

# 激光与光电子学进展

## 可扩展小型化光子晶体波分复用器研究

李梦凡, 陈德媛\*, 张岩, 徐聪

南京邮电大学电子与光学工程学院, 微电子学院, 江苏 南京 210003

**摘要** 采用二维光子晶体设计了一种可扩展的小型化准密集型八通道波分复用器结构。二维光子晶体是由硅介质柱在空气中按照三角格子周期性排列而成, 通过设计直线主波导、下载腔和输出波导结构, 利用腔和波导之间的耦合效应实现波长选择。所设计的腔由一个内柱和四个外柱构成, 结构简洁, 腔模式可通过内外柱的直径进行调控, 实现多波长的选择, 具有可扩展性。实现准密集型波分复用结构, 八个波长分别为: 1542.2, 1544.2, 1546, 1548.2, 1550, 1552, 1554.4, 1557.6 nm, 平均波长间隔为 2.2 nm, 插入损耗分别为  $-0.5$ ,  $-0.25$ ,  $-0.25$ ,  $-0.7$ ,  $-0.25$ ,  $-0.5$ ,  $-0.1$ ,  $-0.1$  dB, 最大信道串扰为  $-12$  dB。器件尺寸为  $19.8 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ , 面积为  $217.8 \mu\text{m}^2$ , 实现了小型化、高透射和高隔离, 为用于光集成奠定了基础。其中设计及分析通过 COMSOL 软件有限元方法完成。

**关键词** 光学器件; 光子晶体; 波分复用器; 插入损耗; 信道串扰; 有限元法

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2325001

## Research on Scalable and Miniaturized Photonic Crystal Wavelength Division Multiplexer

Li Mengfan, Chen Deyuan\*, Zhang Yan, Xu Cong

College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003, China

**Abstract** In this paper, a two-dimensional photonic crystal is used to design a miniaturized, dense, scalable eight-channel multiplexer structure. The two-dimensional photonic crystal is formed by periodically arranging silicon dielectric columns in the air using a triangular lattice. The linear main waveguide, download cavity, and output waveguide structure are designed, and the coupling effect between the cavity and waveguide is used to select the wavelength. The designed cavity is composed of one inner and four outer columns, and it has a simple structure. The cavity mode can be adjusted through the diameter of the inner and outer columns to realize multiwavelength selection and the scalability structure. A quasi-dense wavelength division multiplexing structure is realized. The multiplexing of eight wavelengths, including 1542.2, 1544.2, 1546, 1548.2, 1550, 1552, 1554.4, and 1557.6 nm, achieve 2.2 nm of the average wavelength interval, and the insertion loss is  $-0.5$ ,  $-0.25$ ,  $-0.25$ ,  $-0.7$ ,  $-0.25$ ,  $-0.5$ ,  $-0.1$ , and  $-0.1$  dB, respectively. The maximum channel crosstalk is  $-12$  dB. The device size is  $19.8 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ . It achieves miniaturization, high transmission, and high isolation. It also lays a foundation for optical integration. The design and analysis are done with the finite element method using COMSOL software.

**Key words** optical devices; photonic crystals; wavelength division multiplexer; insertion loss; channel crosstalk; finite element method

**OCIS codes** 230.5298; 250.5300; 160.5293

收稿日期: 2020-12-30; 修回日期: 2021-02-08; 录用日期: 2021-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(61804080)

通信作者: \*mengwqx@163.com

## 1 引言

光子晶体对光波有良好的调制能力,自 1987 年提出“光子晶体”这个概念<sup>[1]</sup>,50 多年来进行了广泛深入的研究。光子晶体可以制作多种光学器件,如光学存储器<sup>[2]</sup>、滤波器<sup>[3-4]</sup>、逻辑门<sup>[5-6]</sup>、光开关<sup>[7]</sup>、分光器<sup>[8]</sup>、传感器<sup>[9-10]</sup>、光纤<sup>[11]</sup>和波分复用器<sup>[12-21]</sup>等。其中光纤和波分复用器是光通信中必不可少的单元器件,且随着网络通信的高速发展和市场需求的日益增加,光纤作为光信号传输的载体,对它的研究逐渐趋向大容量紧密型,而与之匹配的波分复用器则需要更加密集的波长。因此密集型、小尺寸、高性能成为当前波分复用器设计的目标。但由于波长间隔小,导致设计难度增加。基于光子晶体设计的光子器件具有设计灵活、小型化、低功耗等优点,选择光子晶体设计高性能的波分复用器也是很多科研工作者目前正在攻克的目标,设计思路为通过各类波导和各种谐振腔之间的定向耦合,实现不同波长的选择和输出。

