

# 光子晶体粗波分-模分混合复用/解复用器

季珂<sup>1</sup>, 陈鹤鸣<sup>2\*</sup>

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院微电子学院, 江苏 南京 210023;

2. 南京邮电大学 贝尔英才学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:**提出了一种基于光子晶体的粗波分-模分混合复用/解复用器,可在光子晶体上实现波分-模分的一体集成.根据时域耦合模理论,该器件采用点缺陷微腔和波长选择反射微腔的结构实现滤波.根据横向耦合模理论,利用非对称平行波导的结构实现模式转换.应用时域有限差分法对其性能进行分析,仿真结果表明,该器件可以实现 1550 nmTE0 模、1570 nmTE0 模、1550 nmTE1 模和 1570 nmTE1 模四个信道信号的复用和解复用,且具有较低的插入损耗( $< 0.23$  dB)和信道串扰( $< -15.21$  dB),该器件在 CWDM-MDM 中有重要作用,对提升城域网的容量具有重要价值.

**关键词:**光通信;耦合模理论;混合复用/解复用器;光子晶体

**中图分类号:**TN256 **文献标识码:**A

## Coarse wavelength-mode-division hybrid multiplexer/ de-multiplexer of photonic crystal

JI Ke<sup>1</sup>, CHEN He-Ming<sup>2\*</sup>

(1. College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,  
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In this paper, based on photonic crystal (PC), a coarse-wavelength-mode-division hybrid multiplexer/de-multiplexer is proposed. The coarse wavelength division multiplexing (CWDM) and mode division multiplexing (MDM) can be integrated on a chip of PC. According to coupled mode theory in time, point-defect cavities and wavelength-selective cavities were introduced in the PC to filter the optical wave. According to the lateral coupled mode theory, asymmetric parallel waveguides (APWs) consisted of single-mode waveguides (SMWs) and multi-mode waveguides (MMWs) were introduced in the PC to achieve mode conversion. The finite-difference time-domain (FDTD) method is used for property analysis. The simulation results show that the device achieves the multiplexing/de-multiplexing of four signals, i. e., the 1550 nm TE0 mode, 1570 nm TE0 mode, 1550 nm TE1 mode and 1570 nm TE1 mode. The device exhibits not only a low insertion loss ( $< 0.23$  dB) but also low mode crosstalk ( $< -15.21$  dB). It has considerable potential for application in the CWDM-MDM system and great value to improve the capacity of metropolitan area network.

**Key words:** optical communication, coupled mode theory, hybrid multiplexer/de-multiplexer, photonic crystal

**PACS:** 42.70.Qs, 42.79.Sz, 42.82.Et

收稿日期:2017-06-15,修回日期:2017-08-31

Received date: 2017-06-15, revised date: 2017-08-31

基金项目:国家自然科学基金(61571237);江苏省自然科学基金(BK20151509);江苏省研究生创新项目(KYLX15\_0835, KYZZ16\_0251)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61571237); Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (BK20151509); Colleges and Universities in Jiangsu Province plans to graduate research and innovation (KYLX15\_0835, KYZZ16\_0251)

作者简介(Biography):季珂(1991-),女,江苏泰兴人,博士研究生,硕士学位,主要研究领域为光子晶体器件. E-mail: youjrk1991@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: chhm@njupt.edu.cn

## 引言

数据业务飞速发展,导致 IP 网络融合的速度日益加快,所以对网络的扩容显得尤为重要,研究表明波分复用光传输的容量增长正在明显减速,而且其系统实验正在接近非线性光纤传输的仙农极限,限制了全光通信的发展. 模分复用<sup>[1-2]</sup>利用各模式间的正交性,以有限的稳定模式作为独立信道传递信息,扩大了光纤通信的空间维度,从而扩大了通信容量,然而单纯的模分复用还是不能满足容量的需求. 模分复用与波分复用<sup>[3-4]</sup>相结合可以成倍地提高系统容量和频谱效率,可以满足容量的需求. 在波分模分系统中,波分-模分混合复用/解复用器是核心器件. 文献[5]提出的波分-模分混合复用器,采用环形腔结构实现了模式转换,然后与波分复用相结合实现混合复用,波分复用的波长间隔为 15 ~ 16 nm,属于粗波分复用,串扰较大,约为 -12 dB. 文献[6]提出的波分-模分混合复用/解复用器,采用非对称定向耦合器实现模分复用,采用环形腔结构实现模分解复用,在 1550 nm 周围实现波分复用,具体波长间隔未提及,但是该器件的消光比仅为 9 dB,模式串扰为 -10 dB. 文献[7]提出的波分-模分混合复用器由一个基于非对称定向耦合器的模分复用器和 4 个 16 通道的阵列波导光栅构成,波长间隔为 3.2 nm,其功率损耗高达 7 dB,串扰仅为 -10 dB. 文献[8]提出的波分-模分混合复用/解复用器,采用渐变的定向耦合器实现模分复用,采用多模干涉波导实现 1310 nm 和 1550 nm 的波分复用,波长间隔为 240 nm,插入损耗较大,为 1.2 dB,串扰为 -18 dB. 文献[9]提出的波分-模分混合复用/解复用器,波长间隔约为 5 nm,利用多模干涉耦合器的级联实现混合复用,损耗为 0.8 dB. 文献[5-8]提出的波分-模分混合复用器均是通过单独的波分复用器与模分复用器组合实现的,尺寸较大,并且由于采用器件组合插入损耗和串扰均较大.

提出的粗波分-模分混合复用/解复用器在光子晶体上实现了波分和模分的一体集成. 该器件采用二维正方晶格的光子晶体结构,根据时域耦合模理论,在二维正方晶格光子晶体中引入了点缺陷微腔、波长选择反射微腔和线缺陷波导实现滤波;同时根据横向耦合模理论,采用单模波导 (single mode waveguide, SMW) 和多模波导 (multi-mode waveguide, MMW) 构成的非对称平行波导的结构,实现了光波的基模 (TE0) 到一阶模 (TE1) 的转换;

整个器件实现了 1550 nm 的 TE0 模、1570 nm 的 TE0 模、1550 nm 的 TE1 模和 1570 nm 的 TE1 模的四个信道信号的复用和解复用. 与文献[5-9]提出的基于硅基波导的波分-模分混合复用/解复用器相比,本文设计的基于光子晶体的粗波分-模分混合复用/解复用器具有尺寸小 ( $31 \times 18 \mu\text{m}$ ),插入损耗低,信道串扰小等优点,在 CWDM-MDM 中有重要作用,对提升城域网的容量具有重要价值.

## 1 结构和原理

### 1.1 结构

如图 1(a) 所示为正方晶格的光子晶体结构,晶格常数  $a = 540 \text{ nm}$ ,黑色圆柱为硅介质柱,其半径  $r = 90 \text{ nm}$ ,折射率  $n = 3.4$ ,对应的带隙图如图 1(b) 所示,图 1(b) 中带隙的禁带范围为  $0.316 \sim 0.458$ ,其禁带波长范围是  $1180 \sim 1710 \text{ nm}$ . 通过引入线缺陷作为波导,处于带隙内的光波可以在线缺陷内传播<sup>[10-11]</sup>.

