

六通道光子晶体波分复用器的研究与设计

吴蓉, 李龙飞*, 马岩岩

兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要 基于光子晶体谐振腔的耦合原理, 采用环形腔与微腔结构结合的形式, 设计了一种六通道波分复用器。利用平面波展开法研究了晶格常数为 $0.55 \mu\text{m}$ 时光子晶体禁带范围随介质柱半径的变化关系, 并得到其能带结构。采用时域有限差分法分析了谐振腔结构对波长的影响, 得到了该谐振腔结构的传输特性曲线及电场分布, 并实现了波长为 $1.3298, 1.4316, 1.4419, 1.5564, 1.5966, 1.6191 \mu\text{m}$ 的六通道波分复用。实验结果表明, 该器件通过调节微腔内外的介质柱半径进行选频, 通过增加反射点的微腔结构减少串扰, 通过改变输出端边缘介质柱的半径提高输出效率。最终实现透射率大于 90% , 平均带宽为 9 nm 的通道, 且通道间串扰小, 窄带特性好。器件尺寸仅为 $13.4 \mu\text{m} \times 17.6 \mu\text{m}$, 有利于进行光器件集成, 具有潜在的应用价值。

关键词 光学设计; 时域有限差分法; 共振耦合; 谐振腔; 波分复用器

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0323002

Research and Design of Six-Channel Photonic Crystal Wavelength Division Multiplexer

Wu Rong, Li Longfei*, Ma Yanyan

School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University,
Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract In the present paper, based on the coupling principle of photonic crystal resonator, a six-channel wavelength division multiplexer is designed by combining ring cavity with micro cavity structure. By using the plane wave expansion method, the relationship between the band gap of photonic crystal and the radius of dielectric cylinder is studied when the lattice constant is $0.55 \mu\text{m}$, and the band structure is obtained. The influence of the resonator structure on the wavelength is analyzed by using the finite difference time domain method. The transmission characteristic curve and electric field distribution of the resonator structure are obtained. Six-channel wavelength division multiplexing with wavelengths of $1.3298, 1.4316, 1.4419, 1.5564, 1.5966, 1.6191 \mu\text{m}$ is realized. Experimental results show that the device can select the frequency by adjusting the radius of the dielectric column inside and outside the microcavity, reduce the crosstalk by increasing the micro cavity structure of the reflection point, and improve the output efficiency by changing the radius of the dielectric column at the output edge. A channel with a transmittance of more than 90% and an average bandwidth of 9 nm is finally realized, and the crosstalk between channels is small and the narrow band characteristic is good. The size of the device is only $13.4 \mu\text{m} \times 17.6 \mu\text{m}$, which is conducive to optical device integration and has potential application value.

Key words optical design; finite difference time domain method; resonance coupling; resonant cavity; wavelength division multiplexer

OCIS codes 230.5298; 160.5293; 250.4390

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-07-10; 录用日期: 2020-07-20

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1610RJZA046)、光电技术与智能控制教育部重点实验室(兰州交通大学)开放课题(KFKT2018-11)

*E-mail: 2277173671@qq.com

1 引言

光子晶体是由两种或两种以上介电常数差异较大的材料在空间中周期性排列的人工合成材料,具有光子禁带、光子局域态等特性,能很好地控制光子的传播^[1-2]。通过引入某一种缺陷或不同缺陷结构,可使光子晶体中传输的光波有不同的传播表现。人们研究了不同光子晶体结构的传输特性,并基于光子晶体结构设计了多种光集成器件,如光纤^[3]、光开关^[4]、全光逻辑门^[5]、光衰减器^[6]、光波分复用器^[7-10]。

