

基于纳米线波导和一维光子晶体纳米梁腔的 模分-波分混合解复用器

潘万乐¹, 陈鹤鸣^{2*}, 庄煜阳¹, 胡宇宸¹

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 设计了一种基于纳米线波导和一维光子晶体纳米梁腔的模分-波分混合解复用器, 该器件由波分解复用(WDM)和模分解复用(MDM)两部分组成。其中, 波分解复用部分由两个一维光子晶体纳米梁腔构成, 模分解复用部分采用硅基纳米线波导结构。利用三维时域有限差分法, 计算分析了该混合解复用器的性能参数。结果表明, 该器件可以在波长 1570.0 nm 和 1573.2 nm 处实现基模(TE_0)和一阶模(TE_1)四个信道的解复用功能, 插入损耗小于 0.37 dB, 信道串扰小于 -18.4 dB, 自由光谱范围可以达到 400 nm。该混合解复用器可以应用于模分-粗波分复用系统中。

关键词 集成光学; 光子晶体; 纳米梁腔; 纳米线波导; 时域有限差分法; 混合解复用器

中图分类号 O43

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0413001

Hybrid Demultiplexer for Mode-Wavelength Division Based on Nanowire Waveguides and One-Dimensional Photonic Crystal Nanobeam Cavity

Pan Wanle¹, Chen Heming^{2*}, Zhuang Yuyang¹, Hu Yuchen¹

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

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

Abstract A hybrid demultiplexer for mode-wavelength division based on nanowire waveguides and one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity is proposed. The device consists of a wavelength division multiplexer (WDM) and a mode division multiplexer (MDM), in which the WDM is composed of two one-dimensional photonic crystal nanobeam cavities, however the MDM adopts a silicon-based nanowire waveguide structure. The parameters of the hybrid demultiplexer are calculated using the three-dimensional finite-difference time-domain (3D-FDTD) method. The results show that the four channels of the fundamental mode (TE_0) and the first-order mode (TE_1) at wavelengths of 1570.0 nm and 1573.2 nm can be demultiplexed by this device. The insertion loss and the channel crosstalk are smaller than 0.37 dB and -18.4 dB, respectively. The free spectral range can reach 400 nm. The proposed hybrid demultiplexer can be applied to a mode-division and coarse-wavelength-division multiplexing system.

Key words integrated optics; photonic crystals; nanobeam cavity; nanowire waveguides; finite-difference time-domain method; hybrid demultiplexer

OCIS codes 130.3120; 160.5298; 230.5750

收稿日期: 2020-07-28; 修回日期: 2020-08-30; 录用日期: 2020-09-25

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

* E-mail: chhm@njupt.edu.cn

1 引言

随着社会的发展,通信系统中传输容量的需求持续增加^[1-3]。为了满足这种需求,光通信网络采用各种复用技术以扩大容量,比如波分复用(WDM)^[4]、空分复用(SDM)^[5]等。波分复用是指在单根单模光纤上同时传输不同波长信号的技术,波分解复用器件通常可以分为阵列波导光栅(AWG)^[6]型、微环谐振腔(MRR)^[7]型、光子晶体谐振腔(PCR)^[8]型等。模分复用(MDM)^[9]作为空分复用的一种方式,通过增加纤芯的半径来构建能够支持多个模式的少模光纤(FMF)或多模光纤(MMF)。因此,单根光纤可以同时传输不同的光波模式。模分解复用器件主要分为绝热耦合(AC)^[10]型、多模干涉(MMI)^[11]型、光栅辅助反向耦合(GACC)^[12]型、非对称定向耦合(ADC)^[13]型等。为了进一步扩大容量,通信网络一般采用波分复用与模分复用结合的方式。

随着硅光子学的发展,硅基片上集成技术成为研究热点,它结合了光学、CMOS 工艺以及先进的封装技术,制造成本大幅降低,因此通信系统的硅基混合解复用集成器件受到广泛关注。文献[14]提出了一种 AWG-ADC 型模分-波分混合解复用器,该器件可以实现 64 个信道的混合解复用功能,波长信道间隔约为 3.2 nm。但是该结构尺寸偏大,约为 $1961\ \mu\text{m} \times 2986\ \mu\text{m}$ 。为了解决这个问题,文献[15]提出了一种 MRR-ADC 型模分-波分混合解复用器。器件尺寸仅为 $0.11\ \text{mm}^2$,可以在 1530 ~ 1565 nm 波长范围内实现三个波长三个模式的解复用功能。该器件尺寸较小,但是自由光谱范围仅有 35 nm。文献[16]提出了一种 PCR-ADC 型模分-波分混合解复用器,可以在波长 1530 nm 和 1550 nm 处实现基模(TE_0)和一阶模(TE_1)的解复用功能,该器件尺寸约为 $80\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$,但是波长信道间隔为 20 nm,插入损耗约为 2.0 dB。

本文提出了一种基于纳米线波导和一维光子晶体纳米梁腔的模分-波分混合解复用器,该器件由 WDM 模块和 MDM 模块两部分组成。其中,WDM 模块采用一维光子晶体纳米梁腔结构,MDM 模块采用硅基纳米线波导结构。利用三维时域有限差分(3D-FDTD)法进行仿真分析,结果表明,该器件可以在波长 1570.0 nm 和 1573.2 nm 处实现 TE_0 和 TE_1 四个信道的解复用功能,插入损耗小于

0.37 dB,信道串扰小于 -18.4 dB,自由光谱范围约为 400 nm,器件尺寸约为 $85\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ 。该混合解复用器可以应用于模分-粗波分复用系统和光子集成电路中。

