

硅基电光调制与模分复用集成器件

项彤¹, 陈鹤鸣^{2*}, 胡宇宸¹

¹南京邮电大学电子与光学工程学院, 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 提出了一种硅基电光调制与模分复用的集成器件,该集成器件的电光调制模块由硅基光子晶体波导和宽度调制(WM)型谐振腔组成,模分复用模块由硅基非对称平行纳米线波导组成。光子晶体波导和纳米线波导的连接处采用锥形结构,用于减少两种波导之间的级联损耗。根据时域耦合模理论与等离子体色散效应,采用 WM 型谐振腔和 PN 掺杂结构实现了对 TE₀ 模式的调制。根据横向耦合模理论,采用非对称平行纳米线波导实现了 TE₀ 模向 TE₁ 模的转换。应用二维时域有限差分法(2D-FDTD)对其性能进行仿真分析,结果表明,该集成器件在调制电压为 1.24 V 时,可以实现中心波长为 1553.91 nm 的 TE₀ 模和 TE₁ 模的窄带通断调制及复用功能,插入损耗小于 0.46 dB,消光比为 19.73 dB,调制深度为 0.9894,高品质因数 Q 值达 1.5×10^4 ,信道串扰小于 -14.66 dB。该集成器件的结构紧凑,尺寸约为 $54 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$,这对提高系统集成度、提升光通信网络容量具有重要意义。

关键词 光通信; 硅基光子晶体; 耦合模理论; 电光调制; 模分复用; 集成器件

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1106001

1 引言

随着高速光通信器件的封装尺寸越来越小,性能要求越来越高,传统的元器件相互分离的光电模块已经很难适应现代通信的需求,目前光电子器件正朝着高度集成的小型化方向发展^[1]。现代光通信系统正向小体积、大容量、大带宽和集成化的方向发展,在同一芯片上实现光电集成^[2]是最佳的实现途径,而硅光子技术利用其低功耗、高速率以及与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容的特性,也使光子器件与电子器件的集成成为可能。

光子晶体具有独特的带隙和慢光特性,能够制作出性能优良的电光调制器^[3-6]。2017年, Terada 等^[7]设计出了采用 PN 电学结构的硅基光子晶体慢光调制器,所需调制电压不超过 2 V。2015年, Ooka 等^[8]在硅光子平台上通过光刻技术设计出了与 CMOS 兼容且具有高品质因数的光子晶体纳米腔,设计时引入纳米线波导用于输入光源,但是因为与光子晶体平板的连接处没有使用任何过渡结构,

所以会造成一定的级联损耗,不利于集成,插入损耗高达 0.8 dB。2017年,该团队^[9]又在设计滤波器时引入了本征 Q 值高达 6.1×10^4 的宽度调制(WM)型光子晶体谐振腔结构,这比 L3 型谐振腔^[10]高一个量级。同年, Daud 等^[11]利用光刻技术在硅基材料的平板上刻蚀圆形空气孔形成 WM 型光子晶体谐振腔结构,制作出了具有超高品质因数(Q 值高达 10^5)的电光调制器,能够在小折射率差的条件下实现较优的调制功能,这表明 WM 型谐振腔有着高 Q 值的性能优势,但是,上述器件并没有考虑到光源与调制器之间的耦合结构,忽略了在此过程中产生的传输损耗与器件集成需求。同时,近年来片上波导型模分复用器^[12-16]也得到了广泛的研究,其中:多模干涉^[17]型具有较大的带宽,且具备较强的容差能力,但是结构复杂,并且只能支持两种模式;绝热耦合^[18-19]型相对于多模干涉型结构更加简单,但同样只能支持两种模式;非对称 Y 结^[20]型可以支持更多的模式数,但是需要精准控制模式转换区的耦合长度,否则极易产生模式串扰;反向耦合光栅

