

光学学报

用于密集波分复用系统的光子晶体光分插复用器

胡宇宸, 陈鹤鸣*

南京邮电大学电子与光学工程学院, 江苏 南京 210023

摘要 提出一种用于密集波分复用系统的光子晶体光分插复用器, 该器件为由一个光子晶体 Aubry-André-Harper (AAH) 谐振腔、一个光子晶体 AAH 反射腔以及两个光子晶体波导组成的三端口反射腔型光分插复用器。基于耦合模理论建立该结构模型, 推导理论谱线并分析决定其传输性能的关键参数, 根据理论结果指导基于三维时域有限差分法的仿真设计, 得出器件的性能参数。仿真结果表明, 该器件可以在 1556.2 nm 和 1555.4 nm 的工作波长下实现光波的上/下载功能。光子晶体 AAH 反射腔和锥形结构减小了光波在主波导上的泄漏和端口处的模式失配损耗, 使得插入损耗与各端口串扰分别小于 0.51 dB 和 -29.54 dB。所使用的 AAH 腔具有高 Q 值的特性, 输出谱线的线宽仅为 0.2 nm, 尺寸仅为 $19.35 \mu\text{m} \times 13.33 \mu\text{m}$ 。该器件结构紧凑且简单, 支持双信道分插复用, 易扩展信道, 可应用于密集波分复用/解复用器件, 在大规模集成的高容量光通信系统领域具有重要的应用价值。

关键词 光学器件; 光子晶体; AAH 腔; 密集波分复用; 耦合模理论

中图分类号 O43 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS220857

1 引言

随着物联网的兴起, 光通信系统正向着小型化、片上集成化、大容量传输的方向发展^[1-3]。在短距离传输系统中, 光分插复用器(OADM)作为对信道进行上、下载以及复用的设备, 不仅影响了整个系统的插入损耗、信道串扰以及信道间隔等重要参数, 还满足万物互联对传输容量的要求。同时, 硅基光子晶体作为一种人工制造的周期性介质材料, 其独有的禁带效应使基于此结构的光学器件具备低损耗、小尺寸、易集成的优点。因此, 在高度集成化的短距离传输系统中, 基于光子晶体的 OADM 器件具有很高的应用价值, 目前已有多种基于光子晶体的 OADM 设计方案。Fan 等^[4]最早研究出四端口光子晶体 OADM, 利用光子晶体微腔显著的波长选择性, 将两个波导平行放置在光子晶体微腔两侧, 构成四端口平行耦合系统, 从而实现信道上/下载功能。然而, 这种结构存在较大损耗, 理论透过率无法接近 80%。Kuo 等^[5-6]通过在该四端口光子晶体 OADM 的基础上增加反射壁来实现 100% 透过率, 虽然能够对某一信道实现 100% 的上/下载, 但必须利用复杂的结构设计, 使得微腔中的模式为双重简并, 这给实际制造带来很大难度。2005 年, Song 等^[7]率先提出一种三端口光子晶体 OADM 结构, 通过两个垂直波导和位于它们之间的微腔的耦合作用来实现信

道的上/下载。该结构将多个滤波器级联, 实现了多信道的复用/解复用, 充分利用了三端口结构的级联优势。但在器件结构上采用了面外输出的方式, 使其无法与其他硅基器件有效集成, 且透过率最高仅为 0.49, 无法满足低损耗传输要求。2015 年, 李传起等^[8]设计了一种多信道异质结构光子晶体 OADM, 同样采用三端口结构, 证明了将异质结构作为反射壁引入滤波器中, 可显著提升透过率, 其最大归一化透过率可达 0.95, 但 Q 值仅为 4080, 透射谱较宽, 在有限的传输带宽里无法满足密集波分复用(DWDM)对信道间隔的要求。2017 年, Ooka 等^[9]通过引入宽度调制(WM)腔, 设计了一种新型的多信道三端口光子晶体 OADM, 得益于 WM 腔的高 Q 值特性, 获得了较窄的传输谱线, 可满足 DWDM 系统对信道间隔的要求。然而, WM 腔采用带隙迁移型耦合原理, 光波被局域在宽波导中, 无法有效耦合至主波导, 因此损耗高达 25.6 dB。2020 年, Liu 等^[10]基于光子晶体 L3 腔设计了一种波长可调的三端口 OADM, 利用泵浦光源使两个 L3 腔的谐振频率偏移, 从而实现特定波长的滤波功能, 该器件结构简单, 但尺寸过大($200 \mu\text{m}^2$), 且输入、输出端口损耗过大, 导致归一化透过率仅为 0.56。2021 年, BaBu 等^[11]提出一种基于微环腔的光子晶体 OADM, 采用三维时域有限差分(3D-FDTD)方法仿真模拟了该 OADM 的传输性能, Q 值高达 6000, 然而

收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-06-17; 录用日期: 2022-07-21; 网络首发日期: 2022-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(61571237)、江苏省自然科学基金(BK20151509)

通信作者: *chhm@njupt.edu.cn

工作波长下的器件透过率仅为 0.6, 损耗过大。在光通信集成系统中, 单个器件的尺寸和损耗将直接影响整个集成系统的性能, 且当前的光纤传输网络中已广泛采用 DWDM 系统来满足日益增长的速率和带宽需求^[12-13], OADM 作为 DWDM 系统中的关键元器件, 需满足低损耗、小尺寸, 且具备 DWDM 系统的应用条件。

本文提出一种用于 DWDM 系统的光子晶体 OADM, 整体结构为三端口反射腔型 OADM, 由两个 Aubry-André-Harper (AAH) 谐振腔、两个光子晶体波导组成。通过耦合模理论建立结构模型, 推导出理论传输谱线, 根据理论结果指导仿真设计, 同时优化了谐振腔、反射腔以及上载波导等结构参数。仿真结果表明, AAH 反射腔与传输端口处的锥形结构降低了器件损耗, 该器件插入损耗与各端口串扰分别小于 0.51 dB 和 -29.54 dB。该器件具备双信道上下载功能, 由于采用了高 Q 值的 AAH 腔, 仿真所得的输出谱线宽度为 0.2 nm, 信道间隔为 0.8 nm, 可适用于 DWDM 系统, 同时结构易扩展信道, 可用于高度集成的大容量光纤通信系统中。

2 理论模型

2.1 下载过程理论分析

所设计的三端口反射腔型 OADM 的结构与理论模型如图 1 所示, 其中 S_{+i} 表示输入波幅值, S_{-i} 表示输出波幅值, γ_i 表示谐振腔与波导耦合产生损耗时的幅值衰减系数, φ_1 为两个谐振腔之间的单程相位延迟。光波从端口 1 输入, 当光波频率与两个谐振腔的谐振频率一致时, 光波会被耦合进谐振腔 1 的下载波导, 最后从端口 2 输出, 从而实现信道下载功能; 当光波频率与谐振腔的谐振频率不一致时, 光波因无法耦合进谐振腔 1 而继续沿主波导传输, 并从端口 3 输出。基于耦合模理论对其传输特性进行分析, 将谐振腔 1、2 的谐振频率设为 ω_0 , 谐振模振幅分别为 A_1, A_2 。由于谐振腔到主波导的结构具有对称性, 且假设两个谐振腔到波导的幅值耦合衰减系数相等, 可得 $\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 =$

