

# 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器

周兴平 疏 静 卢斌杰 孙凤兴

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

**摘要** 提出了一种基于三角晶格二维光子晶体解波分复用器。该器件主体由线缺陷波导、环形谐振腔及点缺陷微腔构成。使用平面波展开法研究了线缺陷波导的特性,给出了线缺陷波导的能带图,对局部器件微调后进行大量的性能仿真以及对整体器件进行性能仿真,选择合适的器件参数,并使用时域有限差分法研究了不同波长的光在解波分复用器中的传输特性,并给出了电场分布图。仿真结果表明,该种结构可以实现波长分别为 1271 nm 和 1291 nm 两种光波的解波分复用。采用 6 个额外的介质柱,提高了环形腔的透射率;并通过在入射波导的入射口处增加三对介质柱,提高了波导的出射效率,从而整体上提高了双通道解波分复用器的输出效率。

**关键词** 光学器件;光子晶体;点缺陷微腔;解波分复用;时域有限差分

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0123001

## Two-Wavelength Division Demultiplexer Based on Triangular Lattice Photonic Crystal Resonant Cavity

Zhou Xingping Shu Jing Lu Binjie Sun Fengxing

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** A wavelength-division demultiplexer based on two-dimensional triangular lattice photonic crystals is proposed. This structure is composed of line-defect waveguides, ring resonators and point-defect nanocavities. The characteristics of line-defect waveguide are investigated via the method of the plane-wave expansion, and the projected band diagrams of line-defect waveguide are derived. Then appropriate parameters are obtained after a lot of simulations of the fine tuning of local components and the whole device. The transmission characteristics of light with different wavelengths in the photonic crystals demultiplexer are analyzed via the finite-difference time-domain (FDTD) method, and the resulting electric fields are also given. The results show the ability of wavelength-division demultiplexing between 1271 nm and 1291 nm with this device. Besides, six extra dielectric rods are added to enhance the transmission of the ring cavity, and by adding three pairs of dielectric rods at the entrance port, the total output efficiency of the system is increased.

**Key words** optical devices; photonic crystal; point-defect nanocavity; wavelength-division demultiplexing; finite-difference time-domain

**OCIS codes** 050.5298; 130.5296; 160.5298; 230.5298

## 1 引 言

1987 年, E. Yablonovitch<sup>[1]</sup> 和 S. John<sup>[2]</sup> 分别首次提出光子晶体概念。光子晶体的结构是由不同介电常数的介质材料在空间呈周期性排布。当电磁波在光子晶体中传播时, 由于布拉格散射产生了类似于电子的能带结构, 即光子能带。在合适的晶格常

数和介电常数的条件下, 在光子能带之间会产生使某种频率的电磁波完全不能通过的频率区间, 也就是光子带隙。光子带隙的存在使得光子晶体对光具有更强的约束性。如果在光子晶体中引入某种杂质或者缺陷, 就会在光子带隙内形成新的模式, 与缺陷模频率相吻合的光子就会被局限于缺陷位置。一旦

收稿日期: 2012-06-07; 收到修改稿日期: 2012-08-03

基金项目: 中国博士后科学基金(20080430171)和江苏省博士后科学资助计划(0702024B)资助课题。

作者简介: 周兴平(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体器件方面的研究。E-mail: zhou846775223@sina.com

导师简介: 疏 静(1980—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光子晶体、半导体量子点、光力学等方面的研究。

E-mail: jingshu@mail.njust.edu.cn(通信联系人)

偏离缺陷位置,光将迅速衰减。利用这一性质,如果引入的是点缺陷,则将构成微腔;如果引入的是线缺陷,就会形成波导。

在通信与光学传感器领域,波分复用系统对于宽带的复用技术具有重要意义。稀疏波分复用器(CWDM)与密集波分复用器(DWDM)已经成为光纤应用领域的重要技术。光学谐振腔由于其特有的选频特性而被广泛应用于光开关<sup>[3]</sup>、滤波器<sup>[4,5]</sup>和波分复用与解波分复用器中。光子晶体谐振腔由于其特有的周期结构而具有比普通谐振腔更高的品质因子及更小的体积<sup>[6,7]</sup>。基于光子晶体波导、谐振腔的波分及解波分复用器已经得到了广泛的研究<sup>[8~10]</sup>。如 Kuo 等<sup>[11]</sup>使用非对称晶胞结构微腔实现了六信道解波分复用。Takano 等<sup>[12]</sup>使用 L3 谐振腔以及异质结构实现了四信道解波分复用,他们将平板型空气孔光子晶体中相连的 3 个空气孔填充硅介质,从而构成 L3 谐振腔,改变晶格常数会使谐振腔的谐振频率发生变化,由此实现解波分复用功能。本文采用三角晶格介质柱结构,通过环形谐振腔、点缺陷微腔及波导之间的耦合作用实现了双通道解波分复用。这种装置由两个环形腔、两个点缺陷微腔及 3 个波导构成,可以对波长分别为 1271 nm 和 1291 nm 两种光波进行解波分复用。这两种波长的光波位于通信领域常用波段,相差 20 nm,符合国际电信联盟所制定的 G694.2 标准中所规定的 20 nm 的间隔要求。