收稿日期: 2020-10-30; 修回日期: 2020-11-14; 录用日期: 2020-12-23

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

(GACC)^[21] 结构有出色的工艺容差能力,不过仅能应用于具有较窄带宽范围的模分复用系统;而非对称定向耦合(ADC)^[22-26] 型模分复用器的尺寸虽然会随着模式的扩展而增大,但相较于前面所述的几种类型,其结构更加简易,便于进行多模式扩展,易于与其他器件集成。尽管相关领域的专家和学者们对基于光子晶体的电光调制器和硅基模分复用器的研究越来越深入,但是对两种器件进行集成的研究却较少。在未来光通信发展的道路上,小尺寸、大容量和集成化的需求日益凸显,因此,将电光调制器与模分复用器进行一体化集成的研究具有重要意义。

本文提出一种硅基电光调制与模分复用集成器件,在光子晶体波导和纳米线波导的连接处采用锥形结构,用于减少两种波导之间的级联损耗,它可以实现波长为 1553.91 nm 的 TE₀ 模式和 TE₁ 模式的调制及复用功能,在工作波长范围 1550 ~ 1560 nm 下具有较低的插入损耗、信道串扰以及较

高的消光比、调制深度。该集成器件的结构紧凑,性能优良,可应用于高速大容量光通信领域。

2 结构设计与工作原理

2.1 基于光子晶体的电光调制模块

本文提出的硅基电光调制与模分复用集成器件中基于光子晶体的电光调制模块结构如图 1 所示。采用硅材料(有效折射率为 $n_{\text{eff}} = 2.81$)作为平板,在其上刻蚀 29×23 个圆形空气孔,构成三角晶格型光子晶体结构。其中,空气孔的晶格常数为 $a = 0.419 \mu\text{m}$,半径为 $r = 0.14 \mu\text{m}$,平板长度为 $L = 11.52 \mu\text{m}$,平板厚度为 $h = 0.22 \mu\text{m}$ 。在该光子晶体结构中引入一条线缺陷,其宽度为 $1.05 \times \sqrt{3}a$,此线缺陷为光波传输的主波导 A。在此线缺陷上方引入另一条线缺陷即波导 B,其宽度为 $0.98 \times \sqrt{3}a$ 。同时,引入 WM 型光子晶体谐振腔,通过将图 1 中三种空气孔的位置分别移动 3, 6, 9 nm 来形成腔体,与主波导 A 构成侧耦合结构。

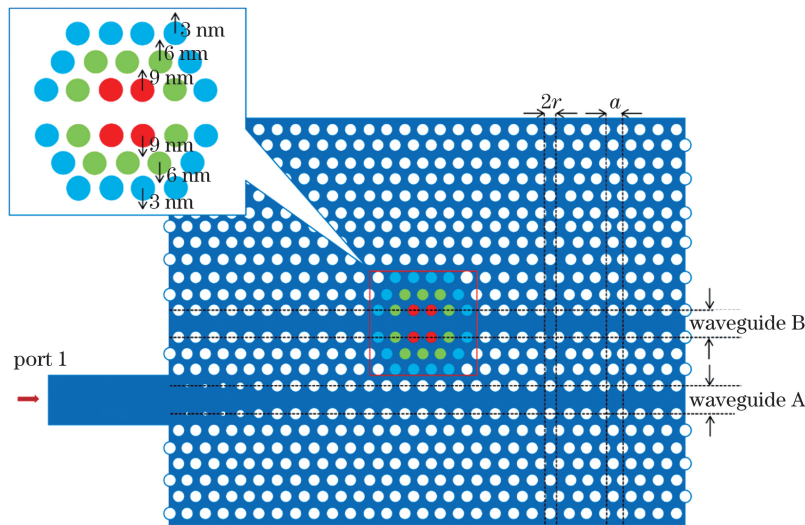


图 1 基于光子晶体的电光调制模块结构图

Fig. 1 Structure diagram of electro-optic modulation module based on photonic crystal