2 工作原理和理论模型

2.1 工作原理

图 1 是本文设计的四信道模分-波分混合解复用器,其工作原理如下。A 和 B 构成纳米线波导非对称定向耦合型 MDM 模块,而 C 和 D 构成一维光子晶体谐振腔型 WDM 模块。在 MDM 模块中,波长为 λ_1 (虚线标记)的 TE_0 和波长为 λ_2 (实线标记)的 TE_1 同时从多模波导区输入。在相位匹配区,传输的 TE_1 与单模波导中的 TE_0 发生模式转换,并耦合至单模波导中进行传输;而在相位匹配区,传输的 TE_0 不会与相邻波导发生模式转换,仍以基模形式继续传输。B 为过渡波导,在该波导中不会发生高低阶模式之间的耦合转换。唯一的变化是下侧波导中 TE_0 的模场相比于多模区时变得更窄。在 WDM 模块中,C 和 D 采用的是基于一维光子晶体纳米梁腔的双信道波分解复用器。当入射光波的波长 λ_1 与下载腔和反射腔的谐振波长相匹配时,入射光波 λ_1 会被谐振腔系统捕获,并隧穿耦合至下载波导进行传输,入射光波 λ_2 从主波导输出。这样,波长为 λ_1 的 TE_0 和波长为 λ_2 的 TE_1 分别从四个不同的端口输出,实现了模分-波分混合解复用功能。以下部分重点研究上述 WDM 模块的理论模型。

2.2 理论模型

WDM 模块的理论模型如图 2 所示。 TE_0 的光从端口 1 入射,当入射光的谐振频率与两个微腔的谐振频率一致时,光波会被谐振腔系统捕获并从端口 3 输出。其他频率的光继续沿着主波导传输并从端口 2 输出。基于时域耦合模理论,对其传输性能进行分析。在图 2 中, S_{+j} 表示输入波幅值, S_{-j} 表示输出波幅值, j 为输入波编号, γ_i 表示谐振腔与波导耦合产生损耗时的幅值耦合衰减系数, i 为幅值耦合衰减系数编号, φ_1 为两个谐振腔之间的单程相位延迟, φ_2 为谐振腔 1 与反射壁之间的单程相位延迟。

假设两个单模谐振腔的谐振频率均为 ω_0 ,谐振腔 1 的谐振模振幅为 a ,谐振腔 2 的谐振模振幅为 b 。由于结构具有对称性,令 $\gamma_i = \gamma(i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$,其时域耦合模方程^[17]表示如下。

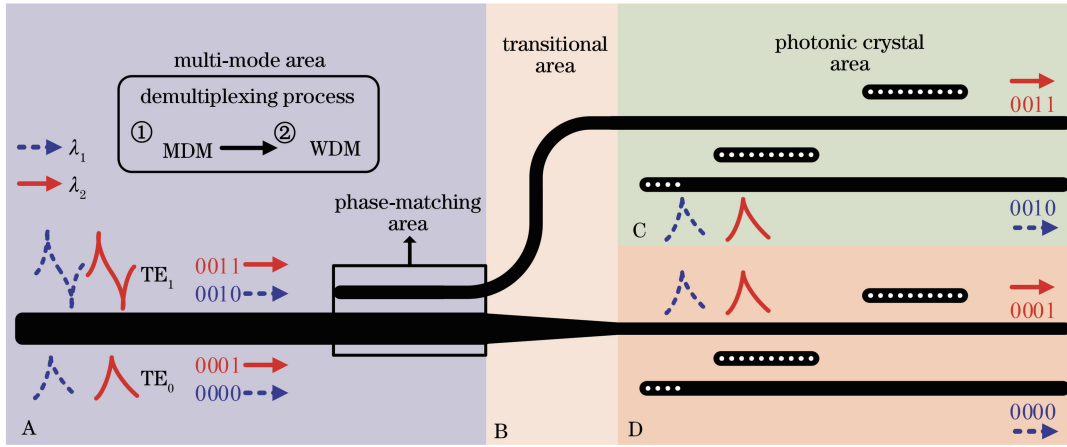


图 1 模分-波分混合解复用器的工作原理图

Fig. 1 Working principle of MDM-WDM hybrid demultiplexer

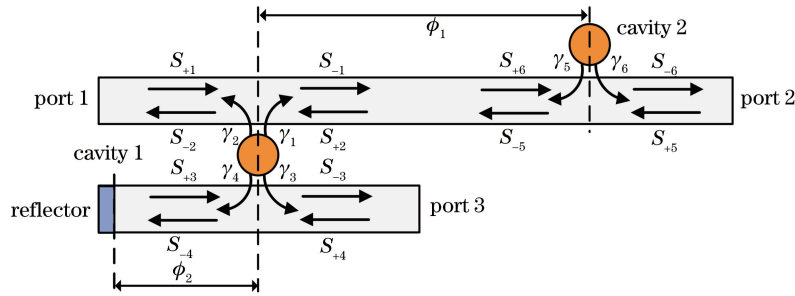


图 2 WDM 的理论模型

Fig. 2 Theoretical model of WDM

对于谐振腔 1, 谐振模振幅的时域变化可以表示为

$$\frac{da}{dt} = -j\omega_0 a - 4\gamma a + \sqrt{2\gamma}(S_{+1} + S_{+2} + S_{+3} + S_{+4}), \quad (1)$$

式中: t 为谐振模的传播时间。

输入波和输出波幅值之间的关系为

$$S_{+2} = S_{-5} \cdot \exp(j\varphi_1), \quad (2)$$

$$S_{-5} = S_{+5} - \sqrt{2\gamma}b, \quad (3)$$

$$S_{+3} = -S_{-4} \cdot \exp(j2\varphi_2), \quad (4)$$

$$S_{-4} = S_{+4} - \sqrt{2\gamma}a. \quad (5)$$

由于输入光的频率 ω 恒定不变, 即 $a(t) = \exp(-j\omega t)$, 因此 $da/dt = -j\omega a$ ^[18]。当输入波只有 $S_{+1}(S_{+4}=0, S_{+5}=0)$ 时, 由(1)~(5)式可得

$$a = \frac{\sqrt{2\gamma}S_{+1} - 2\gamma \cdot \exp(j\varphi_1) \cdot b}{j(\omega_0 - \omega) + 4\gamma - 2\gamma \cdot \exp(j2\varphi_2)}. \quad (6)$$

