

文章编号 1004-924X(2015)08-2171-07

多信道异质结构光子晶体滤波器

李传起, 范庆斌*, 陆叶, 罗德俊

(广西师范大学 电子工程学院 光电子与光通信实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:利用二维正方晶格介质柱型光子晶体(PC),设计了一款由 4 个线性渐变型微腔和异质结构光子晶体反射器组成的多信道下路滤波器。利用平面波展开法(PWE)以及二维时域有限差分法(2D-FDTD)分析了该异质结构滤波器的工作机制,并进一步探究了微腔参考面与异质结界面之间距离对下路效率的影响。研究表明,滤波器中的异质结反射器可以实现接近 100% 的反射,从而大幅度地提高了三端口滤波器的滤波效率。设计的多信道滤波器各个通道都能有效地实现下路滤波功能,其信道间隔为 10 nm,滤波效率均在 90% 以上,透射谱半高宽均在 0.54 nm 以下,实现了较高的品质因子特性。该滤波器尺寸只有 $15.15 \mu\text{m} \times 13.91 \mu\text{m}$,且滤波效率很高,适于在波分复用系统中进行复用与解复用,在未来光路集成应用中具有良好的应用前景。

关键词:异质结构光子晶体;时域有限差分(FDTD)法;多信道下路滤波器;微腔

中图分类号: TN929.1; TN713 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2171

Multi-channel heterophotonic crystal filter

LI Chuan-qi, FAN Qing-bin*, LU Ye, LUO De-jun

(Laboratory of Optoelectronics and Optical Communications,

Department of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

* Corresponding author, E-mail: fqb880812@126.com

Abstract: On the basis of the two-dimensional square lattice photonic crystal with dielectric rods, a novel multi-channel drop filter consisting of four linear gradient microcavities and a heterophotonic crystal reflector was designed. The working mechanism of the heterophotonic crystal filter was analyzed by using Plane Wave Expansion(PWE) method and two-dimensional Finite Difference Time Domain(2D-FDTD) method, then the influence of the distance between the reference plane of microcavity and the hetero-interface on the drop efficiency was explored. The results show that the heterophotonic reflector in the filter is able to achieve 100% reflection so that to improve the drop efficiency of the three-port channel drop filter greatly. Each channel of the designed filter has the ability to drop the light wave effectively, in which the channel space is 10 nm, the rates of normalized transmission are all above 90%, and the full-widths at half-maximum(FWHM) of the transmission spectrums are all below 0.54 nm. The filter has achieved a higher quality factor and shows a compact size of $15.15 \mu\text{m} \times 13.91 \mu\text{m}$ and a high filtering efficiency. It is suitable for multiplexing and demultiplexing in a wavelength division multiplexing system and has potential application values to integrated optics circuits.

收稿日期: 2015-01-26; **修订日期:** 2015-03-01.

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划课题(No. 1598007-12); 广西研究生教育创新计划资助项目(No. YCSZ2015097)

Key words: heterophotonic crystal; Finite Difference Time Domain (FDTD) method; multi-channel drop filter; microcavity

1 引言

光滤波器是波分复用系统(WDM)以及光子集成领域的基本组成单元,用于实现光信号的上下路功能。传统的半导体光滤波器体积较大,不利于光通信日益集成化的发展趋势。1987年,John^[1]和Yablonovitch^[2]分别提出了光子晶体(PC)的概念。由于光子晶体的介电常数呈周期性分布,所以它可控制光子具有类似半导体周期性势场约束电子的特性,其两个最主要的特性就是光子局域和光子禁带(Photonic Band Gap, PBG)。由于具有体积小、损耗低、易集成的特点,因此它已广泛应用于光子晶体光纤^[3-4]、光子晶体分束器^[5]、光子晶体二极管^[6]、以及光子晶体传感器^[7]等器件中。在光子晶体滤波器中,三端口侧边耦合下路滤波器方便引入多个微腔,可以实现多通道滤波^[8-18]。

