可以产生禁止某特定频段电磁波存在的光子带隙。在完整的光子晶体中引入缺陷,即可将缺陷模引入光子带隙,与缺陷模频率相吻合的光子会被局限在缺陷位置,如果偏离了缺陷位置,光子能量将会迅速衰减。根据这一性质,学者们相继提出了低损耗、高传输效率的光子晶体波导和具有优良选频功能以及高品质因子等优点的谐振腔、环形腔,在此基础上又研制了波分复用器、滤波器、传感器、光开关等高性能光子晶体器件<sup>[3-10]</sup>。此外,较之于传统光电子器件,基于光子晶体制造的光学设备具有设计灵活、成本低、可实现大规模集成等优势,故在光通信领域具有很大的应用前景。

基于光子晶体制作的环形谐振腔可获得较高的品质因子,再加之固有的单模属性,其显示出优良的频谱选择性。用光子晶体波导、微腔、环形谐振腔组成的共振耦合系统可实现滤波、波分复用、解波分复用等功能。近年来,基于光子晶体波导、微腔、环形谐振腔设计的滤波器和波分复用器已得到了广泛的研究<sup>[11-17]</sup>。杨春云等采用三角晶格设计了一种可调制的环形腔滤波器,它通过增加环形腔内2个介质柱的半径来调节波长带宽,通过改变耦合区域介质柱(主波导与环形腔之间的介质柱)的半径来调节波长数值<sup>[18]</sup>。张佳等采用四方晶格提出了一种四波长波分复用器,通过2个光子晶体环形腔、4个不同尺寸的光子晶体微腔及波导之间的耦合实现了4个波长的波分复用,通过调制输出波导两侧第一排介质柱的半径来提高输出效率<sup>[20]</sup>。Wu等基于三角晶格提出了一种输出波导垂直于环形腔的四通道波分复用器,其结构经优化后在输出效率及品质因子两方面俱佳<sup>[13]</sup>。

本文采用硅介质圆柱在空气中按三角晶格排列的二维光子晶体,利用光子晶体环形腔缺陷模和波导模共振耦合原理,通过主波导、环形腔和

60°弯波导的巧妙组合,设计了一种新型、高效的多通道波分复用器,实现了对不同频率光的波分复用。运用时域有限差分法(Finite Difference Time Domine, FDTD)对该器件结构进行了大量的仿真计算,并分析了影响输出效率和品质因子的因素,通过优化器件结构大幅提高了输出波导的输出率。所选择的单环单模模式可防止各输出波导间的串扰<sup>[13]</sup>,即用1个主波导、4个环形腔以及4个60°弯波导的组合来实现4个频率光波的波分复用。该器件体积小、结构简易,便于加工制造,有利于大规模集成。

## 2 设计原理与结构模型

在空气背景下,完整的二维三角晶格光子晶体中,晶格常数为 $a$ ,介质柱材料为硅(Si),折射率 $n$ 为3.59,介质柱半径 $r=0.15a$ 。该结构对于TM模(横磁波,电场方向平行于介质柱方向)在归一化频率 $(a/\lambda)0.335\sim 0.525$ 下存在光子禁带(如图1所示),其中 $\lambda$ 为光在真空中的波长。在完整的二维三角晶格光子晶体中引入线缺陷(沿水平方向移除一排介质柱)可以形成单模波导,如果模式频率正好位于光子晶体的带隙内,光子晶体的线缺陷会将模式线性地局域在禁带之内,实现无损耗传输。选取合适的超原胞,利用平面波展开法(PWE)可以计算出该光子晶体单模波导的色散关系曲线(如图1所示)。图中上下端阴影部分为导带,中间为光子禁带(0.335~0.525),光子禁带中的曲线(0.365~0.490)即为线缺陷模。

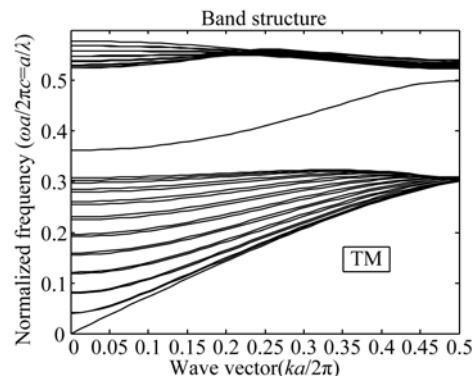
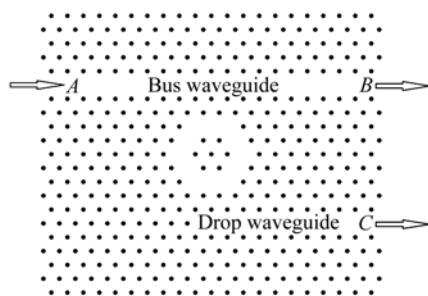