对于谐振腔 2, 谐振模振幅的时域变化可以表示为

$$\frac{db}{dt} = -j\omega_0 b - 2\gamma b + \sqrt{2\gamma}(S_{+5} + S_{+6}), \quad (7)$$

输入波和输出波幅值之间的关系为

$$S_{+6} = S_{-1} \cdot \exp(j\varphi_1), \quad (8)$$

$$S_{-1} = S_{+1} - \sqrt{2\gamma}a. \quad (9)$$

同样, 由(7)~(9)式可得

$$b = \frac{\sqrt{2\gamma} \cdot \exp(j\varphi_1)}{j(\omega_0 - \omega) + 2\gamma} \cdot S_{+1} - \frac{2\gamma \cdot \exp(j\varphi_1)}{j(\omega_0 - \omega) + 2\gamma} \cdot a. \quad (10)$$

将(10)式代入(6)式可得

$$a = \frac{j\sqrt{2\gamma}(\omega_0 - \omega) + 2\gamma\sqrt{2\gamma}[1 - \exp(j2\varphi_1)]}{[j(\omega_0 - \omega) + 4\gamma - 2\gamma \cdot \exp(j2\varphi_2)][j(\omega_0 - \omega) + 2\gamma] - 4\gamma^2 \cdot \exp(j2\varphi_1)} \cdot S_{+1}. \quad (11)$$

端口 3 的下行光波振幅为

$$S_{-3} = S_{+3} - \sqrt{2\gamma}a. \quad (12)$$

将(4)式和(5)式代入(12)式可得

$$S_{-3} = -\sqrt{2\gamma}[1 - \exp(j2\varphi_2)] \cdot a. \quad (13)$$

于是可以得到端口 3 的下行效率 $D(\omega)$ 为

$$D(\omega) = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{2\gamma[1 - \exp(j2\varphi_2)]\{j(\omega_0 - \omega) + 2\gamma[1 - \exp(j2\varphi_1)]\}}{[j(\omega_0 - \omega) + 4\gamma - 2\gamma \cdot \exp(j2\varphi_2)][j(\omega_0 - \omega) + 2\gamma] - 4\gamma^2 \cdot \exp(j2\varphi_1)} \right|^2. \quad (14)$$

当满足 $\varphi_1 = \varphi_2 = (m + 1/2) \times \pi$ (m 为正整数) 时, (14) 式可以简化为

$$D(\omega) = \left| \frac{S_{-3}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{4\gamma[j(\omega_0 - \omega) + 4\gamma]}{[j(\omega_0 - \omega) + 6\gamma][j(\omega_0 - \omega) + 2\gamma] + 4\gamma^2} \right|^2. \quad (15)$$

同理可以计算端口 1 的反射效率 $R(\omega)$ 为

$$S_{-2} = S_{+2} - \sqrt{2\gamma}a. \quad (16)$$

由(2)、(3)、(16)式可得

$$S_{-2} = -\sqrt{2\gamma}b \cdot \exp(j\varphi_1) - \sqrt{2\gamma}a. \quad (17)$$

将(10)式和(11)式代入(17)式, 得到端口 1 的反射效率 $R(\omega)$ 为

$$R(\omega) = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{2\gamma}{j(\omega_0 - \omega) + 2\gamma} - \left[\frac{2\gamma\sqrt{2\gamma}}{j(\omega_0 - \omega) + 2\gamma} + \sqrt{2\gamma} \right] \frac{\sqrt{2\gamma}[j(\omega_0 - \omega) + 4\gamma]}{[j(\omega_0 - \omega) + 6\gamma][j(\omega_0 - \omega) + 2\gamma] + 4\gamma^2} \right|^2. \quad (18)$$

由能量守恒定律可以得到端口 2 的透射效率 $T(\omega)$ 为

$$T(\omega) = 1 - D(\omega) - R(\omega). \quad (19)$$

图 3(a) 为各端口的理论透射谱图。可以看出, 当 $\omega = \omega_0$ 时, 下行效率为 100%, 而透射率和反射率为 0, 从而实现了信道下载功能。图 3(b) 是反射谱

的局部放大图, 可以看出, 在理想条件下, 该结构的入射端口几乎没有反射能量。于是得到该 WDM 模块的理想下载滤波条件: 1) 两个谐振腔的谐振频率一致; 2) 两个相位参数需要同时满足 $\varphi_1 = \varphi_2 = (m + 1/2) \times \pi$ (m 为正整数)。

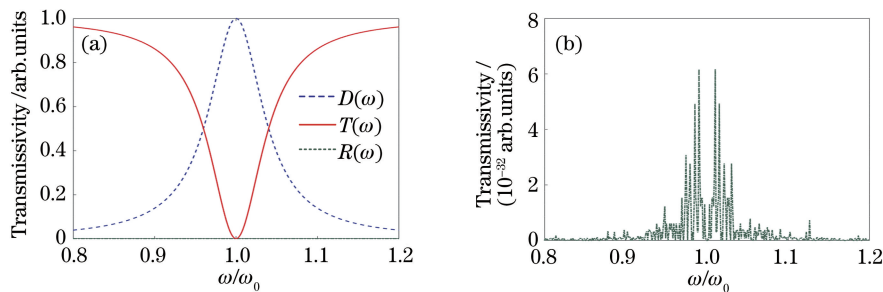


图 3 理论模型透射谱。(a) 各端口的理论透射谱; (b) 反射谱的局部放大图

Fig. 3 Transmission spectra of theoretical model. (a) Theoretical transmission spectra of each port; (b) local magnification of reflection spectrum

3 结构设计与优化

基于纳米线波导和一维光子晶体纳米梁腔的模分-波分混合解复用器的三维结构如图 4 所示, 其中 I_1 为光波的入射端口, O_1 、 O_2 为 MDM 模块的出射端口, $O_3 \sim O_6$ 为 WDM 模块的出射端口。该结构衬底为硅, 厚度约为 $2 \mu\text{m}$, 折射率为 3.47; 包层为二氧化硅, 厚度约为 $4 \mu\text{m}$, 折射率为 1.44, 厚度为 200 nm 的硅基纳米线波导位于二氧化硅包层之中。以下部分对一维光子晶体纳米梁腔 WDM 模块和