波分复用技术可以实现超大容量的通信业务,基于光子晶体的波分复用器主要通过调节波导间的耦合长度、改变介质柱的折射率、增加点缺陷微腔及环形腔耦合结构等方式实现选频功能。2013年,庄煜阳等^[11]通过改变波导间的耦合长度设计了三波长光子晶体波分复用器,其透射率均大于90%,但损耗最大可达到0.44 dB,且集成度不高,尺寸为 $37\ \mu\text{m}\times 13\ \mu\text{m}$ 。2017年,Kannaiyan等^[12]通过调节环形腔中心介质柱的折射率,实现了八通道波分复用器,其透射率均为95%左右,但通道串扰高达-3 dB,且介质材料的折射率不易控制,制作工艺难度大。2018年,张通等^[13]在引入反射腔结构的同时,通过调节微腔介质柱半径,实现了四个频率的光波分复用,器件的尺寸仅为 $11\ \mu\text{m}\times 14\ \mu\text{m}$,但透射率最小为85.6%。2019年,王一飞等^[14]通过改变环形谐振腔中心介质柱的半径,实现了基于三角晶格光子晶体的三通道波分复用器,透射率均大于90%,通道串扰达到-27 dB。

本文将环形谐振腔和微腔结构组合起来,通过调节微腔内外介质柱的半径进行选频,设计了一种透射率高、集成度好、串扰低的六通道波分复用器。与仅依靠点微腔进行选频的结构相比^[15-16],该结构具有传输损耗低、集成度高、扩展性强等优势;与通过改变耦合介质柱材料调整介质折射率的波分复用器相比^[17-18],该结构具有结构简单、传输效率高、制作工艺简单等优势,具有广泛的研究价值。

2 原理与分析

在空气背景下,将材料为GaAs的圆形介质柱按照正方晶格排列,构成完整的二维光子晶体。

其晶格常数 $a=0.55\ \mu\text{m}$,空气折射率 $n_0=1$,介质柱折射率 $n=3.4$ 。利用Rsoft软件,在XOZ平面周期排列,利用平面波展开(PWE)法计算该介质柱半径在 $0.05\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 内TE/TM(TE为横电模,表示磁场方向平行于介质柱方向;TM为横磁模,表示电场方向平行于介质柱方向)禁带范围的变化情况,结果如图1所示。可以发现,半径 r 在 $0.165a\sim 0.2a$ 范围内可覆盖国际主流的长距离光通信系统传输波长,且覆盖了E带(1360~1460 nm)、S带(1460~1530 nm)、C带(1530~1565 nm)、L带(1565~1625 nm)、U带(1625~1675 nm)。当半径 $r=0.185a=0.10175\ \mu\text{m}$ 时,TE禁带范围最大,此时的光子晶体器件结构可用于大范围波段。

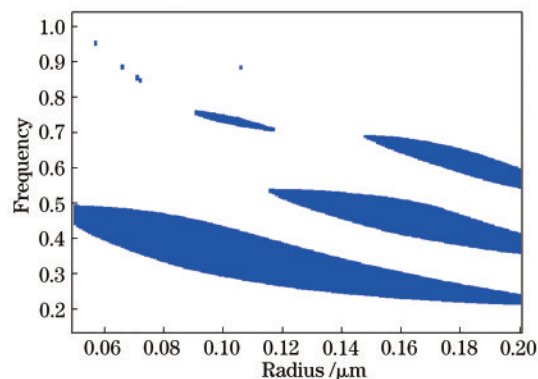


图1 禁带范围随介质柱半径的变化情况

Fig. 1 Change of the band gap range with the radius of the dielectric cylinder

以半径 $r=0.185a=0.10175\ \mu\text{m}$ 的介质柱构成完美光子晶体结构,利用PWE法计算得到的能带结构如图2所示。其中,横坐标 Γ 、X、M分别为布里渊区倒格矢空间的三个坐标,纵坐标为归一化频