$\gamma_5 = \gamma_{\text{wav}}$, 则该结构的时域耦合模方程如下:

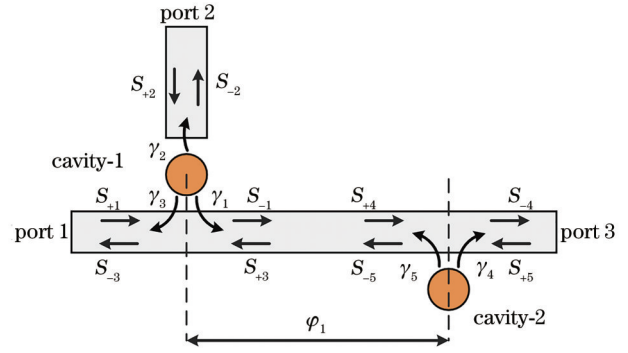


图 1 OADM 理论模型

Fig. 1 Theoretical model of OADM

对于谐振腔 1, 有

$$\frac{dA_1}{dt} = -i\omega_0 A_1 - (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3) A_1 + \sqrt{2\gamma_1} S_{+1} + \sqrt{2\gamma_2} S_{+2} + \sqrt{2\gamma_3} S_{+3}, \quad (1)$$

式中: t 为谐振模的传播时间; i 为虚数单位。根据能量守恒定律和时间反演对称性, 可得到输入波和输出波之间的关系

$$S_{-1} = S_{+1} - \sqrt{2\gamma_1} A_1, \quad (2)$$

$$S_{+2} = -S_{-2} + \sqrt{2\gamma_2} A_1, \quad (3)$$

$$S_{-3} = S_{+3} - \sqrt{2\gamma_3} A_1, \quad (4)$$

$$S_{+3} = S_{-5} \exp(i\varphi_1). \quad (5)$$

对于谐振腔 2, 有

$$\frac{dA_2}{dt} = -i\omega_0 A_2 - (\gamma_4 + \gamma_5) A_2 + \sqrt{2\gamma_4} S_{+4} + \sqrt{2\gamma_5} S_{+5}. \quad (6)$$

同理, 可得到输入波和输出波之间的关系:

$$S_{-4} = S_{+4} - \sqrt{2\gamma_4} A_2, \quad (7)$$

$$S_{+4} = S_{-1} \exp(i\varphi_1), \quad (8)$$

$$S_{-5} = S_{+5} - \sqrt{2\gamma_5} A_2. \quad (9)$$

不妨设 $S_{+2} = S_{+5} = 0$, 即端口 2 与端口 3 没有激光输入, 联立式 (1)~(9) 并将前文分析的关系 $\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = \gamma_{\text{wav}}$ 代入, 可求得端口 2 的下载谱 $T_{\text{drop}}(\omega)$:

$$T_{\text{drop}}(\omega) = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{\sqrt{4\gamma_{\text{wav}}\gamma_2} \{i(\omega - \omega_0) + 2\gamma_{\text{wav}}[1 - \exp(i \cdot 2\varphi_1)]\}}{[i(\omega - \omega_0) + (2\gamma_{\text{wav}} + \gamma_2)][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma_{\text{wav}}] - 4\gamma_{\text{wav}}^2 \cdot \exp(i \cdot 2\varphi_1)} \right|^2. \quad (10)$$

当 $\omega = \omega_0$ 且 $\varphi_1 = (n + 1/2)\pi$ (n 非负整数), 下载效率为

$$T_{\text{drop}}(\omega_0) = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{4\gamma_{\text{wav}}\sqrt{4\gamma_2\gamma_{\text{wav}}}}{2\gamma_2\gamma_{\text{wav}} + 8\gamma_{\text{wav}}^2} \right|^2 = \left| \frac{1}{\frac{\gamma_2}{16\gamma_{\text{wav}}} + \frac{\gamma_{\text{wav}}}{\gamma_2} + \frac{1}{2}} \right|^2. \quad (11)$$

当且仅当 $\gamma_2 = 4\gamma_{\text{wav}}$ 时, $T_{\text{drop}}(\omega_0)$ 可取最大值 1。因此, 该理论模型的理想条件如下: 1) 谐振腔 1、2 具有相同的谐振频率; 2) 谐振腔 1、2 与波导的幅值耦合衰减系数相同; 3) 光波从谐振腔 1 到谐振腔 2 的单程相位延迟满足

$\varphi_1 = (n + 1/2)\pi$ (n 非负整数); 4) 谐振腔 1 到输入波导、主波导的幅值耦合衰减系数满足 $\gamma_2 = 4\gamma_{\text{wav}}$ 。在满足上述 4 个条件的情况下, 该理论模型的下载谱 $T_{\text{drop}}(\omega)$ 、主波导反射谱 $R_{\text{bus}}(\omega)$ 分别为

$$T_{\text{drop}}(\omega) = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{4\gamma_{\text{wav}}[i(\omega - \omega_0) + 4\gamma_{\text{wav}}]}{[i(\omega - \omega_0) + 6\gamma_{\text{wav}}][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma_{\text{wav}}] + 4\gamma_{\text{wav}}^2} \right|^2, \quad (12)$$

$$R_{\text{bus}}(\omega) = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{2\gamma_{\text{wav}}}{i(\omega_0 - \omega) + 2\gamma_{\text{wav}}} - \frac{2\gamma_{\text{wav}}[i(\omega_0 - \omega) + 4\gamma_{\text{wav}}]^2}{[i(\omega_0 - \omega) + 6\gamma_{\text{wav}}][i(\omega_0 - \omega) + 2\gamma_{\text{wav}}]^2 + 4\gamma_{\text{wav}}^2[i(\omega_0 - \omega) + 2\gamma_{\text{wav}}]} \right|^2. \quad (13)$$

由能量守恒定律可得到主波导透射谱 $T_{\text{bus}}(\omega)$:

$$T_{\text{bus}}(\omega) = 1 - T_{\text{drop}}(\omega) - R_{\text{bus}}(\omega). \quad (14)$$

图 2 所示为基于式(12)~(14)的理论谱线。从图 2 可以看出: 当 $\omega = \omega_0$ 时, $T_{\text{drop}}(\omega)$ 取最大值, 由于光波通过谐振腔 1 耦合进下载波导并从端口 2 输出, $T_{\text{bus}}(\omega)$ 取最小值; 当输入光波频率偏离谐振腔 1 的谐振频率时, $T_{\text{bus}}(\omega)$ 逐渐增大, $T_{\text{drop}}(\omega)$ 逐渐减小, 且 $R_{\text{bus}}(\omega)$ 恒等于 0。