如何实现高透过率是滤波器的基本问题。一般情况下,光子晶体侧边耦合的最大下载效率不超过50%,这是因为当光子被耦合进入微腔时,大部分的光能量会以前向波和后向波的形式返回到波导中。Kim等^[16]在波导末端设计了反射壁,实现了100%的反射反馈,大幅提高了下路效率。Ren等^[17]设计了一种侧边耦合的波长选择性反射微腔,增加了三端口下路滤波器的下路效率,但这种滤波器的两个微腔要有相同的谐振频率,在工艺上较难实现。Noda等^[18-19]设计了光子晶体平板下路滤波器,在波导侧边引入L3型微腔,然后在垂直于微腔的方向上获得滤波信号,通过串联几个不同晶格常数的光子晶体,在各个光子晶体之间形成导模禁带,提高了下路效率。

本文设计了一种线性渐变型微腔,以提高微腔的品质因子特性。利用光子晶体波导的导模禁带特性,通过在波导末端嵌入大半径硅柱的方式引入异质结光子晶体,形成了一种滤波器反射结构。分析了该异质结滤波器的工作机制,并进一步探究了微腔参考面与异质结界面之间距离对下路效率的影响。最后根据三端口滤波器的模

型,利用二维正方晶格介质柱型光子晶体,设计了一种多信道下路滤波器,该滤波器主要由4个线性渐变型微腔和异质结反射器组成。通过合理地调整微腔参考面与异质结界面之间的距离,实现了高效下路滤波功能。

2 三端口下路滤波器模型

图1为带反射器的三端口通道滤波器,它主要由主波导、下路波导、微腔与反射器4个部分组成。假设微腔仅支持单模传输,且关于参考面对称。光波在参考面与反射器之间来回一周所产生的相位差为 φ 。 S_{+i} 和 S_{-i} ($i=1,2,3$)分别是各端口的输入输出波幅度。当满足^[16]

$$Q_1/Q_2=2, \quad (1)$$

$$\varphi=2\pi m, (m \text{ 为整数}), \quad (2)$$

下路效率可以实现100%。 Q_1 和 Q_2 分别是微腔衰减进入主波导和下路波导的品质因子。

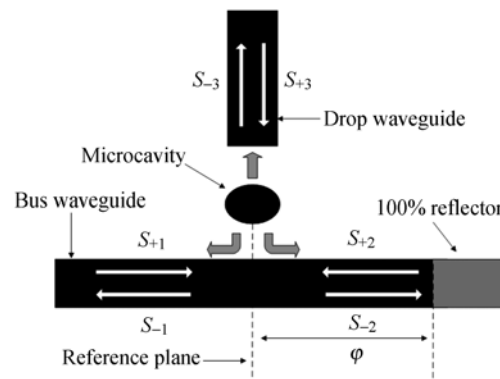


图1 带100%反射器的三端口通道滤波器

Fig. 1 Three-port channel drop filter with a 100% reflector

3 结构设计与数值模拟

3.1 高品质因子微腔与异质结构反射器的设计

本文设计的二维正方晶格光子晶体由圆形硅柱($n=3.4$)在空气中周期性排列组成,光子晶体 PC_1 的硅柱半径为 $0.2a$,光子晶体 PC_2 的硅柱半径为 $0.375a$,两者具有相同的晶格常数 a 。 PC_1 和 PC_2 都具有横磁(Transverse Magnetic, TM)

模式的带隙,电场方向平行于介质柱,因此本文的计算都基于 TM 模式。

光子晶体 PC_1 三端口下路滤波器如图 2(a) 所示,在主波导和下路波导之间引入一个微腔,微腔中心介质柱半径 $R_1=0.067a$,由波导到微腔中心的硅柱半径呈线性递减的趋势,称它为线性渐变型微腔,其硅柱半径从主波导到微腔中心依次为: $R_2=0.145a$, $R_3=0.165a$, $R_4=0.173a$,与下路波导到微腔中心的半径变化一致。该微腔仅支持单模,且由主波导和下路波导能量泄露引起的微腔品质因子 Q 达到 6 641,可以用于实现超窄带滤波。图 2(b)为带反射器的三端口下路滤波器, PC_1 光子晶体波导末端嵌入硅柱半径为 $0.375a$ 的 PC_2 光子晶体波导,形成异质结反射器。微腔参考面与异质结界面之间的距离为 $5a$,这一方面是因为微腔与异质结要有一定距离,以避免受到异质结构的干扰;另一方面则是为了达到 100% 下路效率所需的相位条件($\varphi=2\pi m$)。