在光子晶体平板中引入的 WM 型谐振腔是通过平移空气孔位置形成的,属于点腔,与其下方的线缺陷(即光波传输的主波导 A)构成侧耦合结构,其理论

模型如图 2 所示,入射光波从主波导 A 左侧的端口 1 输入,经过 WM 型谐振腔的作用,最终从主波导 A 右侧的端口 2 输出。根据时域耦合模理论,对侧耦

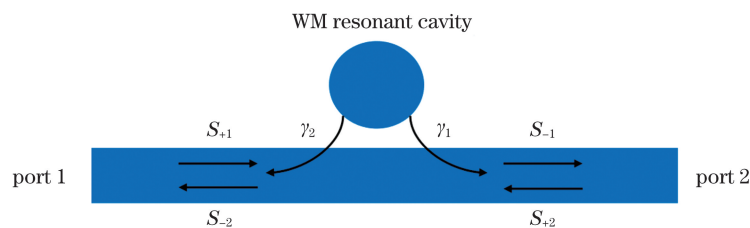


图 2 侧耦合结构理论模型

Fig. 2 Theoretical model of side coupling structure

合 WM 型谐振腔结构的时域耦合模方程进行推导。图 2 中, S_{+l} 表示输入光波的幅值, S_{-l} 表示输出光波的幅值, γ_l 表示谐振腔与波导耦合过程中产生损耗时的幅值耦合衰减系数, ω_0 为谐振腔的谐振频率, a 为谐振模式的振幅。时域耦合模方程可表示为

$$\frac{da}{dt} = -i\omega_0 a - \gamma_1 a - \gamma_2 a + x_1 S_{+1} + x_2 S_{+2}, \quad (1)$$

$$S_{-l} = y_l S_{+l} + z_l a, \quad (2)$$

式中, x_l 和 z_l 分别表示线缺陷到谐振腔和谐振腔到线缺陷的耦合系数, y_l 表示波导内部的耦合系数, 且 x_l, y_l, z_l 均为未知量。利用能量守恒定律求解耦合系数时, 取 $z_l = -\sqrt{2\gamma_l}$, 然后利用时间反演对称性求得耦合系数 $y_l = 1, x_l = \sqrt{2\gamma_l}$ 。因此 x_l, y_l, z_l 这三个参数都能被消除。时域耦合模方程(1)式和(2)式中最终只会留下 ω_0 和 γ_l 这两个参数。此时, 图 2 所示理论模型的时域耦合模方程可表示为

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

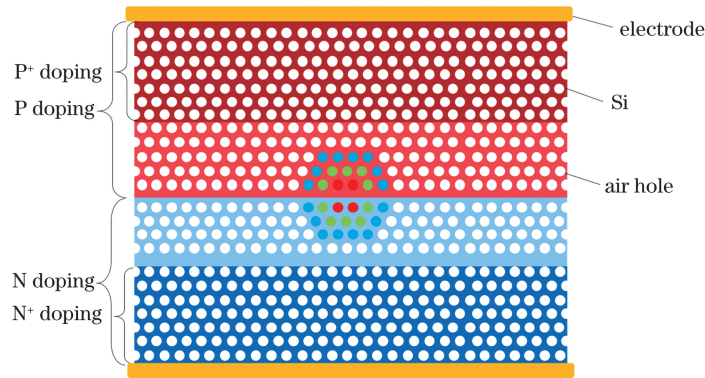


图 3 基于光子晶体的电光调制模块电学结构图

Fig. 3 Electrical structure diagram of electro-optic modulation module based on photonic crystal

等离子体色散效应是指载流子的注入或抽出会改变半导体材料中的自由载流子浓度, 从而导致材料的有效折射率发生变化。当硅基材料处于 1550 nm 的工作波长附近时, 载流子浓度及相关参数[电子浓度变化量 ΔN_e 、空穴浓度变化量 ΔN_h 、单位长度吸收系数的变化量 $\Delta \alpha_c$ (单位: cm^{-1})、材料有效折射率的变化量 Δn_c]的对应关系为^[27]

$$\Delta \alpha_c = 8.5 \times 10^{-18} \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \Delta N_h, \quad (6)$$

$$\Delta n_c = -8.8 \times 10^{-22} \Delta N_e - 8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}. \quad (7)$$