2.2 上载过程理论分析

如图 1 所示, 光波从端口 2 输入, 当光波频率与两个谐振腔的谐振频率一致时, 光波会被耦合进谐振腔 1 并上载至主波导, 最后从端口 1 输出, 从而实现信道上载功能; 当光波频率与谐振腔的谐振频率不一致时, 光波因无法耦合进谐振腔 1 而被反射至输入端口 2。基于耦合模理论并结合式(1)~(9), 在满足 2.1 节所述 4 个

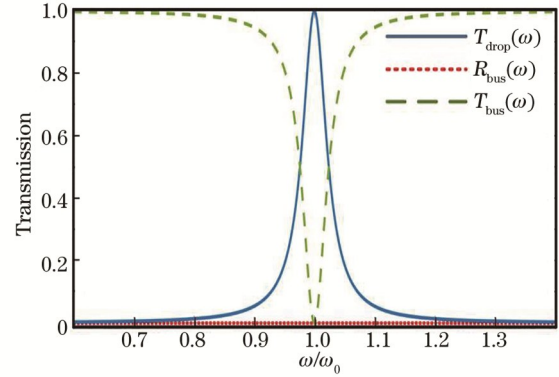


图 2 下载过程的理论线谱

Fig. 2 Theoretical spectra in dropping process

理想条件下, 得到的上载过程的上载谱 $T_{\text{add}}(\omega)$ 、反射谱 $R_{\text{add}}(\omega)$ 以及主波导透射谱 $T_{\text{bus}}(\omega)$ 分别为

$$T_{\text{add}}(\omega) = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+2}} \right|^2 = \left| \frac{4\gamma_{\text{wav}}[i(\omega - \omega_0) + 4\gamma_{\text{wav}}]}{[i(\omega - \omega_0) + 6\gamma_{\text{wav}}][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma_{\text{wav}}] + 4\gamma_{\text{wav}}^2} \right|^2, \quad (15)$$

$$R_{\text{add}}(\omega) = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+2}} \right|^2 = \left| \frac{[i(\omega - \omega_0) - 2\gamma_{\text{wav}}][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma_{\text{wav}}] + 4\gamma_{\text{wav}}^2}{[i(\omega - \omega_0) + 6\gamma_{\text{wav}}][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma_{\text{wav}}] + 4\gamma_{\text{wav}}^2} \right|^2, \quad (16)$$

$$T_{\text{bus}}(\omega) = \left| \frac{S_{-4}}{S_{+2}} \right|^2 = \left| \frac{4i\gamma_{\text{wav}}(\omega - \omega_0)}{[i(\omega - \omega_0) + 6\gamma_{\text{wav}}][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma_{\text{wav}}] + 4\gamma_{\text{wav}}^2} \right|^2. \quad (17)$$

图 3 所示为基于式(15)~(17)的理论谱线。在谐振频率 $\omega = \omega_0$ 下, $T_{\text{add}}(\omega)$ 取最大值, 所有光强被耦合进谐振腔 1 并上载至主波导, 并从端口 1 输出, 输入端反射光强为 0, 且主波导透过率为 0, 即 $R_{\text{add}}(\omega)$ 、 $T_{\text{bus}}(\omega)$ 均取最小值。

3 结构设计

在二维三角晶格空气孔型光子晶体平板的基础上设计了如图 4 所示的光子晶体 OADM, 晶格常数 $a = 430$ nm, 整体尺寸为 $45a \times 31a$, 空气孔半径 $r = 130$ nm, 材料为硅 (折射率 $n = 3.476$)。该 OADM 由两个光子晶体波导和两个光子晶体 AAH 腔组成。AAH 腔由按不同晶格常数 a 和 a_1 排布的一维光子晶体构成 (蓝色区域和红色区域): 蓝色区域构成布拉格

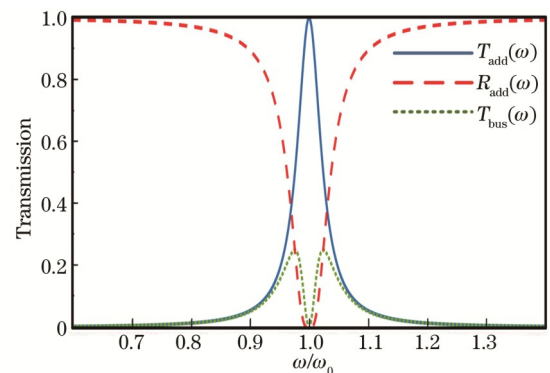


图 3 上载过程的理论线谱

Fig. 3 Theoretical spectra in adding process

反射镜, 用于抑制光波沿 x 方向的泄漏; 红色区域为微腔区域, 当输入光波频率与其谐振频率一致时, 大部分

光强将被束缚在此区域。谐振腔 1 将工作波长下的光强耦合至端口 1、2, 反射腔 2 将工作波长下没有耦合进谐振腔 1 的光波反射到谐振腔 1 进行二次耦合。虚线部分的锥形结构用于减小模式失配损耗^[14-15], 长度为 $7a$ 。谐振腔 1 和反射腔 2 采用 AAH 腔结构^[16-18], 腔内空气孔半径分别为 $r_{a1} = 90 \text{ nm}$, $r_{b1} = 87 \text{ nm}$ 。由第 2 节的理论分析可知, 两个谐振腔之间的单程相位延迟需满足 $\varphi_1 = (n + 1/2)\pi$ (n 非负整数), 调整谐振腔 1 与

谐振腔 2 的间距等于 $13a$ 即可满足条件; 改变空气孔半径 r_1, r_2 , 可增大谐振腔 1 到上载波导之间的耦合强度, 以满足 $\gamma_2 = 4\gamma_{\text{wav}}$ 的关系。因此, 本研究选取的空气孔半径大小为 $r_1 = 36 \text{ nm}$, $r_2 = 120 \text{ nm}$ 。所设计的用于 DWDM 系统的光子晶体 OADM 结构的具体参数如表 1 所示, 其中 δ 为 AAH 腔中的一维光子晶体中间两个空气孔与中心位置的相对偏移量, 可表示为 $\delta = \frac{1}{2}\beta a$, β 为晶格失配常数, 它的值由 $\frac{a_1}{a}$ 决定。

