

文章编号 1004-924X(2007)08-1208-07

带反射回馈的高效光子晶体多路滤波器件

吴 斌,王庆康

(上海交通大学 微纳科学技术研究院 微米/纳米加工技术国家重点实验室,
薄膜与微细技术教育部重点实验室,上海 200030)

摘要:光子晶体制备的滤波器件在光通信中有巨大应用潜力,但普通的基于2D光子晶体的多分路滤波器因为抽取效率不够高,无法达到实用化的要求。本文通过给上述滤波器加入新结构,提出了性能更好的分路滤波器模型。具体的改进结构有两种:一种是在主波导末端放置一个反射微腔,另一种是在主波导两侧放置多个反射微腔。通过时域有限差分(FDTD)法对光波在这两种结构中的传播进行了模拟分析,并绘出了光波能量传播示意图。结果表明,该结构可以明显地减少光波损耗,提高抽取效率。这两种结构器件的理论抽取效率达到了60%~90%,大大高于普通结构的30%~40%的水平。这也说明了反射微腔的新颖结构对改进光子晶体滤波器的重要作用。

关键词:光子晶体;多分路滤波器;反射微腔;时域有限差分法

中图分类号:O734;TN713 **文献标识码:**A

Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters with reflection feedback

WU Bin, WANG Qing-kang

(National Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Key Laboratory for Thin Film and Microfabrication of the Ministry of Education, Institute of Micro and Nano Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Photonic crystal filters have great potential of application in optical communication but a common 2D photonic crystal-based multichannel drop filter is hard to be put into application because the drop efficiency is not high enough. In this paper, we propose two kinds of novel drop filters by putting new structure into common model. One of the novel improved configurations has reflection micro-cavities in the end of waveguide, the other has reflection micro-cavities in two sides of bus waveguide. By analyzing the propagation of light-waves in these structures with finite difference time domain(FDTD) method and giving the schematic diagram of wave propagation, it can be proved that the two novel configurations have capability to decrease the light loss and increase the drop efficiency, obviously. The drop efficiency of the novel filters can achieve 60%~90% theoretically, which is much higher than the level of common filters in drop efficiency of 30%~40%. It is also shows that reflection micro-cavities have great effect on the improvement of the photonic crystal-based filters.

收稿日期:2006-09-28;修订日期:2007-03-21.

基金项目:上海市2005年度纳米科学专项基金资助项目(No.0452nm056)

Key words: photonic crystal; multichannel drop filter; reflection micro-cavity; finite difference time domain (FDTD) method

1 引 言

自 Yablonovitch^[1] 和 John^[2] 于 1987 年提出光子晶体的概念以来,光子晶体的研究吸引了许多学者。光子晶体(PCs)和光子禁带(PBG)结构使控制电介质中的光子流动有了可能,而控制光子的主要方法就是在光子晶体中引入缺陷。由点缺陷构成的微腔和共振器以及由线缺陷构成的波导是目前研究的重点。因为这两种结构的组合可以在一个很小的尺度下实现对光子的控制,是未来超小光学器件和全光回路(PICs)的最关键部分。而在这其中,利用微腔点缺陷模和波导线缺陷模的共振实现分路滤波的结构因为在波分复用(WDM)光通信系统中的巨大应用潜力而倍受关注。

目前,基于 2D 光子晶体(2D PCs)的分路滤波结构已经出现了很多种,主要可分为两大类。第一类是 4 端口结构^[3-4]。这类是在两个平行波导之间放置共振器来实现光子的共振隧穿,主波导中满足特定频率条件的波从平行的副波导一端出来。为取得高效率,这种结构需要共振器满足在不同均衡条件下的两个退化模,从而使设计变得非常困难。第二类是 3 端口结构^[5-6]。这类结构是在主波导的一侧放置共振器。通过和主波导的共振使得满足条件的光子陷入其中,再从垂直方向发散出来。这类结构的设计比第一类简单,而且通过改变微腔共振器的尺度得到不同的共振频率,能实现多分路的滤波,因而实用性更强。然而,3 端口结构因为共振微腔中的不少能量会返回到主波导中,因此分波的抽取效率总是不高。这种情况下,应用反射器使得漏过的处于被抽取频率的波再次折回被二次抽取是提高效率的极佳途径^[7-11]。对于这种结构的器件,目前的研究大多在单分路的理论上^[12]。

