

一种新型高效光子晶体多信道下载滤波器的设计

余建立¹ 沈宏君² 叶松¹ 洪求三¹

(¹ 巢湖学院电子工程与电气自动化学院, 安徽 巢湖 238000)
² 宁夏大学物理系, 宁夏 银川 750021)

摘要 采用二维正方排列的光子晶体, 根据微腔缺陷模和波导模共振耦合原理, 设计了一种新型的多信道下载滤波器, 该滤波器通过主波导、90°弯波导和共振微腔的组合, 提高了各个信道下载波导的下载效率。利用二维时域有限差分法模拟了滤波器的传输特性, 并理论分析了影响下载效率的因素, 进一步对滤波器进行了优化, 使得各信道下载波导的下载效率均在 91% 以上。模拟结果表明该滤波器能有效地实现光波的分波下载, 传输谱信道波长间隔约为 20 nm, 中心波长误差为 ±2 nm, 传输谱的最大半宽度为 3.2 nm, 有良好的波长选择性, 证实了增大下载波导和共振微腔的耦合区域可以有效地提高滤波器的下载效率。

关键词 光子晶体; 多信道下载滤波器; 时域有限差分法; 微腔

中图分类号 TN929.1; TN713 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1106003

Design of Novel Highly Efficient Photonic Crystal Multi-Channel Drop Filter

Yu Jianli¹ Shen Hongjun² Ye Song¹ Hong Qiusan¹

(¹ *Electronic Engineering and Electrical Automation Institute, Chaohu College, Chaohu, Anhui 238000, China*
² *Department of Physics, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China*)

Abstract Based on the resonant coupling principle between the defect mode of micro-cavity and the waveguide mode, a new multi-channel drop filter is designed using the two-dimensional square lattice photonic crystal. The filter is composed of the bus waveguide, the 90° bend waveguide and the resonant micro-cavity. Every channel drop efficiency of the filter is enhanced greatly due to the perfect combination. The transmission characteristic of the filter is simulated with two-dimensional finite difference time domain method and theoretical analysis is performed in order to understand the important factors affecting the drop efficiency. The optimized device enhances the drop efficiency of every channel drop waveguide to over 91%. The simulation results show that the filter has the ability to download the light wave efficiently. The device has a good wavelength selection performance with the channel spacing of 20 nm, the center accordant less than ±2 nm and the maximal spectral half-width of 3.2 nm. It is demonstrated that the drop efficiency of the filter is improved greatly by increasing the coupling region between the download waveguide and the resonant micro-cavity.

Key words photonic crystal; multi-channel drop filter; finite difference time domain method; micro-cavity

OCIS codes 230.7408; 230.0250; 130.7408; 130.5296; 130.0250

1 引言

光波分复用(WDM)技术是全光光纤网络通信的常用技术,而信道下载滤波器是 WDM 技术中处理某个特定信道或者多个信道光信号的关键器件。

传统的滤波器由于器件的几何尺寸较大,不利于集成,难于满足日益发展的密集波分复用(DWDM)技术的要求。光子晶体是近年来提出的一种折射率呈空间周期性变化的新型人工微结构材料^[1],因其具

收稿日期: 2012-05-16; **收到修改稿日期**: 2012-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(61167002)、安徽省高校科学研究项目(KJ2012B115)和安徽巢湖学院博士科研启动基金资助课题。