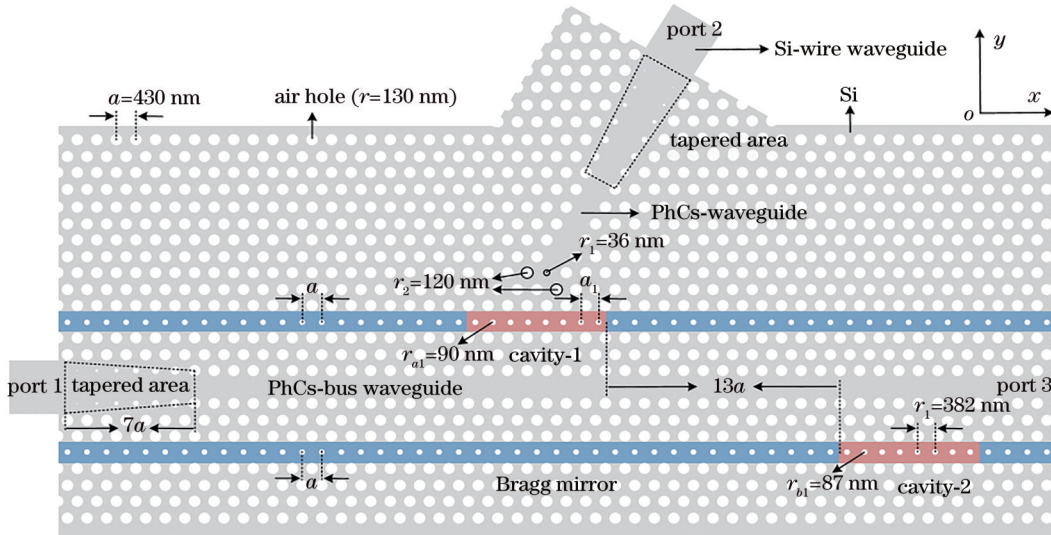


图 4 OADM 结构图

Fig. 4 OADM structure diagram

表 1 用于 DWDM 系统的光子晶体 OADM 结构参数
Table 1 Structure parameters of OADM for DWDM system based on photonic crystal

Parameter	Value	Parameter	Value
a / nm	430	a_1 / nm	382
r / nm	130	δ / nm	191
r_1 / nm	36	r_2 / nm	120
r_{a1} / nm	90	r_{b1} / nm	87

4 性能分析

4.1 下载过程传输性能分析

采用 3D-FDTD 方法仿真下载过程的传输谱, 当波长分别为 1556.2 nm 和 1555.4 nm 的光波从端口 1 输入时, 1556.2 nm 的光波会被耦合进谐振腔, 最终从端口 2 输出, 而 1555.4 nm 的光波不会受到谐振腔的影响, 最终从端口 3 输出, 两个信道的波长间隔为 0.8 nm , 符合 DWDM 系统对信道间隔的要求。将探测器分别放置在端口 1、2, 检测到的传输谱如图 5(a) 所示, 其中点线为在端口 1 测量的反射谱, 实线为在端口 2 测量的透射谱。当 1556.2 nm 的光波由端口 1 输入时, 端口 2 检测到的透过率达到最大值 (约 0.9), 线宽约为 0.2 nm , 端口 1 检测到的反射率最大值约为

0.1。下载过程的插入损耗如表 2 所示。图 5(b) 为仿真所得的端口 2 透射谱与基于耦合模理论推导的端口 2 透射谱的对比图, 可以看出, 理论最大透过率为 1, 仿真最大透过率约为 0.9, 这是因为基于 3D-FDTD 的仿真算法较耦合模方程在损耗计算中更全面, 其中包括波导与波导、波导与谐振腔之间的耦合损耗, 谐振腔垂直方向的损耗, 光子晶体波导的传输损耗等。

4.2 上载过程传输性能分析

采用 3D-FDTD 方法仿真上载过程传输谱, 结果如图 6 所示。由图 6(a)、(b) 可知: 当波长为 1556.2 nm 的光波由端口 2 输入时, 端口 1 检测到的透过率达到最大值 (约 0.89); 当波长为 1555.4 nm 的光波由端口 3 输入时, 输出端口 1 检测到的最大透过率约为 0.9。上载过程的插入损耗如表 2 所示。图 6(c) 为仿真所得端口 1 透射谱与基于耦合模理论推导的端口 1 透射谱的对比图, 其中, 理论所得最大透过率为 1, 仿真所得最大透过率约为 0.89。由前文分析可知, 实际仿真所得的最大透过率会低于理论值。

4.3 插入损耗与端口串扰分析

插入损耗和端口串扰是 OADM 的重要性能指标。插入损耗的定义为

$$I = 10 \log \left(\frac{I_{\text{in}}}{I_{\text{out, max}}} \right), \quad (18)$$

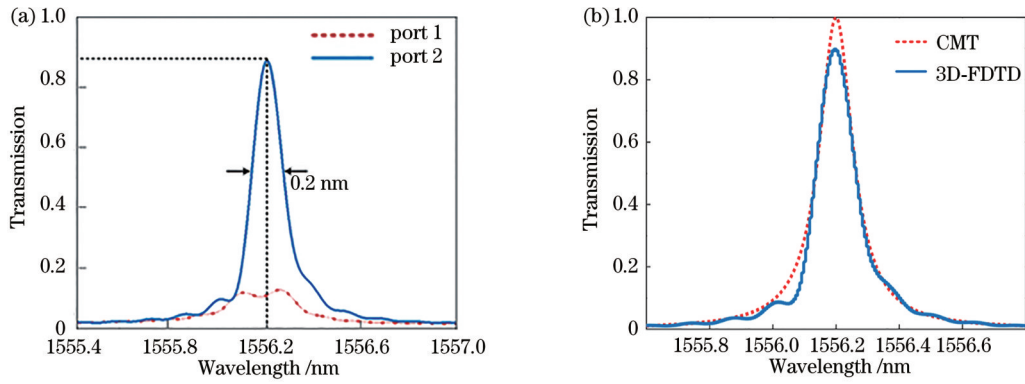


图5 下载过程的透射谱。(a)端口1、2的仿真透射谱;(b)端口2的仿真透射谱与理论透射谱对比

Fig. 5 Transmission spectra in dropping process. (a) Simulated transmission spectra of ports 1 and 2; (b) comparison of simulated and theoretical transmission spectra of port 2