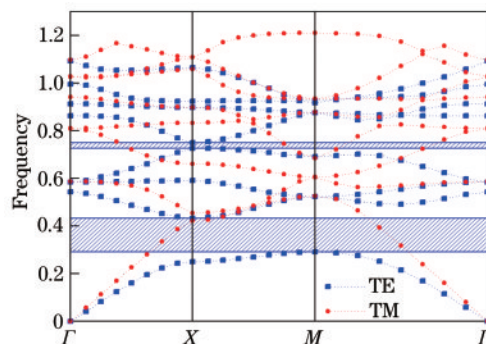


图2 完整二维光子晶体的能带结构

Fig. 2 Band structure of the complete two-dimensional photonic crystal

率。可以发现, TM 模的方向不存在禁带, 而 TE 模的方向存在两条带隙, 其归一化频率分别为 $a/\lambda=0.28721\sim 0.43459$ 和 $0.71802\sim 0.74826$, 其中, λ 为波长; 且归一化频率在 $a/\lambda=0.28721\sim 0.43459$ ($\lambda=1.27\sim 1.91\ \mu\text{m}$) 的带隙较宽, 覆盖了常用光通信系统的传输波长, 因此, 用该禁带设计的波分复用器性能更佳。

在 Lumerical 软件环境下, 将该完整光子晶体结构在 XOY 平面中周期排列, 通过去掉第 4 排 1×14 个介质柱和第 11 列 7×1 个介质柱引入线缺陷的方式构成输入、输出光波导。采用中心介质柱为 3×3 正方晶格排列、四个散射介质柱位于四个角落的环形谐振腔结构, 并将该环形谐振腔与微腔邻近放置在两条光波导之间, 最终构成的共振耦合原理如图 3 所示, 其中, In 为输入端口, Out 为输出端口, r_o 为微腔中心介质柱半径, R_w 为微腔外围介质柱半径, R_e 为微腔末端边侧介质柱半径, R_l 为输出端边缘介质柱半径。

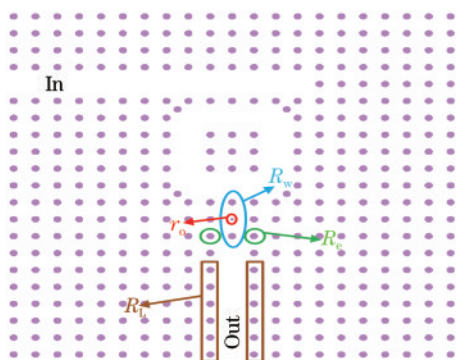


图3 共振耦合单元的原理

Fig. 3 Principle of the resonant coupling unit

利用时域有限差分法(FDTD)对该设计单元结构进行仿真模拟, 用 TM 模的高斯光源作为入射光, 光源宽度为 $1.6\ \mu\text{m}$, 工作波长范围为 $1.28\sim 1.68\ \mu\text{m}$, 吸收边界条件设置为完美匹配层(PML), 微腔外围介质柱半径为 $0.10175\ \mu\text{m}$, r_o 为 $0.049\ \mu\text{m}$ 时, 输出端的透射率分布如图 4 所示。可以发现, 波长为 $1.5601\ \mu\text{m}$ 时有单个最高透射峰, 透射率为 0.998 。原因是只有当微腔结构的谐振频率与环形腔谐振频率近似时, 该波长的光波才会耦合谐振, 进而实现输出, 而其他波长的光波则会被禁止输出, 从而实现选频功能。