Fallahi 等<sup>[22]</sup>设计了三通道六边形环形谐振波分复用器,三个波长平均间隔 4 nm,透射率为 96%,器件尺寸为  $357 \mu\text{m}^2$ 。Alipour-Banaei 等<sup>[23]</sup>提出了一种矩形环形谐振结构,四个波长平均间隔约为 3 nm,最低传输效率大于 95%,器件尺寸为  $900 \mu\text{m}^2$ 。Moungar 等<sup>[24]</sup>基于分光器的基础上设计了复合 1310 nm 波段的八通道和 1550 nm 波段的八通道的十六通道的波分复用器,波长平均间隔约为 5 nm,透射率约为 90%,器件尺寸为  $752 \mu\text{m}^2$ 。Almasian 等<sup>[25]</sup>设计了一种基于二维光子晶体环形谐振器的硅棒六角形晶格的超窄带通道滤波器,五个波长下载通道均间隔 10 nm,下载效率均达到了 100%,性能优越,不过这种结构尺寸较大,为  $657 \mu\text{m}^2$ 。

为了协调器件的尺寸和性能,设计了一种新型腔结构的波分复用器,结构简洁,具有可扩展性。所设计的腔结构由一个内柱和四个外柱构成,可通过调节腔结构参数实现不同波长的输出。实现了 1504.8, 1508, 1512.4, 1525, 1529.4, 1544.4, 1549.4, 1558 nm 八个波长的解波分复用,波长平均间隔 7.6 nm。为了满足密集型波分复用的需求,对腔结构参数进行优化,实现了 1542.2, 1544.2, 1546, 1548.2, 1550, 1552, 1554.4, 1557.6 nm 八个波长的波分复用,波长平均间隔为 2.2 nm。

## 2 腔结构设计

二维光子晶体中介质柱按照三角形阵列排列,背景材料为空气,折射率为 1,介质柱的材料为硅,折射率为 3.4。光子晶体的晶格常数  $a=600 \text{ nm}$ ,介质柱的半径  $r=0.18a$ 。将完美光子晶体的两排介质柱和一个介质柱去掉,形成两个波导和一个点缺陷微腔。两个波导中其中一个作为输入通道,另外一个作为下载输出通道。在去掉介质柱的腔周围加上四个介质柱和一个内介质柱,内柱的半径为  $r_1$ ,四个外柱的半径为  $r_{1w}$ ,外柱距离内柱的距离均为  $0.5a$ ,如图 1 所示。

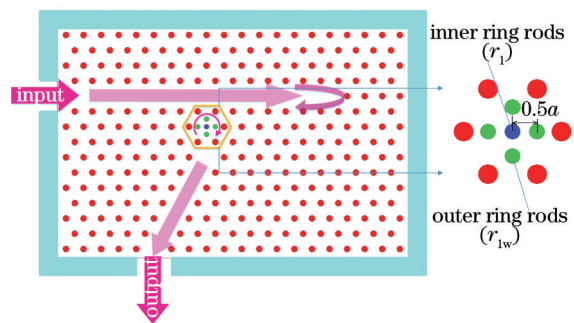


图 1 腔结构示意图

Fig. 1 Schematic of cavity structure

利用有限元法对只去掉一排介质柱的光子晶体波导结构进行扫描,得到图 2 所示的波长导通范围,导通波长在 1.25~1.7  $\mu\text{m}$  之间。

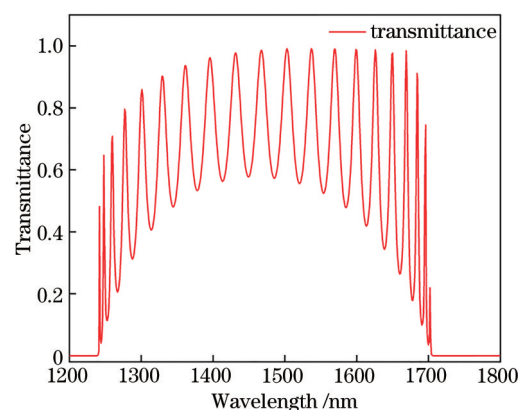


图 2 光子晶体波导波长导通范围图

Fig. 2 Wavelength conduction range of photonic crystal waveguide

取输入波长为 1.5~1.57  $\mu\text{m}$ ,边界条件采用完美匹配层(PML),调节腔结构的内柱半径  $r_1$  和外柱的半径  $r_{1w}$ ,得到如图 3 所示的透射率分布。透射率的计算方法为