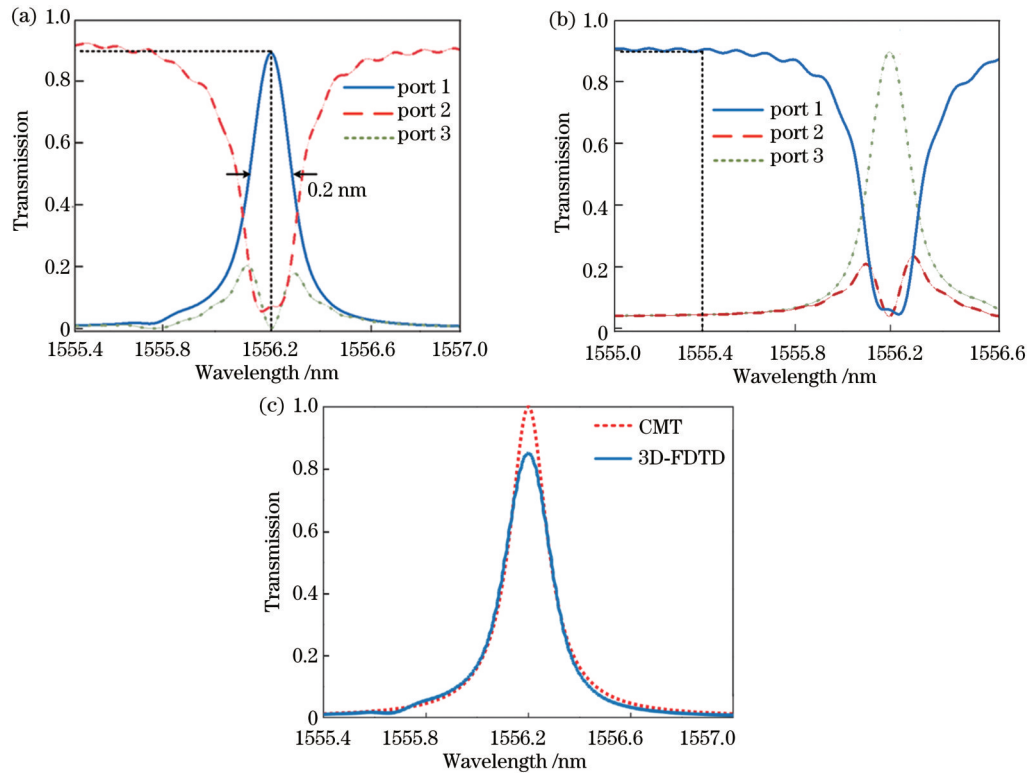


图6 上载过程的透射谱。(a)端口2入射时的仿真传输谱线;(b)端口3入射时的仿真传输谱线;(c)端口1的仿真透射谱与理论透射谱对比图

Fig. 6 Transmission spectra in adding process. (a) Simulated transmission spectra when input from port 2; (b) simulated transmission spectra when input from port 3; (c) comparison of simulated and theoretical transmission spectra of port 1

式中: I_{in} 为输入光光强; $I_{out,max}$ 为最大输出光强。

端口串扰的定义为

$$C = 10 \log \left(I_{else} / I_{output} \right), \quad (19)$$

式中: I_{output} 为工作波长下输出端口光强; I_{else} 为工作波长下非输出端口光强。

根据式(18)和式(19)计算出两条信道在解复用/复用过程中的插入损耗和端口信道串扰,结果如表2所示。在解复用过程中,从端口1输入信道一的1556.2 nm光波插入损耗为0.46 dB,从端口1输入信道二的1555.4 nm光波插入损耗为0.41 dB;在上载过

程中,从端口2输入信道一的1556.2 nm光波插入损耗为0.51 dB,从端口3输入信道二的1555.4 nm插入损耗为0.46 dB;各端口的串扰小于-29.5 dB。

4.4 稳态场分布

图7(a)、(b)分别显示了波长为1556.2 nm和1555.4 nm的光波从端口1入射的稳态场分布,即下载过程的稳态场分布。从图7(a)可以看出,信道一的1556.2 nm光波几乎完全耦合进谐振腔,并从主波导下载至输出端口2,而在端口3几乎无能量输出,从而完成信道一的下载过程;从图7(b)可以看出,当输入

表 2 上/下载过程的插入损耗和端口串扰
Table 2 Insertion loss and crosstalk in dropping/adding processes

Process	1556.2 nm		1555.4 nm	
	Insertion loss /dB	Crosstalk /dB	Insertion loss /dB	Crosstalk /dB
Dropping	0.46	-49.51	0.41	-49.73
Adding	0.51	-29.54	0.46	-33.57

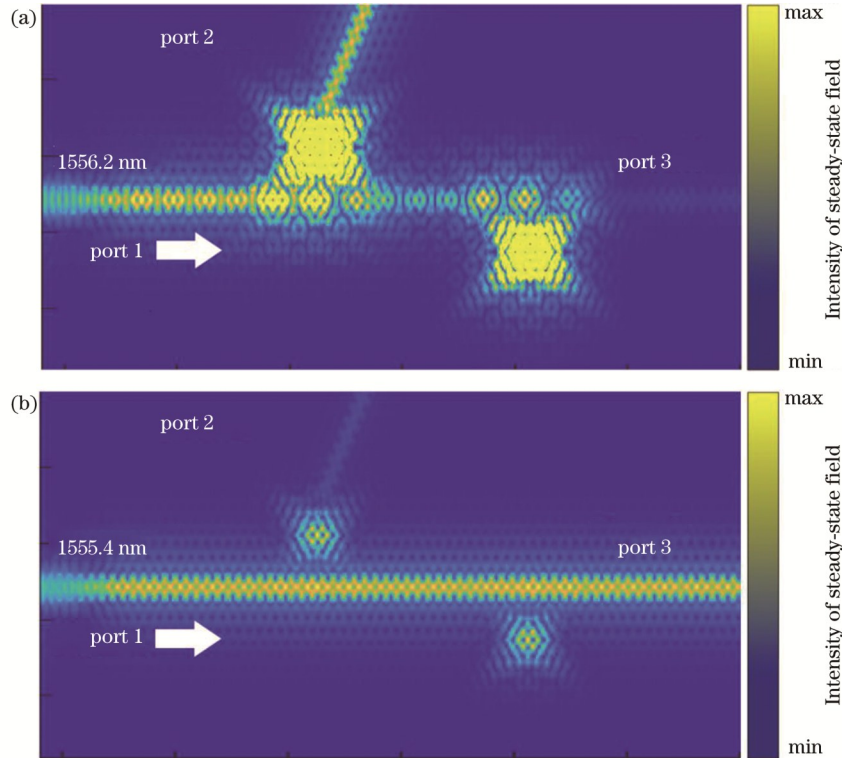


图 7 不同工作波长时下载过程的稳态场分布。(a)工作波长为 1556.2 nm;(b)工作波长为 1555.4 nm

Fig. 7 Distribution of steady-state field with different operation wavelengths during dropping process. (a) Operation wavelength is 1556.2 nm; (b) operation wavelength is 1555.4 nm

波长为 1555.4 nm 的光波时,光波将不会被耦合进谐振腔,继续沿主波导传输至端口 3,完成信道二的下载过程。

图 8(a)、(b)分别显示了波长为 1556.2 nm 和 1555.4 nm 的光波从端口 2 和端口 3 入射的稳态场分布,即上载过程的稳态场分布。从图 8(a)可以看出,信道一的 1556.2 nm 光波几乎完全耦合进谐振腔并插入主波导,最终从端口 1 输出,而在端口 3 几乎无能量输出,从而完成信道一的上载过程;从图 8(b)可以看出,当信道二的 1555.4 nm 光波从端口 3 输入时,光波将不会被耦合进谐振腔,而是从端口 1 输出。

在实际实验情况下,从激光器输出的光波通过纳米线波导输入光子晶体波导^[22-23],然而,光波在纳米线波导中的传输原理基于全内反射效应,而在光子晶体波导中基于禁带效应,这会导致光波在上述两种波导中传输时的光波模式不同,而将两种类型的波导级联必定会引起模式失配损耗^[24-25]。本实验首先在端口 1 和端口 2 均引入锥形结构以降低器件损耗,而现阶段的 OADM 器件均没有引入此结构。其次,在所设计的