为了更好地理解图 2(b)所示结构的高效反射特性,利用平面波展开法计算了光子晶体 PC_1 ($r=0.2a$) 的线缺陷波导和光子晶体 PC_2 ($r=0.375a$) 的线缺陷波导的导模曲线,结果分别如图 3(a)和(b)所示。光子晶体 PC_1 的线缺陷波导在 $0.3045(c/a)\sim 0.4220(c/a)$ 存在导模,微腔所支持的模式为 $0.3679(c/a)$,处于波导所支持的模

式中。光子晶体 PC_2 的线缺陷波导在 $0.3777(c/a)\sim 0.4164(c/a)$ 存在导模,在 $0.3636(c/a)\sim 0.3777(c/a)$ 存在导模禁带,微腔所支持的模式处于导模禁带之中。用一束高斯脉冲光波从左侧主波导入射去激光子晶体 PC_1 的波导模,在第一次经过微腔时只有部分能量(不超过 50%)被耦合进入微腔,其余沿着波导继续传播。当光波经过光子晶体 PC_2 时,若微腔的谐振模处于导模禁带中,谐振光波会在两光子晶体界面发生强烈的后向反射,从而提高滤波器的下路效率。图 3(c)显示了在没有引入微腔情况下,异质结构光子晶体的透射谱和反射谱。在导模禁带内反射率几乎接近 100%,导模禁带的上限为慢光区,此处透射谱的变化非常剧烈,色散也很大。在更高频区域 $0.381(c/a)\sim 0.416(c/a)$,由于两种光子晶体 PC_1 和 PC_2 波导模式失配产生了后向反射,这些反射光对于滤波器是不利的,通过优化可以减弱这些反射光波。图 3(d)是图 2(a)、(b)所示两种光子晶体滤波器归一化强度的透射谱对比,虚线代表无反射滤波器的透射谱,归一化强度仅为 38.6%,实线代表带有异质结反射器的滤波器透射谱,归一化强度达到 95.0%,滤波效率得到了很大的提高。同时,透射峰的品质因子 Q 达到 4 080 ($\lambda/\Delta\lambda$),而模式体积仅有 $0.02836(\lambda/n)^3$ 。

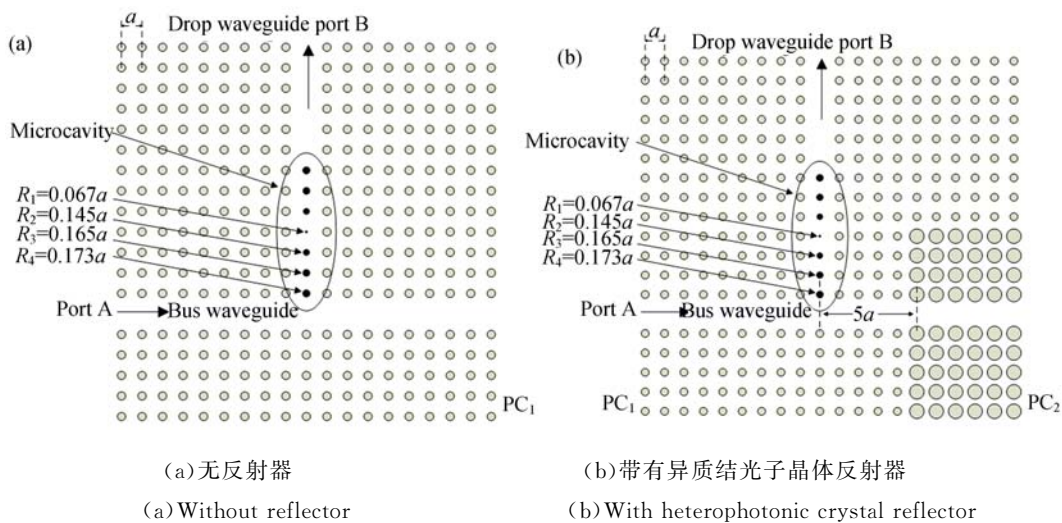


图 2 二维光子晶体三端口下路滤波器

Fig. 2 Structures of three-port channel drop filter with two-dimensional photonic crystal