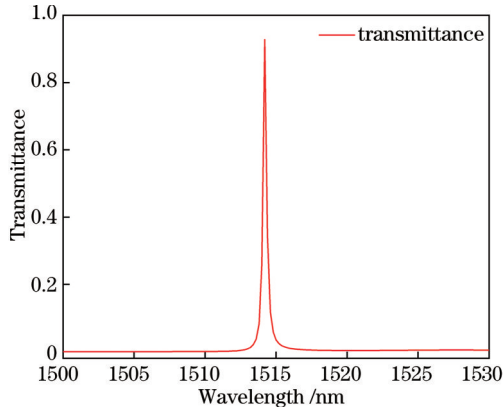


图 3 单下载通道透射谱线

Fig. 3 Single download channel transmission spectrum

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (1)$$

式中,  $P_{in}$  为输入信道光功率,  $P_{out}$  为输出信道光功率。

一般用品质因子  $Q$  (Quality factor) 分析腔的性能,  $Q$  值越大表示局域效果越好。  $Q$  因子的计算方法为

$$Q = \frac{\lambda_c}{\Delta\lambda}, \quad (2)$$

式中,  $\lambda_c$  为输出的中心波长,  $\Delta\lambda$  是信道的半峰全宽。

当  $r_1=88$  nm,  $r_{1w}=86.8$  nm 时, 输出端口只有一个波峰输出, 对应输出波长为 1514.2 nm, 半峰全宽为 0.3 nm,  $Q$  为 5047, 透射率为 93%。这是因为波长 1514.2 nm 的频率与此时腔的谐振频率相同, 可以从下载通道输出, 而其他频率的光则不能通过微腔, 从而实现滤波的功能。

保持  $r_1=88$  nm 不变, 改变  $r_{1w}$  的大小, 腔选择到下载通道的波长也会发生变化。波长变化如图 4 所示, 波长随着  $r_{1w}$  的增大向右移动。

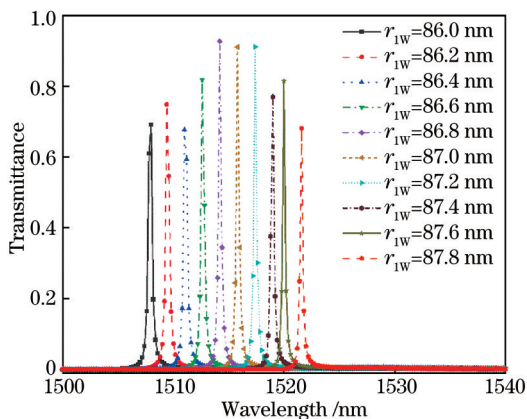


图 4 腔中外柱半径  $r_{1w}$  对下载通道透射率的影响

Fig. 4 Influence of radius  $r_{1w}$  of the outer ring rods in cavity on transmittance of download channel

保持  $r_{1w}=86.8$  nm 不变, 改变  $r_1$  的大小, 腔选择到下载通道的波长几乎没有变化, 但是透射率有明显差异, 如图 5 所示。因此可以通过改变  $r_1$  来调节透射率的大小, 而通过改变  $r_{1w}$  可选择不同的下载波长。

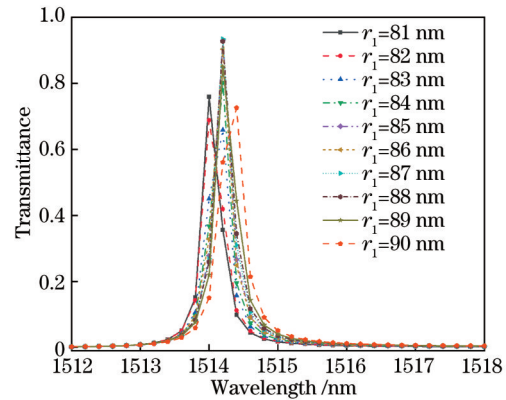


图 5 腔中内柱半径  $r_1$  对下载通道透射率的影响

Fig. 5 Influence of radius  $r_1$  of inner ring rods in cavity on transmittance of download channel

### 3 多通道波分复用器设计

根据图 1 的腔设计结构, 将这一单一通道进行扩展, 形成八个通道的波分复用器, 如图 6 所示。该器件由一个输入主波导和八个输出波导构成, 每一个输出波导和主波导之间都有一个腔进行耦合, 以此来选出八个不同的波长, 实现波分复用功能。光从左侧输入端口进入, 通过调节外柱的半径  $r_{mw}$  来进行波长选择, 调节内柱的半径  $r_m$  得到更高的透射率 ( $m=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ )。