由(6)式和(7)式可知, 随着载流子浓度的增大, 吸收系数逐渐增大, 而折射率将逐渐减小。本

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

根据(3)式和(4)式, 能够求解出如图 2 所示的侧耦合 WM 型谐振腔结构的理论透射谱 $T(\omega)$ 。令 $S_{+1} = 1, S_{+2} = 0$, 即入射光仅从端口 1 入射, 且 $\frac{da}{dt} = -i\omega a$, 再令 $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$, 可得透射谱 $T(\omega)$ 为

$$T(\omega) = \left| \frac{S_{-1}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{(\omega - \omega_0)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + 4\gamma^2}. \quad (5)$$

经上述理论分析, 当入射光的谐振频率与 WM 型谐振腔的谐振频率一致时, 二者发生共振, 光波被束缚在 WM 型谐振腔内, 端口 2 处的透射率可以达到最低, 接近于 0, 否则光波能量将从主波导 A 的端口 2 处输出, 此时透射率可以达到最高, 接近于 1。

该电光调制模块采用 PN 掺杂结构, 如图 3 所示, 调制模块上下两端为电极, 上端接高电位, 下端接地。PN 结的掺杂浓度为 $c_{p,doping}^+ = 1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, c_{n,doping}^+ = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, c_{p,doping}^- = 4.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}, c_{n,doping}^- = 1.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

文基于等离子体色散效应, 在所设计的电光调制器两端加上调制电压, 使 P 型和 N 型载流子浓度 (即空穴和电子浓度) 发生变化, 从而引起材料有效折射率发生变化, 最终使得 WM 型谐振腔的谐振频率发生动态偏移。当不施加调制电压时, 主波导 A 的输出端在谐振波长处的透射率趋近于零, 此时相当于电光调制器处于“断”的状态; 当施加的调制电压达到一定数值时, 电光调制器的谐振波长产生偏移, 原谐振波长处的透射率升高, 此时相当于电光调制器处于“通”的状态。由此达到通断调制的目的。

2.2 硅基模分复用模块

本文提出的硅基电光调制与模分复用集成器件

中的硅基模分复用模块结构如图 4 所示。该模块采用硅基非对称平行纳米线波导,实现了 TE0 和 TE1 模式的模分复用功能。其中,波导厚度为 $h = 0.22 \mu\text{m}$,单模波导的宽度为 $w_1 = 0.6 \mu\text{m}$,多模波导的宽度为 $w_2 = 1.20768 \mu\text{m}$,两波导的间距为 $g = 0.05 \mu\text{m}$,耦合长度为 $L = 22 \mu\text{m}$ 。波长范围在 $1550 \sim 1560 \text{ nm}$ 的 TE0 模式光波从端口 1 输入后,

经过模式转换区。根据横向耦合模理论,TE0 模会由单模波导耦合至多模波导中,并转换为 TE1 模式。而当波长范围在 $1550 \sim 1560 \text{ nm}$ 的 TE0 模式光波从端口 2 输入时,最后仍以 TE0 模的形式在多模波导中传输。最终,在端口 3 处输出 TE0 和 TE1 两个模式的光波,实现了 TE0 和 TE1 两模式的模分复用功能。