本文在近期关于单分路带反射微腔的 3 端口分路滤波器的理论分析基础上,设计了两种带反射微腔的 2D 光子晶体多分路滤波器。通过 2D 时域差分方法(2D-FDTD)的仿真计算表明,这

两种结构都有较高的提取效率,特别是后一种新颖结构,有着很好的应用价值。

2 结构设计和仿真方法

2.1 结构设计

普通的 2D 多分路光子晶体滤波器由多个典型的 3 端口结构组成,如图 1 所示^[13]。中间横向的是主波导,分路波导与它垂直。在主波导和分路波导之间,有符合一定条件的微腔点缺陷。通过点缺陷模和波导线缺陷模的共振,把主波导上各个特定频率的光子引入到各个微腔内,再散发到各自对应的分路波导上。本文的仿真中采用的多分路光子晶体滤波器基本模型是图 2 所示的 4 分路结构。两边各有两路分波波导,这样可以提高器件的集成度^[13]。

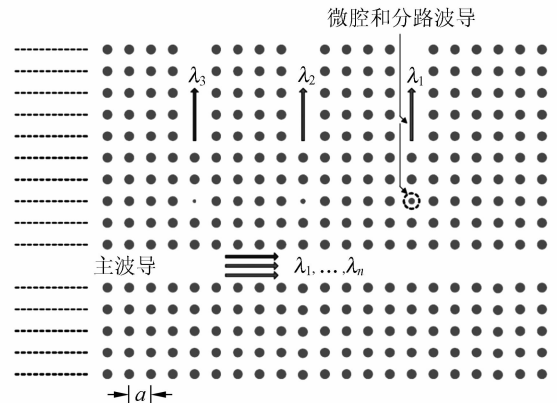


图 1 2 维多分路光子晶体滤波器原理图

Fig. 1 General structure of 2D Photonic crystal-based multichannel drop filters

通过对带反射微腔的 3 端口分路滤波器的理论分析,发现只要微腔的品质因数 Q 以及到两条波导的衰减率满足一定条件,通过反射主波导中剩余对应频率的光子,该结构的抽取效率理论上可以接近 100%。为此,本文尝试在普通的 2D 多分路光子晶体滤波器的基础上,加入反射微腔结构,设计了以下两种结构的高效多分路滤波器。

第一种是用光子晶体本身的结构堵住主波

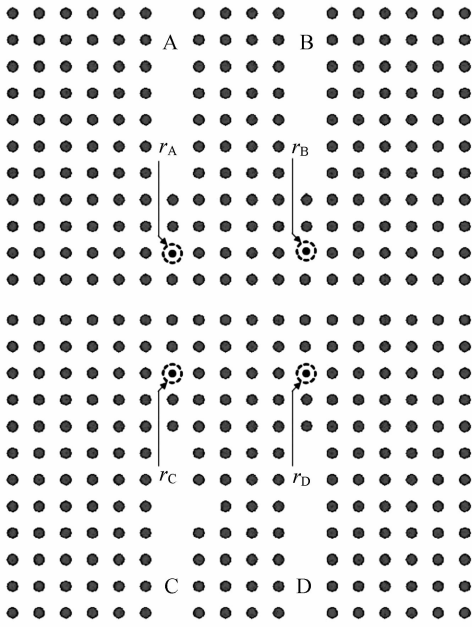
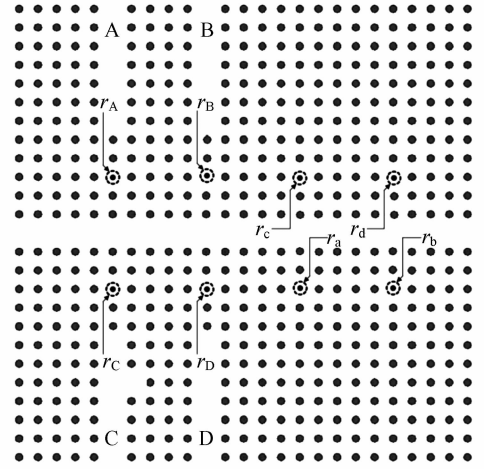