基于共振耦合腔的特性, 设计不同的微腔结构及环形腔结构, 以实现不同频率的共振, 从而得到不同波长的输出。在仿真过程中发现, 微腔内

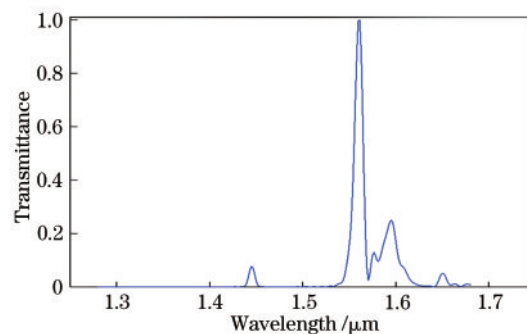


图4 输出端的透射率分布

Fig. 4 Transmittance distribution at the output

外介质柱半径的变化对耦合谐振频率和透射率的变化关系至关重要。当微腔外围介质柱不变, r_o 为 $0.012, 0.049, 0.057\ \mu\text{m}$ 时, 其输出透射率如图 5 所示, 分别在 $1.44839, 1.55939, 1.65237\ \mu\text{m}$ 波长处形成较高的透射峰。保持中心介质柱不变, 当 R_w 为 $0.146, 0.148, 0.151\ \mu\text{m}$ 时, 其透射率如图 6 所示, 分别在 $1.351, 1.359, 1.372\ \mu\text{m}$ 波长处形成较高的透射峰, 且透射率小于 80% 。保持微腔内外介质柱半径不变, 调节 R_l 时该谐振腔结构的透射率如图 7 所示。对比图 7 与图 6, 可以发现, 在图 7 中同一波长处产生较高透射峰, 且透射率均超过 90% 。结果表明, 微腔内外介质柱半径的变化会影响谐振光波频率, 在一定变化范围内, 透射峰会随内外介质柱半径的增大向着波长增大的方向移动; 通过调节输出端边缘介质柱半径, 可在不影响光波谐振频率的情况下, 提高透射率。这表明通过调节微腔内外介质柱半径 r_o 和 R_w 以及输出端边缘介质柱半径 R_l , 就可实现高传输效率的波分复用。

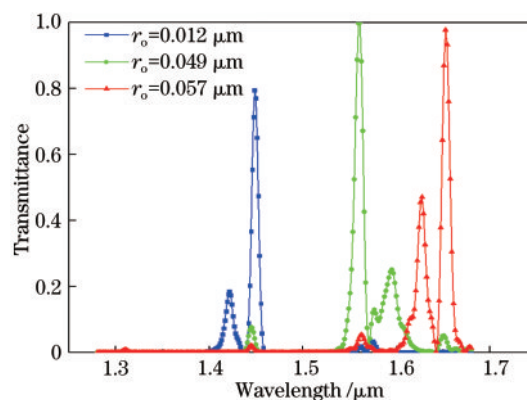


图5 微腔内介质柱半径对透射率的影响

Fig. 5 Influence of the radius of the dielectric cylinder in the microcavity on the transmittance

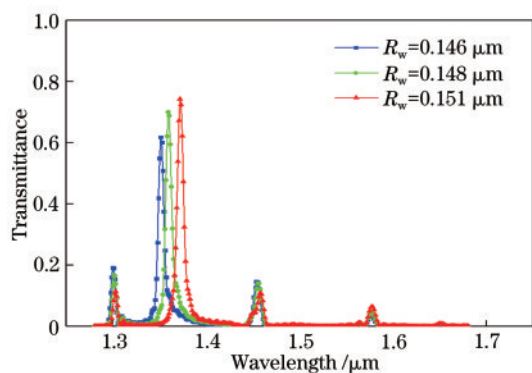


图 6 微腔外介质柱半径对透射率的影响

Fig. 6 Influence of the radius of the medium cylinder outside the microcavity on the transmittance

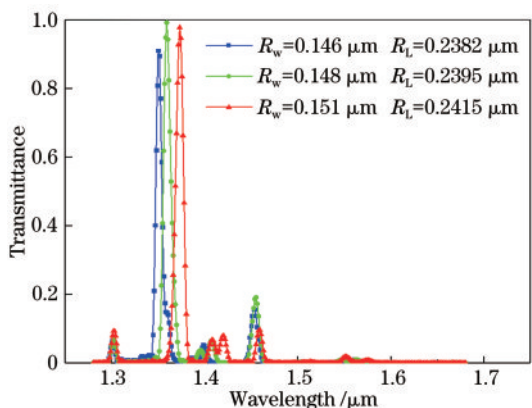


图 7 输出端边缘介质柱半径对透射率的影响

Fig. 7 Influence of the radius of the dielectric cylinder at the output end on the transmittance

3 结构设计与优化

根据上述分析得到的耦合规律,设计了如图 8 所示的六通道光子晶体波分复用器结构。由输入波导 IN, 六个输出波导 CH1~CH6 以及环形腔与微腔构成的两个共振耦合区组成。通过改变微腔中心介质柱半径及外围介质柱半径设计不同结构