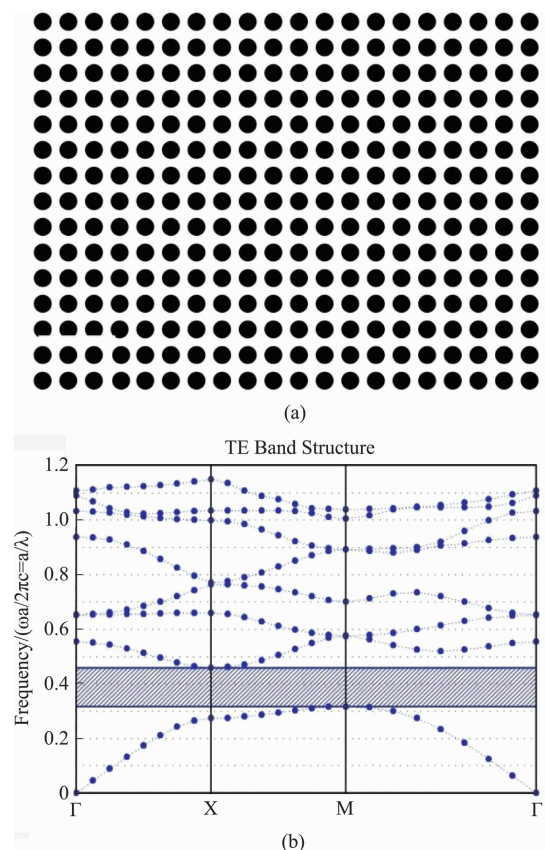


图1 (a) 正方晶格光子晶体结构图, (b) 正方晶格光子晶体带隙图

Fig. 1 (a) The structure of the square lattice PC, (b) The photonic band gap of the square lattice PC

提出的正方晶格光子晶体粗波分-模分混合复用/解复用器结构如图2所示,图中 $R_1$ 和 $R_2$ 为两个点缺陷微腔, $R_3$ 和 $R_4$ 为波长选择反射微腔, $g_1$ 、 $g_2$ 、 $g_3$ 、 $g_4$ 为去掉一排介质柱构成的线缺陷单模波导, $G$ 为多模波导,宽度为 $W = 3.66a = 1.98 \mu\text{m}$ ,在 $g_1$ 和 $G$ 之间加入角度约为 $9.5^\circ$ 锥形波导,从而解决光波从 $g_1$ 传输到 $G$ 存在的模式失配问题.主波导由 $g_1$ 、锥形波导和 $G$ 构成.图2中的结构参数将在1.3中给出.

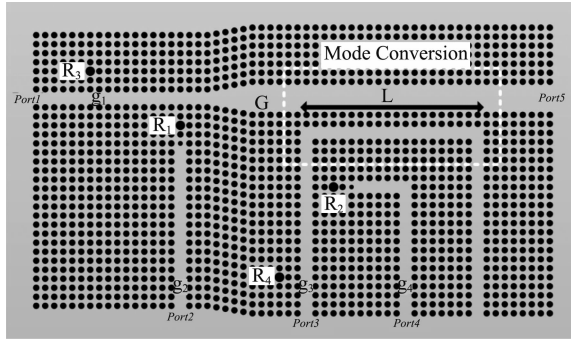


图2 正方晶格结构的光子晶体粗波分-模分混合复用/解复用器结构图

Fig. 2 Structure of the coarse wavelength-mode division hybrid multiplexer/de-multiplexer based on the square lattice PC

## 1.2 原理

所设计的粗波分-模分混合复用/解复用器采用具有波长反射微腔的结构实现滤波.如图3所示为具有波长选择反射微腔的光子晶体结构模型, $S_{+1}$ 、 $S_{+2}$ 、 $S_{+5}$ 为进入点缺陷微腔(Point-defect cavity)的输入波幅度, $S_{-1}$ 、 $S_{-2}$ 、 $S_{-5}$ 为点缺陷微腔的输出波幅度; $S_{+3}$ 、 $S_{+4}$ 为进入波长选择反射微腔(Wavelength-selective reflection cavity)的输入波幅度, $S_{-3}$ 、 $S_{-4}$ 为波长选择反射微腔的输出波幅度; $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_5$ 为衰减系数.

根据时域耦合模理论<sup>[12]</sup>,点缺陷微腔和输入波输出波幅度对时间的变化关系为

$$dA/dt = i\omega_{0A}A - (2\gamma + \gamma_5)A + \sqrt{2\gamma_1}(S_{-1} + S_{+2}) \quad (1)$$

$$S_{-5} = \sqrt{2\gamma_5}A \quad (2)$$

$$S_{+2} = S_{-3} \cdot e^{j\phi} = (-\sqrt{2\gamma_2}B) \cdot e^{j\phi} \quad (3)$$

式中, $A$ 为点缺陷微腔中光波的振幅, $B$ 为波长选择反射微腔中光波的振幅, $\omega_{0A}$ 为点缺陷微腔的谐振频率, $\phi = \beta d$ , $\beta$ 为光波在波导中的传播常数.

波长选择微腔和输入波幅度随时间变化的关系

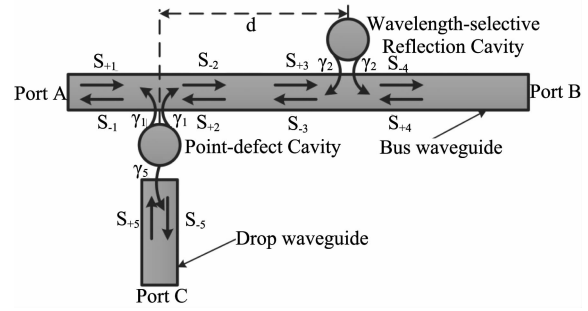


图3 具有波长选择反射微腔的光子晶体结构模型

Fig. 3 Structure model of PC with a wavelength-selective reflection cavity

为

$$dB/dt = i\omega_{0B}B - 2\gamma_2B + \sqrt{2\gamma_2}S_{-3} \quad (4)$$

$$S_{+3} = S_{-2} \cdot e^{j\phi} = (S_{+1} - \sqrt{2\gamma_1}A) \cdot e^{j\phi} \quad (5)$$

$\omega_{0B}$ 为波长选择反射微腔的谐振频率,由式(4)、(5)可得

$$B = \sqrt{2\gamma_2}(S_{+1} - \sqrt{2\gamma_1}A) \cdot e^{j\phi} / [i(\omega - \omega_{0B}) + 2\gamma_2] \quad (6)$$

式(6)中, $\omega$ 为入射光波的频率.