作者简介: 余建立(1976—),男,硕士,副教授,主要从事光子晶体理论方面的研究。E-mail: yjlc@163.com

有控制光子运动的特征而得到广泛的应用。近十几年,光子晶体的研究热点之一是利用光子晶体设计有源或无源的光器件^[2~4],有望制作出可使用的光子晶体器件,特别是利用光子晶体点缺陷模和波导线缺陷模的共振实现分路下载滤波的研究甚为广泛^[4~13],主要集中于光在光子晶体中的传输性能和传输效率方面。Fan等^[5,6]利用光子晶体特性,设计了一个多信道下载滤波器,实现了光的滤波功能。Ren等^[7]利用光子晶体制作了一个三端口滤波器,实验与理论计算符合得很好,但效率较低且选择性差。为了提高光子晶体多信道下载滤波器的效率,Takano等^[8]利用光子晶体异质结作为反射体,设计了一个二维高效的多信道下载滤波器,大大提高了信道下载波导的下载效率,但品质因数相对较低。为了提高下载频谱的品质因数,Kuo等^[9]提出了利用非对称超胞微腔结构的WDM装置,但该装置下载效率最高只能达到90.82%。Wu等^[10]利用环形共振腔设计了一个多信道波分复用器,品质因素和下载效率均得到提高,但是环形腔结构相对复杂,不利于制作加工。

为了提高多信道下载滤波器的下载效率和波长选择性,本文采用硅介质圆柱在空气中正方排列的二维光子晶体,利用光子晶体微腔点缺陷模和波导模共振耦合原理,通过主波导、90°弯波导和共振微腔的巧妙组合,设计了一种新型的、高效的多信道下载滤波器,实现了对不同波长光波的分下载。运用二维时域有限差分(2D-FDTD)方法对设计的器件结构进行仿真模拟,并理论分析了影响滤波器下载效率的因素,进一步对器件进行了优化,大大提高了下载效率。所设计的器件结构简单,便于加工制作,且体积小,易于集成,能够满足WDM技术的要求。

2 结构模型和理论分析

2.1 结构模型

光子晶体滤波器的模型如图1所示,在完整光子晶体中,移除一排介质柱引入线缺陷形成直波导结构,直波导两端分别为入射端口A和出射端口B,在主波导的两侧引入点缺陷微腔(通过改变介质柱半径 r_d 实现)作为共振微腔和反射微腔,在共振微腔的下方引入具有90°弯的线波导作为下载波导,对应端口C为出射端口,这样设置下载波导可以增大共振微腔和下载波导之间的耦合区域,提高下载效率,且在下载波导的拐弯偏离 $a/2(a$ 为晶格

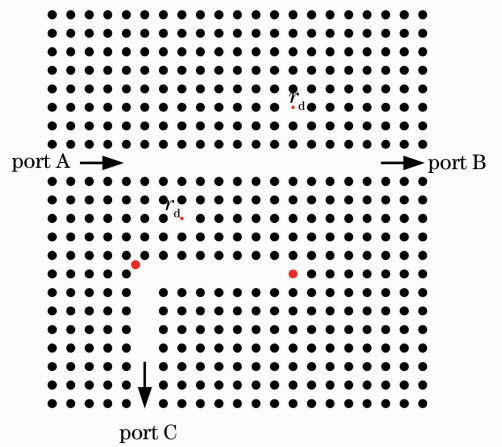


图1 结构模型

Fig. 1 Structure model

常数)距离处增加一个介质柱,增大反射以减小光波的能量损耗^[14],这样就形成了一个三端口的光子晶体下载滤波器模型。

2.2 理论分析

图1的仿真模型可以看作由三部分组成,分别为主波导、处于中心平面与反射平面的微腔和下载波导以及位于下载波导末端的反射壁,如图2所示。当从端口A输入光波波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ 的光波时,若波长为 λ_1 的光波与共振微腔的谐振波长一致,则谐振腔与两波导中的光波模式之间将产生强烈的耦合作用,而其他波长的光波与谐振腔的谐振波长不一致,将在主波导中直行,从端口B输出。