的微腔,以实现六个不同频率光波输出。为了减小 CH5、CH6 中的通道串扰,在 CH5、CH6 输出端加入反射腔结构,调节反射腔中心介质柱半径 R_F 。通过调节输出端边缘介质柱半径 R_L ,提高输出透射率、减小反射。此外,为了在不改变透射频率的同时提高 CH6 通道的透射率,当微腔外围末端边侧介质柱半径 R_e 为 $0.154 \mu\text{m}$ 时,该复用器的透射率最佳。

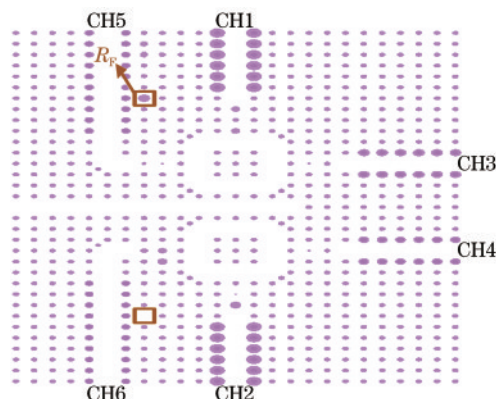


图 8 六通道波分复用器结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the six-channel wavelength division multiplexer

在 Lumerical 软件中,用 FDTD 对器件参数进行扫描分析,得到的通道结构参数如表 1 所示,可以发现,环形腔与微腔的耦合效果最好。最终仿真得到的透射率分布如图 9 所示,对应波长激励源下的电场分布如图 10 所示。可以发现,在中心波长为 $1.3298, 1.4316, 1.4419, 1.5564, 1.5966, 1.6191 \mu\text{m}$ 处产生了六个明显的透射峰,输出透射率较好,均大于 95%;且输出光波带宽较窄,平均为 9 nm ,有良好的滤波特性;同时利用该结构实现了六种不同波长光波分别经特定通道的输出,从其他端口输出的强度很小,都仅能沿着设定的共振耦合结构传输。

表 1 六通道波分复用器的参数

Table 1 Parameters of six-channel wavelength division multiplexer

Output	Central wavelength/ μm	Transmittance/%	Bandwidth/nm	$R_o/\mu\text{m}$	$R_w/\mu\text{m}$	$R_e/\mu\text{m}$	$R_F/\mu\text{m}$	$R_L/\mu\text{m}$
CH1	1.3298	92.5	6.7	0.1018	0.1400	—	—	0.234
CH2	1.4419	91.9	7.3	0.0466	0.1700	—	—	0.230
CH3	1.5966	99.4	11.8	0.0505	0.1018	—	—	0.179
CH4	1.6191	99.0	11.2	0.0566	0.0970	—	—	0.162
CH5	1.5564	90.5	9.3	0.0459	0.1018	—	0.181	0.144
CH6	1.4316	92.4	8.7	0.1370	0.1175	0.154	0.005	0.136

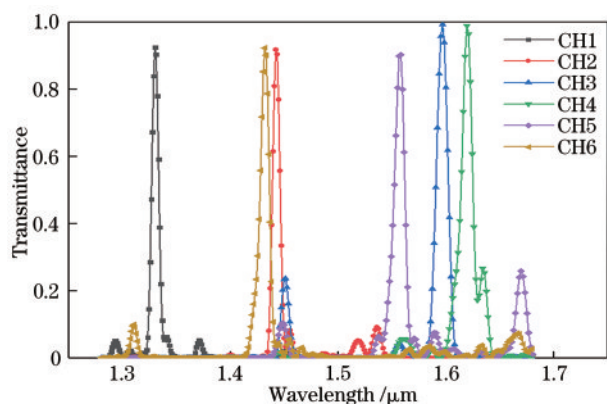


图 9 六通道波分复用器的透射率分布图

Fig. 9 Transmittance distribution diagram of the six-channel wavelength division multiplexer