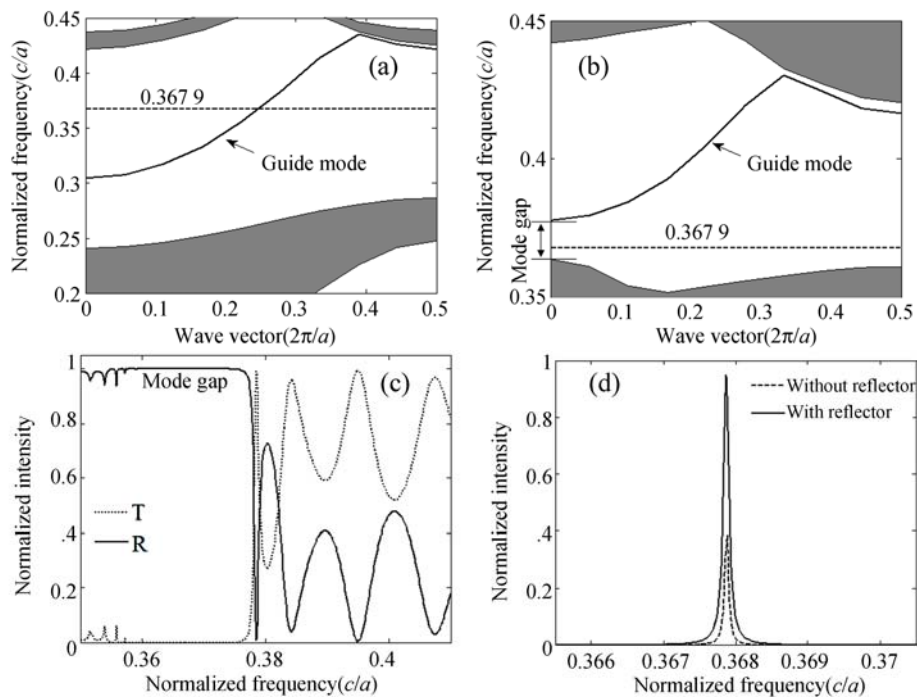


图 3 (a)和(b)分别为光子晶体 PC_1 和光子晶体 PC_2 的波导导模曲线,虚线 $0.3679(c/a)$ 表示微腔的谐振模式。(c)在没有引入微腔的情况下,异质结构光子晶体波导的透射谱(T)和反射谱(R)。(d)带有异质结反射情况下与无任何反射情况下光子晶体的下路效率。透射谱的计算采用二维时域有限差分法(2D-FDTD)。

Fig. 3 (a) and (b) are curves of waveguide modes of PC_1 and PC_2 , respectively. The dashed line of $0.3679(c/a)$ represents resonant mode supported by microcavity. (c) Transmission(T) and reflection(R) spectra of heterophotonic crystal waveguide without introducing a defect. (d) Contrast of drop efficiency of channel drop filter with and without a reflector. Transmission spectra are calculated by 2D-FDTD method.

3.2 微腔参考面与异质界面之间的距离对下路效率的影响

为了设计多通道下路滤波器,需要探究微腔参考面与异质界面之间的距离 d 对下路效率的影响。选定 4 个微腔中心的硅柱半径 r 分别为 $0.0625a, 0.066a, 0.069a, 0.072a$, 其他硅柱半径与图 2(a) 保持一致。采用快速谐波分析法(FHA)计算得到 4 个微腔的 Q_1 与 Q_2 的比值约为 2, 满足式(1)。根据式(2), 参考面与异质界面之间的距离 d 应该满足 $\varphi = 2\pi m$ (m 为正整数), 而 $\varphi = 2d\beta_i + \delta_i$, 其中 β_i 为对应频率的传播常数, δ_i 为对应频率在异质界面处反射产生的附加相位。由于光波在光子晶体异质界面的反射情况比较复杂, 不易得到附加相位, 利用二维时域有限差分法(Two-dimensional-Finite Different Time Domain, 2D-FDTD)模拟了距离 d 对下路效率的影响, 从而间接地选择近似满足相位条件