纳米线波导 MDM 模块进行单独的结构设计。

3.1 WDM 模块的结构设计与优化

基于文献[19]设计了一种一维光子晶体纳米梁腔, 如图 5(a) 所示。该一维光子晶体纳米梁腔的波导宽度为 $w = 550 \text{ nm}$, 所有的圆孔沿 x 轴方向在硅基质中排列, 晶格常数 $a' = 350 \text{ nm}$ 。这里晶格常数 a' 的选取是为了使微腔模式与波导模式满足模式匹配条件, 从而实现高效耦合。其中, 圆孔内的填充物为二氧化硅。在微腔结构中, 虚线两边表示的是布拉格反射区域, 虚线中间表示的是光子晶体微腔区域。

在布拉格反射区域中,圆孔的半径均为 103 nm,而微腔区域中圆孔的半径由两侧的 103 nm 线性递增至 113 nm。具体的圆孔半径分布如图 5(b)所示,其中

横坐标 0 对应图 5(a)中 No. 0 的圆孔。图 5(c)为该一维光子晶体纳米梁腔的谐振模式的稳态场分布情况,其谐振波长为 1571.7 nm。

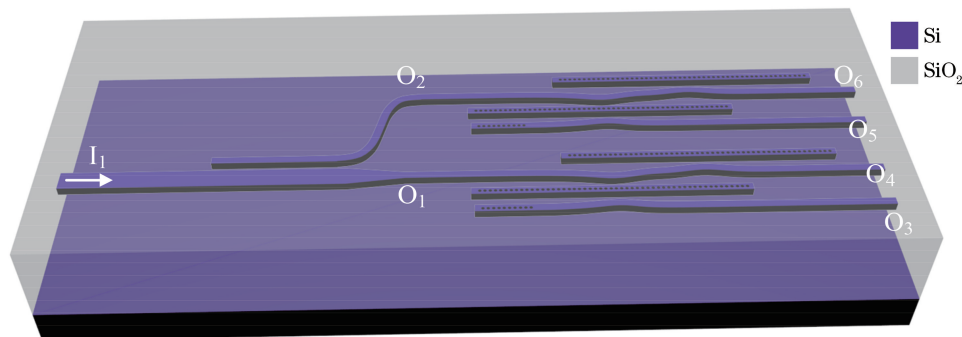


图 4 模分-波分混合解复用器的三维结构示意图

Fig. 4 Three-dimensional structural diagram of MDM-WDM hybrid demultiplexer

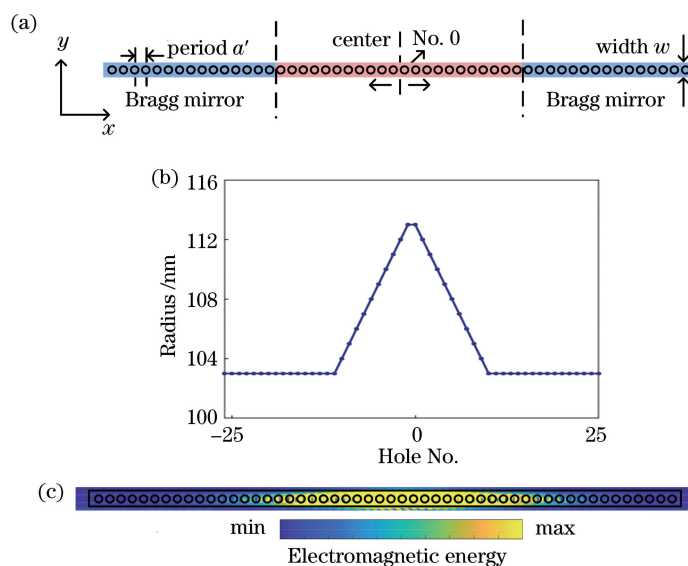


图 5 一维光子晶体纳米梁腔的结构参数和稳态场分布。(a)结构示意图;(b)微腔区域的圆孔半径分布;(c)谐振腔模式的稳态场分布

Fig. 5 Structural parameters and static field distribution of one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity.

(a) Structural diagram; (b) hole radius distribution in microcavity area; (c) static field distribution of resonant cavity mode

基于上述一维光子晶体纳米梁腔,设计了一种双信道波分解复用器,其三维结构如图 6(a)所示,二维平面示意图如图 6(b)所示。该双信道波分解复用器由一维光子晶体纳米梁腔和两个纳米线波导组合构成。两个光子晶体微腔分别用 Cavity 1 和 Cavity 2 表示。其中 Cavity 1 是下载微腔,Cavity 2 是反射微腔。纳米线波导的宽度为 $w = 550$ nm。在微腔中心位置,波导与微腔之间的距离为 $g_1 = 210$ nm;而在非中心位置,波导与微腔之间的距离为 $g_2 = 560$ nm。Cavity 1 与 Cavity 2、Cavity 1 与反射壁之间的距离分别为 $s_1 = 6600$ nm 和 $s_2 = 4750$ nm,目的是使得 Cavity 1 与 Cavity 2 之间的

相位距离 φ_1 、Cavity 1 与反射壁之间的相位距离 φ_2 同时满足 $\pi/2$ 的整数倍。Cavity 1 中心位置两个孔的半径增大至 113.4 nm,而 Cavity 2 中心位置两个孔的半径增大至 113.5 nm,目的是使得两个微腔的谐振波长一致,且均为 1570.0 nm。

利用仿真软件 Lumerical 对该波分解复用器进行 3D-FDTD 仿真,网格大小设置为 35 nm($a'/10$)。将宽光谱 TE₀ 光源放置在端口 A,并在端口 B 和端口 C 处分别放置探测器,测得的透射谱如图 7(a)所示,其中实线和虚线分别代表端口 B 和端口 C 处所测得的透射谱。可以看出,端口 B 的透射谱在 1570.0 nm 处有尖锐的下降峰,而端口 C 的透射