结构中加入反射腔,根据反射腔建立理论模型并进行理论分析,可得到最大透过率为 1 的理论结果。然后,利用该结果指导仿真设计,得到性能较优的结构参数,因此所设计的结构在插入损耗上较其他文献的研究结果有明显优势。最后,选择高 Q 值的 AAH 腔作为谐振腔与反射腔,输出谱线的线宽窄,信道间隔符合 0.8 nm 的要求,可用于 DWDM 系统。所设计的光子晶体 OADM 和已有结构的性能对比如表 3 所示。由表 3 可知,所设计的用于 DWDM 系统的光子晶体 OADM 在 1556.2 nm 工作波长下的最小插入损耗与串扰分别为 0.41 dB、-49.7 dB,且器件整体长度不超过 20 μm ,谱线宽度仅为 0.2 nm,在 DWDM 解复用系统中有着较大的应用潜力。

4.5 容差分析

目前已商用化的制造技术主要包括精度为 90 nm 的光刻技术^[26]和精度为 60 nm 电子束刻蚀技术^[27],本研究所设计的器件中,光子晶体空气孔的直径为 240 nm,而对精度要求较高的优化结构,其最小的空气孔直径为 64 nm。然而,由外界环境或加工工艺引

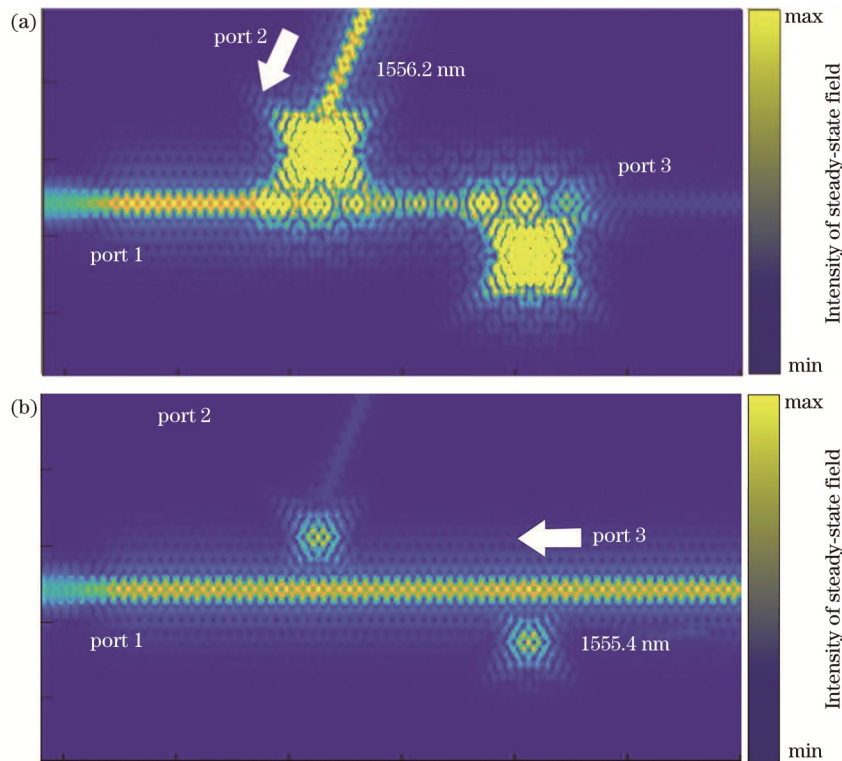


图 8 不同工作波长时上载过程的稳态场分布。(a)工作波长为 1556.2 nm;(b)工作波长为 1555.4 nm

Fig. 8 Distribution of steady-state field with different operation wavelengths during adding process. (a) Operation wavelength is 1556.2 nm; (b) operation wavelength is 1555.4 nm

表 3 所设计的光子晶体 OADM 和已有结构的性能对比

Table 3 Comparison of performances between the proposed photonic crystal OADM and existing structures

Ref.	Minimum insertion loss /dB	Minimum crosstalk / dB	Footprint /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	Line width /nm	Q factor
[19]	18	-40	391×3.6	3.5	445
[20]	1.46	-	-	1	1541
[21]	-	-38	-	2.6	538
This work	0.41	-49.7	19.35×13.33	0.2	7781

起的误差主要来自局部结构尺寸以及空气孔半径大小的不确定性。在理想的仿真环境下,所得出的仿真结果基于预先设定好的结构参数,而在实际的制备环境下,存在多种影响器件性能的因素。为了分析工艺误差对器件性能的影响,改变结构中一些重要参数的取值,仿真得出器件的性能指标,观察器件性能变化,得到工艺误差范围。

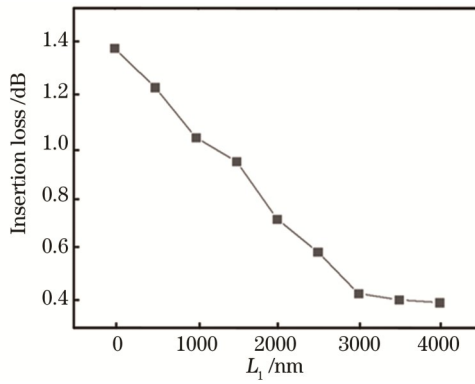
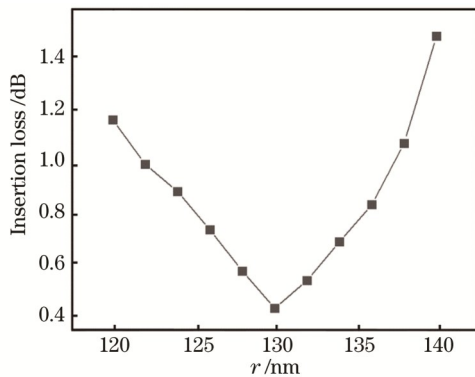
所设计结构中对器件性能影响较大的重要参数为锥形结构长度 L_1 、光子晶体的半径 r 、空气孔的半径 r_1 。其中,锥形结构用于降低模式失配损耗,光子晶体的半径 r 决定了通带范围,光子晶体波导与谐振腔 1 之间的耦合强度取决于 r_1 的大小。以上 3 个参数的变化会在不同程度影响器件的最终性能。

图 9 所示为器件的插入损耗随锥形结构长度 L_1 变化的关系,所设计的锥形结构长度为 $7a$ (约 3000 nm),通过改变锥形结构长度来观察器件性能的变化。从图 9 可以看到,随着锥形结构长度的增大,器件损耗明显降低,这是因为锥形区域本质上为一个模式转换器,

