

光子晶体八通道波分复用器研究

吴蓉¹, 刘振^{1,2*}, 严清博¹, 吴小所^{1,2**}

¹兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;

²兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

摘要 基于光子晶体谐振腔优越的选频特性,设计了一种八波长光子晶体波分复用器。利用平面波展开法得到了特定晶格排列和半径下光子晶体的能带结构,采用时域有限差分法分析了微腔耦合频率的变化规律,得出环形谐振器和微腔之间的共振耦合特性。该器件主要由 4 个光子晶体环形腔和 8 个尺寸不同的微腔组成,实现了 1.37, 1.39, 1.42, 1.44, 1.50, 1.51, 1.53, 1.55 μm 等 8 个波长的波分解复用。结果表明,只通过调节微腔中心柱和外围介质柱的半径,就可以使 8 个波长从特定端口输出,且输出效率都可以达到 97% 以上。所设计的器件尺寸为 $23 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$,具有物理尺寸小、耦合效率高等优点,在集成光学领域具有潜在的应用前景。

关键词 集成光学; 光子晶体环形谐振腔; 耦合谐振; 波分复用器; 时域有限差分法

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.091302

Eight-Channel Photonic-Crystal Wavelength-Division Multiplexer

Wu Rong¹, Liu Zhen^{1,2*}, Yan Qingbo¹, Wu Xiaosuo^{1,2**}

¹School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

²Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

Abstract Herein, an eight-wavelength photonic-crystal wavelength demultiplexer was designed based on the superior frequency-selection characteristics of a photonic crystal resonator. The energy band structure of the photonic-crystal with a specific lattice constant and radius was obtained using the plane wave expansion method. The law of variation in the coupling frequency of a micro-cavity was analyzed via the finite difference time domain method. The resonant coupling between the ring resonator and the micro-cavity was demonstrated. The device primarily comprised four photonic-crystal ring resonators and eight micro-cavities with different sizes. It achieved wavelength-division multiplexing at eight wavelengths of 1.37, 1.39, 1.42, 1.44, 1.50, 1.51, 1.53, and 1.55 μm . The results show that the aforementioned eight wavelengths can be output from a specific port, and an output efficiency of more than 97% can be achieved by adjusting the radii of the central rods of the micro-cavity and the peripheral dielectric rods. The designed device can be applied in integrated optics owing to its small physical size of $23 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ and high coupling efficiency.

Key words integrated optics; photonic crystal ring resonator; resonant coupling; wavelength-division multiplexer; finite difference time domain method

OCIS codes 130.7408; 230.5298; 160.5293; 250.4390

1 引言

光子晶体是介电常数不同的几种材料在空间中按一定规律分布的人工合成材料,因多重布拉格散

射,某一频率段内的光不能在光子晶体中传播,这被称为光子禁带;当去掉一排介质柱时,原来在完整光子晶体中无法传播的光又会局域在缺陷中沿波导传播,这种特性被称为光子局域^[1-2]。依据这些特性,

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-11-25; 录用日期: 2018-11-30

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)、甘肃省住房与城乡建设厅项目(JK2017-24)

* E-mail: 1757421016@qq.com; ** E-mail: wuxs_laser@mail.lzjtu.cn

可以设计许多应用价值很高的通信器件,如光开关^[3-4]、光分束器^[5-6]、光波分复用器^[7-8]、光纤等^[9-10]。光子晶体因其制作工艺简单、易于集成等优点,具有很好的应用价值。

波分复用器是光集成器件重要的组成部分之一^[11]。基于光子晶体的波分复用器研究主要通过波导间的定向耦合、点缺陷微腔耦合和环形谐振腔耦合等3种方式实现选频功能。庄煜阳等^[12]利用多模干涉效应,通过控制耦合波导的长度设计了基于波导耦合的三波长波分复用器,但损耗较大;周兴平等^[13]在三角晶格光子晶体中引入点缺陷,利用谐振腔自身的谐振频率,将光局域在微腔内,极大地提高了耦合效率;郭浩等^[14]分析讨论了中心介质柱为 $3 \times 3, 5 \times 5$ 的环形腔的耦合效果,发现 3×3 结构的耦合效率最高,但器件结构比较复杂,一个微腔对应一个环形腔,因此需要3个环形谐振腔才可以耦合输出8种频率的光波,该器件尺寸较大,不利于集成。