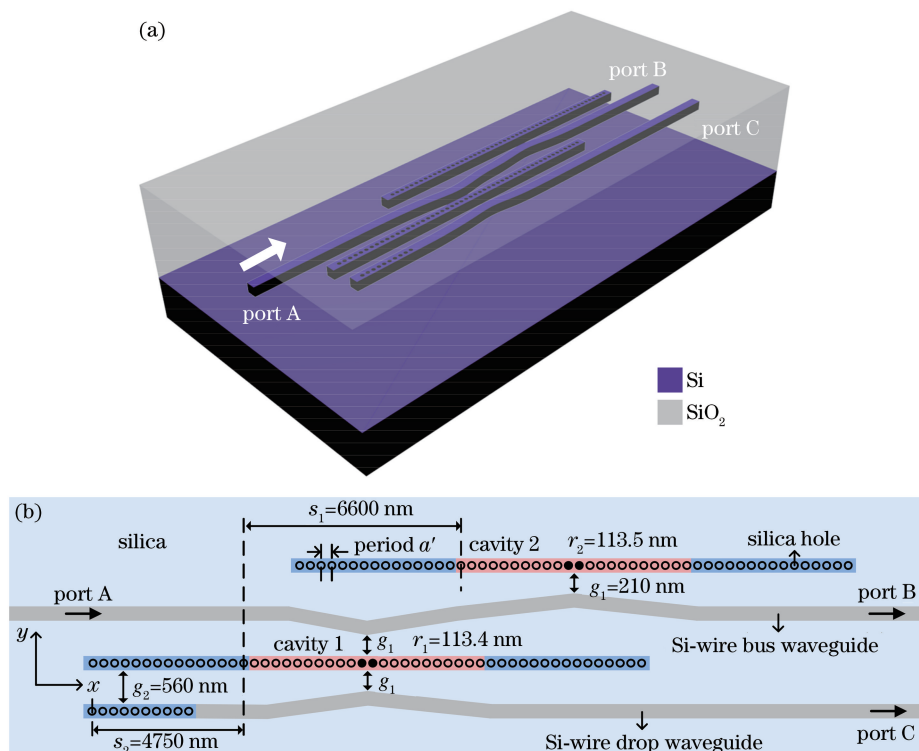


图 6 波分解复用器结构图。(a) 三维;(b) 二维

Fig. 6 Structural diagrams of WDM demultiplexer. (a) Three-dimensional; (b) two-dimensional

谱与之相反。图 7(b) 为图 7(a) 所示透射谱在 1570.0 nm 附近的局部放大图。可以看出, 该波分解复用器的自由光谱范围 (FSR) 约为 400 nm

(1300~1700 nm), 1570.0 nm 处的插入损耗为 0.28 dB, 其 3 dB 带宽约为 0.43 nm, 下载品质因数约 3650。

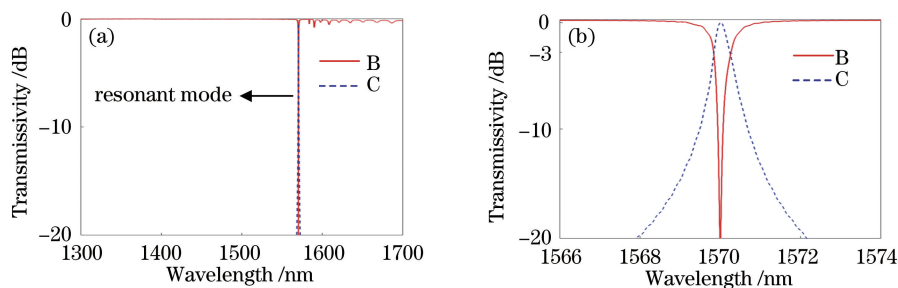


图 7 波分解复用器透射谱。(a) 各端口透射谱;(b) 透射谱局部放大图

Fig. 7 Transmission spectra of WDM demultiplexer. (a) Transmission spectrum at each port; (b) enlarge views of transmission spectra

图 8(a)、(b) 分别显示了波长为 1570.0 nm 和 1573.2 nm 的光波从端口 A 入射时对应的稳态场分布。可以看出, 1570.0 nm 的入射光几乎完全耦合至下行波导并从端口 C 输出; 而 1573.2 nm 的入射光在两个光子晶体微腔处不发生谐振, 始终沿着主波导传输并从端口 B 输出。信道间隔为 3.2 nm, 因此该双信道波分解复用器可以实现粗波分解复用功能。

WDM 模块利用下载微腔和反射微腔实现波分解复用功能, 图 9 显示了 Cavity 1 和 Cavity 2 的半径变化 Δr 对 WDM 模块器件性能的影响。可以看

出, 当入射光波为 TE_0 时, 微腔半径减小 0.3 nm, 1570.0 nm 波长的插入损耗增大到 2.7 dB, 信道串扰增大到 -0.99 dB, 器件性能迅速下降; 而 1573.2 nm 波长的性能参数几乎没有变化。这是因为半径的变化使微腔系统的谐振波长偏离 1570.0 nm, 1570.0 nm 波长的性能下降, 而 1573.2 nm 波长几乎不受影响。另外, 微腔半径的微小变化引起器件性能的显著下降, 表明微腔系统对器件结构的精度要求比较高, 在实际制备器件时需要考虑误差带来的影响。

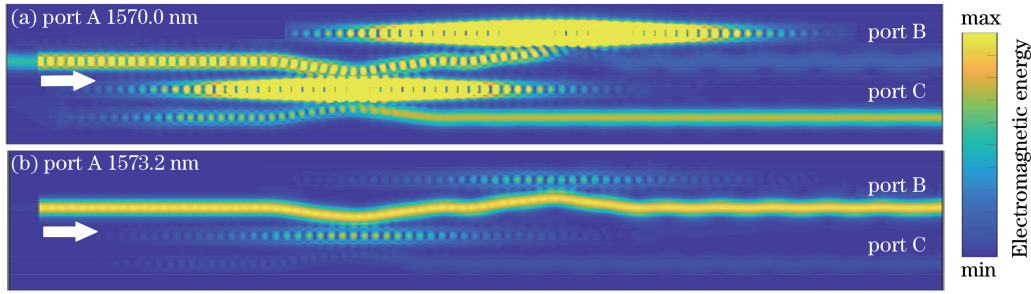


图 8 不同入射光在波分解复用过程中的稳态场分布。(a) 1570.0 nm;(b) 1573.2 nm

Fig. 8 Static field distributions of different incident light in WDM demultiplexing process. (a) 1570.0 nm; (b) 1573.2 nm