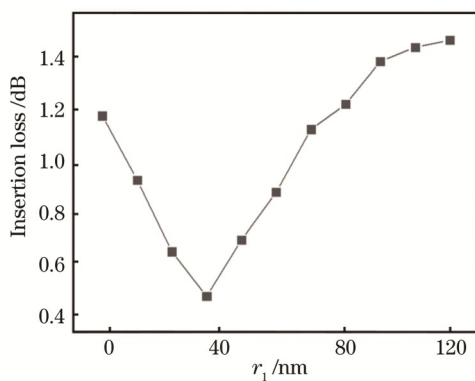
其长度越长,纳米线波导和光子晶体波导中的光波模式匹配度越高,模式失配损耗越小。在实际的实验制备时,考虑到插入损耗小于 0.969 dB (透过率大于 80%),将锥形结构的长度在 3000 nm 的基础上减小 1500 nm 或增大 1000 nm 均可,锥形结构的工艺容差范围为 2500 nm。

图 10 所示为器件插入损耗随空气孔半径 r 的变化关系。所选取的光子晶体平板波导中空气孔半径 r 为 130 nm,晶格常数为 430 nm。以上两个参数决定了光子晶体平板波导的通带范围,当工作波长处于通带范围时,光子晶体对光波的束缚较强,器件损耗较低;相反则损耗较大,甚至无法传输。固定晶格常数为 430 nm,通过改变空气孔半径观察器件性能的变化。由图 10 可知,当半径在 124 nm 到 137 nm 的范围变化时,器件仍然具有良好的性能 (透过率大于 80%),因此半径 r 的工艺容差范围为 13 nm。

图 11 所示为插入损耗随空气孔半径 r_1 的变化关系。当空气孔半径减小至 36 nm 时,器件的插入损耗

图9 插入损耗与锥形结构长度 L_1 的变化关系Fig. 9 Relationship between insertion loss and the length of tapered structure L_1 图10 插入损耗随光子晶体半径 r 变化的关系Fig. 10 Relationship between insertion loss and the radius of photonic crystal r

下降至最低值 0.47 dB; 当空气孔半径继续减小时, 插入损耗则增大。这是因为当空气孔半径 r_1 为 36 nm

图11 插入损耗与空气孔半径 r_1 的变化关系Fig. 11 Relationship between insertion loss and the radius of air hole r_1

时, 满足第 2 节理论分析中谐振腔到下载波导的幅值衰减系数与谐振腔到主波导的幅值衰减系数的 4 倍关系, 即 $\gamma_1 = 4\gamma_{\text{wav}}$ 。考虑到器件插损小于 0.969 dB (透过程率大于 80%) 的情况, 空气孔半径 r_1 的取值范围为 10~65 nm, 即 r_1 的工艺容差范围为 55 nm。

5 结 论

设计了一种用于 DWDM 系统的光子晶体 OADM, 该 OADM 具有上/下载信道的双信道功能。基于耦合模理论建立了结构模型, 推导并分析了理论传输谱线; 根据理论所得结果, 利用 3D-FDTD 方法仿真设计了器件, 得出仿真数据验证了理论结果的准确性。该器件的插入损耗、信道串扰均较低, 尺寸小, 结构简单且紧凑, 可通过级联拓展信道, 实现信道间隔为 0.8 nm 的 DWDM 功能, 在高度集成的大容量通信系统中有着很大的应用潜力。

参 考 文 献

- [1] 潘天豪, 陈雄斌, 闵成斌, 等. 超低照射下的可见光物联网终端设计[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0706003.
Pan T H, Chen X B, Min C Y, et al. Design of visible light-based internet of things terminal under ultralow illumination conditions[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0706003.
- [2] 肖功利, 徐俊林, 杨宏艳, 等. 内嵌矩形金属块纳米圆盘结构等离子体多通道波分复用器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1206006.
Xiao G L, Xu J L, Yang H Y, et al. A plasmon multi-channel wavelength-division multiplexer constructed with a nanodisk structure embedded in a rectangular metal block[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1206006.
- [3] 黄媛, 赵家钰, 王金东, 等. 一种基于波分复用的实时光纤信道偏振补偿系统[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1406003.
Huang Y, Zhao J Y, Wang J D, et al. A real-time polarization compensation system based on wavelength-division multiplexing for optical fiber communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1406003.
- [4] Fan S H, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, et al. Channel drop tunneling through localized states[J]. Physical Review Letters, 1998, 80(5): 960-963.
- [5] Kuo C W, Chang C F, Chen M H, et al. A new approach of planar multi-channel wavelength division multiplexing system using asymmetric super-cell photonic crystal structures[J]. Optics Express, 2007, 15(1): 198-206.
- [6] Kim S, Park I, Lim H, et al. Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters of three-port system with reflection feedback[J]. Optics Express, 2004, 12(22): 5518-5525.
- [7] Song B S, Asano T, Akahane Y, et al. Multichannel add/drop filter based on in-plane hetero photonic crystals[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(3): 1449-1455.
- [8] 李传起, 范庆斌, 陆叶, 等. 多信道异质结构光子晶体滤波器[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2171-2177.
Li C Q, Fan Q B, Lu Y, et al. Multi-channel heterophotonic crystal filter[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(8): 2171-2177.
- [9] Ooka Y, Tetsumoto T, Daud N A B, et al. Ultrasmall in-plane photonic crystal demultiplexers fabricated with photolithography[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 1521-1528.
- [10] Liu L, Liao S S. Low-power active tunable microwave photonic filter using photonic crystal nanocavities[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(16): 999-1002.
- [11] Babu D L, Sreenivasulu T. 4-channel DWDM demultiplexer on silicon photonic crystal slab[J]. Sadhana, 2021, 46(1): 14.
- [12] Goel A, Pandey G. Design of broadband dispersion flattened fiber for DWDM system: performance analysis using various modulation formats[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 42: 109-118.
- [13] Kunderát J, Vojtěch J, Škoda P, et al. YANG/NETCONF