本文设计了一种基于光子晶体的八通道波分复用器,利用光子晶体环形腔和微腔的共振耦合特性,将4个环形腔级联在一起,实现了1.37, 1.39, 1.42, 1.44, 1.50, 1.51, 1.53, 1.55 μm 等8个波长的波分解复用。该波分解复用器与刘文楷等^[15]和Mehdizadeh等^[16]提出的结构相比,每个环形腔对应两个微腔耦合谐振,器件尺寸极大地减小,而且只通过改变微腔中心介质柱和外围介质柱的半径就可以控制不同频率的光波从特定的端口输出。该波分复用器结构简单,易于集成,调制方法简单,耦合效果高,在未来集成光路中具有应用价值。

2 原理与分析

将材料为GaAs的介质柱按一定规律排列,构成正方晶格排列的二维光子晶体,背景为空气,介质柱折射率 $n=3.4$,晶格常数 $a=0.55 \mu\text{m}$,通过模拟仿真得到最优介质柱半径 $r=0.185a$ 。在完整光子晶体中去掉两排介质柱构成两条波导,上端一条作为输入端口,下端一条作为输出端口。根据文献^[14]中讨论的结果,选取耦合效果最好的环形腔结构,在输入波导下面依次去掉4排介质柱,形成 3×3 的环形腔结构,在环形腔的顶点摆放4个同样大小的介质柱以减少环形腔在耦合传输过程中的损耗。在环形腔的正下方隔一排介质柱去掉一个介质柱,造成点缺陷形成微腔,最终构成如图1所示的共振耦合腔原理图,其中, r_c 为微腔中心介质柱半径, R_w 为微腔外围介质柱半径。

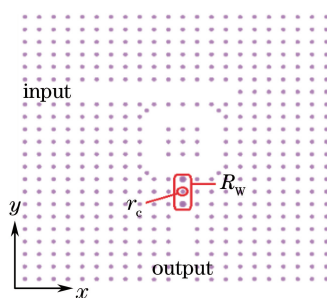


图1 共振耦合腔原理图

Fig. 1 Schematic of resonant coupling cavity

利用平面波展开(PWE)法对图1中的耦合结构进行能带计算,得到如图2所示的能带图(图中 Γ, X, M 分别为布里渊区倒格空间的3个坐标)。由图2可知,只有横磁(TM)模(电场方向平行于介质柱)的方向存在两条光子禁带,其中在归一化频率 $a/\lambda=0.298 \sim 0.436$ (式中 a 为晶格常数, λ 为波长,且 $\lambda=1.26 \sim 1.84 \mu\text{m}$)的禁带较宽。禁带越宽,设计的器件性能越好;因此,选取前述禁带进行波分复用器设计。

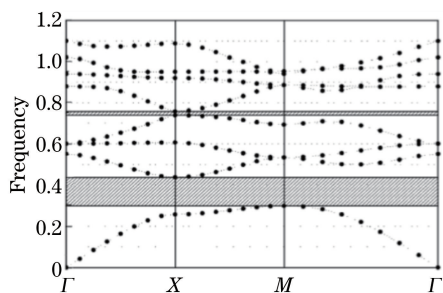


图2 完整光子晶体 TM 能带图

Fig. 2 TM energy band structure of complete photonic crystal

在Lumerical软件下,利用时域有限差分(FDTD)法对所设计的结构进行仿真模拟,输入光采用TM模式的高斯光源作为入射光,其宽度为 $1.6 \mu\text{m}$,工作波长范围为 $1.3 \sim 1.7 \mu\text{m}$,吸收边界采用完全匹配边界层(PML),得到如图3所示的输出端口的透射率分布。当微腔中心柱的半径 r_c 和外围介质柱半径 R_w 分别为 $0.03 \mu\text{m}$ 和 $0.133 \mu\text{m}$ 时,在输出端只有一个波峰输出,对应波长为 $0.141 \mu\text{m}$ 。这是由于只有当环形腔的谐振频率与微腔的谐振频率相同时,该频率的光波才会在两种结构之间发生耦合谐振,并通过输出波导输出,而其他频率的光波则会被禁止输出,因此实现了滤波功能。

