

一种双反射壁型二维光子晶体窄带滤波器

庄煜阳 周雯 季珂 陈鹤鸣

A narrow bandpass filter based on two-dimensional photonic crystals with two reflectors

Zhuang Yu-Yang Zhou Wen Ji Ke Chen He-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 224202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.224202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I22>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

阿基米德螺旋微纳结构中的表面等离激元聚焦

Focusing surface plasmon polaritons in archimedes' spiral nanostructure

物理学报.2015, 64(19): 194201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194201>

电磁波在大面积等离子体片中传播特性的分析

Analysis of propagation properties of electromagnetic waves through large planar plasma sheets

物理学报.2015, 64(19): 194202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194202>

用四台阶相位板产生涡旋光束

Generation of vortex beams by the four-step phase plates

物理学报.2015, 64(18): 184202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184202>

(1+2)维各向同性介质中的旋转椭圆空间光孤子

(1+2) dimensional spiraling elliptic spatial optical solitons in the media without anisotropy

物理学报.2015, 64(15): 154202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154202>

平面金属等离激元材料对光学 Tamm 态及相关激射行为的增强作用

Optical Tamm state and related lasing effect enhanced by planar plasmonic metamaterials

物理学报.2015, 64(11): 114202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114202>

## 一种双反射壁型二维光子晶体窄带滤波器\*

庄煜阳<sup>1)</sup> 周雯<sup>1)</sup> 季珂<sup>1)</sup> 陈鹤鸣<sup>2)†</sup>

1)(南京邮电大学光电工程学院, 南京 210023)

2)(南京邮电大学贝尔英才学院, 南京 210023)

(2015年5月22日收到; 2015年7月5日收到修改稿)

提出了一种基于双反射壁型结构的光子晶体窄带滤波器, 该滤波器由一个单模谐振腔和两个反射壁构成. 通过调节谐振腔与反射壁之间的距离可以改变滤波谱线的带宽. 利用时域有限差分法进行仿真分析, 结果表明, 该滤波器的工作频率在 193.40 THz 附近, 带宽小于 5.9 GHz, 峰值透射率高达 94%, 工作区域长度仅有 9  $\mu\text{m}$ . 该器件可应用于密集波分复用系统.

关键词: 光子晶体, 窄带滤波器, 谐振腔, 反射壁

PACS: 42.25.Bs, 42.60.Da, 42.70.Qs, 42.79.Ci

DOI: 10.7498/aps.64.224202

## 1 引言

光子晶体具有光子禁带和光子局域特性. 基于这两个特性, 目前已经研制了多种二维光子晶体光学器件, 包括光开关<sup>[1-3]</sup>、分束器<sup>[4-6]</sup>、分插复用器<sup>[7-9]</sup>和光学滤波器<sup>[10]</sup>等. 其中, 光学滤波器作为密集波分复用(DWDM)光通信系统中的关键器件而受到广泛关注. 常见的二维光子晶体滤波器采用环形腔结构, 如文献<sup>[11, 12]</sup>提出的一种可调制的环形腔滤波器, 通过在环形腔中增加散射介质柱可以使光波的透射率达到90%以上, 但缺点是滤波谱线的带宽较宽且滤波谱线的形状是不规则的. 另一类滤波器采用的是微腔结构, 如余建立等<sup>[13]</sup>设计的一种多信道滤波器, 其具有多路下载的功能且下载效率均在91%以上, 但其信道间隔约为20 nm, 仅适用于粗波分复用系统; 又如Dai等<sup>[14]</sup>设计的一种中心频率为1 THz、带宽为4 GHz的三阶切比雪夫滤波器, 它由三个微腔组合构成, 虽然其峰值透射率很高且谱线形状很好, 但同样存在着带宽较宽的问题, 故仅适用于粗波分复用系统. 为了解决带宽问题, 陈超等<sup>[15]</sup>提出了一种二维光子晶

体相移波导光栅滤波器, 通过在波导光栅中引入相移产生透射带, 可以适用于信道间隔为100 GHz的DWDM光通信系统. 但是为了使得滤波谱线带宽变窄, 该滤波器结构需要增加光栅的周期数, 器件的长度高达134  $\mu\text{m}$ , 这不仅增加了工艺难度而且不利于光学集成.