由式(3)、(6)可得

$$S_{+2} = -2\gamma_2 e^{2j\phi} (S_{+1} - \sqrt{2\gamma_1}A) / [i(\omega - \omega_{0B}) + 2\gamma_2] \quad (7)$$

由式(1)、式(7)可得

$$S_{+1} = \{1 - 2\gamma_2 \cdot e^{2j\phi} / [i(\omega - \omega_{0B}) + 2\gamma_2]\} \cdot [i(\omega - \omega_{0A})A + (2\gamma_1 + \gamma_5)A] / [\sqrt{2\gamma_1} - 2\gamma_2 \sqrt{2\gamma_1} e^{2j\phi} A / [i(\omega - \omega_{0B}) + 2\gamma_2]] \quad (8)$$

从主波导(Bus waveguide)端口A(Port A)输入的光波经过波长选择反射微腔的作用进入滤波波导(Drop waveguide)的透过率

$$T = |S_{-5}/S_{+1}| = \left| \frac{\sqrt{4\gamma_1\gamma_5} [i(\omega - \omega_{0B}) + 2\gamma_2(1 - e^{2j\phi})]}{- (\omega - \omega_{0A})(\omega - \omega_{0B}) + 2i\gamma_2(\omega - \omega_{0A}) + i(2\gamma_1 + \gamma_5)(\omega - \omega_{0B}) + 2\gamma_2(2\gamma_1 + \gamma_5) - 4\gamma_1\gamma_5 e^{2j\phi}} \right|^2 \quad (9)$$

由式(9)可得,当 $\omega = \omega_{0A} = \omega_{0B} = \omega_0$ ,即入射光的频率与点缺陷微腔和波长选择反射率微腔的谐振频率(缺陷模频率)相同时,且 $e^{2j\phi} = -1$ ,即 $\phi = (m + 1/2)\pi$  ( $m = 0, 1, 2, \dots$ )时,

$$T = \left| \frac{(\sqrt{4\gamma_1\gamma_5} 4\gamma_2) / (8\gamma_1\gamma_2 + 2\gamma_2\gamma_5)}{1 / (1/2 + \gamma_1/\gamma_5 + \gamma_5/16\gamma_1)} \right| \quad (10)$$

由式(10)可得,当  $\gamma_5 = 4\gamma_1$  时,  $T = 1$ . 此时从主波导端口 A 输入的光经过波长选择反射微腔的作用能完全耦合进滤波波导从端口 C 输出;同理从滤波波导端口 C 入射的光经过波长反射微腔的作用,能完全从端口 A 输出.

因此在光子晶体中采用具有波长选择反射微腔的结构实现高效率的滤波,入射波的频率要与点缺陷微腔的频率相同,并且点缺陷微腔和波长选择反射微腔之间的距离  $d$  需满足

$$\beta d = (m + 1/2)\pi, (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (11)$$

所设计的粗波分—模分混合复用/解复用器采用了单模波导和多模波导组成的非对称平行波导的结构实现模式转换. 如图 4 所示,为基于光子晶体的非对称平行波导的结构模型,在单模波导中传输的光波的复振幅为  $A_1$ ,在多模波导中传输的光波的复振幅为  $A_2$ ,当两波导中光波沿  $z$  方向传输时,两个波导中的光波会发生横向耦合,根据横向耦合模理论<sup>[13]</sup>,其线性微分方程组可表示为

$$\begin{aligned} d(A_1)/dz &= -j\beta_1 A_1(z) + \kappa_{12} A_2(z) \\ d(A_2)/dz &= -j\beta_2 A_2(z) + \kappa_{21} A_1(z) \end{aligned} \quad (12)$$

$\beta_1, \beta_2$  为单模波导和多模波导中光波的传播常数,  $\kappa_{12}, \kappa_{21}$  为耦合系数,设置边界条件,当  $z = 0$  时,  $A_1(0) = 1, A_2(0) = 0$ ;且  $\kappa_{12} = \kappa_{21} = jc, c$  为常数. 令  $A_1 = e^{-jh_1 z} E_1, A_2 = e^{-jh_2 z} E_2$ ,代入式(12)可得

$$-jhE_1 e^{-jh_1 z} = -j\beta_1 E_1 e^{-jh_1 z} + jcE_2 e^{-jh_2 z} \quad (13)$$

因为  $E_1, E_2$  不是  $z$  的函数,所以  $dE_1/dz = 0$ ,代入式(12)可得

$$\begin{aligned} jE_1(h - \beta_1) + jcE_2 &= 0 \\ jE_2(h - \beta_2) + jcE_1 &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

要使式(14)有非零解,其系数行列式需为零,

即

$$\begin{vmatrix} h - \beta_1 & c \\ c & h - \beta_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (15)$$

求解式(15)可得

$$\begin{aligned} h_{1,2} &= (\beta_1 + \beta_2)/2 \pm c \sqrt{1 + [(\beta_1 + \beta_2)/2c]^2} \\ &= (\beta_1 + \beta_2)/2 \pm c \sqrt{1 + 1/Q^2} \end{aligned} \quad (16)$$

在式(16)中,  $Q = 2c/(\beta_1 - \beta_2)$ .  $E_{11}$  和  $E_{12}$  对应  $h_1$ ,  $E_{21}$  和  $E_{22}$  对应  $h_2$ ,式(12)的一般解为

$$\begin{aligned} A_1 &= e^{-jh_1 z} E_{11} + e^{-jh_2 z} E_{12} \\ A_2 &= e^{-jh_1 z} E_{21} + e^{-jh_2 z} E_{22} \end{aligned} \quad (17)$$

代入边值条件,式(17)可变为

$$\begin{aligned} E_{11} + E_{12} &= 1 \\ E_{21} + E_{22} &= 1 \end{aligned} \quad (18)$$

由式(14)和式(18)解出  $E_{11}, E_{12}, E_{21}$  和  $E_{22}$ ,代入式(17)可得

$$\begin{aligned} A_1 &= 1/2[1 - (1 + Q^{-2})^{-1/2}]e^{-jh_1 z} + 1/2[1 + (1 + Q^{-2})^{-1/2}]e^{-jh_2 z} \\ A_2 &= 1/2(1 + Q^{-2})^{-1/2}(e^{-jh_1 z} - e^{-jh_2 z}) \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)可得多模和单模波导中光波的传输功率为

$$\begin{aligned} P_2 &= |A_2|^2 = \sin^2(\sqrt{1 + Q^{-2}} cz)/(1 + Q^{-2}) \\ P_1 &= 1 - P_2 \end{aligned} \quad (20)$$

在式(20)中,当  $\beta_1 = \beta_2$  时,两个波导中光波的复振幅可以表示为

$$\begin{aligned} A_1(z) &= \cos(cz) \\ A_2(z) &= \sin(cz) \end{aligned} \quad (21)$$

由式(21)可得,当  $cz = n\pi/2$  ( $n$  为正奇数)时,  $A_1(z) = 0, A_2(z) = 1$ ,即传输功率发生转换,在单模波导中传输的光波能完全耦合到多模波导中传输.

因此在光子晶体中,要实现模式的最佳横向耦合,需要光波在单模波导中的传播常数与多模波导中的传播常数相等;即

$$\beta_1 = \beta_2 \quad (22)$$

为了耦合效率达到最高,也需要选择合适的耦合长度.

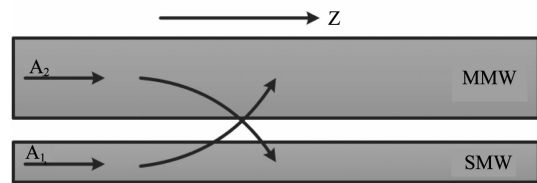


图4 光子晶体非对称平行波导结构模型  
Fig. 4 Structure model of the asymmetric parallel waveguide based on PC

### 1.3 结构参数的选取

光子晶体具有光子局域特性<sup>[14-15]</sup>,在光子晶体中引入的圆形点缺陷微腔的半径不同,产生的缺陷模的波长也会不同<sup>[16]</sup>.在图2所示的结构中,点缺陷用于1550 nm的光波的滤波,因此点缺陷微腔产生的缺陷模的波长需为1550 nm.如图5所示,为利用时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)法仿真得出的点缺陷微腔  $R_1$  产生的缺陷模的透射谱.此时点缺陷微腔  $R_1$  的半径为  $r_1 = 173.6$  nm,对应的缺陷模波长为1550 nm.点缺陷微腔  $R_2$  产生的缺陷模波长也需为1550 nm,由于周围结构对点缺陷微腔  $R_2$  的影响,要使其产生的缺陷模波长为1550 nm,需对其半径进行微调,最终确定  $R_2$  的

半径为  $r_2 = 173.7 \text{ nm}$ . 波长选择反射微腔  $R_3$  的半径和点缺陷微腔相同, 为  $r_3 = r_1 = 173.6 \text{ nm}$ ,  $r_4 = r_2 = 173.7 \text{ nm}$ .