## 2 理论分析

为了更易形成光子带隙,使用三角晶格介质柱二维光子晶体。晶格常数  $a = 404$  nm,介质柱半径  $r = 0.29a$ ,介质柱介电常数  $\epsilon = 11.97$ 。使用平面波展开法(PWE)仿真计算得到完美三角晶格介质柱二维光子晶体 TM 模能带结构(如图 1 所示),可以看出从归一化频率( $a/\lambda$ )为 0.227~0.321 处具有 34.3% 的光子带隙。使用同样的方法计算 TE 模能带结构(如图 2 所示),从图 2 中可以看到,此时光子带隙极小,不适用于光子晶体器件的设计应用。所以本文所设计的解波分复用器为偏振器件,工作于单一的偏振模式。

光子带隙的存在使得线性缺陷波导成为可能。使用线性缺陷,可以将光线从一个地点引导到另一个地点。改变完美光子晶体中的一系列的线性晶胞就形成了波导。如果频率落在光子带隙中,光波就可以在此波导中传播。传统的介质波导传播光线是

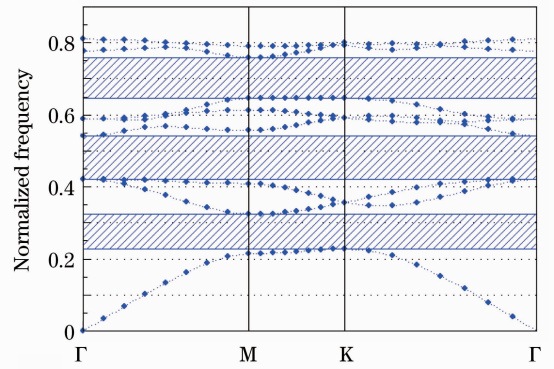


图 1 空气中三角晶格介质柱 TM 模能带图

Fig. 1 Photonic band structure for the TM modes of dielectric rods with triangular lattice in air

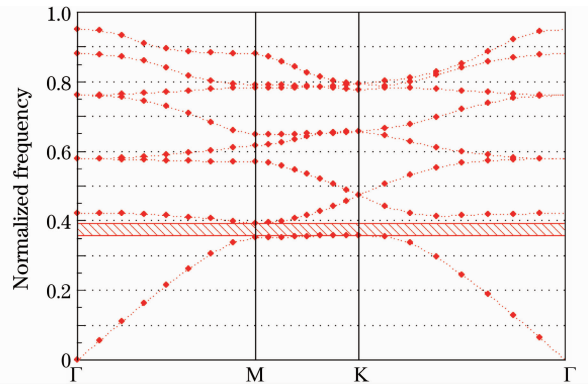


图 2 空气中三角晶格介质柱 TE 模能带图

Fig. 2 Photonic band structure for the TE modes of dielectric rods with triangular lattice in air

通过全反射的机制来实现的,但是这种机制只能将光约束在高介电区域。相反,在这里波导需要通过周围光子晶体的带隙来实现。这样就与中心区域的物质的性质无关。对于许多应用,这种性质非常重要。这可以减少相互作用,比如光线与介质材料的吸收、非线性作用<sup>[13]</sup>。接下来对这里所使用的线缺陷波导进行分析,同样使用平面波展开法计算出其能带图(如图 3 所示)。从图 3 中可以看出,箭头所指的部分即为波导模式。由于线性缺陷波导具有平移对称性,波导模式可以用沿波导方向的倒易空间波矢  $\mathbf{k}$  来描述。当  $|\mathbf{k}| = 0$  时,能带从  $\omega = 0.29 \times 2\pi c/a$  开始,当  $|\mathbf{k}| = 0.3 \times 2\pi/a$  时,能带到达带隙的顶端,进入所谓的泄露模式。