在模拟仿真中发现,微腔内外介质柱半径变化时,耦合谐振频率和透射率也会发生变化,因此找到微腔内外介质柱半径变化对耦合结构共振频率的影

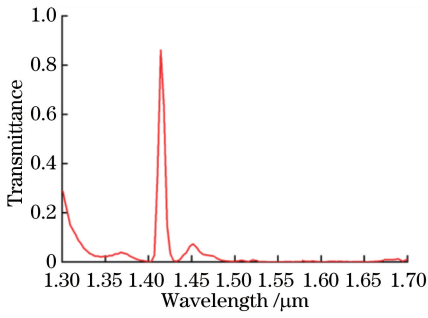


图 3 输出端透射率

Fig. 3 Transmittance of output port

响及规律至关重要。选取微腔中心介质柱半径分别为 $0.005, 0.015, 0.03 \mu\text{m}$, 微腔外围介质柱尺寸保持不变, 耦合透射率如图 4(a) 所示。结果表明, 随微腔中心介质柱半径逐渐增大, 环形腔和微腔的耦合谐振峰将向波长增大的方向(低频方向)移动。保持微腔内介质柱半径不变, 当外围介质柱半径依次从 $0.150, 0.167, 0.183 \mu\text{m}$ 增大时, 耦合谐振峰将向波长减小的方向(高频方向)移动, 如图 4(b) 所示。可见, 可以通过控制微腔的内外介质柱半径来控制不同频率的波长输出。

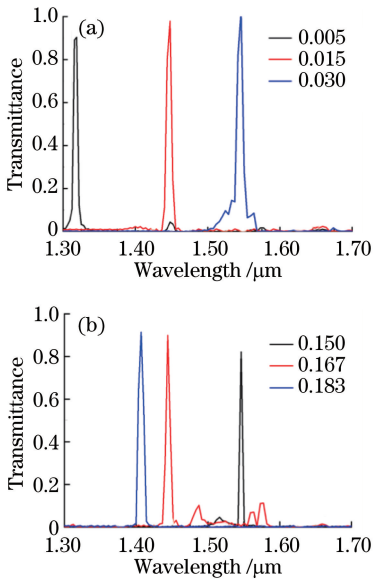


图 4 微腔半径对透射率的影响。(a)内介质柱;(b)外介质柱

Fig. 4 Impact of micro-cavity radius on transmittance.
(a) Internal dielectric rods; (b) peripheral dielectric rods

3 结构与优化

根据前面分析得出的耦合规律, 将单一的环形腔级联, 每个环形腔对应两个微腔构成八波长波分复用器, 每个波导弯曲处都添加一个介质柱以减小损耗, 得到如图 5 所示的器件。该器件由一个输入

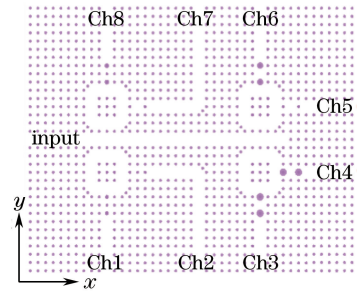


图 5 八通道波分复用器结构示意图

Fig. 5 Structural diagram of eight-channel wavelength-division multiplexer

波导、4 个环形腔、8 个微腔和 8 个输出波导(分别记为 Ch1、Ch2、Ch3、Ch4、Ch5、Ch6、Ch7、Ch8) 构成。当光从输入端进入时, 与环形腔耦合频率相同的光将进入环形腔内, 再分别调节 8 个微腔中心介质柱半径 r_c 和外围介质柱半径 R_w 的大小, 使微腔的谐振频率分别与对应的环形腔的谐振频率相同, 这样频率相同的光就从特定的端口输出, 而频率不同的光波被禁止输出。

采用时域有限差分法对器件参数进行优化, 用 Lumerical 软件扫描分析可知, 当微腔内介质柱半径 $r_{c1} = 0.0267 \mu\text{m}, r_{c2} = 0.0455 \mu\text{m}, r_{c3} = 0.0111 \mu\text{m}, r_{c4} = 0.0090 \mu\text{m}, r_{c5} = 0.0371 \mu\text{m}, r_{c6} = 0.0436 \mu\text{m}, r_{c7} = 0.0411 \mu\text{m}, r_{c8} = 0.0900 \mu\text{m}$; 外围介质柱半径 $R_{w1} = 0.1333 \mu\text{m}, R_{w2} = 0.10175 \mu\text{m}, R_{w3} = 0.25 \mu\text{m}, R_{w4} = 0.1667 \mu\text{m}, R_{w5} = 0.10175 \mu\text{m}, R_{w6} = 0.2178 \mu\text{m}, R_{w7} = 0.1166 \mu\text{m}, R_{w8} = 0.16 \mu\text{m}$ 时, 环形腔与对应的微腔耦合效果最好。通过扫描优化, 最终计算得出波分复用器的透射率, 如图 6 所示, 在中心波长 $Z_1 = 1.37 \mu\text{m}, Z_2 = 1.39 \mu\text{m}, Z_3 = 1.42 \mu\text{m}, Z_4 = 1.44 \mu\text{m}, Z_5 = 1.50 \mu\text{m}, Z_6 = 1.51 \mu\text{m}, Z_7 = 1.53 \mu\text{m}, Z_8 = 1.55 \mu\text{m}$ 处产生了明显的透射峰, 实现了 8 种不同波长的光