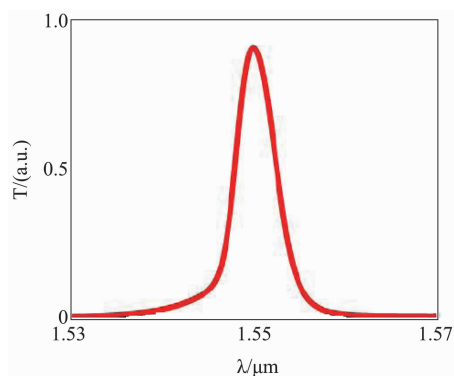


图5 点缺陷微腔  $R_1$  产生的缺陷模  
Fig.5 Defect mode of the point defect cavity  $R_1$

点缺陷微腔和波长选择反射微腔之间的距离需满足式(11), 如图6所示, 为单模波导中光波的传播常数曲线. 从图6可以看出, 1550 nm ( $a/\lambda = 0.348$ ) 处对应的传播常数为 0.176, 计算得出, 当  $m = 3$  时,  $d \approx 10a = 5.4 \text{ μm}$ , 因此  $R_1$  与  $R_3$  之间的距离为  $5.4 \text{ μm}$ . 同理,  $R_2$  与  $R_4$  之间的距离也为  $5.4 \text{ μm}$ .

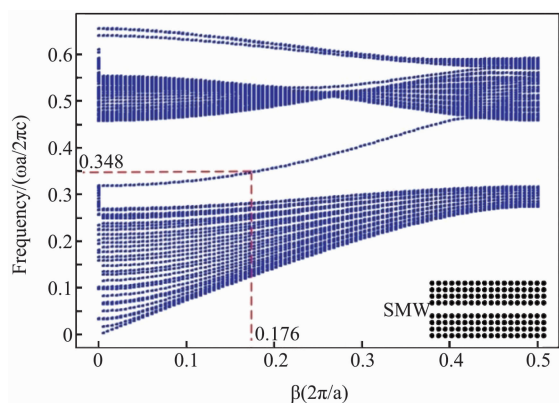


图6 单模波导中光波的传播常数曲线  
Fig.6 The propagation constant of the SMW

所设计的粗波分-模分混合复用/解复用器采用了单模波导和多模波导组成的非对称平行波导的结构实现模式转换. 单模波导和多模波导的传播常数需满足式(22), 通过调节波导的宽度改变传播常数的大小, 首先固定单模波导的宽度为  $2a$ , 然后确定多模波导的宽度. 如图7所示, 为利用 FDTD 法仿真得到的多模波导的宽度为  $W = 3.66a = 1.98 \text{ μm}$  时, 单模波导和多模波导构成的非对称平行波导的

传播常数曲线图.

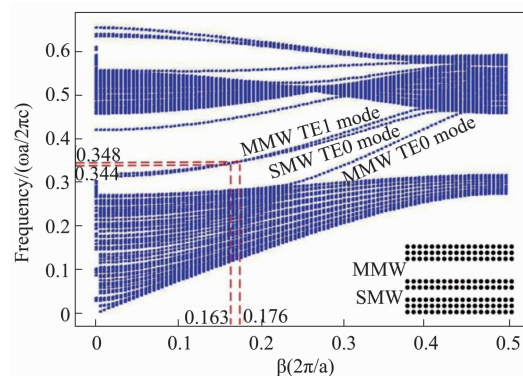


图7 非对称平行波导的传播常数曲线  
Fig.7 The propagation constant of the APW

由图7可以看出, 在单模波导中传输光波的 TE0 模的传播常数与在多模波导中传输的 TE1 模的传播常数有交点, 并且相交处曲线较为平坦, 1550 nm ( $a/\lambda = 0.348$ ) 的光波在单模波导中的 TE0 模的传播常数和多模波导中 TE1 模的传播常数相等, 为 0.176; 1570 nm ( $a/\lambda = 0.344$ ) 光波在单模波导中的 TE0 模的传播常数和多模波导中 TE1 模的传播常数相等, 为 0.163. 因此在单模波导中传输的 1550 nm 的 TE0 模和在多模波导中传输的 1550 nm 的 TE1 模会发生横向耦合; 在单模波导中传输的 1570 nm 的 TE0 模和在多模波导中传输的 1570 nm 的 TE1 模也会发生横向耦合. 通过选择合适的耦合长度, 可以使得耦合效率达到最高, 即在单模波导中传输的 TE0 模完全耦合进多模波导中转换成 TE1 模传输. 由于 1550 nm 和 1570 nm 的光波的传播常数相近, 可以选择一个合适的耦合长度, 使得 1550 nm 和 1570 nm 同时获得较高的耦合效率, 共用一个非对称平行波导实现模式转换, 以减小器件的尺寸. 利用 FDTD 法仿真得到非对称平行波导发生横向耦合的模场分布图, 如图8所示, 图8(a)为 1550 nm TE0 模转换成 TE1 模的模场分布图, 耦合长度为  $L_1 = 22a = 11.88 \text{ μm}$ , 图8(b)为 1570 nm TE0 转换成 TE1 模的模场分布图, 耦合长度为  $L_2 = 18a = 9.72 \text{ μm}$ , 最终折衷选取耦合长度为  $L = 21a = 11.34 \text{ μm}$ .

#### 1.4 复用解复用过程

在图2所示的结构中, 复用时, 1570 nm 的 TE0 模从端口 1 (Port1) 输入, 端口 5 (Port 5) 输出; 1550 nm 的 TE0 模从端口 2 (Port2) 输入, 耦合进点缺陷微腔  $R_1$ , 再从  $R_1$  耦合进主波导, 经过波长反射微腔  $R_2$  的作用, 从端口 5 (Port 5) 输出; 1570 nm 的 TE0



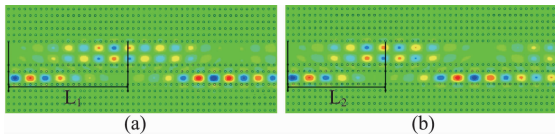


图8 (a)非对称平行波导中1550 nm的TE0模转换成TE1模的稳态场强分布图,(b)非对称平行波导中1570 nm的TE0模转换成TE1模的稳态场强分布图

Fig.8 (a) Steady field intensity distribution for the 1550 nm mode conversion in the APW, (b) steady field intensity distributions for the 1570 nm mode conversion in the APW

模从端口3(Port 3)输入,经过耦合距离 $L$ ,耦合进多模波导 $G$ 中,并转换成1570 nm的TE1模,最后从端口5输出;1550 nm的TE0从端口4(Port 4)入射,耦合进点缺陷微腔 $R_2$ ,再耦合进单模波导 $g_3$ ,经过波长反射微腔 $R_4$ 的作用,TE0模沿着波导 $g_3$ 传输距离 $L$ 后,耦合进多模波导 $G$ 中,同时转换成1550 nm的TE1模,从端口5输出.因此,从端口5输出1550 nmTE0模、1570 nmTE0模、1550 nmTE1模和1570 nmTE1模,实现了四个信道信号的波分—模分混合复用.