的距离 d 。从图 4 可以看出, 不同微腔下有多个距离能达到接近 100% 的下路效率, 其原因主要

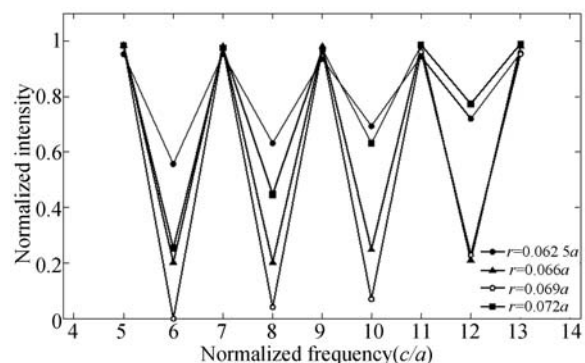


图 4 微腔参考面与异质界面之间距离 d 对下路效率的影响

Fig. 4 Drop efficiency as a function of distance between reference plane of the microcavity and hetero-interface

有:(1)随着距离 d 的增大,相位条件周期性得到满足;(2)下路效率对 $Q_1/Q_2=2$ 和 $\varphi=2\pi m$ 这两个条件不敏感^[16]。如果要进一步优化滤波性能,可以对距离 d 进行细调。

4 多通道下载滤波器的设计

如图 5 所示,异质结构二维光子晶体多通道下路滤波器主要由 4 个线性渐变型微腔和异质结

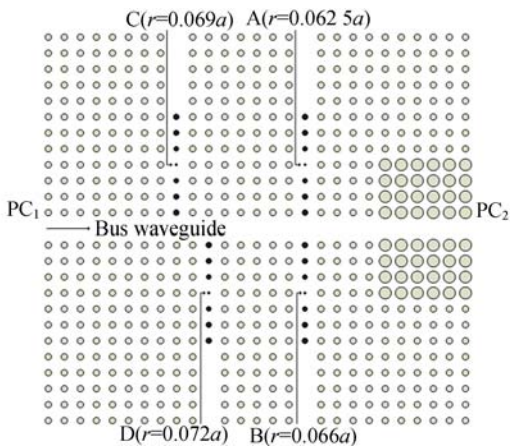


图 5 四信道下路滤波器

Fig. 5 Schematic diagram of four channel drop filter

反射器组成,仅改变微腔中心的硅柱半径即可完成选频作用,微腔周围的硅柱半径与图 2(a)保持一致,光子晶体 PC_1 和光子晶体 PC_2 的参数设计与前文保持一致。为了设计适用于第三通信窗口(1 550 nm)附近波段的滤波器,取晶格常数 $a=570$ nm。4 个微腔中心的硅柱半径分别为 $0.0625a, 0.066a, 0.069a, 0.072a$,对应所支持的模式分别为 $0.3711(c/a), 0.3687(c/a), 0.3664(c/a), 0.3643(c/a)$,即滤波器的工作频段为 $0.364(c/a) - 0.372(c/a)$,位于光子晶体 PC_2 线缺陷导模禁带的范围内,如图 6(a)黑色区域所示。

根据图 4 选择合适的距离 d ,为了减小滤波器的尺寸,一般选取较小的 d 。采用 2D-FDTD,并用完美匹配层(PML)作为吸收边界条件对该异质结光子晶体滤波器进行模拟计算,得到该滤波器的透射谱,如图 6(b)所示。结果表明,该光子晶体滤波器能高效地将光信号下载到各个下路波导中输出,各信道的下路波长分别为 1536.1 nm(A 信道),1 546.0 nm(B 信道),1 555.7 nm(C 信道),1 564.8 nm(D 信道),透射谱信道间隔约为 10 nm,各个信道的透过率均大于 90%,且品质因子较高,各信道的具体性能参数见表 1。