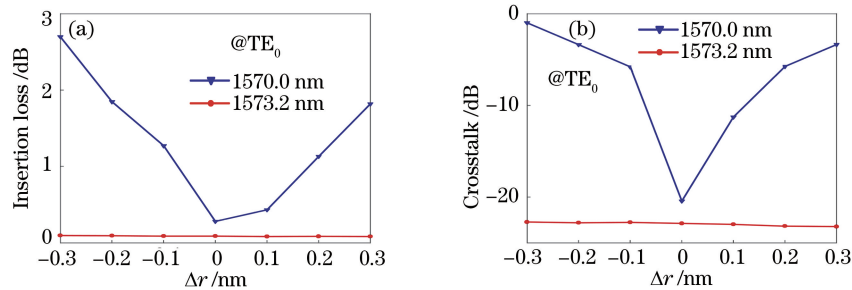


图 9 波分解复用器性能与 Δr 的关系。(a)各个波长的插入损耗随 Δr 的变化;(b)各个波长的信道串扰随 Δr 的变化

Fig. 9 Relationship between performance of WDM demultiplexer and Δr . (a) Insertion loss at each wavelength versus Δr ; (b) channel crosstalk at each wavelength versus Δr

3.2 MDM 模块的结构设计与优化

当工作波长为 1570.0 nm 时,包层为二氧化硅的硅基纳米线波导 TE_0 和 TE_1 的有效折射率如图 10(a)所示。当单模波导的 TE_0 与多模波导的 TE_1

的有效折射率相等时,可以实现模式匹配。

基于模式匹配原理,设计了一种硅基纳米线波导模分解复用器,其三维结构如图 10(b)所示。结构参数如下:多模波导和单模波导的宽度分别为

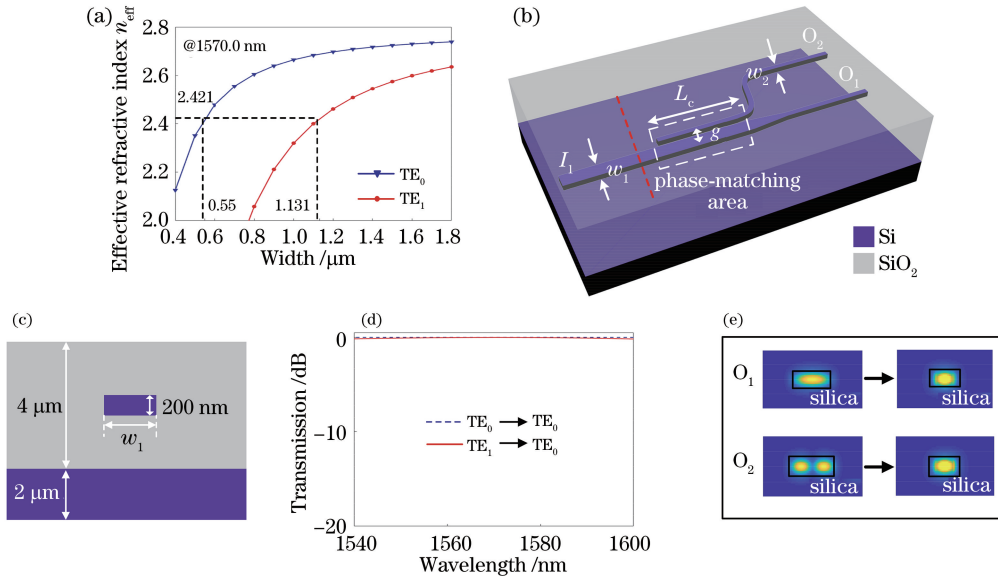


图 10 模分解复用器的结构参数和透射谱。(a)纳米线波导的有效折射率图;(b)三维结构图;

(c)三维结构侧视图;(d)透射谱;(e)不同模式转换图

Fig. 10 Structural parameters and transmission spectra of MDM demultiplexer. (a) Effective refractive index map of nanowire waveguides; (b) three-dimensional structural diagram; (c) side view of three-dimensional structure; (d) transmission spectra; (e) different mode conversion diagrams

$\omega_1 = 1.131 \mu\text{m}$ 和 $\omega_2 = 0.55 \mu\text{m}$, 相位匹配区域的模式耦合长度为 $L_c = 38 \mu\text{m}$, 单模波导与多模波导之间的间距为 $g = 150 \text{ nm}$ 。图 10(b)虚线处的三维结构侧视图如图 10(c)所示, 纳米线波导的厚度为 200 nm 。端口 O_1 和 O_2 处测得的透射谱如图 10(d)所示。端口 O_1 处的 $\text{TE}_0 \rightarrow \text{TE}_0$ 模式转换和端口 O_2 处的 $\text{TE}_1 \rightarrow \text{TE}_0$ 模式转换如图 10(e)所示。在模分解复用过程中, 1570.0 nm 处附近的插入损耗小于 0.1 dB 。

将不同模式的光源放置在端口 I_1 处, 端口 O_1 、

O_2 处得到的插入损耗和信道串扰随耦合长度 L_c 的变化如图 11 所示。可以看出, TE_0 的插入损耗和信道串扰都比较小, 并且随 L_c 的增大其变化也比较小。但是 TE_1 的性能参数受 L_c 的影响比较大, 当 $L_c = 33 \mu\text{m}$ 时, 插入损耗最大为 0.22 dB , 信道串扰最大为 -13.4 dB 。这是因为 L_c 的改变导致模式失配, 影响了 TE_1 模的转换效率。 $L_c = 38 \mu\text{m}$ 时性能最佳, 考虑信号透过率大于 99% 的情况, 在实验室实际制备器件时, 耦合长度需控制在 $37 \sim 40 \mu\text{m}$ 范围内。