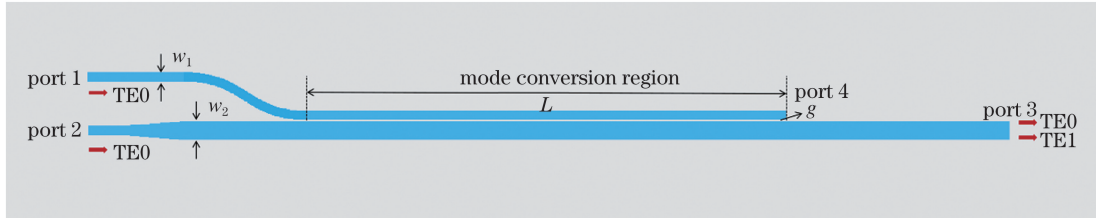


图 4 硅基模分复用模块结构图

Fig. 4 Structure diagram of silicon-based mode-division-multiplexing module

硅基模分复用模块的理论模型如图 5 所示,根据横向耦合模理论,两个耦合模的线性微分方程可写为

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -j\beta_1 A_1(z) + jcA_2, \quad (8)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -j\beta_2 A_2(z) + jcA_1, \quad (9)$$

式中: A_1 表示单模波导中传输光波的复振幅, A_2 表示多模波导中传输光波的复振幅; β_1 、 β_2 分别表示单模波导和多模波导的传播常数; c 表示耦合系数。假设 c 为常数,引入边界条件 $A_1(0) = 1$ 、 $A_2(0) = 0$,推导后可以得出耦合功率方程为

$$P_2 = |A_2|^2 = (1 + Q^{-2})^{-1} \sin^2(\sqrt{1 + Q^{-2}} cz), \quad (10)$$

$$P_1 = 1 - P_2, \quad (11)$$

式中, P_1 、 P_2 表示两个模式功率, $Q = \frac{2c}{\beta_1 - \beta_2}$,当 $Q \rightarrow \infty$ 即 $\beta_1 = \beta_2$ 时,波导中的光波振幅可表示为

$$A_1 = \cos(cz) \exp(-j\beta_1 z), \quad (12)$$

$$A_2 = j\sin(cz) \exp(-j\beta_2 z). \quad (13)$$

由(12)式和(13)式可得传输功率在两个波导间能够完全周期性耦合,因此,对横向耦合来说,传播

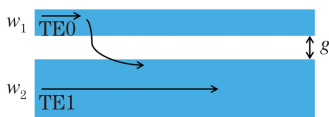


图 5 硅基模分复用模块理论模型图

Fig. 5 Theoretical model of silicon-based mode-division-multiplexing module

常数适配是影响耦合效率的关键。在该模块中,为了实现模式之间的最佳耦合,需要满足光波在 w_1 和 w_2 中传播常数相等的条件,即

$$\beta_1 = \beta_2. \quad (14)$$

根据横向耦合模理论^[28],模式转换的本质为有效折射率相互匹配,即

$$n_{\text{eff1}} = n_{\text{eff2}}. \quad (15)$$

2.3 硅基电光调制与模分复用集成器件

本文所设计的硅基电光调制与模分复用集成器件的结构如图 6(a)所示,它由基于光子晶体的电光调制模块和基于硅基纳米线波导的模分复用模块两部分组成。光子晶体平板和纳米线波导均采用硅材料,且厚度均为 $0.22 \mu\text{m}$,周围是空气。在该集成器件中,波长范围在 $1550 \sim 1560 \text{ nm}$ 的 TE0 模式光波从端口 A 输入至第一个电光调制模块,当未施加调制电压,入射波长与 WM 腔的谐振波长一致时,该波长的光波被束缚在腔内,形成“断”的状态;当施加一定的调制电压时,WM 型谐振腔处的有效折射率发生变化,导致谐振波长发生偏移,原谐振波长处的光波可以通过线缺陷波导,形成“通”的状态,此时光波从端口 1 输出并进入模分复用模块的单模纳米线波导 w_1 中传输,然后经过模式转换区转换为 TE1 模式并耦合进入多模纳米线波导 w_2 中,最终从端口 3 输出。同时,另一个波长范围在 $1550 \sim 1560 \text{ nm}$ 的 TE0 模式从端口 B 输入至第二个电光调制模块,同理,光波会从端口 2 输出并进入模分复用模块的多模纳米线波导 w_2 中,最终与从单模纳米线波导 w_1 中转换而来的 TE1 模式一同从端口 3 输出。至此完成 TE0 和 TE1 模式的窄带通断调制