图1 线缺陷能带图

Fig. 1 Dispersion relations of a line defect

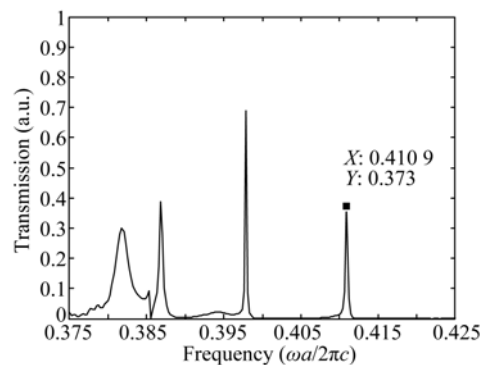
在完整的二维三角光子晶体中,移除内部的环形介质柱,构成 1 个呈六边形的环形腔,内部有 6 个中心介质柱。将环形谐振腔放置于主波导与下载波导之间,即构成共振耦合系统,如图 2(a)所示。光波从输入端进入主波导,由于光子带隙的作用,频率位于  $0.365 \sim 0.490$  (缺陷模)的光波在波导中近乎无损耗地传播。若该频段某些光波的频率与环形谐振腔的共振频率一致,则环形谐振腔与两波导中的光波模式之间将产生强烈的共振耦合作用<sup>[13]</sup>。环形腔会把与其共振频率一致的光波从主波导中耦合到下载波导中,即实现选频功能;而与环形腔共振频率不一致的光波则会一直在主波导中直行。

图 2(a)为波导环形腔共振耦合结构示意图,该结构由主波导、环形腔、下载波导 3 个部件构成,环形腔内介质柱的半径  $r_1 = 0.15a$ 。采用 FDTD 对该结构进行仿真计算,吸收边界采用完全匹配吸收层(PML)。在主波导输入端 A 放置高斯点光源,取归一化中心频率为 0.40,带宽为 0.05,在下载波导输出端 C 放置功率探测器以测量其透射频谱<sup>[21]</sup>(利用 FDTD 可得到入射波的输入功率谱和透射波的输出功率谱,用输出功率谱除以输入功率即可得到透射谱)。计算结果如图 2(b)所示,可以看出环形腔有多个共振频率。将  $f=0.4109$  作为目标频率,其相应光波的透射率只有 37%,说明这种三端口式波导环形腔共振耦合结构的下载波导输出效率很低,该频率下至少一半的光子能量从主波导输出端 B 传出。图 2(c)是当  $f=0.4109$  时,  $E_z$  的电场分布图。



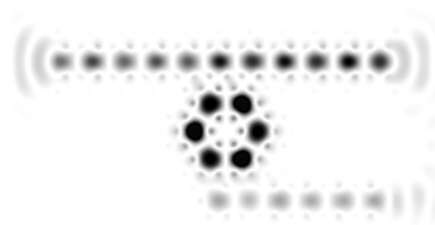
(a) 波导环形腔共振耦合结构示意图

(a) Configuration of waveguide-ring resonator



(b) 透射谱

(b) Transmission spectrum



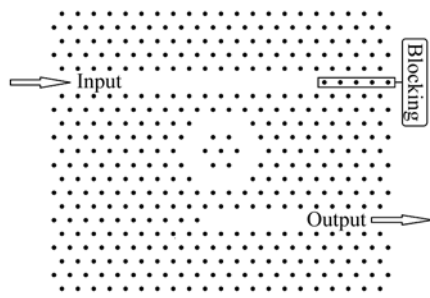
(c)  $f=0.4109$  时,  $E_z$  电场分布图

(c) Field distribution of  $E_z$  at resonant frequency of 0.4109

图 2 波导环形腔共振耦合器及其性能

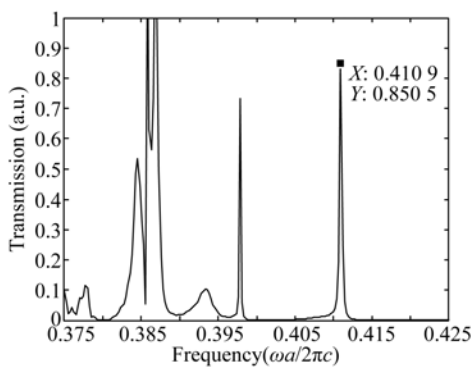
Fig. 2 Design of waveguide-ring resonator and its properties