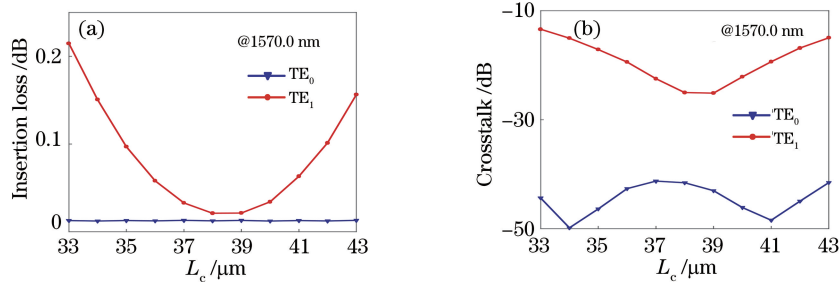


图 11 模分解复用器性能与 L_c 的关系。(a)各个模式的插入损耗随 L_c 的变化;(b)各个模式的信道串扰随 L_c 的变化

Fig. 11 Relationship between performance of MDM demultiplexer and L_c . (a) Insertion loss of each mode versus L_c ; (b) channel crosstalk of each mode versus L_c .

4 仿真分析

将 WDM 模块与 MDM 模块集成, 构成了模分-波分混合解复用器, 并对该集成器件的解复用过程进行 3D-FDTD 仿真。将宽光谱光源放置在端口 I_1 处, 波长模式为 TE_0 。在端口 O_3 和 O_4 处放置探测器, 其透射谱如图 12(a)所示, 可以看出, 出现了两个谐振峰, 并且谐振波长偏离 1570.0 nm , 这是由于 WDM 模块与 MDM 模块集成时, MDM 模块可以等效为一个宽度调制(WM)微腔^[20], 此时 WDM 模块中反射微腔、下载微腔和 MDM 模块的宽度微腔相互耦合, 导致反射微腔和下载微腔的谐振波长发生偏移。MDM 模块引起的微扰导致两个微腔的谐

振波长发生偏移。此时, 微调微腔中心的两个圆孔半径, 使两个微腔的谐振波长一致。图 12(b)为圆孔半径微调后的透射谱, 可知在 1570.0 nm 处仅有一个谐振峰, 并且插入损耗比较小。

波长 1570.0 nm 和 1573.2 nm 处的 TE_0 和 TE_1 同时从端口 I_1 输入, 经过该集成器件的解复用, 1570.0 nm 的 TE_0 、 1573.2 nm 的 TE_0 、 1570.0 nm 的 TE_1 和 1573.2 nm 的 TE_1 分别从端口 $O_3 \sim O_6$ 输出, 完成模分-波分混合解复用过程。分别在端口 $O_3 \sim O_6$ 处放置探测器来测量各端口的透射谱, 如图 13 所示。可知, 在解复用过程中, 不同模式的 3 dB 带宽约为 0.4 nm , 并且具有较低的信道串扰和插入损耗。

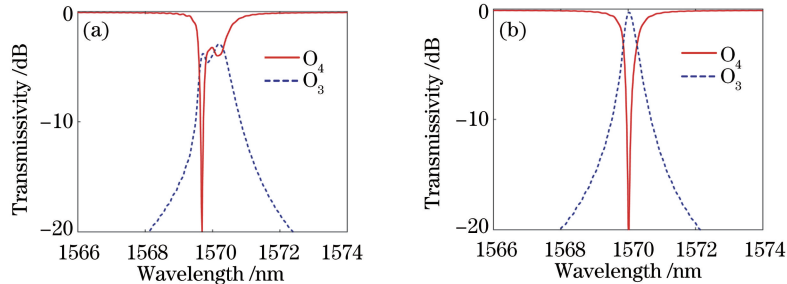


图 12 解复用过程中端口 O_3 和 O_4 处的透射谱。(a)圆孔未微调;(b)圆孔微调

Fig. 12 Transmission spectra of ports O_3 and O_4 in demultiplexing process. (a) Hole is not fine-tuned; (b) hole is fine-tuned

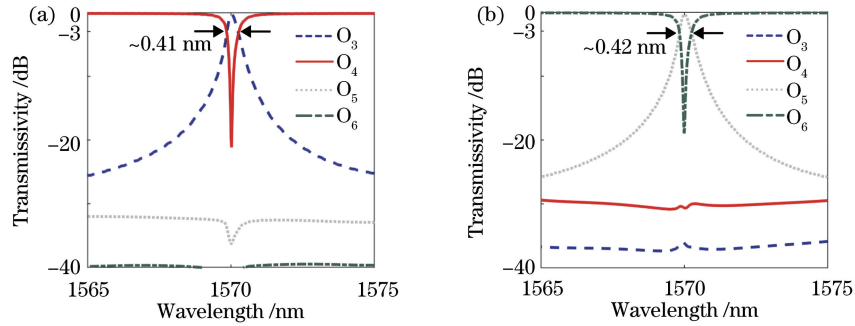


图 13 解复用过程中各个模式的透射谱。(a) TE_0 ; (b) TE_1

Fig. 13 Transmission spectra of each mode in demultiplexing process. (a) TE_0 ; (b) TE_1

经过计算,各个模式的插入损耗和信道串扰如表 1 和表 2 所示。可知,解复用过程的插入损耗小于 0.37 dB,信道串扰小于 -18.4 dB。插入损耗主要来源于两个部分,包括在 WDM 模块中的损耗(0.28 dB)以及 MDM 模块中的损耗(0.1 dB)。

图 14 (a) ~ (d) 分别为波长 1570.0 nm 和 1573.2 nm 下 TE_0 和 TE_1 的解复用过程中的稳态场分布。可以看出,1570.0 nm 和 1573.2 nm 下的 TE_0 分别从端口 O_3 和 O_4 输出,而 1570.0 nm 和 1573.2 nm 下的 TE_1 分别从端口 O_5 和 O_6 输出。