解复用为复用的逆过程,解复用时,1550 nmTE0模、1570 nmTE0模、1550 nmTE1模和1570 nmTE1模同时从端口5输入,1570 nm的TE0模在主波导中传输,最后从端口1输出;1550 nm的TE0模在主波导中传输时,部分直接耦合进点缺陷微腔 $R_1$ ,部分经过波长反射微腔 $R_2$ 的作用耦合进点缺陷微腔 $R_1$ ,然后耦合进波导 $g_2$ ,最后从端口2输出;1570 nm的TE1模在主波导中传输时,经过耦合长度 $L$ ,转换成1570 nm的TE0模在波导 $g_3$ 中传播,最后从端口3输出;1550 nm的TE1模在主波导中传输时,经过耦合长度 $L$ ,转换成1550 nm的TE0模在波导 $g_3$ 中传播,部分直接耦合进点缺陷微腔 $R_2$ ,部分经过波长反射微腔 $R_4$ 的作用耦合进点缺陷微腔 $R_2$ ,然后耦合进波导 $g_4$ ,最后从端口4输出.整个过程实现了1550 nmTE0模、1570 nmTE0模、1550 nmTE1模和1570 nmTE1模四个信道信号的波分—模分混合解复用.

## 2 性能分析

插入损耗和信道串扰是波分模分混合复用解复用器的重要性能指标.插入损耗定义为:

$$\gamma = 10 \log(I_{in}/I_{out}) \quad , \quad (23)$$

其中, $I_{in}$ 为输入光强, $I_{out}$ 为传输信道的输出光强.

信道串扰定义为:

$$C = 10 \log(I'_{out}/I_{out}) \quad , \quad (24)$$

其中, $I'_{out}$ 为传输信道进入相邻信道的光强, $I_{out}$ 为传输信道的输出光强.

### 2.1 复用性能分析

本文采用FDTD法仿真器件的性能.复用时,波长为1550 nm的TE0模从端口2入射,在端口5测得1550 nm的TE0模的输出光强,在端口1、端口3以及端口4测得信号传输到波导 $g_1$ 、 $g_3$ 和 $g_4$ 的光强,其稳态场强分布如图9(a)所示.同理,波长为1570 nm的TE0模从端口1入射,在端口5测得1570 nm的TE0模的输出光强,在端口2、端口3以及端口4测得信号传输到波导 $g_2$ 、 $g_3$ 和 $g_4$ 的光强,其稳态场强分布如图9(b)所示.波长为1550 nm的TE0模从端口4入射,在端口5放置探测器测量1550 nm的TE1模的输出光强,在端口1、端口2以及端口3测量信号传输到波导 $g_1$ 、 $g_2$ 和 $g_3$ 的光强,其稳态场强分布如图9(c)所示.波长为1570 nm的TE0模从端口3入射,在端口5放置探测器测量1570 nm TE1模的输出光强,在端口1、端口2以及端口4测量信号传输到波导 $g_1$ 、 $g_2$ 和 $g_4$ 的光强,其稳态场强分布如图9(d)所示.

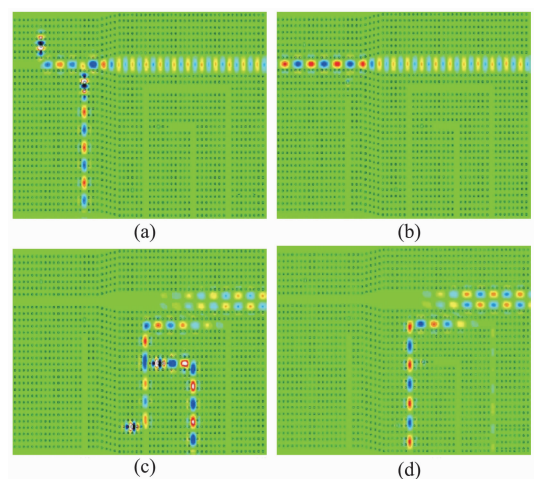


图9 复用时(a)1550 nm的TE0模,(b)1570 nm的TE0模,(c)1550 nm的TE1模,(d)1570 nm的TE1模传输的稳态场强分布图

Fig.9 Steady field intensity distribution for multiplexing of (a) the TE0 mode at 1550 nm, (b) the TE0 mode at 1570 nm, (c) the TE1 mode at 1550 nm, (d) the TE1 mode at 1570 nm

如图9(a)所示,从端口2输入1550 nm的TE0模,从端口5输出1550 nm的TE0模;如图9(b)所

示,从端口 1 输入 1570 nm 的 TE0 模,端口 5 输出 1570 nm 的 TE0 模;如图 9(c) 所示,从端口 4 输入 1550 nm 的 TE0 模,端口 5 输出 1550 nm 的 TE1 模;如图 9(d) 所示,从端口 3 输入 1570 nm 的 TE0 模,端口 5 输出 1570 nm 的 TE1 模. 因此从稳态场强分布图可以看出,该器件能很好地实现复用.

同时由仿真测得的复用 1550 nm 和 1570 nm 的 TE0 模和 TE1 模的在端口 5 的输出光强,以及传输到其他端口的输出光强,利用式(23) 计算得到插入损耗如表 1 所示,利用式(24) 计算得到信道串扰如表 2 所示.

表 1 复用 1550 nm 和 1570 nm 的 TE0 模和 TE1 模的插入损耗

Table 1 Insertion loss of the TE0 mode and TE1 mode at 1550 nm and 1570 nm for multiplexing

	1550 nm TE0	1570 nm TE0	1550 nm TE1	1570 nm TE1
插入损耗/dB	0.28	0.03	0.15	0.07

表 2 复用 1550 nm 和 1570 nm 的 TE0 模和 TE1 模的信道串扰

Table 2 Crosstalk of the TE0 mode and TE1 mode at 1550 nm and 1570 nm for multiplexing

信道串扰/dB	1550 nmTE0	1570 nmTE0	1550 nmTE1	1570 nmTE1
1550 nmTE0		-19.86	-38.48	-51.30
1570 nmTE0	-24.09		-62.45	-38.83
1550 nmTE1	-36.91	-56.78		-21.99
1570 nmTE1	-51.63	-38.29	-19.76	

由表 1 和表 2 可以看出,在复用 1550 nm 和 1570 nm 的 TE0 模和 TE1 模时,器件的插入损耗均低于 0.28 dB,信道串扰均小于 -19.76 dB,复用性能良好.