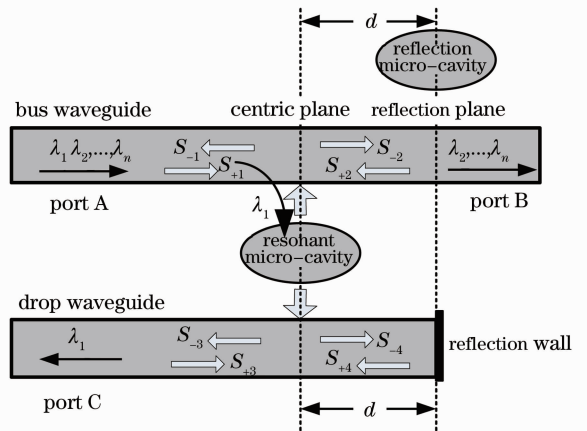


图2 仿真模型

Fig. 2 Simulation model

根据耦合模理论^[15],对于波长为 λ 的光波,在共振微腔中谐振模振幅 A 随时间的变化可表示为

$$\frac{dA}{dt} = \left(j \frac{2\pi}{\lambda} - \frac{1}{\tau_e} - \frac{1}{\tau_e} \right) A + K_1 S_{+1} + K_2 S_{+2} + K_3 S_{+3} + K_4 S_{+4}. \quad (1)$$

根据能量守恒定律,可以得到波导中入射(出射)波振幅和微腔中谐振模振幅间的关系为

$$S_{-1} = S_{+2} - K_2^* A, \quad (2)$$

$$S_{-2} = S_{+1} - K_1^* A, \quad (3)$$

$$S_{-3} = S_{+4} - K_4^* A, \quad (4)$$

$$S_{-4} = S_{+3} - K_3^* A, \quad (5)$$

式中 S_{+1} (S_{-1})、 S_{+2} (S_{-2})、 S_{+3} (S_{-3})、 S_{+4} (S_{-4}) 分别表示入射(出射)波的振幅, λ 为谐振波长, $1/\tau_e$ 和 $1/\tau_e'$ 分别为共振微腔内谐振模向主波导和下载波导的衰减速率, K_i^* ($i = 1, 2, 3, 4$) 是两波导中各传导模与谐振模耦合系数的共轭复数。

由于下载波导末端相当于反射壁,从而有 $S_{+4} = \exp(-j\phi)S_{-4}$,同时由于主波导和反射微腔组成一个边耦合系统,对于输入波有带阻反射作用,于是有 $S_{+2} = \exp(-j\phi)S_{-2}$,式中 ϕ 是由于波的折返及反射所造成的相位变化,与中心平面和反射平面间的距离 d 有关,即有 $\phi = 2d\beta_\lambda + \delta_\lambda$,其中 β_λ 是处于谐振波长 λ 的光波在波导中的传播常数, δ_λ 是光波在反射平面处的相位变化。

通过计算,在此系统中,波长为 λ 的光波从下载波导端口 C 输出的下载效率 D 和反射回主波导端口 A 的反射率 R 分别为

$$\begin{cases} D = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{1 + \exp(-j\phi)}{2} \right|^2, \\ R = \left| \frac{S_{-1}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{\exp(-j\phi) - 1}{2} \right|^2. \end{cases} \quad (6)$$

从(6)式可以看出,如果能满足 $\phi = 2\pi n$ (n 为整数),可以得到 $D = 1, R = 0$,即选择合适的共振微腔的中心平面和反射微腔、反射壁的反射平面间的距离 d ,理论上可以实现 λ 的完全下载。

2.3 模拟结果

在图 1 结构的光子晶体滤波器模型中,采用的光子晶体是由圆介质柱在空气中正方排列形成的,背景介质折射率为 1,介质柱折射率为 3.4(对应于硅的折射率),介质柱半径 $r = 0.19a$,利用平面波展开法^[16]可以计算出该结构光子晶体 TE 模不存在带隙, TM 模具有较大的光子带隙,其带隙图如图 3 所示。计算结果表明,光子晶体的最大带隙归一化频率范围为 $0.295 \sim 0.434(\omega a/2\pi c)$,如图中阴影区域所示,中心频率为 $0.3645(\omega a/2\pi c)$,取晶格常数为 $0.546 \mu\text{m}$,对应的中心波长为 1500 nm ,下面的研究均以光子晶体的 TM 模为研究对象。