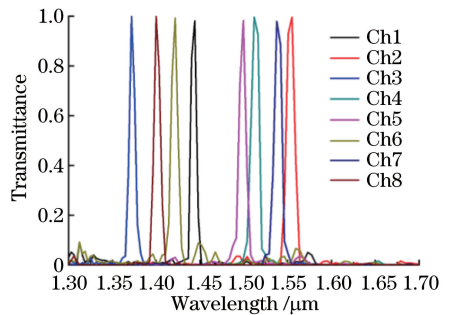


图 6 八通道波分复用器的透射率分布图

Fig. 6 Transmittance of eight-channel wavelength-division multiplexer

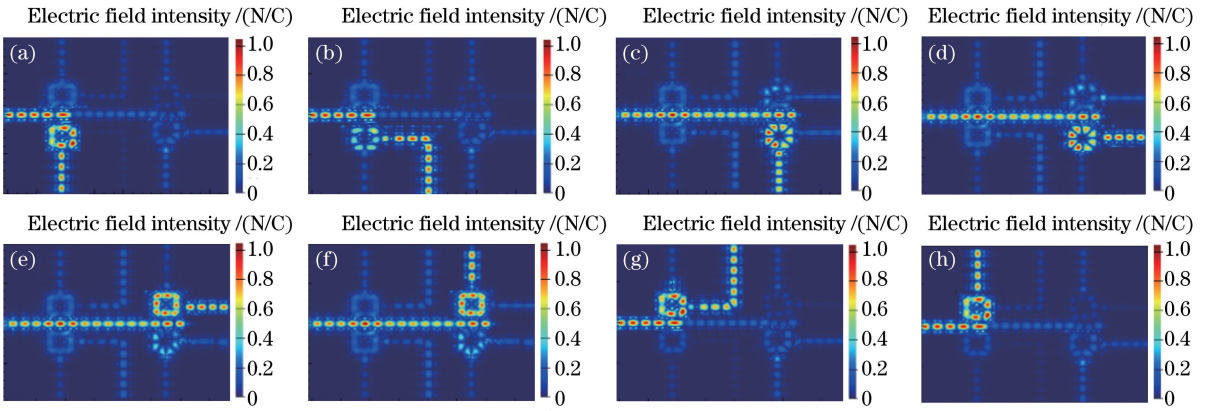


图7 八通道解波分复用器在不同波长激励源下的场分布图。(a) 1.44 μm ; (b) 1.55 μm ;
(c) 1.37 μm ; (d) 1.51 μm ; (e) 1.50 μm ; (f) 1.42 μm ; (g) 1.53 μm ; (h) 1.39 μm

Fig. 7 Field distributions of eight-channel wavelength-division multiplexer under excitation sources with different wavelengths.

(a) 1.44 μm ; (b) 1.55 μm ; (c) 1.37 μm ; (d) 1.51 μm ; (e) 1.50 μm ; (f) 1.42 μm ; (g) 1.53 μm ; (h) 1.39 μm

波分别经由 Ch1、Ch2、Ch3、Ch4、Ch5、Ch6、Ch7、Ch8 等 8 个通道输出。结果表明,各输出端的透射率都较高,且带宽窄,具有良好的滤波性能。

分别将图 6 中透射峰对应中心波长的光波单独从输入端输入,得到如图 7 所示的八通道波分复用器在不同激励源下的场分布图。仿真结果表明,当特定波长的激励源入射时,光波从其他端口输出的强度很小,都可以沿着设定好的共振耦合结构从特定的输出端口输出。

信道串扰定义为相邻信道对传输信道的串扰程度,其表达式为

$$I = 10 \lg(P_t/P_{in}), \quad (1)$$

式中: P_t 为相邻信道进入传输信道的辐射强度; P_{in} 为传输信道的透射强度。信道串扰越低,器件性能越好。将仿真结果代入(1)式可得到各通道的串扰大小,结果见表 1。由表 1 可知,各通道间的信号串扰都小于 -27 dB。

表 1 八通道波分复用器参数

Table 1 Parameters of eight-channel wavelength-division multiplexer

Output	Central wavelength / μm	$r_c/\mu\text{m}$	$R_w/\mu\text{m}$	Transmittance / %	Bandwidth / nm	I / dB
Ch1	1.44	0.0267	0.1333	98.0	6.30	-31.4
Ch2	1.55	0.0455	0.10175	99.5	9.49	-30.2
Ch3	1.37	0.0111	0.2500	99.8	7.41	-27.3
Ch4	1.51	0.0090	0.1667	99.5	10.35	-29.6
Ch5	1.50	0.0371	0.10175	98.1	8.22	-29.5
Ch6	1.42	0.0436	0.2178	99.2	7.93	-28.5
Ch7	1.53	0.0411	0.1166	97.8	10.01	-35.2
Ch8	1.39	0.0900	0.1600	99.8	7.32	-27.6