用 COMSOL 软件进行参数扫描分析, 采用有限元法对参数进行优化, 当内柱半径  $r_1=88$  nm,

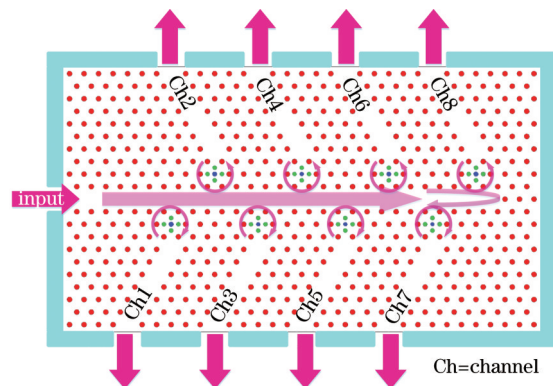


图 6 八通道腔型波分复用器结构图

Fig. 6 Structure diagram of eight-channel cavity wavelength division multiplexer

$r_2=102$  nm,  $r_3=90$  nm,  $r_4=100$  nm,  $r_5=92$  nm,  $r_6=98$  nm,  $r_7=80$  nm,  $r_8=96$  nm 时, 外柱半径  $r_{1w}=84.5$  nm,  $r_{2w}=88$  nm,  $r_{3w}=88.6$  nm,  $r_{4w}=84.5$  nm,  $r_{5w}=87.9$  nm,  $r_{6w}=84.1$  nm,  $r_{7w}=87.1$  nm,  $r_{8w}=91.18$  nm 时, 腔选择下载波长效果良好, 透射率如图 7 所示。选择的八个中心波长分别为: 1504.8, 1508, 1512.4, 1525, 1529.4,

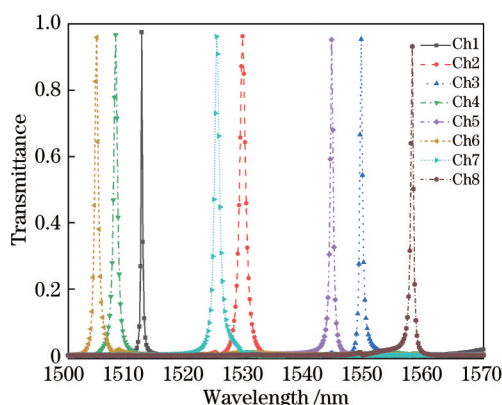


图 7 八通道腔型波分复用器透射率分布图

Fig. 7 Distribution of transmittance of eight-channel cavity wavelength division multiplexer

1544.4, 1549.4, 1558 nm, 平均波长间隔为 7.6 nm, 平均透射率为 96%。由于半峰全宽  $\Delta\lambda$  很小, 因此品质因子  $Q$  值很高, 该八通道波分复用器有良好的滤波特性。

表 1 给出了该八通道光子晶体波分复用器的结构参数和性能参数, 其中 Loss 表示插入损耗 (Insertion loss)。

衡量波分复用器性能好坏有两个指标, 分别为插入损耗和信道串扰。插入损耗代表了器件对每个通道光输出功率的影响, 数值越大(越接近 0)表示性能越好。其表达式为

$$IL = 10\lg(P_t/P_{in}) \quad (3)$$

信道串扰定义为相邻信道对传输信道的串扰程度, 其定义表达式为:

$$C = 10\lg(P_{wt}/P_t) \quad (4)$$

式中,  $P_{in}$  为输入信道的光功率,  $P_t$  为下载波长从信道输出的光功率,  $P_{wt}$  为下载波长信道进入相邻信道的光功率。信道串扰越低, 表示信道之间的隔离度越高, 器件性能越好。信道串扰曲线如图 8 所示, 信道间的互相串扰的值见表 2。各通道

表 1 八通道波分复用器参数

Table 1 Parameters of eight-channel wavelength division multiplexer

Channels	$\lambda_c$ /nm	$r_m$ /nm	$r_{mw}$ /nm	$T$ /%	$\Delta\lambda$ /nm	$Q$	Loss /dB
Ch1	1512.4	88	84.50	97.5	0.3	5041	-0.11
Ch2	1529.4	102	88.00	96.0	1.1	1390	-0.17
Ch3	1549.4	90	88.60	95.0	0.5	3099	-0.20
Ch4	1508.0	100	84.50	97.0	0.7	2154	-0.15
Ch5	1544.4	92	87.90	95.0	0.4	3861	-0.21
Ch6	1504.8	98	84.10	96.0	0.7	2150	-0.18
Ch7	1525.0	80	87.10	96.0	1.0	1525	-0.17
Ch8	1558.0	96	91.18	93.5	0.5	3116	-0.30

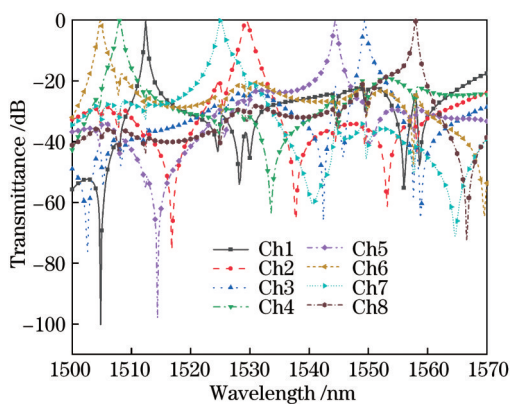


图 8 八通道串扰曲线

Fig. 8 Crosstalk of eight-channel

间的串扰值都小于 -20.5 dB, 说明均有较高的隔离度。

图 9 是八个下载波长从相应的输出端口输出的电场分布图。结果表明, 每一个输出波长都能很好地从对应的端口输出, 进入其他端口的强度较小, 有着较高的隔离度。有一些光强进入了其他通道, 这是因为存在其他通道对当前信道的串扰, 串扰值越大, 隔离度越差。当串扰值小于 -25 dB 时, 信道之间的串扰现象表现得不敏感, 波分复用的性能更优。表 3 给出在当前输出端口波长下其他端口的透射率。