环形腔的设计如图 4 所示,注意到箭头所指的 6 个额外的介质柱是用来增加环形腔的透射率<sup>[14]</sup>,并将 6 个介质柱沿 X 轴与 Y 轴同时向外侧移动距离  $d$ (上下两个介质柱仅沿 Y 轴移动),环形腔的作用是增加耦合效果及减小反射回波<sup>[15]</sup>。

对于点缺陷微腔,不同半径的微腔具有不同的

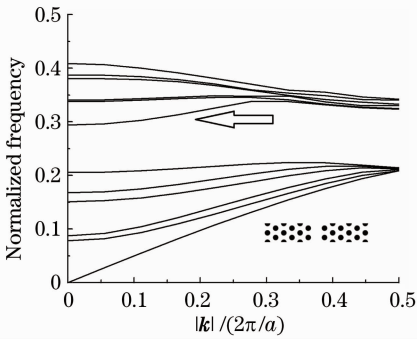


图3 线缺陷波导能带图(插图为线缺陷波导几何结构)

Fig.3 Projected band diagram for waveguide based on line defect. (Structure of the line-defect waveguide is shown in the inset)

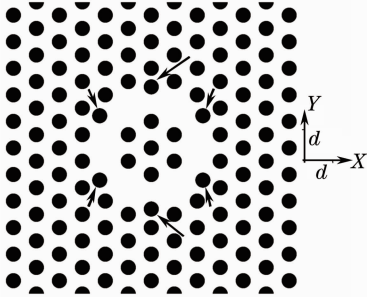


图4 环形腔结构

Fig.4 Schematic of the ring cavity

谐振频率,当缺陷介质柱半径小于周围介质柱半径时会形成单极子模式,并且谐振频率随着缺陷介质柱半径的减小而增加,所以只需要改变介质柱的半径就可以很容易地改变微腔的谐振频率。只有当微腔禁带内的频率与环形腔中的频率相近时才会发生耦合,这样就为选频提供了可能性<sup>[16]</sup>。

### 3 解波分复用器结构设计及仿真优化

图5为解波分复用器的结构图,由输入波导A,

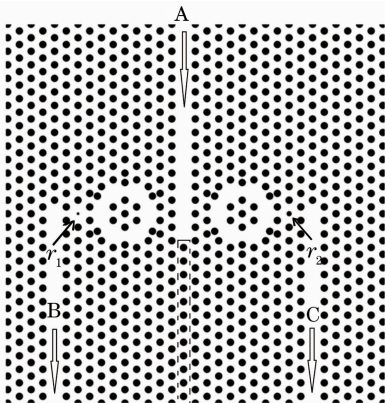


图5 解波分复用器结构示意图

Fig.5 Schematic of the wavelength-division demultiplexer

输出波导B、C,两个环形腔及两个微腔构成。晶格常数  $a=404\text{ nm}$ ,微腔中心介质柱半径分别为  $r_1=0.12a$ ,  $r_2=0.21a$ 。使用二维时域有限差分法(FDTD)进行仿真。吸收边界采用完全匹配吸收层(PML)。激励源采用高斯脉冲光源。

图5中虚线内的介质柱为反射介质柱,用来增加透射率<sup>[16]</sup>。由于三角形介质柱光子晶体只有TM模禁带,所以使用分量为  $E_z$ (平行于介质柱方向)的入射高斯光源。取归一化的中心频率为0.31,带宽为0.1。在两个出射波导处分别测量其透射频谱。将由FDTD算法所得的入射波和透射波函数进行快速傅里叶变换(FFT),则得到输入功率谱和输出功率谱,用输出功率谱除以输入功率谱即得到透射谱。

环形腔6个额外增加的介质柱的移动距离对于器件的性能有着较大的影响。将6个介质柱沿X轴与Y轴同时向外侧移动距离  $d$ (上下两个介质柱仅沿Y轴移动)。通过FDTD法计算其品质因子Q值。计算结果如图6所示。Q值过小将会产生较大的损耗,而Q值过高则不能得到想要的滤波性能和波长间隔。改变介质柱移动距离,计算波长间隔,如图7所示。从图7中可以发现,当介质柱移动距离为  $0.3a$  时,波长间隔为  $20\text{ nm}$ ,完全符合国际电信联盟所制定的G694.2标准中所规定的  $20\text{ nm}$  的间隔要求。因此,选择介质柱移动距离为  $0.3a$ 。