本文提出了一种基于双反射壁型结构的二维光子晶体窄带滤波器, 它由一个单模谐振腔和两个反射壁构成. 通过调节谐振腔与两个反射壁之间的距离就可以控制滤波器的带宽, 从而实现窄带甚至超窄带滤波功能. 本文设计的滤波器频率范围在193.40 THz附近, 带宽小于5.9 GHz, 峰值透射率高达94%, 工作区域的长度仅为9  $\mu\text{m}$ , 结构简单紧凑, 易于集成, 因此在光集成领域和DWDM光通信系统中有着巨大的应用潜力.

## 2 理论模型与分析

本文提出的双反射壁型滤波理论模型如图1所示, 基于耦合模理论(CMT)对其传输特性进行分析. 其中,  $S_{+i}$ 表示输入波幅值,  $S_{-i}$ 表示输

\* 国家自然科学基金(批准号: 61077084, 61571237)和江苏省研究生科研创新计划(批准号: KYLX15\_0835)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [chhm@njupt.edu.cn](mailto:chhm@njupt.edu.cn)

出波幅值;  $\gamma_i$  表示谐振腔与波导耦合产生损耗时的幅值衰减系数;  $\phi_i$  为单程相位延迟. 假设单模谐振腔的谐振频率为  $\omega_0$ , 谐振模振幅为  $a$ . 由于结构具有对称性, 令  $\gamma_i = \gamma (i = 1, 2, 3, 4)$ , 则谐振模振幅的时域变化可以表示为

$$\frac{da}{dt} = i\omega_0 a - 4\gamma a + \sqrt{2\gamma}(S_{+1} + S_{+2} + S_{+3} + S_{+4}). \quad (1)$$

根据功率守恒和时间反转对称性, 得出输入波和输出波幅值之间的关系为

$$S_{+3} = S_{-3} e^{2i\phi_1}, \quad (2)$$

$$S_{+4} = S_{-4} e^{2i\phi_2}, \quad (3)$$

$$S_{-3} = S_{+1} - \sqrt{2\gamma}a, \quad (4)$$

$$S_{-4} = S_{+2} - \sqrt{2\gamma}a, \quad (5)$$

$$S_{-2} = S_{+4} - \sqrt{2\gamma}a. \quad (6)$$

当输入波只有  $S_{+1}$  ( $S_{+2} = 0$ ) 时, 联立 (1)–(6) 式可得透射率

$$T(\omega) = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{4\gamma^2 (1 + e^{2i\phi_1})^2 (1 + e^{2i\phi_2})^2}{(\omega - \omega_0)^2 + 4\gamma^2 (2 + e^{2i\phi_1} + e^{2i\phi_2})^2}. \quad (7)$$