表 2 八通道互相间的串扰参数值  
Table 2 Crosstalk of eight-channel parameters

unit: dB

Channels	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8
Ch1	—	-41.2	-37.8	-27.5	-55.5	-30.2	-32.9	-43.7
Ch2	-37.2	—	-27.9	-33.3	-29.5	-25.3	-22.1	-33.2
Ch3	-30.1	-41.4	—	-23.4	-27.9	-24.1	-37.2	-23.8
Ch4	-41.0	-31.2	-42.4	—	-43.9	-20.5	-32.0	-42.6
Ch5	-28.3	-40.5	-21.6	-25.9	—	-30.5	-34.1	-32.5
Ch6	-100.2	-34.3	-42.7	-27.0	-37.2	—	-34.1	-38.2
Ch7	-34.4	-20.9	-30.5	-34.6	-29.4	-28.3	—	-40.4
Ch8	-24.9	-35.1	-42.1	-25.8	-31.2	-24.7	-41.6	—

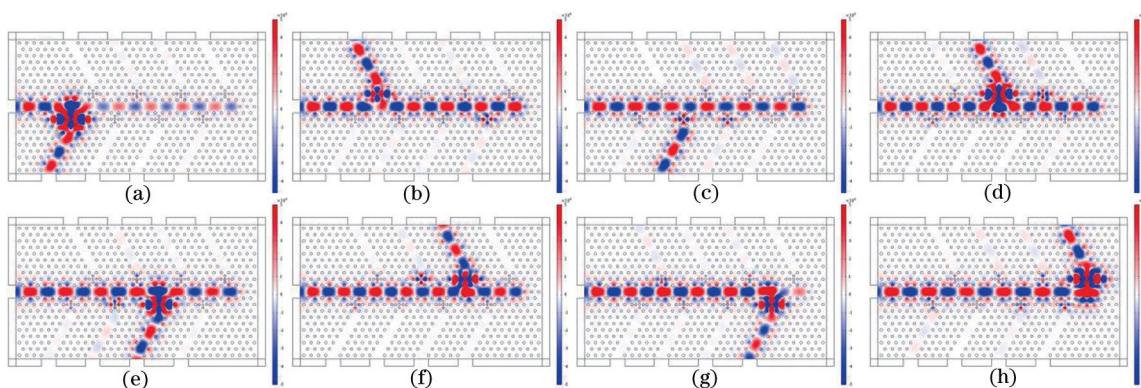


图 9 八通道解波分复用器在不同波长下的电场图。(a) 1512.4 nm; (b) 1529.4 nm; (c) 1549.4 nm; (d) 1508.0 nm; (e) 1544.4 nm; (f) 1504.8 nm; (g) 1525.0 nm; (h) 1558.0 nm

Fig. 9 Electric field diagram of eight-channel de-wavelength division multiplexer at different wavelengths. (a) 1512.4 nm; (b) 1529.4 nm; (c) 1549.4 nm; (d) 1508.0 nm; (e) 1544.4 nm; (f) 1504.8 nm; (g) 1525.0 nm; (h) 1558.0 nm

表 3 端口透射率汇总  
Table 3 Port transmittance summary

unit: %

Channels	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8
Ch1	97.50	0.01	0.02	0.18	0.00	0.1	0.06	0.00
Ch2	0.02	96.00	0.16	0.04	0.11	0.30	0.61	0.04
Ch3	0.10	0.01	95.00	0.46	0.16	0.40	0.02	0.41
Ch4	0.01	0.08	0.01	97.00	0.01	0.90	0.06	0.01
Ch5	0.15	0.01	0.69	0.25	95.00	0.09	0.04	0.06
Ch6	0.00	0.04	0.01	0.20	0.02	96.00	0.04	0.02
Ch7	0.01	0.82	0.09	0.04	0.11	0.15	96.00	0.04
Ch8	0.31	0.03	0.01	0.26	0.08	0.34	0.01	93.50

### 4 选择波长的优化

为实现在 1550 nm 波段选出更多的波长,因此需要对腔的结构进行优化,缩小波长间隔,使波分复用器密集化。当内柱半径  $r_1=100$  nm,  $r_2=96$  nm,  $r_3=83$  nm,  $r_4=86$  nm,  $r_5=83$  nm,  $r_6=94$  nm,  $r_7=82$  nm,  $r_8=98$  nm 时,外柱半径  $r_{1w}=90.2$  nm,  $r_{2w}=89.28$  nm,  $r_{3w}=88.5$  nm,  $r_{4w}=87.3$  nm,  $r_{5w}=$