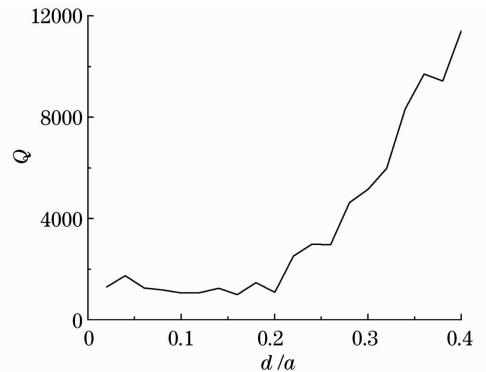


图6 环形腔Q值随介质柱移动的变化曲线

Fig.6 Q factor of the ring cavity versus displacement of dielectric rods

当环形腔介质柱移动距离为  $0.3a$  时,透射频谱图如图8所示。由两个箭头所指可以看出,两个谐振腔分别在0.3125和0.3180处有谐振点,与环形腔发生共振,但是其透射率偏低。当归一化频率为0.3125时,出射波导C波导只有72%的透射率;当归一化频率为0.3180时作为出射波导的B波导透射率更是只有67%。

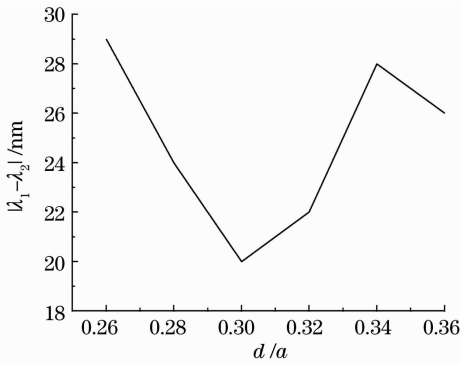


图 7 波长间隔随介质柱移动的变化曲线  
Fig. 7 Wavelength spacing versus displacement of dielectric rods

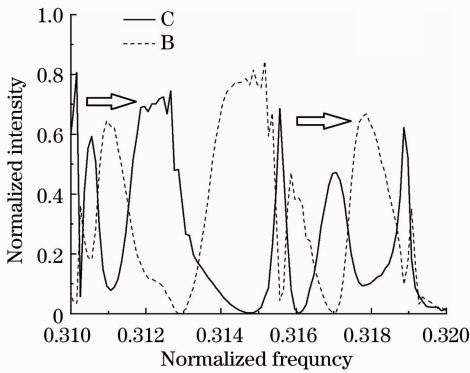


图 8 解波分复用器透射谱

Fig. 8 Transmission spectra of the wavelength demultiplexer

为了进一步提高解波分复用器的透射率,在入射波导 A 的入射口处增加了三对半径为  $r_0 = 0.18a$  的介质柱。原来的系统耦合较强烈,易产生反射。增加的三对介质柱可以降低入射端口的耦合强度,使光波更易进入波导中,从而降低了反射带来的损耗。改进后的系统的透射谱如图 9 所示。图 9 中右

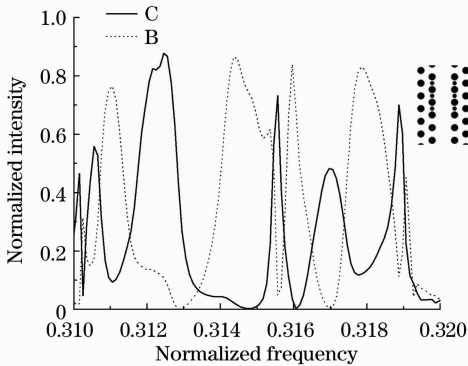


图 9 改进后解波分复用器透射谱(右侧插图为波导 A 示意图)

Fig. 9 Transmission spectra of the optimized wavelength-division demultiplexer (Structure of waveguide A is shown in the right inset)

上角插图为 A 波导的入射口示意图。

从表 1 中可以看出,在入射口处增加三对介质柱可以显著地提高出射效率。对于改进后的结构,归一化的中心频率为 0.3125 时,C 波导出射率提高至 88%。而当中心频率为 0.3180 时,B 波导出射率提高至 83%。

表 1 不同结构的出射效率

Table 1 Output efficiencies of different structures

Central frequency of incident ray	0.3125		0.3180	
Output waveguide	B	C	B	C
System before improvement / %	7	72	67	9
System after increasing dielectric rods / %	7.5	88	83	12

通过时域有限差分法计算得到当激励源归一化中心频率分别为 0.3125 和 0.3180 的高斯光源时,所得电场分布图分别为图 10(a)、(b)。从图 10 中可以清楚地看到,不同频率的光波分别从不同的波导出射,波长为 1271 nm 的光线由左侧的波导 B 射出,而波长为 1291 nm 的光线由右侧的波导 C 射出,由透射谱计算得到两种波长的带宽均为 4 nm,实现了解波分复用功能。