## 2.2 解复用性能分析

解复用 1550 nm 的 TE0 模从端口 5 入射,在端口 2 测得 1550 nm 的 TE0 模解复用后的输出光强,同时在端口 1、端口 3 以及端口 4 测得信号传输到波导  $g_1$ 、 $g_3$  和  $g_4$  的光强,其稳态场强分布如图 10(a) 所示. 同理,波长为 1570 nm 的 TE0 模从端口 5 入射,在端口 1 测得 1570 nm TE0 模解复用后的输出强度,在端口 2、端口 3 以及端口 4 测得信号传输到波导  $g_2$ 、 $g_3$  和  $g_4$  的光强,其稳态场强分布如图 10(b) 所示. 波长为 1550 nm 的 TE1 模从端口 5 入射,在端口 4 测得 1550 nm 的 TE1 模解复用后的输出强度,在端口 1、端口 2 以及端口 3 测得信号传输到波导  $g_1$ 、 $g_2$  和  $g_3$  的光强,其稳态场强分布如图 10(c) 所示. 波长为 1570 nm 的 TE1 模从端口 5 入射,在端口 3 测得 1570 nm 的 TE1 模解复用后的输

出强度,在端口 1、端口 2 以及端口 4 测得信号传输到波导  $g_1$ 、 $g_2$  和  $g_4$  的光强,其稳态场强分布如图 10(d) 所示. 从稳态场强分布图可以看出该器件解复用效果良好.

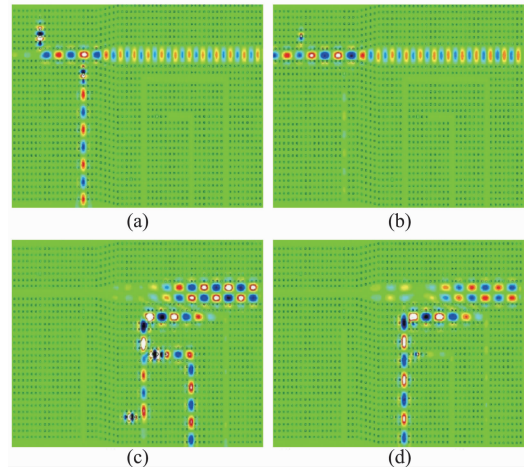


图 10 解复用 1550 nm 的 TE0 模,1570 nm 的 TE0 模,1550 nm 的 TE1 模,1570 nm 的 TE1 模传输的稳态场强分布图

Fig. 10 Steady field intensity distribution for de-multiplexing of (a) the TE0 mode at 1550 nm, (b) the TE0 mode at 1570 nm, (c) the TE1 mode at 1550 nm, (d) the TE1 mode at 1570 nm

同时根据仿真测得的解复用后 1550 nm 和 1570 nm 的 TE0 模和 TE1 模的输出光强,以及传输到其他端口的光强,由式(23) 计算得到的插入损耗如表 3 所示,由式(24) 计算得到的信道串扰如表 4 所示.

表 3 解复用 1550 nm 和 1570 nm 的 TE0 模和 TE1 模的插入损耗

Table 3 Insertion loss of the TE0 mode and TE1 mode at 1550 nm and 1570 nm for de-multiplexing

	1550 nmTE0	1570 nmTE0	1550 nmTE1	1570 nmTE1
插入损耗/dB	0.25	0.05	0.08	0.18

表 4 解复用 1550 nm 和 1570 nm 的 TE0 模和 TE1 模的信道串扰

Table 4 Crosstalk of the TE0 mode and TE1 mode at 1550 nm and 1570 nm for de-multiplexing

信道串扰/dB	1550 nmTE0	1570 nmTE0	1550 nmTE1	1570 nmTE1
1550 nmTE0		-20.39	-32.28	-44.71
1570 nmTE0	-22.08		-51.60	-31.40
1550 nmTE1	-33.89	-52.81		-27.32
1570 nmTE1	-44.95	-29.99	-15.21	

由表 3 和表 4 可以看出,解复用 1550 nm 和 1570 nm 的 TE0 模和 TE1 模时,器件的插入损耗均低于 0.25 dB,信道串扰均小于 -15.21 dB,

解复用性能良好.

### 2.3 点缺陷微腔和波长选择反射微腔半径变化对器件性能的影响

所设计的光子晶体粗波分-模分混合复用/解复用器采用点缺陷微腔和波长选择反射微腔的结构进行滤波,如图 11 所示为改变点缺陷微腔  $R_1$  和波长选择反射微腔  $R_3$  的半径时,四路信号的插入损耗变化.

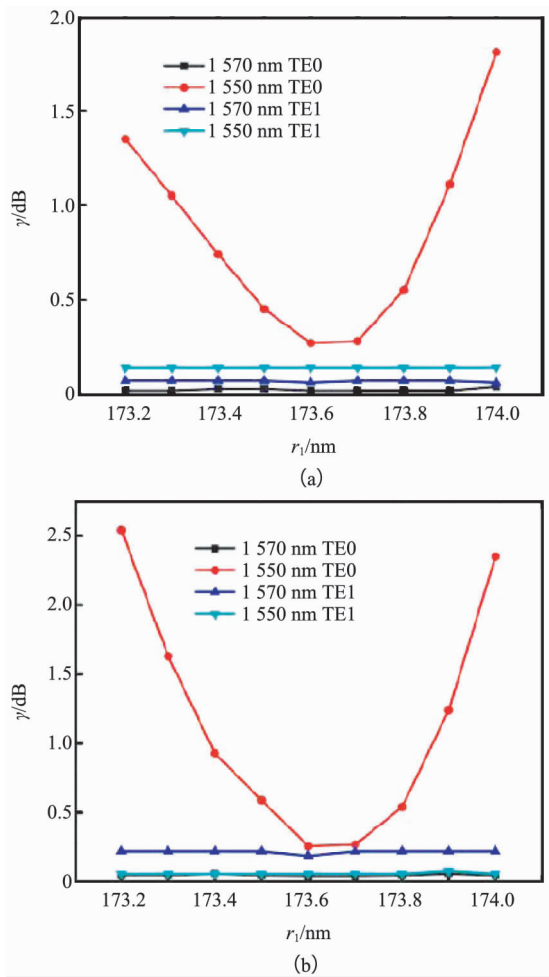


图 11 (a)复用时,四路信号的插入损耗随  $R_1$  和  $R_3$  半径变化的关系,(b)解复用时,四路信号的插入损耗随  $R_1$  和  $R_3$  半径变化的关系

Fig. 11 Insertion loss of the four signals versus the radius of  $R_1$  and  $R_3$  for (a) multiplexing, (b) de-multiplexing

由图 11 可以看出, $R_1$  和  $R_3$  半径变化对 1550 nm TE0 模的插入损耗影响较大,对其他信号的插入损耗几乎没有影响.仿真  $R_1$  和  $R_3$  半径变化时 1550 nm TE0 模的串扰变化如图 12 所示.