可用通道串扰评价波分复用器的性能,通道串扰 I 定义为邻近通道对传输通道的串扰程度,通道串扰越小,器件性能越好,可表示为

$$I = 10 \lg(P_i/P_m), \quad (1)$$

式中, P_i 为相邻通道进入传输通道的辐射强度, P_m 为传输通道的透射强度。将仿真结果代入(1)式可得到各通道串扰大小,结果如表 2 所示。可以发现,各通道之间信号串扰较小,均小于 -13 dB。

表 3 为本设计与其他文献中方案的选频结构、通道数目、最小透射率、通道串扰、器件尺寸等方面的对比结果。可以发现,文献[10]具有极佳的透射率,但通道串扰过高,且器件尺寸偏大。文献[11]的器件尺寸最小,但其最小透射率远低于其他参考文献,且通道数目不足。本器件的尺寸仅为 $13.4 \mu\text{m} \times 17.6 \mu\text{m}$,可实现的透射率大于 90%,且通道串扰低于 -13.1 dB,具有出色的性能表现。

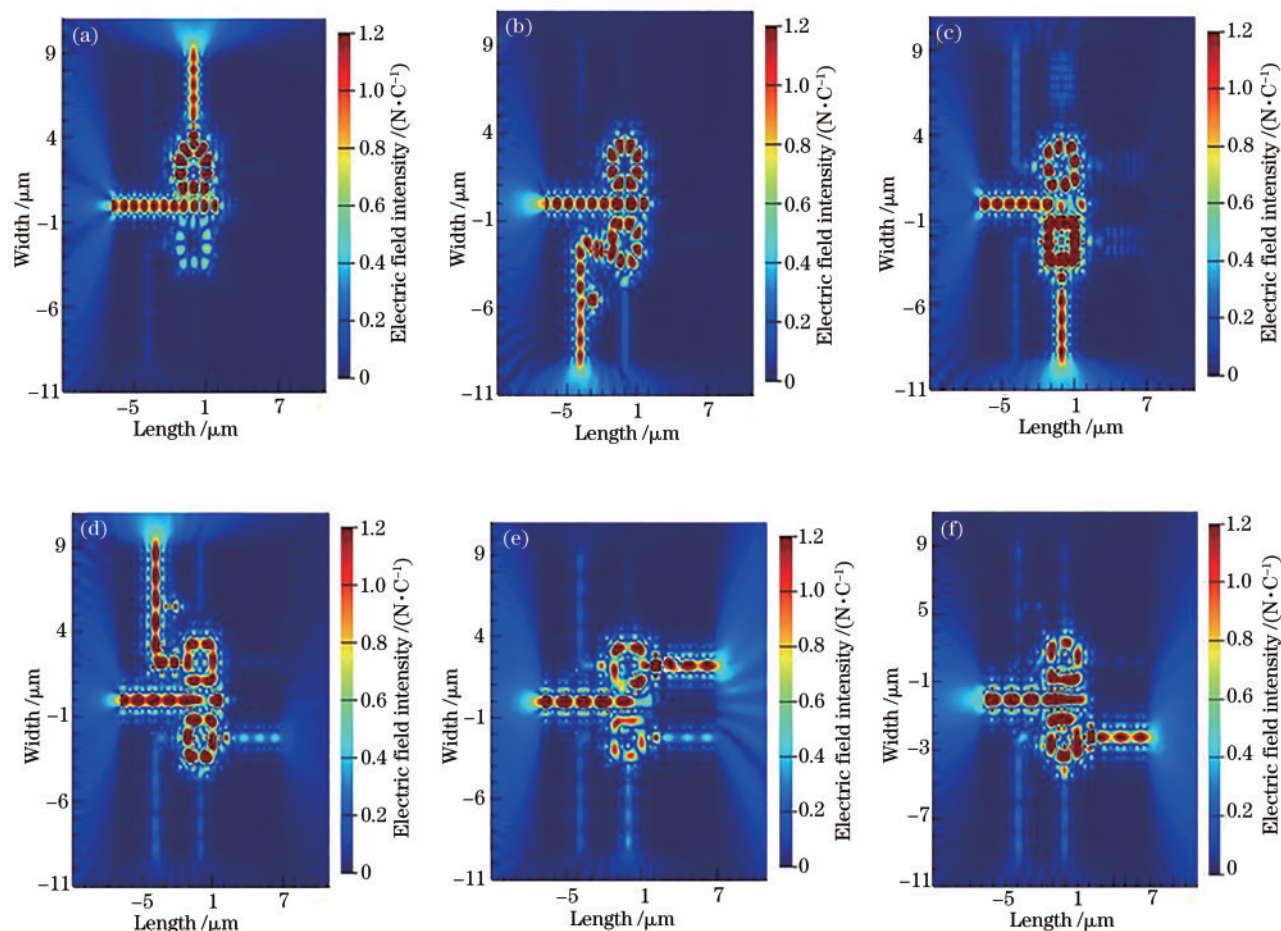


图 10 波分复用器在对应波长激励源下的场分布图。(a) $1.3298 \mu\text{m}$; (b) $1.4316 \mu\text{m}$; (c) $1.4419 \mu\text{m}$; (d) $1.5564 \mu\text{m}$; (e) $1.5966 \mu\text{m}$; (f) $1.6191 \mu\text{m}$

Fig. 10 Field distribution diagram of the wavelength division multiplexer under the corresponding wavelength excitation source.

(a) $1.3298 \mu\text{m}$; (b) $1.4316 \mu\text{m}$; (c) $1.4419 \mu\text{m}$; (d) $1.5564 \mu\text{m}$; (e) $1.5966 \mu\text{m}$; (f) $1.6191 \mu\text{m}$

表 2 各通道之间的串扰

Table 2 Crosstalk between channels

unit: dB

Crosstalk	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
CH1	-	-26.2	-49.9	-59.0	-28.4	-30.8
CH2	-37.4	-	-41.6	-38.8	-34.9	-21.6
CH3	-49.7	-23.4	-	-29.8	-14.2	-35.0
CH4	-46.2	-18.8	-22.7	-	-13.1	-35.7
CH5	-32.6	-16.6	-17.6	-26.0	-	-31.2
CH6	-29.4	-14.1	-18.2	-20.9	-23.5	-

表 3 不同方案的对比情况