图 2 普通 2 维多分路光子晶体滤波器模型

Fig. 2 Model of common 2D Photonic crystal-based multichannel drop filter

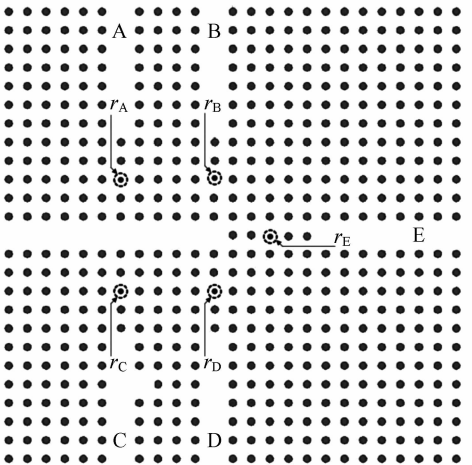


(b)放在主波导两侧的反射微腔结构

(b) Reflection micro-cavities located on two sides of bus waveguide

导,此种结构 Sangin Kim 等人也已经提出。这种情况下,由于主波导上传播的波直接遇到障碍,必然会强烈反射。它的改进型如图 3(a)所示,用一个反射微腔来堵住主波导,理想情况是它能反射特定的波,透过其他频率的波。

第二种是把点缺陷微腔放在波导的一侧,利用和主波导线缺陷的特定频率上的共振来实现反射,其结构如图 3(b)所示。经多次仿真,发现单一的微腔无法有效地实现反射多种频率的光子,



(a)放在主波导上的反射微腔结构

(a) Reflection micro-cavity located on bus waveguide

图 3 两种带反射结构的新型 2 维分路光子晶体滤波器模型

Fig. 3 Two models of novel 2D Photonic crystal-based multichannel drop filter with reflection feedback

为此,设置了多个微腔,每一个微腔对应一个特定频率的分路波导。

2.2 二维时域有限差分方法 (2D-FDTD)

光子晶体的理论研究问题,可以归结为光在光子晶体中的传播问题,于是可以由宏观麦克斯韦方程组来求解。光子晶体的麦克斯韦方程组为

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (2)$$

式中 $\epsilon(\mathbf{r})$ 是光子晶体的介电常量,它是空间坐标的函数;有关光子晶体理论计算的焦点问题是如何由已知的介电常量 ϵ 的分布求解上面的麦克斯韦方程组。

对于二维情况,TEM 波有两种偏振状态:TE 模(M 偏振)和 TM 模(E 偏振)。对于 TE 模, \mathbf{H} 分量与 z 轴平行,电磁分量分别是 $(E_x, E_y, 0)$, $(0, 0, H_z)$ 。代入式(1)、(2),得到 TE 模的麦克斯韦方程组:

$$\frac{\partial H_z}{\partial x} = \epsilon(\mathbf{r}) \frac{\partial E_y}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} = \epsilon(\mathbf{r}) \frac{\partial E_x}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t}. \quad (5)$$

对于 TM 模,可以得到与式(3)~(5)类似的方程。

用时域有限差分法求解上面麦克斯韦方程组的具体方法是:由数值色散关系和所关心的光波长来确定空间离散步长的大小,进而用此空间步长将所要研究的光子晶体沿坐标轴向方向分成很多 Yee 网格单元。之后,将在直角坐标系中展开的标量场分量方程组用二阶精度的数值差商代替微商,将连续的空间和时间问题离散化,得到标量场分量的差分方程组。