由 (7) 式可得,  $\phi_1, \phi_2$  的周期为  $\pi$ , 若固定  $\gamma$  不变, 当  $\phi_1 = m\pi \pm \Delta\phi, \phi_2 = n\pi \mp \Delta\phi$  ( $m, n$  为正整数),  $0 \leq \Delta\phi < \pi/2$  时, 透射率  $T(\omega)$  与  $\Delta\phi$  的关系如图 2(a) 所示. 从图 2(a) 可以看出, 在  $\omega = \omega_0$  处谱线峰值为 1, 且随着  $\Delta\phi$  逐渐增大, 谱线带宽逐渐变窄并且中心频率不会发生变化. 而当  $\Delta\phi = \pi/2$  时, 透射系数  $T(\omega)$  为 0. 这一特性可以应用于窄带甚至是超窄带滤波. 由于实际的制造工艺过程难免会产生误差, 这将影响谐振腔与反射壁之间的相位, 所以接下来讨论该滤波器结构的相位敏感度. 当  $\omega = \omega_0$  时, 如 (7) 式所示,  $T(\omega_0)$  的大小与  $\gamma$  无关, 仅与  $\phi_1$  和  $\phi_2$  有关. 若固定  $\phi_1$  不变,  $\phi_2$  引入微扰量  $\delta$ , 不妨令  $\phi_1 = m\pi + \Delta\phi, \phi_2 = n\pi - \Delta\phi + \delta$  ( $m, n$  为正整数), 其中,  $0 \leq \Delta\phi < \pi/2, -\pi \leq \delta \leq \pi$ . 当  $\delta$  发生变化时, 滤波谱线中心频率  $\omega_0$  处的峰值大小随之发生变化, 如图 2(b) 所示. 从图 2(b) 可以看出,  $\Delta\phi$  越大, 滤波谱线的峰值大小变化越敏感, 即相位敏感度增加. 这意味着在实现窄带滤波时, 谐振腔与两个反射壁之间的相位变化需要精确控制, 否则峰值透射率会有较大的衰减. 一般情况下, 通

过调节波导两侧的介质柱半径大小可以实现对相位控制, 且现代工艺的精度对滤波谱线峰值透射率的大小会产生影响.

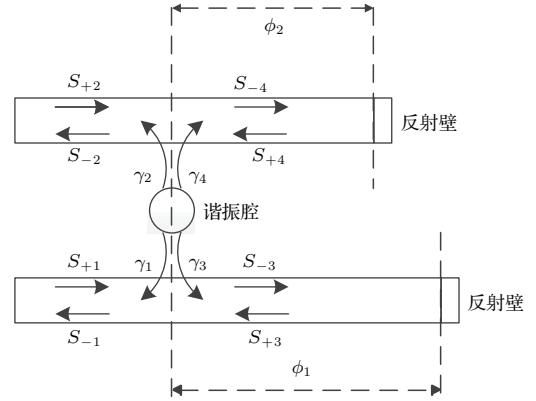


图1 双反射壁型滤波结构理论模型

Fig. 1. Theoretical model of the filter with two reflectors.

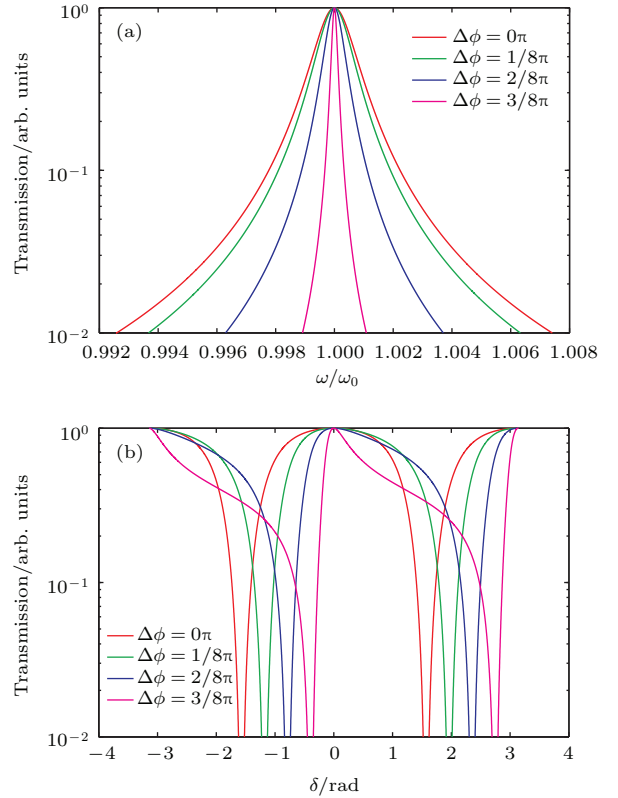


图2 (网刊彩色)(a) 理论模型透射光强谱线; (b) 峰值的相位敏感度曲线

Fig. 2. (color online) (a) Transmission spectrum of theoretical model; (b) phase sensitivity curves of the peak.