Table 3 Comparison of different schemes

Reference	Frequency selection structure	Channels	Transmission/%	Crosstalk/dB	Footprint/ ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)
Ref. [6]	radius of ring cavity and micro cavity	8	97.0	-27.0	23×18
Ref. [9]	coupling length	3	90.0	-15.0	37×13
Ref. [10]	ring cavity dielectric column material	8	98.0	-1.5	-
Ref. [11]	radius of micro cavity dielectric column	4	85.6	-	11×14
Ref. [12]	radius of ring cavity dielectric column	3	90.0	-14.0	-
Ours	radius of ring cavity and micro cavity	6	90.5	-13.1	13.4×17.6

4 结 论

基于光子晶体谐振腔耦合理论,在二维光子晶体中通过引入不同缺陷结构的方式引入波导、环形谐振腔、微腔结构。通过调节微腔中心介质柱半径、外围介质柱半径进行选频,通过调节输出端边缘介质柱半径提高透射率,在输出波导一侧增加点微腔来减少串扰,实现了波长为 1.3298, 1.4316, 1.4419, 1.5564, 1.5966, 1.6191 μm 的六通道波分复用。利用 PWE 法和 FDTD 法分别对其进行能带、传输特性及场分布分析。结果表明,该结构实现六通道波分复用器功能的同时,传输效率均大于 90%,通道间串扰均小于 -13 dB,器件尺寸仅为 13.4 $\mu\text{m} \times 17.6 \mu\text{m}$ 。且本结构使用的调制方法简单,满足现有工程技术及工艺制造指标,具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [2] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] Cheng C, Shen C Y. Optical transmission

performance of photonic crystal fiber doped with near-infrared PbS quantum dots [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0506006.

程成, 沈承昱. 近红外 PbS 量子点掺杂光子晶体光纤的光传输特性[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0506006.