设 Δx 和 Δy 分别为 x 和 y 方向的空间步长, Δt 为时间步长,采用中心差分法,将式(3)~(5)离散化,即可以得到下面的 TE 模 2D-FDTD 方程^[14-15]:

$$E_x^{n+1}(i, j) = E_x^n(i, j) + \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2})}{\Delta y} \cdot \frac{\Delta t}{\epsilon(i, j)}, \quad (6)$$

$$E_y^{n+1}(i, j) = E_y^n(i, j) + \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2})}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta t}{\epsilon(i, j)}, \quad (7)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i, j) + \frac{E_x^n(i, j + \frac{1}{2}) - E_x^n(i, j - \frac{1}{2})}{\Delta y} \cdot \frac{\Delta t}{\mu} - \frac{E_y^n(i + \frac{1}{2}, j) - E_y^n(i - \frac{1}{2}, j)}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta t}{\mu}. \quad (8)$$

至于 TM 模的情况,和上面的 TE 模类似,只要把 H_z 、 E_x 、 E_y 换成 E_z 、 H_x 、 H_y 即可。

从公式(6)~(8)可以发现,只要知道在每一个离散格点上的介电常数以及电磁场的初始分布,就可以根据离散的 FDTD 时间步长公式获得电磁场的时间演化规律。

在吸收边界条件(ABC)的问题上,本文计算采用的是完全匹配层(PML)边界条件^[14-15]。

3 仿真结果和分析

为了计算上述两种结构的多路滤波器的抽取

效率相对于普通结构的提高程度,首先要建立统一的基本模型。对于本文要计算的 3 种光子晶体结构(图 2,3),统一确定为在空气中按正方晶格排列的圆型介质柱。设晶格常数为 420 nm,整个计算区域大小是 40 晶格 \times 40 晶格(模型图和后面的传播示意图都用 25 晶格 \times 25 晶格的小区域),边界设成 PML 吸收层。而介质柱的半径为 $0.2a$,介质柱材料设为 Si,对应的介电常数是 11.56。在 TE 偏振波的情况下,应用 FDTD 算法和 PML 边界条件,得到该晶格结构的能带图,如图 4 所示,可见,在归一化频率 0.29~0.42 的范围内是禁带。下面模拟计算设置的激励源的中心频率用 0.36,这样可以保证束缚在线波导内传播。

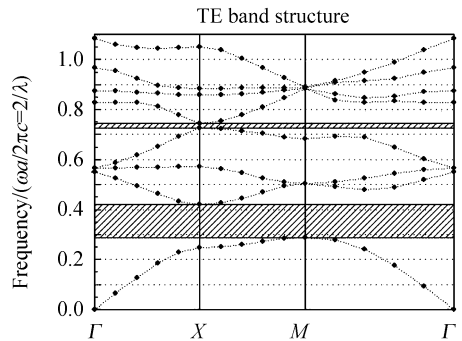


图 4 对应设置的 2D 光子晶体的能带图

Fig. 4 Band structure of 2D Photonic crystal corresponding to setting

先从图 2 所示的基本结构讨论分路滤波的方法和效率。对于图 2 中所示的 A、B、C、D 4 个分路,可以使用不同共振频率的点缺陷微腔来实现分路滤波。主要方法是改变图 2 中标出的 4 处介质柱的半径。此处距离主波导和分路波导各两个介质柱的距离,可以起到比较合适的导波作用。设图 2 中对应 4 个分路的作用点缺陷的介质柱半径分别是 r_A 、 r_B 、 r_C 、 r_D ,为了清晰地分离出 4 道不同频率的波,这 4 个半径需要很好地设计。经过综合考虑,以下的设置效果最佳: $r_A = 27$ nm, $r_B = 0$ nm, $r_C = 34$ nm, $r_D = 21$ nm,介电常数不变。用 FDTD 法对该结构进行仿真计算,并在 4 个分路上设置探测器,得到的透射谱如图 5 所示。其中 A、B、C、D 4 个不同颜色的透射峰就表示 4 个分路的透过率情况。