### 3 结构与仿真分析

本文设计了一种基于双反射壁型结构的二维光子晶体带通滤波器, 如图 3(a) 所示. 它是一种由

圆柱形介质柱按正方晶格排列、沿二维平面周期性分布的光子晶体结构, 介质柱材料为硅(折射率为3.4), 背景材料为空气(折射率为1). 晶格常数  $a = 0.6 \mu\text{m}$ , 介质柱半径  $r = 0.1 \mu\text{m}$ . 激励光源为高斯脉冲, 放置在端口 A; 探测器放置在端口 B, 采用时域有限差分法仿真分析该滤波器的传输性能.

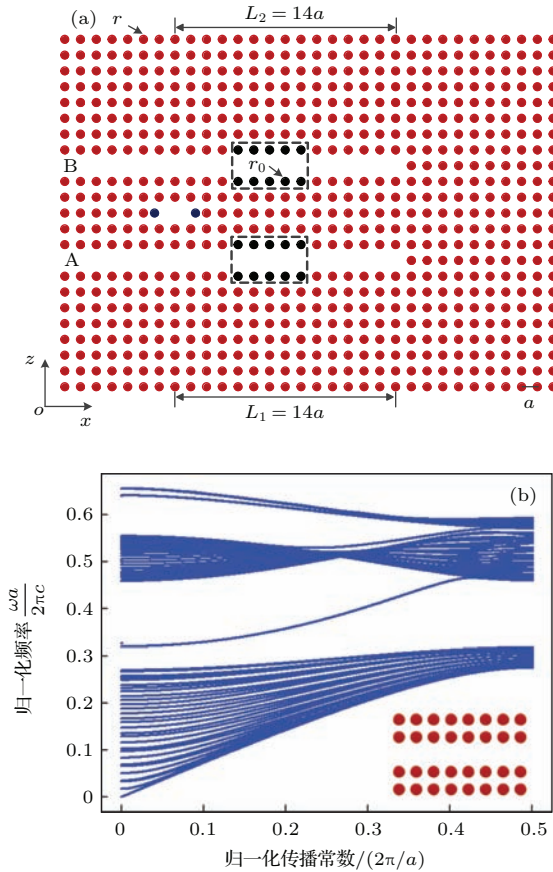


图3 (网刊彩色) (a) 双反射壁型滤波器结构; (b) 线缺陷波导色散曲线  
Fig. 3. (color online) (a) Structure of the filter with two reflectors; (b) dispersion curves of line defect waveguide.

在光子晶体中移除两排介质柱形成两条线缺陷波导, 其色散曲线如图3(b)所示. 从图3(b)可以看出, 归一化频率  $\omega a / (2\pi c)$  范围在 0.32056—0.45549 中的横磁波能够在线缺陷波导中传输. 在波导一侧挖去一个介质柱从而形成单模谐振腔, 将谐振腔水平方向两侧的介质柱同时向外平移  $0.0261 \mu\text{m}$ , 此时谐振腔的谐振频率为 193.40 THz, 其归一化传播常数为 0.26757 ( $2\pi/a$ ). 图3(a)虚线框部分为相位调整区, 该区域中波导两侧介质柱的半径  $r_0 = 0.1025 \mu\text{m}$ , 用于微调相位参数.