在入射端口 A 放置高斯光源,端口 B、C 放置探测点,利用超原胞的平面波展开法计算得出,当缺陷

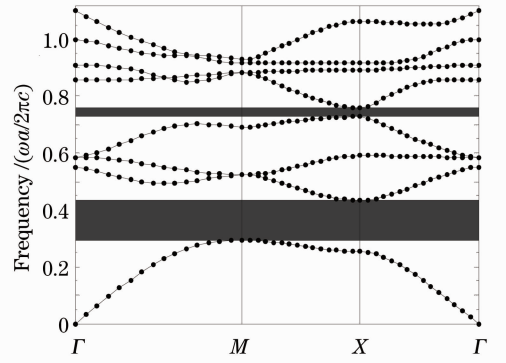


图 3 二维四方晶格光子晶体 TM 模能带图
Fig. 3 TM band structure of two-dimensional square photonic crystal

介质柱半径为 $0.0416 \mu\text{m}$ 时,缺陷模归一化频率为 $0.3523(\omega a/2\pi c)$,对应的波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 。利用 2D-FDTD 法^[17]模拟计算该滤波器的传输特性,结果如图 4 所示,结果表明,与缺陷模频率相同的光波被耦合到下载波导中,并从端口 C 输出,下载效率达到 84%,与文献[9]中的滤波器相比,下载效率提高了许多。

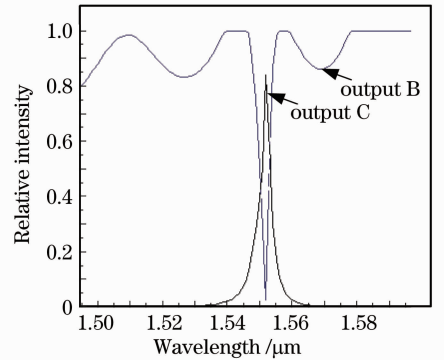


图 4 三端口滤波器的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of three-port filter

2.4 滤波器模型的优化

根据(6)式得到,中心平面与反射平面之间距离 d 的选择应满足 $\phi = 2\pi n$ (n 为正整数),而 $\phi = 2d\beta_\lambda + \delta_\lambda$,虽然由于传播引起的相位变化 $2d\beta_\lambda$ 可以很容易求出,但 δ_λ 却不容易求出,利用 2D-FDTD 法仿真计算得到一个近似优化的 d ,图 1 模型中 d 选择了 $6a$ 。在此基础上,将反射平面上的下载波导末端和反射微腔缺陷的介质柱进行左右移动,使它偏离理想光子晶体的介质柱位置。假设偏离的距离为 δ_a ,经过反复模拟仿真,结果表明,介质柱的左右偏移对下载效率会产生显著的影响。图 5 为偏移距离 δ_a 对下载效率的影响,由模拟结果可知,向左或向右移动约 $0.06a$ 时,下载效率几乎能达 100%。

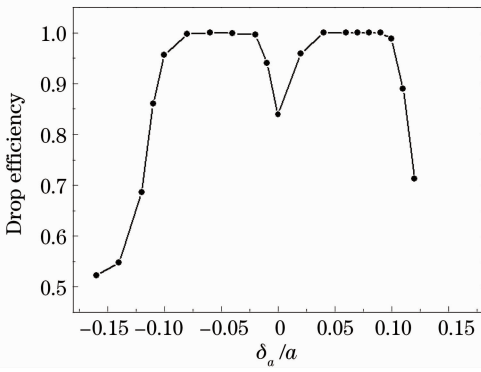


图 5 偏移距离 δ_a 对下载效率的影响

Fig. 5 Effect of the offset distance δ_a on the drop efficiency

3 多信道下载滤波器的设计

一种新型的二维光子晶体多信道下载滤波器如图 6 所示,由 4 个典型的 3 端口滤波器组合而成,光子晶体是由圆介质柱在空气中正方排列形成,同样介质柱折射率取为 3.4,介质柱半径 $r=0.19a$,晶格常数 $a=0.546 \mu\text{m}$ 。该结构滤波器由 65×30 个周期单元组成,横向的波导是光子晶体滤波器的主波导,4 个 90° 弯波导为信道下载波导,主波导和下载波导是通过移走一排介质柱形成的,同时在下载波