图 5 中,4 个分路的抽取效率都在 30%~40%左右,是普通 2D 多分路光子晶体滤波器的

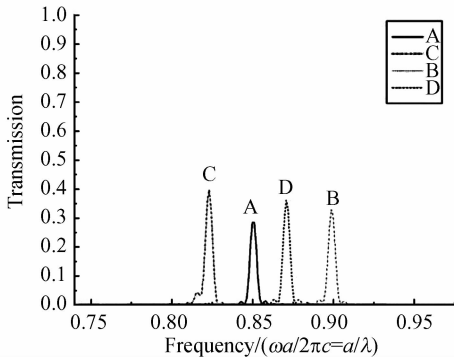


图 5 普通结构的 2D 多分路滤波器的透射谱

Fig. 5 Transmission spectrum of common 2D multi-channel drop filter

一般效率。显然,对于实用的 WDM 系统而言,这个效率是不够的,所以考虑用反射器来提高效率。首先计算如图 3(a)所示的模型,即在图 2 的基础上,将一个点缺陷微腔放在主波导上,堵住主波导,以此来反射主波导上没有抽取完的光波。设置图 3 中的 $r_E = 42 \text{ nm}$,介电常数不变,并把右侧原来主波导的部分也看成另外一个分路波导,这样计算得到的透射谱如图 6 所示。可以发现,

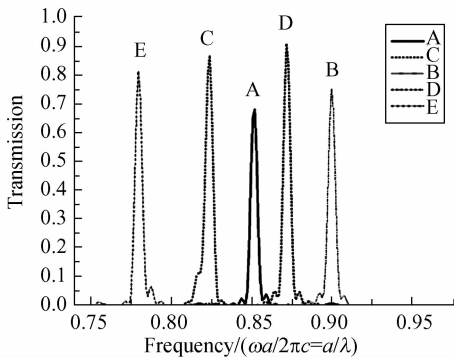


图 6 在主波导上设反射微腔的多路滤波器透射谱

Fig. 6 Transmission spectrum of the multichannel drop filters with reflection micro-cavity located on bus waveguide

新配置的反射结构明显提高了分路抽取的效率,4 个分路的抽取效率几乎都有了成倍的增长,其中 C、D 两路的效率甚至接近了 90%。图 7 是输入对应 A 分路频率的连续波得到的传播示意图,可以看到光波波能量被反射的情况。

图 3(a)所示的模型虽然提高了抽取效率,但它的缺点也非常明显。因为要在一个微腔上实现特定频率的波反射,特定频率的波滤过是不可能

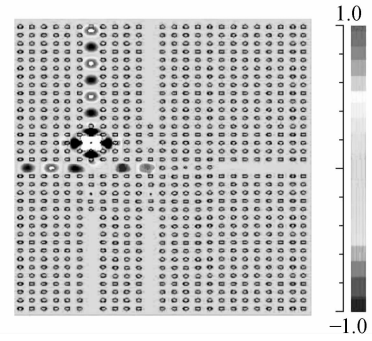


图 7 处于 A 分路共振频率的光波传播示意图-对应图 3(a)结构

Fig. 7 Schematic diagram of wave propagation at the resonance frequency ($\lambda = 1.173 \text{ nm}$) of drop filter at port A—corresponding to the structure of fig. 3(a)

的。这个结构其实直接阻挡了主波导上的光波,大量的能量直接反射回去。在未来的多分路 WDM 器件中,实用性较低。相比之下,图 3(b)所示的结构更有应用价值。利用位于侧面共振微腔来做反射,完全不妨碍主波导上光波的传播,可以更好地利用能量。先前有关于此种形式单路抽取模型的很多理论推导和模拟^[12],理论上可以达到 100% 的抽取效率。图 3(b)所示的模型则是第一次把这种结构从单路扩展到多路。