图3(a)所示结构中谐振腔与两反射壁之间的距离均为 14 个晶格常数, 单程相位变化为  $\pi$  的

整数倍, 对应第二部分所述  $\Delta\phi = 0$  的情况. 该结构滤波谱线的带宽约为 290 GHz, 峰值透射率高达 98%, 并且理论曲线和仿真曲线相互重合得很好, 如图4(a)所示. 倘若保持其他参数不变, 仅改变图3(a)结构中谐振腔与两个反射壁之间的距离, 令  $L_1 = 14a + \Delta L$ ,  $L_2 = 14a - \Delta L$ . 当  $\Delta L = 1a$ , 即  $L_1 = 15a$ ,  $L_2 = 13a$  时, 在 193.40 THz 的相位变化  $\Delta\phi = \beta\Delta L = 0.53514\pi$ . 考虑到相位变化在  $0 \leq \Delta\phi < \pi/2$  范围, 则  $\Delta\phi = \pi - 0.53514\pi = 0.46486\pi$ . 结构优化后的滤波谱线如图4(b)所示, 优化后的峰值透射率为 94%, 相比于图3(a)所示结构其透射率有所减少, 这是由相位敏感度增加所导致的. 若要进一步提高透射率, 可以对相位调整区波导两侧介质柱半径进行精度更微小的调整, 这就相应地提高了对工艺水平的要求. 结构优化后的理论曲线和仿真曲线之间的重合效果之所以会变差, 是因为在理论模型的推导过程中近似认为中心频

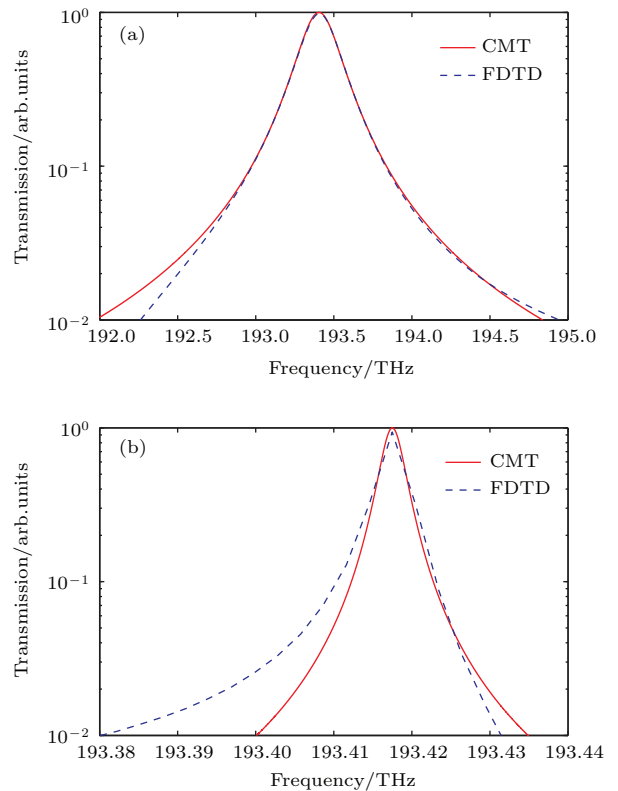


图4 (网刊彩色) 滤波谱线图 (a)  $L_1 = 14a$ ,  $L_2 = 14a$ , 对应  $\Delta\phi = 0$  的情况; (b)  $L_1 = 15a$ ,  $L_2 = 13a$ , 对应  $\Delta\phi = 0.46486\pi$  的情况

Fig. 4. (color online) Transmission spectrum of the filter: (a)  $L_1 = 14a$ ,  $L_2 = 14a$ , corresponding to  $\Delta\phi = 0$ ; (b)  $L_1 = 15a$ ,  $L_2 = 13a$ , corresponding to  $\Delta\phi = 0.46486\pi$ .

率附近的光波在波导中的传播常数是相等的, 而事实上, 随着频率的增大, 光波的传播常数随之增大, 这就使得滤波谱线中心频率的左侧低频处变化较缓慢而右侧高频处变化较快, 这一特性在相位敏感度较大时就会凸显出来. 设计时只需考虑中心频率所对应的相位, 从而使得中心频率处的透射率达到最大. 而附近频率的相位差必然会使得透射谱线的对称性有所破坏, 但这并不会影响透射谱中心频率的位置及其峰值大小. 另外还可以发现, 虽然透射率相对来说减小了, 但优化后带宽变得极窄, 小于 5.9 GHz, 这充分体现了双反射壁结构的窄带滤波特性.