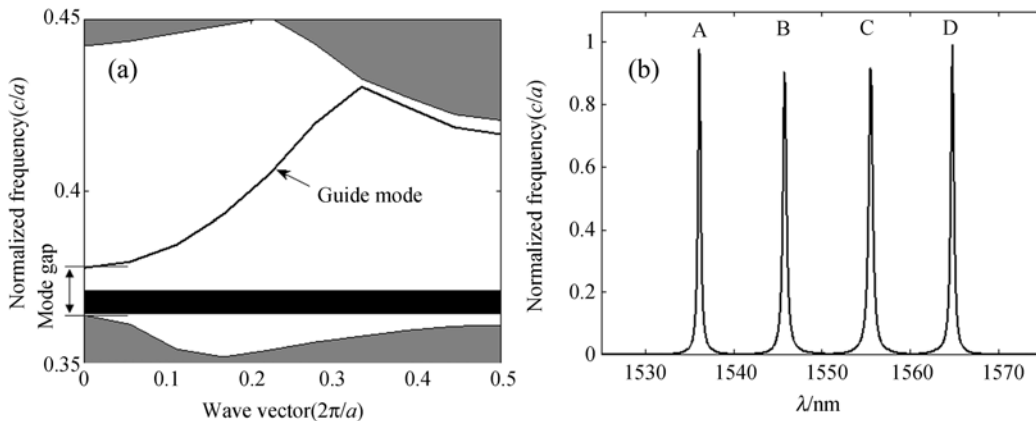


图 6(a)多通道下路滤波器的工作频段(黑色区域)和(b)多通道下路滤波器的透射谱

Fig. 6 (a)Operating frequency of multi-channel drop filter (black region) and (b)transmission spectrum of multi-channel drop filter

由于该异质结多信道光子晶体滤波器 4 个微腔的谐振模都处于光子晶体 PC_2 的导模禁带内,100%的反射大大提高了各个信道的下路效率。适当设计各个微腔参考面与异质结界面之间的距

离,可以使其接近相位条件。事实上,本文之所以设计线性渐变型微腔,一方面是因为导模禁带的带宽有限,只有提高微腔的品质因子特性,才能使得滤波器的工作带宽被导模禁带覆盖,同时,超窄

表 1 滤波器各个信道的性能参数

Tab. 1 Performance parameters of each channel of designed filter

Channel	Center wavelength/nm	Normalized transmission/%	FWHM /nm	Quality factor($\lambda/\Delta\lambda$)
A	1 536.1	97.7	0.37	4 152
B	1 546.0	90.5	0.48	3 221
C	1 555.7	91.7	0.54	2 881
D	1 564.8	99.1	0.42	3 726

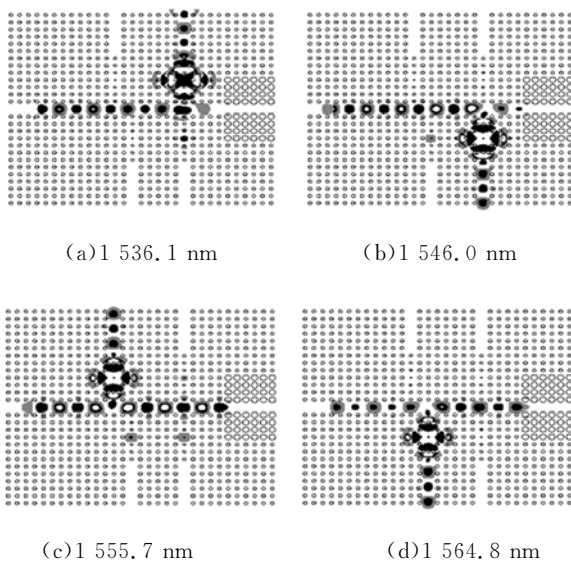


图 7 不同波长下光波下路时稳定的光场图

Fig. 7 Steady state wave propagation at different resonance wavelengths

带滤波也是现代光通信的一个重要需求;另一方面,通过调节微腔硅柱半径可以较为准确地获得 $Q_1/Q_2=2$ 。需要注意的是,异质结光子晶体 PC_2

参考文献:

- [1] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] FOKOUA E N, RICHARDSON D J, POLETTI F. Impact of structural distortions on the performance of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Opt. Express*, 2014, 22(3):2735-2744.
- [4] 马依拉木·木斯得克,姚建铨,陆颖,等. 1.55 μm 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.
- [5] MAYILAMU · M, YAO J Q, LU Y, *et al.*. Highly nonlinear and birefringent photonic crystal fiber at 1.55 μm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3):588-596. (in Chinese)
- [6] PARK I, LEE H S, KIM H J, *et al.*. Photonic crystal power-splitter based on directional coupling [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(15):3599-3604.
- [7] FENG S, REN C, WANG W Z, *et al.*. Wideband high-contrast optical diode and unidirectional beam splitters via near-infrared metallic photonic crystals [J]. *Optics Communications*, 2013, 289:144-148.
- [8] 梁斌明,胡艾青,蒋强,等. 光子晶体负折射效应在糖溶液浓度检测中的应用[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4):877-883.