光波从主波导输入端 A 入射时,耦合效率偏低,只有 37% 的光子能量从下载波导输出端 C 输出,大部分的光子能量从主波导的输出端 B 传出(图 2(c))。为了提高下载波导输出端 C 的输出效率,本文在主波导输出端 B 增加若干个反射介质柱,构成一种新型的两端口波导环形腔共振耦合结构(见图 3(a)),从而使未被耦合到环形腔的光波反射回去再次进行耦合,以进一步提高输出率<sup>[12,17,22]</sup>。同样利用 FDTD 计算出下载波导输出端 C 的透射谱,如图 3(b)所示。波导环形腔共振耦合结构在增加反射介质柱后,目标频率光波的透射率达到 85%,说明该频率下未被耦合到环形腔的光波遇到反射介质柱后返回,再次进行了耦合,使得目标频率光波的透射率得到了提高。图 3(c)是当  $f=0.4109$  时,  $E_z$  的电场分布。



(a)增加了反射介质柱的波导环形腔共振耦合结构

(a) Structure of waveguide-ring resonator with reflection dielectric rods at end of bus waveguide



(b)透射谱

(b) Transmission spectrum



(c)  $f=0.4109$  时,  $E_z$  电场分布图

(c) Field distribution of  $E_z$  at resonant frequency of 0.4109

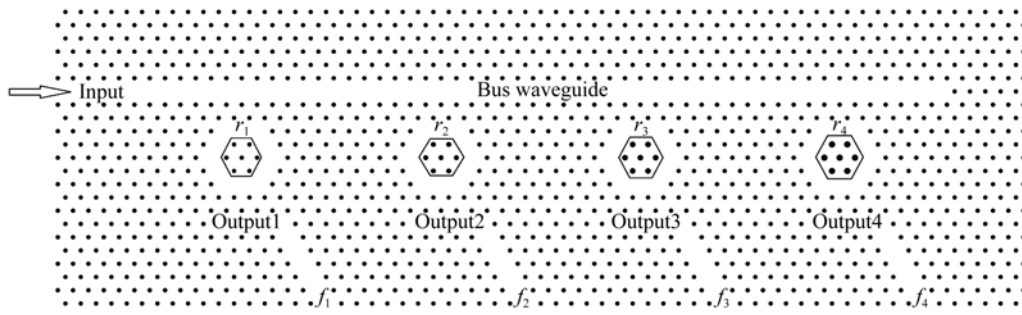
图 3 两端口波导环形腔共振耦合器及其性质

Fig. 3 Waveguide-ring resonator with reflection dielectric rods at end of bus waveguide and its properties