由图 12 可以看出, $R_1$  和  $R_3$  半径变化时,1550 nm TE0 模对 1570 nm TE0 模传输信道的串扰影响最大,因为波长选择反射微腔  $R_3$  半径变化后,对

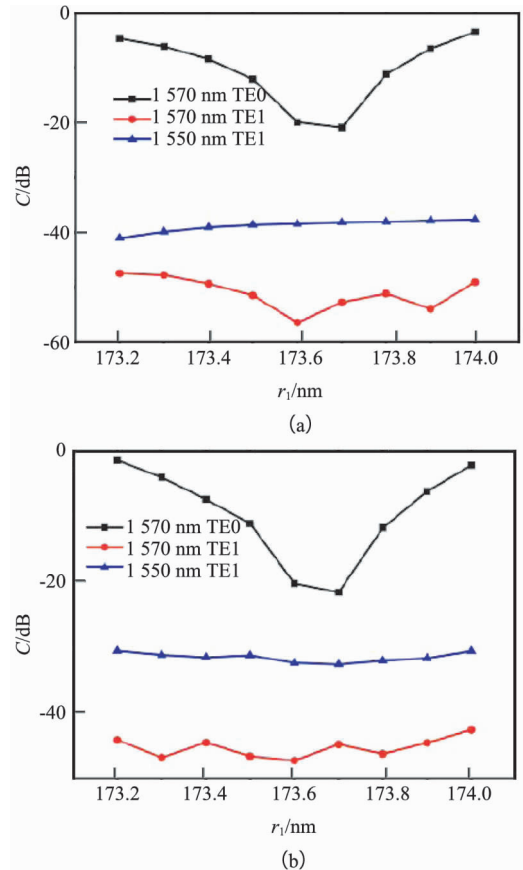


图 12 (a)复用时,1550 nm TE0 模的串扰随  $R_1$  和  $R_3$  半径变化的关系,(b)解复用时,1550 nm TE0 模的串扰随  $R_1$  和  $R_3$  半径变化的关系

Fig. 12 Crosstalk of the 1550 nm TE0 mode versus the radius of  $R_1$  and  $R_3$  for (a) multiplexing, (b) de-multiplexing

1550 nm TE0 模的反射作用变小,传输到端口 1 的信号强度变大,串扰变大.

$R_1$  和  $R_3$  半径为 173.6 nm 时,性能最优,在实验制作器件时点缺陷微腔的精确度需达到 0.1 nm,考虑影响最大的信号 1550 nm TE0 模的透过率高于 90% 的情况下,点缺陷微腔半径可以在 173.5 ~ 173.8 nm 之间.

### 2.4 多模波导宽度变化对器件性能的影响

本文所设计的粗波分-模分混合复用/解复用器通过单模波导和多模波导组成的非对称平行波导结构实现模式转换,如图 13 所示为改变多模波导 G 的宽度时,四路信号插入损耗的变化.

由图 13 可以看出,G 宽度变化时,1550 nm 和 1570 nm 的 TE1 模的插入损耗变化较大,因为波导 G 宽度变化时,1550 nm 和 1570 nm 的 TE1 模的传播常数发生变化,与单模波导  $g_3$  中 1550 nm 和



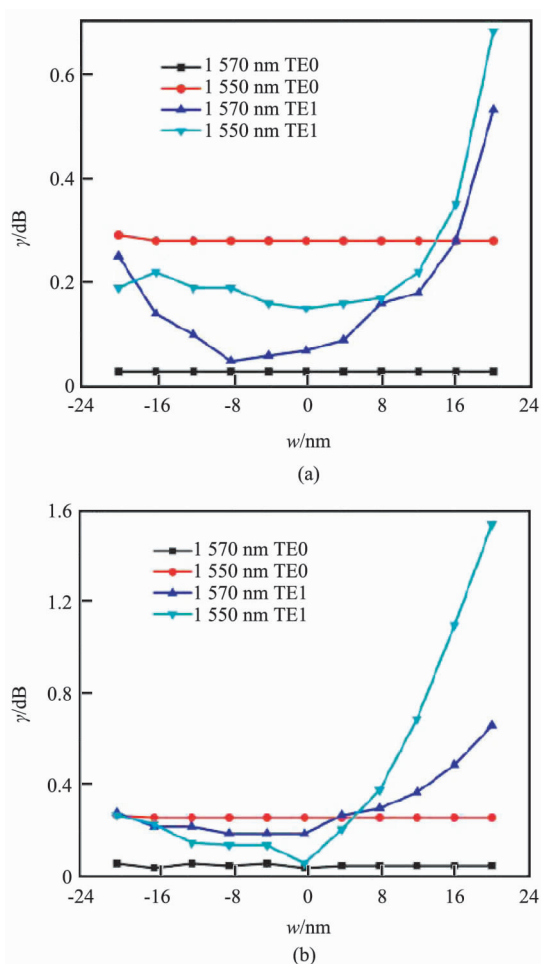


图 13 (a)复用时,四路信号的插入损耗随  $G$  宽度变化的关系,(b)解复用时,四路信号的插入损耗随  $G$  宽度变化的关系

Fig. 13 Insertion loss of the four signals versus the width variation of  $G$  for (a) multiplexing, (b) de-multiplexing

1570 nm 的 TE0 模的传播常数不再相等,转换效率降低,因此插入损耗变大. 仿真  $G$  宽度变化时,1550 nm TE1 模和 1570 nm TE1 模的串扰变化如图 14 所示.

多模波导的宽度变化主要对各波长 TE1 模的传输性能产生影响,在宽度为  $3.66a$  时性能最佳. 在实验制作器件时,波导宽度的精确度需在 nm 量级,波导宽度的容差率较大,考虑影响较大的两个信号透过率高于 90% 的情况下,波导宽度的在  $3.66a$  的基础上减小 20 nm 到增大 8 nm 的范围内均可.

### 3 结论

提出了一种新型的基于光子晶体的粗波分-模分混合复用/解复用器,可在光子晶体上实现波分复用与模分复用的一体集成. 在光子晶体中引入点缺

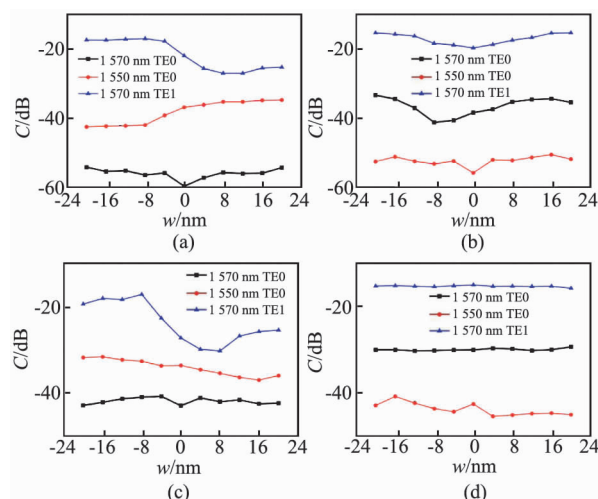


图 14 (a)复用时,1550 nm TE1 模的串扰随  $G$  宽度变化的关系,(b)复用时,1570 nm TE1 模的串扰随  $G$  宽度变化的关系,(c)解复用时,1550 nm TE1 模的串扰随  $G$  宽度变化的关系,(d)解复用时,1570 nm TE1 模的串扰随  $G$  宽度变化的关系

Fig. 14 Crosstalk of (a) the 1550 nm TE1 mode, (b) the 1570 nm TE1 mode versus the width variation of  $G$  for multiplexing, crosstalk of (c) the 1550 nm TE1 mode, (d) the 1570 nm TE1 mode versus the width variation of  $G$  for de-multiplexing

陷微腔和波长选择反射微腔实现 1550 nm 光波的滤波,引入非对称平行波导实现波长为 1550 nm 和 1570 nm 的光波的 TE0 模到 TE1 模的模式转换. 利用时域有限差分法分析其性能指标,结果表明,该器件可以实现 1550 nm TE0 模、1570 nm TE0 模、1550 nm TE1 模和 1570 nm TE1 模四个信道信号的复用和解复用,插入损耗低,信道串扰小,能有效地实现复用和解复用功能,并且尺寸小,仅为  $31 \times 18 \mu\text{m}$ . 该器件结构简单,性能优良,在 CWDM-MDM 中具有重要作用,对城域网容量的提升具有重要意义.