$88.0$  nm,  $r_{6w}=88.74$  nm,  $r_{7w}=92.3$  nm,  $r_{8w}=90.4$  nm 时,腔选择输出波长效果良好,透射率如图 10 所示。选择的八个中心波长分别为 1542.2, 1544.2, 1546, 1548.2, 1550, 1552, 1554.4, 1557.6 nm, 平均波长间隔为 2.2 nm, 平均透射率为 92.5%。由于半峰全宽  $\Delta\lambda$  很小,因此品质因子 Q 值较高,该准密集型八通道波分复用器有良好的滤波特性。

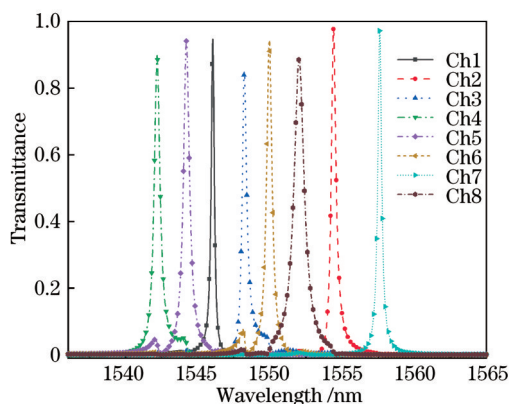


图 10 准密集型八通道波分复用器透射率分布图

Fig. 10 Transmittance distribution diagram of quasi-dense eight-channel wavelength division multiplexer

信道串扰曲线如图 11 所示,改进准密集型八通道光子晶体波分复用器的结构参数和性能参数值见表 4,信道间的互相串扰的值见表 5。各通道间的

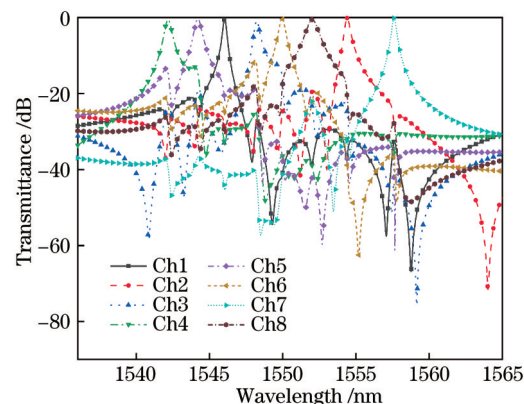


图 11 准密集型八通道串扰曲线

Fig. 11 Crosstalk of quasi-dense eight-channel

串扰值均小于 -12 dB,这个输出波长下的信道串扰明显大于第 3 节中的波长间隔为 7.6 nm 时的 -20.5 dB,这说明波长间隔越小,信道之间的串扰越大。

表 4 准密集型八通道波分复用器参数

Table 4 Parameters of quasi-dense eight-channel wavelength division multiplexer

Channels	$\lambda_c$ /nm	$r_m$ /nm	$r_{mw}$ /nm	$T$ /%	$\Delta\lambda$ /nm	$Q$	Loss /dB
Ch1	1546.0	100	90.20	95.0	0.25	6184	-0.25
Ch2	1554.4	96	89.28	97.5	0.40	3886	-0.10
Ch3	1548.2	83	88.50	85.0	0.40	3870	-0.70
Ch4	1542.2	86	87.30	90.0	0.50	3084	-0.50
Ch5	1544.2	83	88.00	94.0	0.50	3088	-0.25
Ch6	1550.0	94	88.74	95.0	0.45	3445	-0.25
Ch7	1557.6	82	92.30	97.5	0.30	5192	-0.10
Ch8	1552.0	98	90.40	89.0	0.80	1940	-0.50

表 5 准密集型八通道相互间的串扰参数值

Table 5 Crosstalk parameters of quasi-dense eight-channel wavelength division multiplexer

unit: dB

Channels	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8
Ch1	—	-29.5	-32.8	-33.5	-22.0	-25.5	-43.8	-30.5
Ch2	-36.5	—	-24.7	-32.0	-37.0	-38.5	-32.5	-21.0
Ch3	-27.5	-26.4	—	-25.0	-19.5	-12.0	-42.0	-18.7
Ch4	-28.1	-29.5	-22.9	—	-15.7	-23.9	-40.5	-29.5
Ch5	-25.5	-26.7	-19.4	-14.5	—	-26.7	-36.7	-32.5
Ch6	-41.0	-24.7	-17.5	-36.4	-37.8	—	-41.2	-17.5
Ch7	-32.7	-27.8	-42.0	-35.7	-42.0	-36.6	—	-27.8
Ch8	-38.4	-19.6	-23.2	-39.0	-42.2	-22.2	-22.0	—

表 6 为所提出的八通道波分复用器的器件尺寸和波长间隔与已有文献的对比。可知,所提出的波分复用器具有小型化的优势:品质因子约 3000,信道波长间隔约 2.2 nm,传输效率为 85%~98%,串