- ROADM: evolving open DWDM toward SDN applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(15): 3105-3114.
- [14] 胡宇宸, 陈鹤鸣, 周昊天. 基于光子晶体和纳米线波导的马赫-曾德尔型调制器[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(4): 499-507. Hu Y C, Chen H M, Zhou H T. Mach-Zehnder modulator based on photonic crystal and nanowire waveguide[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(4): 499-507.
- [15] Khoo E H, Liu A Q, Wu J H, Li J, Pinjala D. Modified step-theory for investigating mode coupling mechanism in photonic crystal waveguide taper[J]. Optics Express, 2006, 14(13):6035.
- [16] Alpegiani F, Andreani L C, Gerace D. Effective bichromatic potential for ultra-high Q -factor photonic crystal slab cavities[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(26): 261110.
- [17] Simbula A, Schatzl M, Zagaglia L, et al. Realization of high- Q / V photonic crystal cavities defined by an effective Aubry-André-Harper bichromatic potential[J]. APL Photonics, 2017, 2(5): 056102.
- [18] Zhuang Y Y, Chen H M, Hu Y C, et al. Hybrid demultiplexer for mode and dense wavelength division multiplexing based on photonic crystal and nanowire waveguides[J]. Journal of Modern Optics, 2020, 67(18): 1417-1423.
- [19] Wang J J, Chen L R. Low crosstalk Bragg grating/Mach-Zehnder interferometer optical add-drop multiplexer in silicon photonics[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26450-26459.
- [20] Li C Y, Chang C H, Lin Z G, et al. Optical add/drop multiplexer for tree-based passive optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 54: 102121.
- [21] Liu L, Guan H, Liu Y, et al. Compact and broadband optical add-drop de-multiplexer with cascaded elliptical micro-rings on SOI[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(6): 451-454.
- [22] Sato H, Miura H, Qiu F, et al. Low driving voltage Mach-Zehnder interference modulator constructed from an electro-optic polymer on ultra-thin silicon with a broadband operation[J]. Optics Express, 2017, 25(2): 768-775.
- [23] Hinakura Y, Terada Y, Tamura T, et al. Wide spectral characteristics of Si photonic crystal Mach-Zehnder modulator fabricated by complementary metal-oxide-semiconductor process [J]. Photonics, 2016, 3(2): 17.
- [24] Krauss T F, Rue R M D L, Brand S. Two-dimensional photonic-bandgap structures operating at near-infrared wavelengths[J]. Nature, 1996, 383(6602): 699-702.
- [25] Talneau A, Agio M, Soukoulis C M, et al. High-bandwidth transmission of an efficient photonic-crystal mode converter[J]. Optics Letters, 2004, 29(15): 1745-1747.
- [26] Baba T, Nguyen H C, Yazawa N, et al. Slow-light Mach-Zehnder modulators based on Si photonic crystals[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2014, 15(2): 024602.
- [27] Kuruma K, Ota Y, Kakuda M, et al. Surface-passivated high- Q GaAs photonic crystal nanocavity with quantum dots[J]. APL Photonics, 2020, 5(4): 046106.

Optical Add-Drop Multiplexer for Dense Wavelength Division Multiplexing System Based on Photonic Crystals

Hu Yuchen, Chen Heming*

College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, Jiangsu, China

Abstract

Objective The silicon-based photonic crystal (PhC) is an artificially manufactured periodic dielectric material, whose unique band gap effect enables optical devices based on this structure to have the advantages of low loss and small size. In recent years, silicon-based PhC devices such as beam splitters, electro-optic modulators, optical switches, mode multiplexers, and optical add-drop multiplexers (OADMs) have received widespread attention from scholars in various countries due to their small size and easy cascading performance in the highly integrated optical communication system. Of various PhC-based devices, OADM, a key device in wavelength division multiplexing (WDM) systems, has attracted more and more attention from researchers. To meet the requirement of the highly integrated optical communication system, OADM design faces three possible challenges that cannot be ignored, namely, low insertion loss, compact size, and easy cascading performance. Moreover, with the advent of 5G, dense wavelength division multiplexing (DWDM) has become a key technology for increasing transmission capacity in optical fiber communication systems. As DWDM devices occupy an important position in optical communication systems, more requirements are posed for OADM design in channel spacing and crosstalk. In this study, we propose an OADM for DWDM systems based on PhCs. The device has low insertion loss, channel crosstalk, small size, and compact structure and can expand channels through cascading to achieve DWDM with channel spacing of 0.8 nm, which has great application potential in highly integrated large-capacity communication systems.

Methods This paper designs an OADM on the basis of a two-dimensional (2D) PhC triangular lattice plate of air holes in silicon. In the designed PhC plate in silicon, the circular air holes are arranged in a triangular lattice and periodically distributed along the 2D X - Y planes. The designed structure contains two different Aubry-André-Harper (AAH) bichromatic potential cavities, i. e., the resonant cavity and the reflection cavity. The resonant cavity couples the light

intensity at the working wavelength, and the reflection cavity reflects the light intensity at the working wavelength. First, we design a PhC AAH cavity, which is the key component of the proposed OADM device. It is composed of one-dimensional PhCs arranged according to different lattice constants based on the design principles of the AAH cavity model. Then, we model the basic structure of the designed OADM according to the coupled mode theory. Theoretical transmission spectra are derived to determine the optimal parameters of the OADM structure. After that, we calculate the parameters of the proposed device by the three-dimensional finite-difference time-domain (3D-FDTD) method for verification. In addition, we design a tapered structure for further optimization of the PhC OADM device on the basis of the modified step theory.

Results and Discussions First, the theoretical spectra of the adding-dropping process based on Eqs. (12)–(17) present a clear trend that the transmission can reach resonant cavity 1 as ω is close to ω_0 . The following four rules must be satisfied to achieve this ideal condition of the theoretical model: 1) two resonant cavities have the same resonant frequency ω_0 ; 2) the amplitude coupling attenuation coefficients of the two resonant cavities to the bus waveguide are equal, which is $\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_5 = \gamma_{\text{wav}}$; 3) the phase delay of the light wave from one cavity to another is $\varphi_1 = (n + 1/2)\pi$ (n is a non-negative integer); 4) the amplitude coupling attenuation coefficient of resonant cavity 1 to the input waveguide and the bus waveguide is $\gamma_1 = 4\gamma_{\text{wav}}$. Second, when the above four rules are met, the parameters of the design device are calculated by the 3D-FDTD method. The numerical results show that the proposed device can add/drop light intensity at the operation wavelength of 1556.2 nm and 1555.4 nm. The PhC AAH reflection cavity and tapered structure are designed to reduce the leakage of the light wave at the working wavelength on the bus waveguide and the mode mismatch loss at each port, which make the insertion loss and crosstalk lower than 0.51 dB and -29.54 dB, respectively. The line width is 0.2 nm due to the high Q value of the AAH cavity. However, the comparison of the theoretical and numerical spectra [Fig. 5 (b) and Fig. 6 (c)] demonstrates that the two transmission spectra overlap, but the highest transmittance obtained by the simulation is lower than the theoretical transmittance. This is because the simulation algorithm based on the 3D-FDTD method is more comprehensive than the coupled mode equation in the calculation of such loss as the coupling loss between waveguide and resonant cavity and that between silicon waveguide and PhC waveguide, the vertical direction loss of the resonant cavity, and the transmission loss of the PhC waveguide. In addition, the spectra of ports 1, 2, and 3 obtained by simulation are consistent with the spectral trend derived from the theoretical equations in Section 2.1.

Conclusions An OADM based on PhCs for DWDM is proposed. The theoretical model of the three-port filter is built, and the transmission spectrum is derived on the basis of the coupled mode theory. The 3D-FDTD method is used to calculate transmission performance to verify theoretical results. The device has low insertion loss, channel crosstalk, and small size ($19.35 \mu\text{m} \times 13.33 \mu\text{m}$) and can expand channels through cascading to achieve DWDM with channel spacing of 0.8 nm, which has great application potential in highly integrated large-capacity communication systems.

Key words optical device; photonic crystal; AAH cavity; dense wavelength division multiplexing; coupled mode theory