- [4] Liang L X, Zhang X J, Wu X S, et al. Terahertz filter and optical switch based on magnetic-photonic crystals[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0513002.
梁龙学, 张晓金, 吴小所, 等. 基于磁光子晶体的太赫兹滤波器和光开关[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0513002.

- [5] Liu Z, Wu R, Yan Q B, et al. Design and simulation of two-dimensional photonic crystal all-optical logic gates [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 182301.
刘振, 吴蓉, 严清博, 等. 二维光子晶体全光逻辑门的设计与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 182301.

- [6] Chen Z X, Liang B M, Zhuang S L. Temperature-controlled optical attenuator based on two-dimensional photonic crystals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(15): 152301.

陈之厦, 梁斌明, 庄松林. 基于二维光子晶体的温控光衰减器[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(15): 152301.

- [7] Wu R, Liu Z, Yan Q B, et al. Eight-channel photonic-crystal wavelength-division multiplexer [J]. Laser &

- Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 091302.
- 吴蓉, 刘振, 严清博, 等. 光子晶体八通道波分复用器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091302.
- [8] Zhang J, Xu X M, He L J, et al. Four-wavelength multiplexer/demultiplexer based on photonic crystal resonant coupling[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(5): 054213.
- 张佳, 徐旭明, 何灵娟, 等. 基于光子晶体共振耦合的四波长波分复用/解复用器[J]. 物理学报, 2012, 61(5): 054213.
- [9] Mounzar A, Badaoui H, Abri M. 16-channels wavelength efficient demultiplexing around 1.31/1.55 μm in 2D photonic crystal slab[J]. Optik, 2019, 193: 162685.
- [10] Dong X W, Ni P P, Liu W K. Investigation of four-channel photonic crystal wavelength division demultiplexer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 030603.
- 董小伟, 倪品品, 刘文楷. 四通道光子晶体解波分复用器的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 030603.
- [11] Zhuang Y Y, Chen H M. Study on three-wavelength photonic crystal WDM [J]. Study on Optical Communications, 2013(6): 49-51.
- 庄煜阳, 陈鹤鸣. 三波长光子晶体波分复用器的研究[J]. 光通信研究, 2013(6): 49-51.
- [12] Kannaiyan V, Savarimuthu R, Dhamodharan S K. Performance analysis of an eight channel demultiplexer using a 2D-photonic crystal quasi square ring resonator [J]. Opto-Electronics Review, 2017, 25(2): 74-79.
- [13] Zhang T, Sun J, Yang Y X. Design of WDM based on photonic crystal [J]. Optical Communication Technology, 2018, 42(3): 33-35.
- 张通, 孙晶, 杨运兴. 光子晶体波分复用器的设计[J]. 光通信技术, 2018, 42(3): 33-35.
- [14] Wang Y F, Wang M M, Wen F, et al. Three-channel wavelength division demultiplexer based on photonic crystal[J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(12): 27-29.
- 王一飞, 王梦梦, 文丰, 等. 基于光子晶体三通道解波分复用器[J]. 光通信技术, 2019, 43(12): 27-29.
- [15] Li X, Le Z C. The design and simulation of wavelength division demultiplexer based on photonic crystal micro-cavity [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(S1): 0123003.
- 李旭, 乐孜纯. 光子晶体微腔稀疏波分解复用器的设计与模拟[J]. 光子学报, 2014, 43(S1): 0123003.
- [16] Najjar M, Radhouene M, Janyani V. Optimisation of optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities [C]//2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), April 5-7, 2017, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2017: 1009-1014.
- [17] Wang Y X, Zhang K F, Shao L, et al. A six-channel wavelength demultiplexer based on photonic crystal ring resonators [J]. Laser Journal, 2019, 40(6): 45-49.
- 王娅欣, 张克非, 邵龙, 等. 六信道光子晶体环形腔波分解复用器的设计[J]. 激光杂志, 2019, 40(6): 45-49.
- [18] Rashki Z, Seyyed Mahdavi Chabok S J. Novel design of optical channel drop filters based on two-dimensional photonic crystal ring resonators [J]. Optics Communications, 2017, 395: 231-235.