扰值为 -12 dB,器件尺寸约为 217.8  $\mu\text{m}^2$ 。此外,此结构有良好的扩展性,可做更多通道的波分复用器,且相较于其他可扩展通道的波分复用器,器件尺寸也不会明显的增加。因此,所设计的波分复用

表 6 各种波分复用器的比较

Table 6 Comparison of various wavelength division multiplexers

Reference	Number of output ports	Coupling efficiency / %		Q factor Min	Crosstalk / dB		Footprint / $\mu\text{m}^2$	Spectral line-width / nm	Scalability
		Min	Max		Min	Max			
Ref. [22]	3	92.0	100.0	1550	—	—	357.0	1.1	Yes
Ref. [23]	4	95.0	100.0	2620	-40.0	-19.0	900.0	3.0	Yes
Ref. [24]	16	80.0	100.0	517	-41.4	-9.6	752.0	5.0	No
Ref. [25]	5	100.0	100.0	1500	—	—	657.0	10.0	Yes
Ref. [18]	8	97.8	99.8	150	-35.2	-27.3	414.0	23.0	—
Ref. [19]	3	90.0	94.0	—	-37.8	-14.0	398.0	5.5	—
Our work	8	85.0	98.0	3084	-43.8	-12.0	217.8	2.2	Yes

器有更高的集成度,有利于光集成。

### 5 可扩展性分析

根据腔结构的简易性和小型化特性,可以轻易地对八通道进行扩展。出于对仿真的精度和时长的考虑,只对结构扩展为十六通道的结构进行分析。改变内柱半径( $r_m$ )和外柱半径( $r_{mw}$ )的大小,得到新的十六个输出波长,都有较高的透射率,十六通道波分复用器透射率分布如图 12 所示,具体数值在表 7 中给出。

由图 12 和表 7 可知,该结构在十六通道时的最低的透射率仍然能达到 85%,平均透射率为 90.5, Q 最小值为 1705,最大可达到 10254。十六个波长的平均间隔为 2.1 nm,插入损耗较低,确有较强的扩展性。

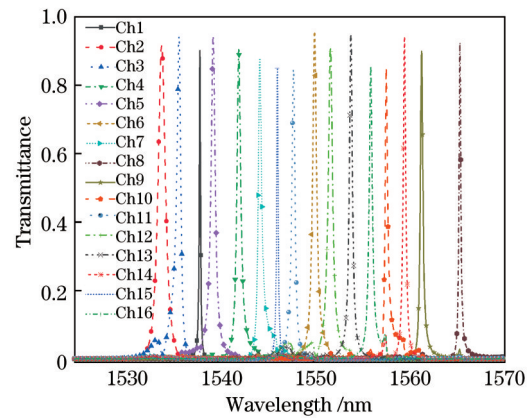


图 12 十六通道波分复用器透射率分布图

Fig. 12 Transmittance distribution diagram of sixteen-channel wavelength division multiplexer

表 7 十六通道波分复用器参数

Table 7 Parameters of sixteen-channel wavelength division multiplexer

Channels	$\lambda_c$ / nm	$r_m$ / nm	$r_{mw}$ / nm	$T$ / %	$\Delta\lambda$ / nm	Q	Loss / dB
Ch1	1538.1	81.0	87.40	90.1	0.15	10254	-0.45
Ch2	1534.1	82.0	86.20	91.7	0.90	1705	-0.38
Ch3	1535.9	83.3	86.45	94.4	0.50	3071	-0.25
Ch4	1542.2	84.0	87.26	90.5	0.45	3427	-0.45
Ch5	1539.5	85.0	86.90	94.4	0.50	3079	-0.25
Ch6	1550.1	86.0	88.68	95.7	0.50	3100	-0.20
Ch7	1544.4	87.0	87.60	88.0	0.40	3861	-0.62
Ch8	1565.3	88.0	90.80	92.4	0.20	7827	-0.34
Ch9	1561.3	89.0	90.26	90.0	0.30	5204	-0.46
Ch10	1557.6	90.0	89.70	85.2	0.30	5192	-0.70
Ch11	1547.9	91.0	88.40	84.8	0.40	3870	-0.72
Ch12	1551.8	92.0	89.00	91.2	0.55	2821	-0.40
Ch13	1553.9	93.0	89.20	94.7	0.40	3885	-0.24
Ch14	1559.5	94.0	89.90	94.2	0.30	5198	-0.28
Ch15	1546.2	88.0	89.60	85.0	0.20	7731	-0.70
Ch16	1556.0	96.9	90.85	85.6	0.40	3890	-0.67