的线缺陷波导虽然反射发生在异质结界面,但仍需要有足够的波导长度以及垂直厚度,才能形成有效的导模禁带。

各个微腔所支持的谐振波长从主波导输入,达到稳态时 E_y 的分布如图 7 所示,各个信道均能实现高效的下路效率。同时,也可以在各个端口输入对应的谐振光波,从而实现光信号的上路作用。

5 结 论

本文利用光子晶体波导的导模禁带特性,通过在波导末端嵌入大半径硅柱的方式引入异质结光子晶体,形成了一种滤波器反射结构。分析了该异质结滤波器的工作机制,发现异质结反射器在一个较大带宽范围内的反射效率接近 100%,并进一步探究了微腔参考面与异质结界面之间距离对下路效率的影响,发现随着距离的增加,多个位置均能达到接近 100%的下路效率。根据三端口滤波器模型,利用二维正方晶格介质柱型光子晶体,设计了一种多信道下路滤波器,该滤波器主要由 4 个线性渐变型微腔和异质结反射器组成。通过合理地调整微腔参考面与异质结界面之间的距离,实现了滤波器的高效下路,信道间隔为 10 nm,滤波效率均在 90%以上,透射谱的半峰全宽(FWHM)均在 0.54 nm 以下,获得了较高的品质因子。该滤波器尺寸只有 15.15 $\mu\text{m} \times 13.91 \mu\text{m}$,滤波效率高,适用于在波分复用系统中进行复用与解复用,在未来光路集成发展中具有很好的应用前景。

- LIANG B M, HU A Q, JIANG Q, *et al.*. Application of photonic crystal negative refraction effect to sugar solution concentration detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):877-883. (in Chinese)
- [8] 吴斌,王庆康. 带反射回馈的高效光子晶体多路滤波器件[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8):1208-1214.
- WU B, WANG Q K. Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters with reflection feedback[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1208-1214. (in Chinese)
- [9] PARK D, KIM S, PARK I, *et al.*. Higher order optical resonant filters based on coupled defect resonators in photonic crystals[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2005, 23(5):1923-1928.
- [10] ZHANG W, LIU J, ZHAO W. Design of a compact photonic-crystal-based polarization channel drop filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, 21(11):739-741.
- [11] REN C, TIAN J, FENG S, *et al.*. High resolution three-port filter in two dimensional photonic crystal slabs[J]. *Opt. Express*, 2006, 14(21):10014-10020.
- [12] FAN S, VILLENEUVE P, JOANNOPOULOS J, *et al.*. Channel drop filters in photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 1998, 3(1): 4-11.
- [13] 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(7): 2512-2530.
- [14] TAKANO H, AKAHANE Y, ASANO T, *et al.*. In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(13): 2226-2228.
- [15] CHUTINAN A, MOCHIZUKI M, IMADA M, *et al.*. Surface-emitting channel drop filters using single defects in two-dimensional photonic crystal slabs[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79(17): 2690-2692.
- [16] KIM S, PARK I, LIM H. Highly efficient photonic crystal-based multi-channel drop filters of three-port system with reflection feedback [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(22): 5518-5525.
- [17] REN H, JIANG C, HU W, *et al.*. Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selection reflection microcavity[J]. *Opt. Express*, 2006, 14(6): 2446-2458.
- [18] SONG B S, NODA S, ASANO T. Photonic devices based on in-plane hetero photonic crystals [J]. *Science*, 2003, 300(5625):1537.
- [19] SONG B S, ASANO T, AKAHANE Y, *et al.*. Role of interfaces in heterophotonics crystals for manipulation of photons[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 71(19):195101.

作者简介:



范庆斌(1988—),男,福建龙岩人,硕士研究生,主要从事光子晶体及其应用技术等方面的研究。E-mail: fq880812@126.com

导师简介:



李传起(1964—),男,安徽六安人,博士,教授,1991年于中国科学院等离子体物理研究所获得硕士学位,2004年于东南大学获得博士学位,主要从事物理学及光通信技术领域的研究。E-mail: lcq@gxnu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)