导 90° 拐弯 $a/2$ 处增加一个介质柱,以减少能量损耗。在主波导和下载波导之间有一 5×5 的点缺陷超胞,如图 6 中虚线框区域所示。通过改变点缺陷中心介质柱半径引入共振微腔和反射微腔。当微腔的缺陷介质柱半径满足一定条件使点缺陷模和波导线缺陷模产生共振时,主波导中与微腔谐振的光波被耦合到各个共振微腔内,再耦合到各信道对应的下载波导中。为了获得适用于光通信中波长为 1550 nm 的下载滤波器,设置点缺陷处的介质折射率和背景介质柱折射率相同,通过超原胞的平面波展开法,计算出与波长 $\lambda_1=1510 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2=1530 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3=1550 \text{ nm}$ 和 $\lambda_4=1570 \text{ nm}$ 对应的缺陷介质柱半径,分别设置缺陷介质柱半径 $r_1=34.90 \text{ nm}$ 、 $r_2=38.49 \text{ nm}$ 、 $r_3=41.59 \text{ nm}$ 和 $r_4=44.76 \text{ nm}$,这样设置的缺陷微腔能起到很好的波长选择作用。为了使反射平面和中心平面之间满足 $\phi=2\pi n$ 关系,通过多次模拟仿真,4 个信道反射平面上的反射微腔和反射壁的设置如图 6 所示,下载波导 1 的反射壁与共振微腔距离为 $5a$,其他 3 个为 $6a$,且将 4 个信道的下载波导的末端反射壁和对应的共振反射微腔的介质柱按从左往右的顺序依次向右移动 $0.02a$ 、向左移动 $0.08a$ 、向左移动 $0.03a$ 和不偏移。

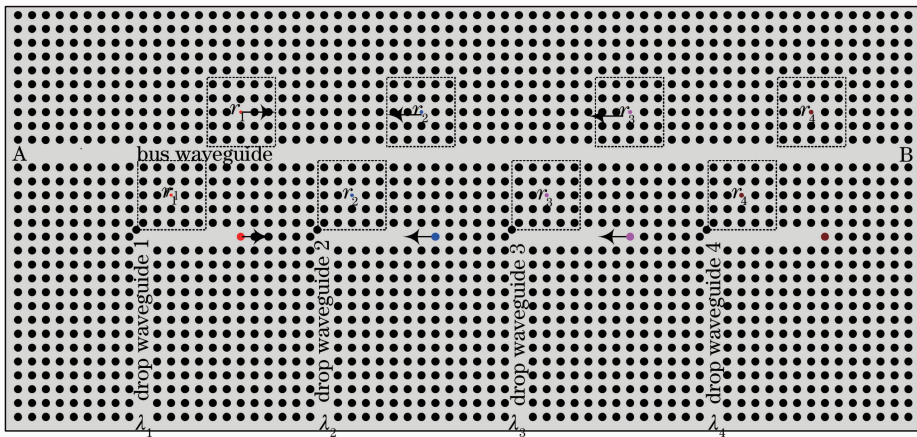


图 6 多信道光子晶体下载滤波器结构图

Fig. 6 Structure of photonic crystal multi-channel drop filters

对图 6 结构的多信道滤波器,利用 2D-FDTD 法进行模拟计算,在计算区域四周采用完全匹配层 (PML) 作为吸收边界,在主波导端口 A 入射高斯波,每个下载波导出口处设置探测点,记录场序列,对场序列进行傅里叶变换,得到该结构的传输谱,如图 7 所示。模拟结果显示,该结构能将主波导中与微腔点缺陷模波长共振的光波信号下载至各信道下