对比两种结构的计算结果可知,反射介质柱的增加大幅提高了波导环形腔共振耦合器的下载波导输出端的输出效率。

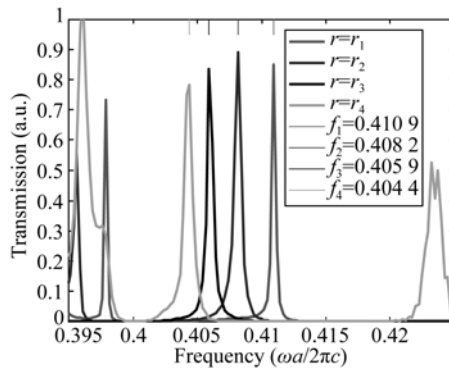
### 3 多通道波分复用器的设计

基于上述结构,本文设计了多通道波分复用器模型(图 4(a)),该模型由 1 个主波导、4 个环形腔以及 4 个  $60^\circ$ 弯波导构成。主波导通过移除一排空气孔获得,在末端放置若干介质柱以提高下载波导的输出效率。受晶格类型的限制,下载波导由原来的直波导变成  $60^\circ$ 弯波导。对于环形腔,环内介质柱半径不同,环形腔的谐振频率就不同,并随着腔内介质柱半径的增加而减小,改变环内介质柱的半径即可很容易地改变环形腔的谐振频率<sup>[13]</sup>。选取  $r_1 = 0.15a, r_2 = 0.17a, r_3 = 0.19a, r_4 = 0.21a$ , 作为环形腔内介质柱的半径,  $a$  为晶格常数。利用 FDTD 计算 4 个下载波导末端的透射谱,计算结果如图 4(b)所示。环内介质柱半径为  $r_1 = 0.15a, r_2 = 0.17a, r_3 = 0.19a, r_4 = 0.21a$  的环形腔对应着 4 个谐振频率,它们分别是:  $f_1 = 0.4109, f_2 = 0.4082, f_3 = 0.4059, f_4 = 0.4044$ 。随着  $r$  的增大,环形腔内的等效介电常数增大,根据电磁变分原理,谐振频率红移,与上面的分析一致。如图 4(b)所示,在归一化频率  $0.400 \sim 0.415$  有 4 个锐利的透射峰,它们的透射率均达 80% 以上。如果取  $a = 650 \text{ nm}$ , 则 4 个谐振频率分别对应  $\lambda_1 = 1581.9 \text{ nm}, \lambda_2 = 1592.3 \text{ nm}, \lambda_3 = 1601.3 \text{ nm}, \lambda_4 = 1607.3 \text{ nm}$  4 个波长值。选取  $f = 0.4059$  为目标频率,  $E_z$  电场分布如图 4(c)所示。可以看出,该频率的绝大部分光子能量位于主波导、环内介质柱半径  $r_3 = 0.19a$  的环形腔及与其相邻的下载波导中,在其他 3 个环形腔及下载波导中,该频率的光子能量几乎可以忽略。由此说明,基于波导环形腔共振耦合结构的多通道波分复用器可以较好地实现上述 4 个频率光波的波分复用功能。



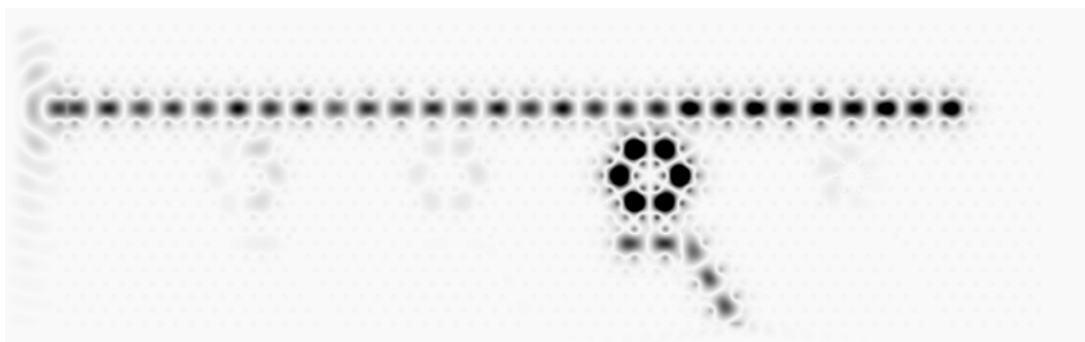
(a) 光子晶体解波分复用系统结构图

(a) Structure of photonic crystal WDM system



(b) 透射谱

(b) Transmission spectrum



(c)  $f=0.4059$  时,  $E_z$  电场分布图

(c) Field distribution of  $E_z$  at resonant frequency of 0.405 9

图 4 多通道波分复用器及其性能

Fig. 4 Multi-channel WDM system and its properties

多通道波分复用器各下载波导输出端的输出效率依赖于环形腔与上下两侧波导之间的耦合区域的耦合效果<sup>[18]</sup>。改变耦合区域介质柱(环形腔上下两排介质柱(图 5))的半径可以增强耦合效果,但耦合区域的介质柱是环形腔的一部分,改动其半径也必然会使环形腔的谐振频率发生移动。

因此,为了进一步提高耦合效率,将耦合区域的圆形介质柱换成了同等横截面面积的椭圆形介质柱。令椭圆的长半轴长度为  $y$ ,短半轴长度为  $x$ ,根据:

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

在  $r=0.15a$  时,取  $x=0.10a, 0.12a, 0.14a$ ,

0.15a,0.16a,0.18a,0.20a,则  $y=0.225a,0.1875a,0.1607a,0.15a,0.1406a,0.125a,0.1125a$ 。环形腔内的介质柱半径为  $r_1=0.15a$ ,利用 FDTD 计算以上 7 组参数,结果如表 1 所示。表中第二行至第六行相应的谐振频率未发生变化,属于讨论范围。当椭圆的长半轴方向垂直主波导时,短半轴长度从  $0.14a$  减小至  $0.12a$ ,谐振频率所对应的光波在下载波导输出端的透射率增大,最高为 91.7%;当椭圆的短半轴方向平行主波导时,长半轴长度从  $0.16a$  增加至  $0.18a$ ,谐振频率所对应的光波在下载波导输出端的透射率减小。计算结果说明,在介质柱横截面面积保持不变的情况下,改变耦合区域介质柱的形状可以影响耦合效果。在一定范围之内,采用长半轴方向垂直于主波导的椭圆形介质柱的方式可以提高耦合区域的耦合效率。

根据上述讨论结果,将图 4(a)中 4 个耦合区域的圆形介质柱均用长半轴长度为  $0.1875a$ 、短半轴长度为  $0.12a$  的椭圆形介质柱替换(如图 5),再次用 FDTD 计算其他 3 个下载波导输出端的谐振频率及透射率,结果如图 6 所示。较之于图 4(b),改变耦合区域介质柱形状后,环形腔的谐振频率没有发生移动,透射率均达 90% 以上,耦合区域的耦合效率得到了提高。

表 1 耦合区域介质柱参数优化结果

Tab. 1 Results of parameter optimization of dielectric rods in coupling region

$x$	$y$	Resonant frequency	Transmission/%
0.10a	0.2250a	0.4112	93.4
0.12a	0.1875a	0.4109	91.7
0.14a	0.1606a	0.4109	87.9
0.15a	0.1500a	0.4109	85.1
0.16a	0.1406a	0.4109	63.4
0.18a	0.1250a	0.4109	55.7
0.20a	0.1125a	0.4114	88.8

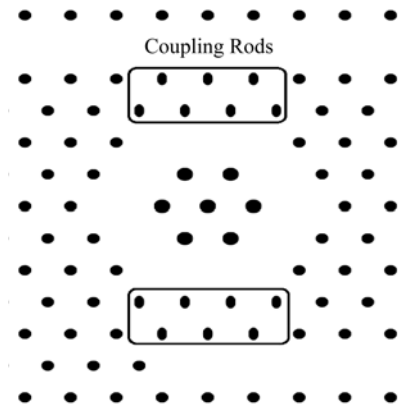


图 5 耦合区域介质柱示意图

Fig. 5 Schematic of dielectric rods in coupling region

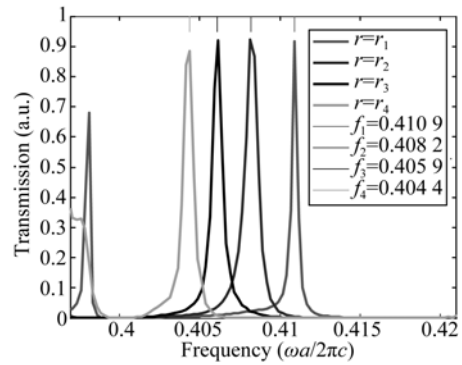


图 6 优化后多通道波分复用器的透射谱

Fig. 6 Transmission spectra from multi-channel wavelength division multiplexing system after optimization

### 4 结 论

本文基于光子晶体波导与环形腔之间的共振耦合原理,设计了一种多通道的二维三角晶格波分复用系统。该系统由 1 个主波导、4 个环形腔和 4 个  $60^\circ$  弯波导组成。利用 FDTD 对其各下载波导输出端的透射谱进行了计算,通过改变环形腔内介质柱的半径来调制各环形腔的谐振频率,通过在主波导末端增加反射介质柱以及将耦合区域圆形介质柱改换成长半轴垂直于主波导的椭圆形介质柱,提高了系统的耦合效率。优化后的系统可将归一化频率分别为  $f_1=0.4109, f_2=0.4082, f_3=0.4059, f_4=0.4044$  的入射光波高效地耦合到不同的下载波导中,透射率均可达 90% 以

上,较好地实现了波分复用功能。该系统尺寸为  $40.3 \mu\text{m} \times 16.25 \mu\text{m}$ , 体积较小, 输出效率高, 共