图 3(b)的具体设置就是在图 3(a)的基础上,加入了另外的 4 个点缺陷,同样是通过改变介质柱的半径。设这 4 个介质柱的半径分别为 r_a, r_b, r_c, r_d ,位置如图所示,它们的具体大小被定为 $r_a = r_A, r_b = r_B, r_c = r_C, r_d = r_D$ 。这样的设置可以引起满足理论值的共振,进而起到反射器的作用。其作用机理如下:对于信道 A,抽取相应频率范围的光波,先前传播在主波导上的能量先陷入 r_A 所在那个微腔,再发散到分路波导。而该频率范围没有被抽取掉的光波,则继续向前传播,当遇到 r_a 所在的微腔时,再次发生共振,将能量发散回来,再次抽取。同理可以分析 B、C、D 路。其实这是一个由抽取微腔和反射微腔组成的巧妙系统(因为这两个微腔可能有共振干扰,图中有意把它们分开设置在两侧)。对于这样的系统,只要包括微腔系统设计主要满足品质因数 Q 和相位差 ϕ 的要求,就可以达到很高的抽取效率。

先计算满足上面条件的 4 路抽取加 4 侧面反射器的模型,发现得到的透射谱不是很理想,这是

因为简单设计的微腔没有达到最佳性能。通过调节点缺陷周围上下各两个介质柱的大小来对微腔进行微调,可以让反射和抽取的统一效果更好。通过在最初半径大小 20% 之内的调整,其效率可以达到比较高的程度。计算得到透射谱如图 8 所

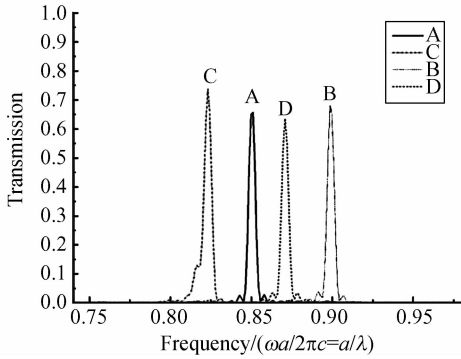


图 8 在主波导两侧设反射微腔的多路滤波器透射谱
Fig. 8 Transmission spectrum of the multichannel drop filter with reflection micro-cavity located on two sides of bus waveguide

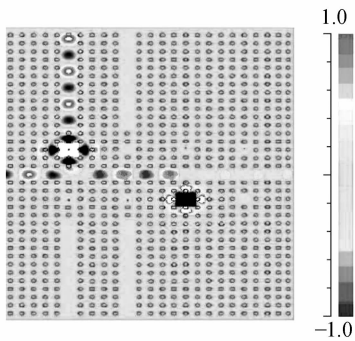


图 9 处于 A 分路共振频率的光波传播示意图-对应图 3(b) 结构

Fig. 9 Schematic diagram of wave propagation at the resonance frequency ($\lambda = 173 \text{ nm}$) of drop filter at port A—corresponding to the structure of Fig. 3(b)

示。图 9 是输入 A 分路对应频率的连续波得到的传播情况示意图,可以清楚看到反射微腔起到的作用。

从图 8 可以看出,图 3(b) 所示结构具有较高的抽取效率,在 65%~75% 之间。这个结果和先前文献报道中单信道结构近 100% 的效率^[12] 显然有差距,可能是微腔的设计不够精确,仍然需要不断调整和试验。另一个重要原因可能是反射微腔之间不可避免的干扰,使得从单路发展到多分路时效率下降。但不管怎么样,此种新结构的多分路滤波器确实有效地提高了抽取效率,并有很大的优化潜力。

4 结 论

在普通光子晶体多分路滤波器器件的基础上,设计了两种带有反射结构的多分路滤波器。一种是在主波导上直接阻挡式的,另一种是利用侧面共振微腔实现反射的新颖结构。用时域有限差分法(FDTD)和完全吸收层(PML)条件对两种结构的性能进行了仿真模拟,证实了加入反射器确实有效地提高了各个分路的抽取效率,达到 60% 以上。这两种结构可以考虑作为今后该类器件实用化的一种方向,特别是后一种新颖的结构,更具有不错的发展潜力。我们将进一步加强微腔的设计,研究抽取效率不如单分路情况的原因,以便给出更优化的模型。可以预见,这种基于光子晶体的新型滤波器经过优化后,将可以在诸多需要光学滤波的场合发挥作用,成为传统滤波器^[16-18] 的有力竞争者。