此外,从表 1 器件性能参数还可以看出,将模拟仿真得出的微腔内外介质柱半径设定在器件结构中时,环形腔和微腔的耦合效率高,透射效率都可达到 97% 以上,3 dB 带宽均在 11 nm 以下,表明器件选频特性好,满足设计要求。

4 结 论

设计了一种光子晶体八通道波分复用器,通过控制不同微腔的中心柱和外围介质柱的半径,实现

了 1.37, 1.39, 1.42, 1.44, 1.50, 1.51, 1.53, 1.55 μm 等 8 个波长的波分解复用。用 PWE 法得到了完整光子晶体的禁带结构,并用 FDTD 法分析了单一波长的光波从输入端入射后的传输情况和电场分布。模拟分析结果表明,各端口的透射率都可以达到 97% 以上。该八通道解波分复用器由 4 个环形腔分别对应 2 个微腔组成,器件尺寸大大减小,仅为 $23 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$,易于集成,而且调制方法简单,在集成光器件领域具有潜在的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Panoiu N C, Bahl M, Osgood R M. All-optical tunability of a nonlinear photonic crystal channel drop filter[J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1605-1610.
- [2] Liu J P, Li H B, Meng X D, *et al.* Eigen field distribution of two-dimensional functional photonic crystals with point defects [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0803001.
刘继平, 李海波, 孟祥东, 等. 含点缺陷二维函数光子晶体的本征场分布[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0803001.
- [3] 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.
- [4] Li L, Liu G Q, Chen Y H. An optical switch based on coupled heterostructure photonic-crystal waveguides[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123002.
黎磊, 刘桂强, 陈元浩. 光子晶体异质结构耦合波导光开关[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123002.
- [5] Zhang X X, Chen H M. Design and performance analysis of photonic crystal polarizing beam splitter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011301.
张信祥, 陈鹤鸣. 光子晶体偏振分束器的设计与性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011301.
- [6] Wang J L, Liu Y, Chen H M. Design on terahertz polarization beam splitter based on self-collimating effect of photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0423001.
汪静丽, 刘洋, 陈鹤鸣. 基于光子晶体自准直效应的太赫兹偏振分束器设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0423001.
- [7] Fu P D, Chen H M. Design and performance analysis of three mode division multi/demultiplexer based on two-dimensional photonic crystals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 020602.
付培栋, 陈鹤鸣. 基于二维光子晶体三模式模分复用/解复用器的设计与性能分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 020602.
- [8] 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.
- [9] Liao K, Liao J F, Xie Y M, *et al.* A defect photonic crystal fiber with high birefringence and negative dispersion [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070604.
廖昆, 廖健飞, 谢应茂, 等. 一种高双折射负色散的缺陷型光子晶体光纤[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070604.
- [10] Yang Y H, Yang F L, Lu L, *et al.* Research on interferometer photonic crystal fiber optic gyroscope technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328004.
杨远洪, 杨福铃, 陆林, 等. 干涉型光子晶体光纤陀螺技术研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328004.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Zhou X P, Shu J, Lu B J, *et al.* Two-wavelength division demultiplexer based on triangular lattice photonic crystal resonant cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0123001.
周兴平, 疏静, 卢斌杰, 等. 基于三角晶格光子晶体谐振腔的双通道解波分复用器[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0123001.
- [14] Guo H, Wu P, Yu T B, *et al.* Design of large separating angle ultracompact multiway beam splitter based on photonic crystal ring resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1501-1505.
郭浩, 吴评, 于天宝, 等. 光子晶体环形谐振腔大角度超微多路光分束器的设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1501-1505.
- [15] Liu W K, Li B Q, Dong X W, *et al.* Design and simulation on eight-channel photonic crystal filter [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(6): 772-774, 821.

- 刘文楷, 李保群, 董小伟, 等. 八通道光子晶体滤波器的设计与仿真[J]. 半导体光电, 2012, 33(6): 772-774, 821.
- [16] Mehdizadeh F, Soroosh M, Alipour-Banaei H, *et al.* All optical 8-channel wavelength division demultiplexer based on photonic crystal ring resonators[C]//International Conference on Electrical and Electronics Engineering, November 30-December 2, 2017, Bursa, Turkey. New York: IEEE, 2017: 446-450.