载波导中输出,各信道的下载波长分别为 $\lambda_1=1510.1 \text{ nm}$ 、 $\lambda_2=1529.7 \text{ nm}$ 、 $\lambda_3=1550.9 \text{ nm}$ 和 $\lambda_4=1569.4 \text{ nm}$,传输谱信道间隔约为 20 nm ,中心波长误差为 $\pm 2 \text{ nm}$,最大的频谱半峰全宽为 3.2 nm ,具有良好的波长选择性,能够满足 WDM 的要求,且每个信道的下载效率均在 91% 以上,特别是 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 三个信道下载效率几乎达到 100% 。

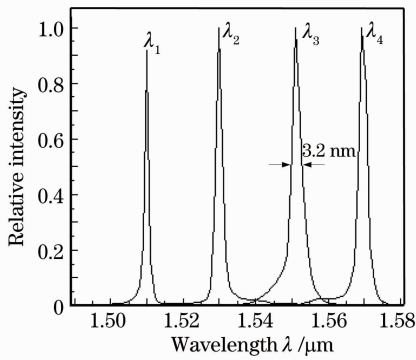


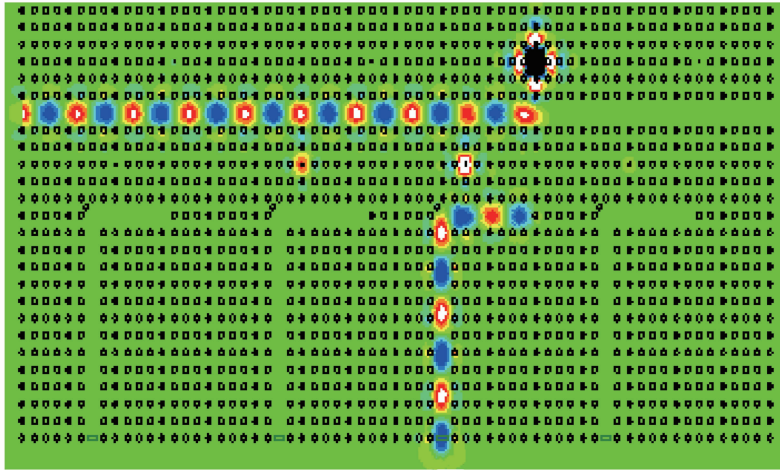
图7 多信道下载滤波器传输谱

Fig. 7 Transmission spectrum of the muti-channel drop filter

对于该结构的滤波器,下载波导与共振微腔之间增大了耦合区域,使得下载效率得到很大提高,同时设置了反射微腔与反射壁,且调节反射平面与中心平面之间的距离,使得它们之间可以满足理论上的共振反射作用。对于反射微腔的作用机理可以这

样解释:对于 λ_1 下载波导,抽取相应波长范围的光波,在主波导上传播的光能量先耦合到 r_1 所在的共振微腔,再耦合到 λ_1 下载波导。而与 λ_1 波长对应的光能量没有被耦合进入共振微腔的部分,则继续向前传播,当遇到 r_1 所在的反射微腔时,再次发生共振,将能量反射回来,进行再次耦合,其他信道的分析类似。反射壁的巧妙设置,可以防止下载信号与反射壁反射信号发生相消,进而提高下载效率。实际上该结构是一个由共振微腔、反射微腔和反射壁组成的巧妙系统,但微腔与微腔之间一般会存在共振干扰,还需要进一步的改进和优化。

当波长 $\lambda_3 = 1550.9 \text{ nm}$ 的连续波输入时,达到稳态时的场强 E_y 的分布如图8所示,从场分布可以看出 λ_3 的光波能高效地从 λ_3 信道下载波导中输出,对于 λ_1 、 λ_2 和 λ_4 也可以分别从各自的信道下载波导输出,实现了对光波的波分复用。将该器件用于复用,在4个下载信道输入 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 的光波时,理论上可在主波导中得到混合的复用信号。

图8 波长 $\lambda_3 = 1550.9 \text{ nm}$ 的光波在信道3下载时的稳态场分布Fig. 8 Steady field distribution of light wave dropped with wavelength $\lambda_3 = 1550.9 \text{ nm}$