参考文献:

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58:2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(23):2486-2489.
- [3] FAN S, VILLENEUVE P R, JOANNOPOULOS J D, *et al.*. Channel drop filters in photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 1998, 3:4-11.
- [4] 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]. *Opt. Commun.*, 2004, 237: 59-63.

- [5] KEE C S, CHO D H, JUNG J H, *et al.*. Photonic crystal multichannel add/drop filters[C]. *Abstract Book of MRS 2003 Spring meeting, San Francisco, Calif.*, 2003: 64.
- [6] SHINYA A, NOTOMI M, MITSUGI S, *et al.*. Photonic crystal devices combining width tuned waveguides and cavities [C]. *Technical Digest of International Symposium on Photonic and Electronic Crystal Structures V, Kyoto, Japan*, 2004: 201.
- [7] JIN C, FAN S, HAN S, *et al.*. Reflectionless multichannel wavelength demultiplexer in a transmission resonator configuration [J]. *Journal of Quantum Electron.*, 2003, 39: 160-165.
- [8] SONG B S, NODA S, ASANO T. Photonic devices based on in-plane hetero photonic crystals [J]. *Science*, 2003, 300: 1537.
- [9] SONG B S, ASANO T, AKAHANE Y, *et al.*. Role of interfaces in hetero photonic crystals for manipulation of photons [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 71: 195101-1-195101-5.
- [10] AKAHANE Y, ASANO T, TAKANO H, *et al.*. Two-dimensional photonic-crystal-slab channel drop filter with flat-top response [J]. *Opt. Express*, 2005, 13: 2512-2530.
- [11] SHINYA A, MITSUGI A, KURAMOCHI E, *et al.*. Ultrasmall multichannel resonant-tunneling filter using mode gap of width-tuned photonic-crystal waveguide [J]. *Opt. Express*, 2005, 13: 4202-4209.
- [12] REN H L, JIANG C, HU W S, *et al.*. Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity [J]. *Opt. Express*, 2006, 14: 2446-2458.
- [13] SHARKAWY A, SHI S, PRATHER D W. Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals [J]. *Appl. opt.*, 2001, 40: 2247-2252.
- [14] 葛德彪, 闫玉敏. 电磁波时域有限差分方法 [M]. 西安, 西安电子科技大学出版社, 2001.
GE D B, YAN Y M. *Finite Difference Time Domain Method of Electromagnetic Wave* [M]. Xian: Xidian ph, 2001. (in Chinese)
- [15] 王秉中. 计算电磁学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
WANG B ZH. *Computational Electromagnetics* [M]. Beijing: Science press, 2002. (in Chinese)
- [16] 潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. 一种梯形干涉链可调谐光滤波器的设计与研究 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 627-632.
PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al.*. Design of tunable optical filter using ladder-interference-type structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 627-632. (in Chinese)
- [17] 鲁怀伟, 章宝歌, 李敏芝, 等. 基于双耦合器的平坦型全光纤波长交错滤波器 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2): 145-150.
LU H W, ZHANG B G, LI M ZH, *et al.*. All-fiber flat-top interleaver based on double single mode couplers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 145-150. (in Chinese)
- [18] 袁宏韬, 张贵彦. 一种日夜两用光学低通滤波器的研制 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 570-574.
YUAN H T, ZHANG G Y. Design and manufacture of a day and night optical low pass filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 570-574. (in Chinese)

作者简介: 吴斌 (1981-) 男, 浙江湖州人, 上海交通大学微纳科学技术研究院博士研究生, 主要研究方向为亚波长光学器件。E-mail: celeon733@hotmail.com