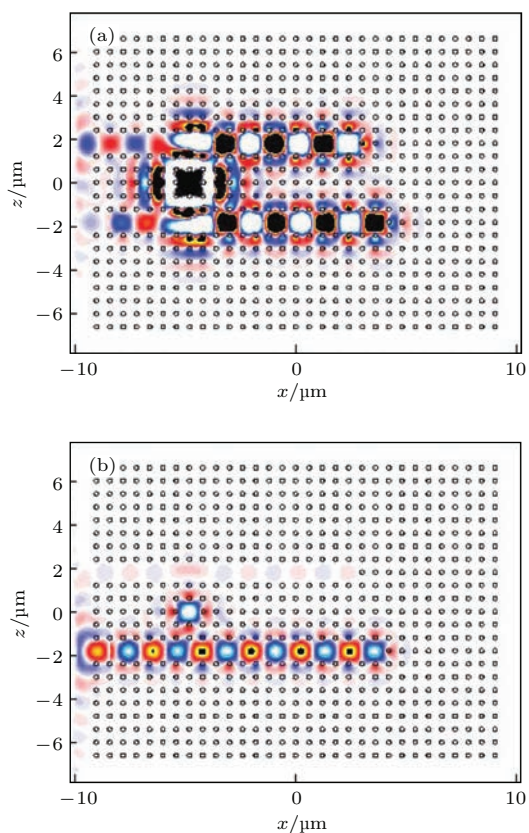


图5 (网刊彩色)  $L_1 = 15a$ ,  $L_2 = 13a$  情况下, (a) 193.417 THz 光波入射时的稳态场分布以及 (b) 193.367 THz 光波入射时的稳态场分布

Fig. 5. (color online) In the case of  $L_1 = 15a$ ,  $L_2 = 13a$ , panels (a) and (b) are the steady state field distribution at 193.417 THz and 193.367 THz, respectively.

图5给出了在  $L_1 = 15a$ ,  $L_2 = 13a$  情况下频率为 193.417 THz 和 193.367 THz 的光波入射时的稳态场分布. 可以看出, 193.417 THz 的光波从端口 A 处入射, 绝大部分能量都能从端口 B 出射, 而 193.367 THz 的光波绝大部分能量都被反射回入射端口 A. 两频率之间的信道间隔为 50 GHz, 这说

明该滤波器结构可以适用于信道间隔为 50 GHz 的 DWDM 通信系统. 另外, 器件的实际有效工作区域是在谐振腔与反射壁之间, 长度仅为 15 个晶格常数 ( $9 \mu\text{m}$ ), 体现了结构紧凑的特点. 倘若对结构参数进行优化和微调, 其工作区域仍有进一步缩短的空间且滤波谱线带宽可以进一步变窄, 甚至可以实现超窄带通滤波的功能.

## 4 结 论

本文提出了一种基于双反射壁型结构的二维光子晶体窄带滤波器. 研究发现, 通过调节滤波器结构中的两个相位参数, 可以对其滤波谱线的带宽进行控制, 从而实现窄带滤波. 本文设计的二维光子晶体窄带通滤波器具有传输性能优越、结构紧凑的特点, 可用于信道间隔为 50 GHz 的 DWDM 通信系统, 在未来光集成领域中有着重重要的应用价值.