## 6 总 结

设计了一种可扩展的小型化准密集型八通道光子晶体波分复用器,通过调节内柱半径和外柱半径的大小,实现了不同波长在相应通道下的下载输出。在八个波长分别为 1542.2, 1544.2, 1546, 1548.2, 1550, 1552, 1554.4, 1557.6 nm 时,平均波长间隔仅为 2.2 nm。该结构有较强的扩展性,可在八通道的基础上增加扩展腔和下载通道的数量,并且随着通道扩展数量的增多,器件的小型化优势更为显著。当扩展为十六通道时,波分复用性能表现依然良好。该器件结构仅有八个耦合腔,大大减小了器件的尺寸,仅为  $19.8 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ ,面积为  $217.8 \mu\text{m}^2$ ,易于集成,在光器件领域有广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Mekis A, Chen J C, Kurland I, et al. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(18): 3787-3790.
- [2] Geravand A, Danaie M, Mohammadi S. All-optical photonic crystal memory cells based on cavities with a dual-argument hysteresis feature[J]. *Optics Communications*, 2019, 430: 323-335.
- [3] Rakhshani M R, Mansouri-Birjandi M A. Realization of tunable optical filter by photonic crystal ring resonators[J]. *Optik*, 2013, 124(22): 5377-5380.
- [4] Okayama H, Onawa Y, Shimura D, et al. Wavelength filter using twin one-dimensional photonic crystal cavity silicon waveguides[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(2): 107-109.
- [5] Shaik E H, Rangaswamy N. Multi-mode interference-based photonic crystal logic gates with simple structure and improved contrast ratio[J]. *Photonic Network Communications*, 2017, 34(1): 140-148.
- [6] Cheraghi F, Soroosh M, Akbarizadeh G. An ultra-compact all optical full adder based on nonlinear photonic crystal resonant cavities[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2018, 113: 359-365.
- [7] Djavid M, Dastjerdi M H T, Philip M R, et al. Photonic crystal-based permutation switch for optical networks[J]. *Photonic Network Communications*, 2018, 35(1): 90-96.
- [8] Azar M, Alipour-Banaei H, Zavvari M. A High Efficiency Optical Power Splitter in a Y-Branch Photonic Crystal for DWDM Optical Communication Systems[J]. *Frequenz -Berlin-*, 2017, 72(1-2):79-84.
- [9] Vigneswaran D, Ayyanar N, Sharma M, et al. Salinity sensor using photonic crystal fiber[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 269: 22-28.
- [10] Pitruzzello G, Krauss T F. Photonic crystal resonances for sensing and imaging[J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(7): 073004.
- [11] Rifat A A, Ahmed R, Yetisen A K, et al. Photonic crystal fiber based plasmonic sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 243: 311-325.
- [12] Mehdizadeh F, Soroosh M. A new proposal for eight-channel optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities[J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 31(1): 65-70.
- [13] Kannaiyan V, Dhamodharan S K, Savarimuthu R. Performance analysis of two-dimensional photonic crystal octagonal ring resonator based eight channel demultiplexer[J]. *Optica Applicata*, 2017, 47(1): 7-18.
- [14] Venkatachalam K, Kumar D S, Robinson S. Investigation on 2D photonic crystal-based eight-channel wavelength-division demultiplexer[J]. *Photonic Network Communications*, 2017, 34(1): 100-110.
- [15] Fallahi V, Seifouri M, Olyaei S, et al. Four-channel optical demultiplexer based on hexagonal photonic crystal ring resonators[J]. *Optical Review*, 2017, 24(4): 605-610.
- [16] Balaji V R, Murugan M, Robinson S, et al. Design and optimization of photonic crystal based eight channel dense wavelength division multiplexing demultiplexer using conjugate radiant neural network [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(5): 1-15.
- [17] Talebzadeh R, Soroosh M, Kaviani Y S, et al. All-optical 6- and 8-channel demultiplexers based on photonic crystal multilayer ring resonators in Si/C rods[J]. *Photonic Network Communications*, 2017, 34(2): 248-257.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Wu R, Li L F, Ma Y Y. Research and design of six-channel photonic crystal wavelength division multiplexer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 032302.
- 吴蓉, 李龙飞, 马岩岩. 六通道光子晶体波分复用器的研究与设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 032302.
- [22] Fallahi V, Seifouri M, Mohammadi M. A new design of optical add/drop filters and multi-channel filters based on hexagonal PhCRR for WDM systems [J]. *Photonic Network Communications*, 2019, 37(1): 100-109.
- [23] Alipour-Banaei H, Serajmohammadi S, Mehdizadeh F. Optical wavelength demultiplexer based on photonic crystal ring resonators[J]. *Photonic Network Communications*, 2015, 29(2): 146-150.
- [24] Mounzar A, Badaoui H, Abri M. 16-Channels wavelength efficient demultiplexing around 1.31/1.55  $\mu\text{m}$  in 2D photonic crystal slab[J]. *Optik*, 2019, 193: 162685.
- [25] Almasian M R, Abedi K. Performance improvement of wavelength division multiplexing based on photonic crystal ring resonator[J]. *Optik*, 2015, 126(20): 2612-2615.