表 1 各个模式的插入损耗

Table 1 Insertion loss of each mode

Port	TE_0		TE_1	
	@1570.0 nm	@1573.2 nm	@1570.0 nm	@1573.2 nm
O_3	0.37 dB			
O_4		0.15 dB		
O_5			0.37 dB	
O_6				0.13 dB

表 2 各个模式的信道串扰

Table 2 Channel crosstalk of each mode

Port	TE_0		TE_1	
	@1570.0 nm	@1573.2 nm	@1570.0 nm	@1573.2 nm
O_3		-22.7 dB	-35.8 dB	-36.4 dB
O_4	-19.2 dB		-30.3 dB	-29.8 dB
O_5	-35.9 dB	-32.6 dB		-23.0 dB
O_6	-43.7 dB	-39.3 dB	-18.4 dB	

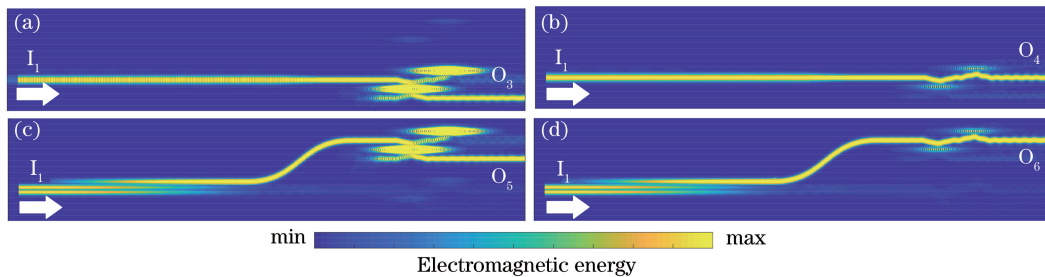


图 14 解复用过程中的稳态场分布。(a) 波长 1570.0 nm 下的 TE_0 ; (b) 波长 1573.2 nm 下的 TE_0 ; (c) 波长 1570.0 nm 下的 TE_1 ; (d) 波长 1573.2 nm 下的 TE_1

Fig. 14 Static field distribution in demultiplexing process. (a) TE_0 at 1570.0 nm; (b) TE_0 at 1573.2 nm; (c) TE_1 at 1570.0 nm; (d) TE_1 at 1573.2 nm

5 结 论

提出了一种基于纳米线波导和一维光子晶体纳米梁腔的模式-波分混合解复用器,并利用三维时域有限差分法计算分析了该集成器件的性能参数。结果表明,该器件可以在波长 1570.0 nm 和 1573.2 nm 处实现 TE_0 和 TE_1 的解复用功能,插入损耗小于 0.37 dB,信道串扰小于 -18.4 dB。该器件自由光谱范围约为 400 nm,尺寸约为 $85\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$,可以应用于模式-粗波分复用系统和光子集成电路中。

参 考 文 献

- [1] Liu X, Jia M, Zhang X Y, et al. A novel multichannel Internet of Things based on dynamic spectrum sharing in 5G communication [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(4): 5962-5970.
- [2] Zhang L, Liang Y C, Xiao M. Spectrum sharing for Internet of Things: a survey [J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(3): 132-139.
- [3] 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.
潘天豪, 陈雄斌, 闵成斌, 等. 超低照度下的可见光物联网终端设计 [J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0706003.
- [4] 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.
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.
- [5] Shu H W, Shen B T, Deng Q Z, et al. A design guideline for mode (de)multiplexer based on integrated tapered asymmetric directional coupler [J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1-12.
- [6] Pathak S, Van Thourhout D, Bogaerts W. Design trade-offs for silicon-on-insulator-based AWGs for (de)multiplexer applications [J]. Optics Letters, 2013, 38(16): 2961-2964.
- [7] 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.
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.
- [8] Asano T, Ochi Y, Takahashi Y, et al. Photonic crystal nanocavity with a Q factor exceeding eleven million [J]. Optics Express, 2017, 25(3): 1769-1777.
- [9] He Y, Zhang Y, Zhu Q M, et al. Silicon high-order mode (de)multiplexer on single polarization [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(24): 5746-5753.
- [10] Xing J J, Li Z Y, Xiao X, et al. Two-mode multiplexer and demultiplexer based on adiabatic couplers [J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3468-3470.
- [11] Li Y M, Li C, Li C B, et al. Compact two-mode (de)multiplexer based on symmetric Y-junction and multimode interference waveguides [J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5781-5786.
- [12] Nawwar O M, Shalaby H M H, Pokharel R K. Modeling, simulation, and fabrication of bi-directional mode-division multiplexing for silicon-on-insulator platform [J]. Applied Optics, 2018, 57(1): 42-51.
- [13] Mehrabi K, Zarifkar A. Ultracompact and broadband asymmetric directional-coupler-based mode division (de)multiplexer [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(7): 1907-1913.
- [14] Dai D X, Wang J, Chen S T, et al. Monolithically integrated 64-channel silicon hybrid demultiplexer enabling simultaneous wavelength- and mode-division-multiplexing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2015, 9(3): 339-344.
- [15] Luo L W, Ophir N, Chen C P, et al. WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip [J]. Nature Communications, 2014, 5: 3069.
- [16] Zhuang Y Y, Chen H M, Ji K, et al. On-chip hybrid demultiplexer for mode and coarse wavelength division multiplexing [J]. Applied Physics B, 2019, 125(1): 12.
- [17] Ren H L, Jiang C, Hu W S, et al. Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity [J]. Optics Express, 2006, 14(6): 2446-2458.
- [18] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, et al. Photonic crystals: molding the flow of light [M]. Princeton: Princeton University Press, 2008: 198-203.
- [19] Tetsumoto T, Kumazaki H, Ishida R, et al. Investigation of the influence of the proximity effect and randomness on a photolithographically fabricated photonic crystal nanobeam cavity [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10456: 104561Y.
- [20] 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.