## 参考文献

- [1] Zhao Y H, Qian C J, Qiu K S, Gao Y N, Xu X L 2015 *Opt. Express* **23** 9211
- [2] Chen H M, Wang G D 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0323006 (in Chinese) [陈鹤鸣, 王国栋 2011 光学学报 **31** 0323006]
- [3] Li Z J, Zhang Y, Li B J 2006 *Opt. Express* **14** 3887
- [4] Zhou X P, Shu J 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0423002 (in Chinese) [周兴平, 疏静 2013 光学学报 **33** 0423002]
- [5] Sesay M, Jin X, Ouyang Z B 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 2043
- [6] Ren H L, Qin Y L, Liu K, Wu Z F, Hu W S, Jiang C, Jin Y H 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 749
- [7] Ren H L, Qin Y L, Wen H, Cao Q J, Guo S Q, Chang L P, Hu W S, Jiang C, Jin Y H 2012 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **24** 332
- [8] Fasihi K, Mohammadnejad S 2009 *Opt. Express* **17** 8983
- [9] Wu Y D, Hsu K W, Shih T T, Lee J J 2009 *J. Opt. Soc. Am. B* **26** 640
- [10] Chen H M, Meng Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014202 (in Chinese) [陈鹤鸣, 孟晴 2011 物理学报 **60** 014202]
- [11] Yang C Y, Xu X M, Ye T, Miu L P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 017807 (in Chinese) [杨春云, 徐旭明, 叶涛, 缪路平 2011 物理学报 **60** 017807]
- [12] Chen Y, Wang W Y, Yu N 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 034205 (in Chinese) [陈颖, 王文跃, 于娜 2014 物理学报 **63** 034205]
- [13] Yu J L, Shen H J, Ye S, Hong Q S 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 1106003 (in Chinese) [余建立, 沈宏君, 叶松, 洪求三 2012 光学学报 **32** 1106003]
- [14] Dai Z X, Wang J L, Heng Y 2011 *Opt. Express* **19** 3667
- [15] Chen C, Li X C, Li H H, Xu K, Wu J, Lin J T 2007 *Opt. Express* **15** 11278

# A narrow bandpass filter based on two-dimensional photonic crystals with two reflectors\*

Zhuang Yu-Yang<sup>1)</sup> Zhou Wen<sup>1)</sup> Ji Ke<sup>1)</sup> Chen He-Ming<sup>2)†</sup>

1) (School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

2) (Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

( Received 22 May 2015; revised manuscript received 5 July 2015 )

## Abstract

With the rapid development of wavelength division multiplexing technology, narrow bandpass filters have drawn widespread public attention. In this paper, a compact narrow bandpass filter based on two-dimensional photonic crystals is proposed. The transfer characteristics of the filter with a single mode resonator and two reflectors are analyzed by using coupled mode theory. Research results show that the bandwidth of the filter can be controlled by adjusting the distance between the resonator and the two reflectors, which can be applied to the realization of narrow bandpass filters, and even ultra-narrow bandpass filters. Based on the theoretical model mentioned above, we design a narrow bandpass filter based on two-dimensional photonic crystals, which is composed of silicon rods with square lattice in air. Two single mode waveguides are formed by removing two rows of rods. Meanwhile, a point cavity is formed by removing a dielectric column. In order to precisely control the phase change between the resonator and the two reflectors, a phase adjustment region is introduced. We study the transmission spectrum of the structure by the finite-difference time-domain (FDTD) method. We find that the bandwidth of the filter can be narrowed when the phase change between the resonator and the two reflectors satisfies the specific conditions, and the transmission ratio is still high as well. These are consistent with the theoretical analyses. But it is worth noting that there is a difference between the simulation result and theoretical result. This is because in the theoretical analysis, we consider that the propagation constants of the frequencies close to the central frequency are the same. In fact, the propagation constant increases with the increase of frequency, however, this does not affect the central frequency nor its transmission. The performance of the designed filter is analyzed by FDTD, showing that the working frequency is close to 193.40 THz, the bandwidth is smaller than 5.9 GHz, the peak transmittance is up to 94%, and the length of the working area is only 9  $\mu\text{m}$ . Compared with the conventional photonic crystal filters, the designed narrow bandpass filter is very compact, and the performance is suitable for dense wavelength division multiplexed communication systems.

**Keywords:** photonic crystals, narrow bandpass filter, resonator, reflector

**PACS:** 42.25.Bs, 42.60.Da, 42.70.Qs, 42.79.Ci

**DOI:** 10.7498/aps.64.224202

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61077084, 61571237) and the Colleges and Universities in Jiangsu Province Plans to Graduate Research and Innovation, China (Grant No. KYLX15\_0835).

† Corresponding author. E-mail: [chhm@njupt.edu.cn](mailto:chhm@njupt.edu.cn)