### References

- [1] ZHOU Wen, CHEN He-Ming. Mode division multiplexing of two-dimensional triangular lattice photonic crystal based on magneto-optical effect [J]. *Acta Physica Sinica*, (周雯,陈鹤鸣. 基于磁光效应的二维三角晶格光子晶体模分复用器. *物理学报*), 2015, **64**(6): 64210-64216.
- [2] Wu Y, Chiang K S. Mode-selective coupling between few-mode fibers and buried channel waveguides [J]. *Optics Express*, 2016, **24**(26): 30108-30123.
- [3] Dideban A, Habibiyan H, Ghafoorifard H. Photonic crystal channel drop filters based on fractal structures [J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2014, **63**(9): 304-310.
- [4] Charalambous G, Hasanuzzaman G K M, Perentos A, et al. High-Q wavelength division multiplexed optoelectronic oscillator based on a cascaded multi-loop topology [J]. *Optics*

- Communications, 2017, **387**: 361 – 365.
- [5] Luo L W, Ophir N, Chen C P, *et al.* WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip [J]. *Nature Communications*, 2014, **5**(2): 3069 – 3077.
- [6] YANG Yue-De, LI Yu, HUANG Yong-Zhen, *et al.* Silicon nitride three-mode division multiplexing and wavelength-division multiplexing using asymmetrical directional couplers and microring resonators [J]. *Optics Express*, 2014, **22**(18): 22172 – 22183.
- [7] WANG Jian, CHEN Si-Tao, DAI Dao-Xin. Silicon hybrid demultiplexer with 64 channels for wavelength/mode-division multiplexed on-chip optical interconnects [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(24): 6993 – 6996.
- [8] Mulugeta T, Rasras M. Silicon hybrid (de) multiplexer enabling simultaneous mode and wavelength-division multiplexing [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(2): 943 – 949.
- [9] LI Zhao-Song, LU Dan, ZUO Bing, *et al.* Proposal of an InP-based few-mode transmitter based on multimode interference couplers for wavelength division multiplexing and mode division multiplexing applications [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, **14**(8): 22 – 26.
- [10] CHEN He-Ming, SU Jian, Wang Jing-Li, *et al.* Optically-controlled high-speed terahertz wave modulator based on nonlinear photonic crystals [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(4): 3599 – 3603.
- [11] ZHUANG Yu-Yang, ZHOU Wen, JI Ke, *et al.* A narrow bandpass filter based on two-dimensional photonic crystals with two reflectors [J]. *Acta Physica Sinica*, (庄煜阳, 周雯, 季珂, 等. 一种双反射壁型二维光子晶体窄带滤波器. *物理学报*) 2015, **64**(22): 224202 – 224207.
- [12] Jiang C, Ren H, Wang J, *et al.* Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(6): 2446 – 2458.
- [13] QIAN Jing-Ren. Coupled-mode theory and its application to fiber optics [J]. *Acta Optica Sinica*, (钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用. *光学学报*) 2009, **29**(5): 1188 – 1192.
- [14] John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Physical Review Letters*. 1987, **58**(23): 2486.
- [15] Yablonoitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronic [J]. *Physical Review Letters*. 1987, **58**(20): 2059.
- [16] SONG Li-Jun, JI Ke, CHEN He-Ming, *et al.* The Radius Changes of Point Defect on the Impact of THz Modulator Based on Photonic Crystal [J]. *Modern Scientific Instruments*, (宋丽君, 季珂, 陈鹤鸣, 等. 点缺陷半径变化对光子晶体 THz 波调制器性能影响分析. *现代科学仪器*) 2012, (6): 40 – 42.

(上接第 49 页)

- Dynamics in Semiconductor Nanostructures: a THz Spectroscopy Approach [D], Ph. D. Thesis, Albert-Ludwigs-University, 2004: 30.
- [7] ZHONG Yong-qiang ZHENG Jia-gui, FENG Liang-heng. Study on ZnTe (ZnTe:Cu) Polycrystalline Films by XPS [J], *Spectroscopy and Spectral Analysis* (钟永强, 郑家贵, 冯良桓. ZnTe (ZnTe:Cu) 多晶薄膜的 XPS 研究. *光谱学与光谱分析*). 2007, **27**(3): 598 – 601.
- [8] Fikry El Akkad and Maneesh Mathai. Structural and luminescence properties of heavily doped radio-frequency-sputtered ZnTe:Cu thin films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015(118): 095706.
- [9] Joanne W L, Yim, Deirdre Chen, Gregory F. Brown, and Junqiao Wu, Synthesis and Ex Situ Doping of ZnTe and ZnSe [J]. *Nanostructures with Extreme Aspect Ratios*, *Nano Res*(2009)2:931 – 937.
- [10] Mycielski A. Szadkowska, A. usakowska, E. , Parameters of substrates-single crystals of ZnTe and Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te (x = 0.25), obtained by physical vapor transport technique (PVT) [J]. *J. Crystal. Growth*, 1999, **197**: 423 – 426.
- [11] Reng Wang, Weizheng Fang, Shixin Yuan, Pei Zhao, Caihong Zhang, Lei Zhang, Huier Zhang, Shuhong Hu, Xuemin Shen, Ning Dai. Growth and Characterization of < 110 > oriented ZnTe single crystal [C]. *Proc. SPIE*, 2007 (6835): 683519.
- [12] WANG Reng, LI Xiang-yang, LU Ye. Research Advances in Vapor Phase Growth of CdZnTe under Microgravity [J] *Infrared* (王仍, 李向阳, 陆液. 空间微重力汽相生长 CdZnTe 的研究进展. *红外*) 2013, **34**(11): 8 – 12.
- [13] Lu Ye. Growth and characterization of ZnTe crystal on TG-II spaceship In microgravity [C]. The Ninth microgravity science academic conference, China. (陆液 天宫二 ZnTe:Cu 晶体的空间生长研究. 第九届全国微重力科学学术会议) 2015: 40.
- [14] Reng Wang, Xiangyang Li. Growth of II-VI semiconductor materials under microgravity [C]. Asian Microgravity Pre-Symposium. 2012: 39 – 41.
- [15] Lu Ye. Growth and characterization of ZnTe crystal on TG-II spaceship In microgravity [R]. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. Internal Data. (陆液 天宫二 ZnTe:Cu 晶体的空间生长研究 中科院上海技术物理研究所 内部资料).
- [16] Dieter K. Schroder. Semiconductor material and device characterization [M]. Wiley. 1998.
- [17] Iribarren A. Fern? andez, P. , Piqueras J. . Cathodoluminescence characterization of ZnO:Te microstructures obtained with ZnTe and TeO<sub>2</sub> doping precursors [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2008: (43) 600 – 604.
- [18] Kozlovsky V. I. Krysa, A. B. , Korostelin Yu. V. , MBE growth and characterization of ZnTe epilayers and ZnCdTe/ZnTe structures on GaAs(100) and ZnTe(100) substrates [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000: (214/215) 35 – 39.
- [19] Nishio M. , Saito K. Nakatsuru, Y. Photoluminescence and electrical properties of P-doped ZnTe layers grown by low pressure MOVPE [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2017, **468**(15): 666 – 670.