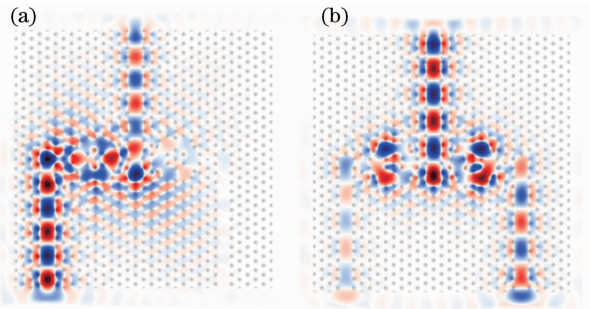


图 10  $E_z$  电场分布图。(a)  $a/\lambda = 0.3180$ ;

(b)  $a/\lambda = 0.3125$

Fig. 10 Cross sections of  $E_z$  field. (a)  $a/\lambda = 0.3180$ ;

(b)  $a/\lambda = 0.3125$

## 4 结 论

通过结合光子晶体波导、环形腔及点缺陷微腔设计了一种双通道解波分复用器。通过平面波展开法和时域有限差分法仿真模拟实现了波长分别为 1271 nm 和 1291 nm 两种光波的解波分复用,工作波长带宽为 4 nm。采用 6 个额外的介质柱,提高了环形腔的透射率;并通过在入射波导的入射口处增加三对介质柱,提高了波导的出射效率,从整体上提高了双通道解波分复用器的输出效率。波导耦合解波分复用器需要较长的耦合区域,所以体积无法做



得更小。与其相比,所设计的器件具有更小的体积。与基于点微腔的解波分复用器相比,所设计的器件具有更高的效率,并具有较好的 4 nm 工作波长带宽。此种结构的器件在未来的光集成回路及光学器件制造方面具有一定的意义。

### 参 考 文 献

- 1 E. Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 2 S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 3 F. Cuesta-Soto, A. Martínez, J. García *et al.*. All-optical switching structure based on a photonic crystal directional coupler [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(1): 161~167
- 4 Song Litao, He Jie, Wang Hualei *et al.*. Optical performance of photonic crystal filter with liquid crystal layer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2834~2837  
宋立涛, 何杰, 王华磊等. 液晶缺陷光子晶体滤波器的光学特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2834~2837
- 5 Cui Naidi, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu *et al.*. Photonic crystal single channel side-coupled waveguide with parallel resonators[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0223001  
崔乃迪, 梁静秋, 梁中翥等. 并联谐振腔光子晶体单通道侧面耦合波导[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0223001
- 6 Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song *et al.*. High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal [J]. *Nature*, 2003, **425**(6961): 944~947
- 7 Li Zhiyuan, Gan Lin. Two-dimensional silicon photonic crystal slab devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900119  
李志远, 甘霖. 二维硅基平板光子晶体器件[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900119
- 8 A. Sharkawy, S. Shi, D. W. Pratrher. Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(14): 2247~2252
- 9 B. S. Song, T. Nagashima, T. Asano *et al.*. Resonant-wavelength tuning of a nanocavity by subnanometer control of a two-dimensional silicon-based photonic crystal slab structure[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(26): 4899~4903
- 10 Wen Ke, Wang Rong, Wang Jingyuan *et al.*. A novel wavelength-division demultiplexer based on hybrid photonic crystal fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1088~1091  
文科, 王荣, 汪井源等. 基于混合导光型光子晶体光纤的波分解复用器研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1088~1091
- 11 C. W. Kuo, C. F. Chang, M. H. Chen *et al.*. A new approach of planar multi-channel wavelength division multiplexing system using asymmetric super-cell photonic crystal structures[J]. *Opt. Express*, 2006, **15**(1): 198~206
- 12 H. Takano, B. S. Song, T. Asano *et al.*. Highly efficient multi-channel drop filter in a two-dimensional hetero photonic crystal[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3491~3496
- 13 J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn *et al.*. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*[M]. New Jersey: Princeton University Press, 2008. 86~89
- 14 Y. Wu, J. Lee, T. Shih *et al.*. A high quality factor filter based on quasi-ring resonator design in two-dimensional photonic crystal [C]. Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition and Conference, 2008. SuD2
- 15 F. S. Chien, Y. Hsu, W. Hsieh *et al.*. Dual wavelength demultiplexing by coupling and decoupling of photonic crystal waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(6): 1119~1125
- 16 Y. D. Wu, K. W. Hsu, T. T. Shih. 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

栏目编辑: 王晓球