4 结 论

通过点缺陷微腔和波导模共振耦合原理,利用二维正方排列的光子晶体,设计了一种新型的多信道下载滤波器,该滤波器由4个典型的3端口滤波器组成,通过主波导、90°弯波导和共振微腔的巧妙组合,以及对器件的进一步优化有效地提高了各个信道的下载效率,各个信道的下载效率均在91%以上。器件大小为 65×30 个周期原胞,相当于 $35.49 \mu\text{m} \times 16.38 \mu\text{m}$,与传统的光电器件相比,体积较小,尺寸在微米量级。利用2D-FDTD法模拟了该器件的传

输特性,结果表明该结构能有效地实现光波的分路下载,传输谱信道波长间隔约为20 nm,中心波长误差为 $\pm 2 \text{ nm}$,传输谱的最大半峰全宽为3.2 nm,具有良好的波长选择性。这种基于光子晶体的新型滤波器,将可以用在诸多需要光学滤波的集成电路中,成为传统滤波器件的有力竞争者,而且利用光子晶体制作的光电器件,可以通过目前成熟的半导体加工技术进行加工制作和实现。本研究为光子晶体滤波器的制作提供了理论依据,使得光电子器件向高度集成化迈进了一步。

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 Lin Xubin, Liu Yukui, Li Baojun. Theoretical study of silicon based two-dimensional photonic crystal coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1157~1160
林旭彬, 刘玉奎, 李宝军. 硅基二维光子晶体耦合器理论研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1157~1160
- 3 Zhu Guixin, Yu Tianbao, Chen Shuwen *et al.*. A new ultracompact polarizing beam splitter based on photonic crystal directional coupler[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 450~454
朱桂新, 于天宝, 陈淑文 等. 一种新型光子晶体波导定向耦合型超微偏振光分束器[J]. *光子学报*, 2010, **39**(3): 450~454
- 4 A. Khavasi, M. Miri, M. Rezaei *et al.*. Transmission line model for extraction of transmission characteristics in photonic crystal waveguides with stubs; optical filter design[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(8): 1322~1324
- 5 S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos. Channel drop filters in photonic crystals[J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(1): 4~11
- 6 B. Song, T. Asano, Y. Akahane *et al.*. Multichannel add/drop filter based on 8 in-plane hetero photonic crystals [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1449~1455
- 7 C. Ren, J. Tian, S. Feng *et al.*. High resolution three-port filter in two dimensional photonic crystal slabs [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 10014~10020
- 8 H. Takano, B. 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
- 9 C. Kuo, C. Chang, M. Chen *et al.*. A new approach of planar multi-channel wavelength division multiplexing system using asymmetric super-cell photonic crystal structures [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(1): 198~206
- 10 Y. Wu, T. Shih, J. Lee. High-quality-factor filter based on a photonic crystal ring resonator for wavelength division multiplexing applications [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(25): F24~F30
- 11 F. Monifi, A. Ghaffari, M. Djavid *et al.*. Three output port channel-drop filter based on photonic crystals[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(4): 804~809
- 12 Chen Heming, Meng Qing. Design of high efficiency photonic crystal terahertz filter[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 014202
陈鹤鸣, 孟 晴. 高效光子晶体太赫兹滤波器的设计[J]. *物理学报*, 2011, **60**(1): 014202
- 13 Yang Chunyun, Xu Xuming, Ye Tao *et al.*. The modulation of a novel photonic crystal ring resonator filter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 017807
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): 017807
- 14 A. Mekis, J. C. Chen, I. Kurland *et al.*. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(18): 3787~3790
- 15 C. Manolatu, M. J. Khan, S. Fan *et al.*. Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(9): 1322~1331
- 16 M. Plihal, A. A. Maradudin. Photonic band structure of two-dimensional systems: the triangular lattice [J]. *Phys. Rev. B*, 1991, **44**(16): 8565~8571
- 17 Ge Debiao, Yan Yubo. Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetic Waves[M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2005. 20~25
葛德彪, 闫玉波. 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, 2005. 20~25

栏目编辑: 韩 峰