振频率易于调节, 为高精度光电子器件的设计与制造提供了理论依据。

#### 参考文献:

- [1] FAN SH H, VILLENEUVE P R, JOANNOPOULOS J D. Channel drop filters in photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 1998, 3(1): 4-11.
- [2] FAN SH H, VILLENEUVE P R, JOANNOPOULOS J D, *et al.* Theoretical analysis of channel drop tunneling processes [J]. *Phy. Rev. B*, 1999, 59(24): 15882-15892.
- [3] LITTLE B E, CHU S T, HAUS H A, *et al.* Microring resonator channel dropping filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, 15(6): 998-1005.
- [4] VILLENEUVE P R, FAN SH H, JOANNOPOULOS J D. Microcavities in photonic crystals: mode symmetry, tunability, and coupling efficiency [J]. *Phy. Rev. B*, 1996, 54(11): 7837-7842.
- [5] FAN A H, PIERRE R, JOANNOPOULOS J D. Channel drop tunneling through localized states [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 80(5): 960-963.
- [6] MONIFI F, GHAFFARI A, DJAVID M, *et al.* Three output port channel-drop filter based on photonic crystals [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(1): 804-809.
- [7] LIU SH, LIU Y G, LIU R 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.
- [8] 马依拉木·木斯得克, 姚建铨, 陆颖, 等. 1.55  $\mu\text{m}$  高非线性高双折射光子晶体光纤 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 588-596.
- MAYILAMU M, YAO J Q, LU Y, *et al.* Highly nonlinear and birefringent photonic crystal fiber at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 588-596. (in Chinese)
- [9] 崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥, 等. 二维硅薄膜光子晶体波导的设计及制作 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(12): 2549-2556.
- CUI N D, LIANG J Q, LIANG ZH Z, *et al.* Design and fabrication of two-dimensional photonic crystal waveguides on silicon films [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2549-2556. (in Chinese)
- [10] 洪国彬, 杨钧杰, 卢廷昌. 蓝紫光氮化镓光子晶体面射型激光器 [J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 559-571.
- HONG G B, YANG J J, LU T CH. Blue-violet GaN-based photonic crystal surface emitting lasers [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 559-571. (in Chinese)
- [11] DAVID M, GHAFFARI A, ABRISHAMIAN M S. Coupled-mode analysis of photonic crystal add-drop filters based on ring resonators [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, 25(11): 1829-1832.
- [12] 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): 68-73.
- 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): 68-73. (in Chinese)
- [13] WU Y D, TSORNG 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): 24-30.
- [14] TAKANO H, SONG B S, ASANO T, *et al.* Highly efficient multi-channel drop filter in a two-dimensional hetero photonic crystal [J]. *Opt. Exp.*, 2006, 14(8): 3491-3496.
- [15] WU Y D, WEI HSU K, SHIH T T. Thirty-two-channel dense-wavelength-division multiplexer based on cascade two-dimensional photonic crystal waveguide structure [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, 24(9): 2075-2080.
- [16] NIYAZI M, AMIRKHANI A, MOSAVI M R. Investigation and simulation of a two-channel drop filter with tunable double optical resonators [J]. *J. Supercond Nov. Magn.*, 2014, 27: 827-834.
- [17] 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]. *Opt. Exp.*, 2007, 15(1): 198-206.
- [18] 陈雪坤, 张璐, 吴志勇. 空间激光与单模光纤和光子晶体光纤的耦合效率 [J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 208-215.
- CHEN X K, ZHANG L, WU ZH Y. Coupling efficiency of free-space laser coupling into single mode fiber and photonic crystal fiber [J]. *Chinese Op-*

- tics, 2013, 6(2): 208-215. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 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)
- [21] 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)
- [22] FASIHI K, MOHAMMADNEJD S. Highly efficient channel-drop filter with a coupled cavity-based wavelength-selective reflection feedback [J]. *Opt. Exp.*, 2009, 17(11): 9883-8997.

#### 作者简介:



沈宏君(1970—),男,河南商丘人,博士,副教授,1992于宁夏大学获得学士学位,1997年于河南师范大学获得硕士学位,2009于北京邮电大学获得博士学位,主要从事光子晶体的研究。E-mail: shenhongj2004@126.com



刘杰(1986—),男,山西长治人,硕士研究生,主要从事光子晶体的研究。E-mail: jetliu1986@163.com

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)