和模分复用功能。

在本文所设计的集成器件中,电光调制模块的光子晶体平板线缺陷波导的导光机制是禁带效应,而模分复用模块中非对称平行纳米线波导的导光机制是全内反射效应,这两种导光机制不同,所以它们各自

的传播常数也不同,即两种波导的有效折射率不同^[29]。因此二者直接级联会出现模式失配的情况,从而产生大量散射损耗。为了减少级联损耗对器件性能造成的影响,本研究在光子晶体平板与纳米线波导的连接处引入空气孔按一定规律缩小的锥形结构。

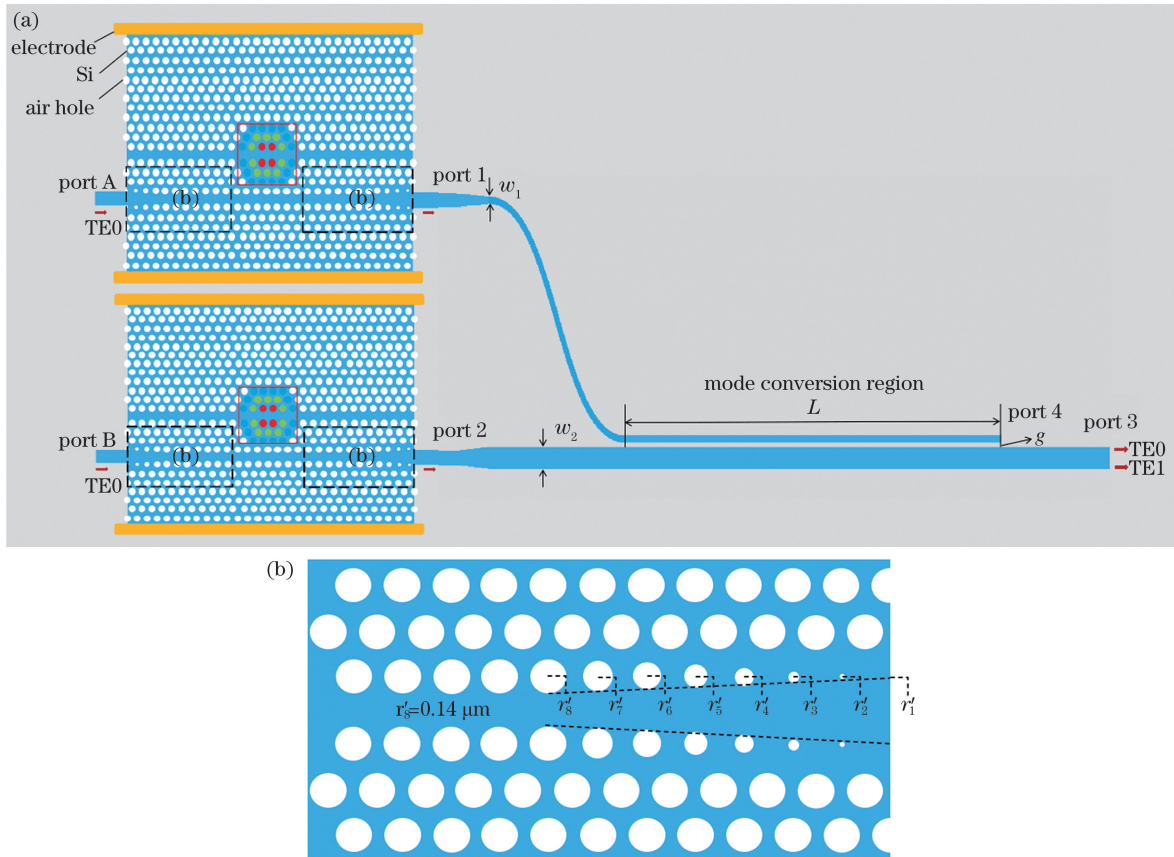


图 6 硅基电光调制与模分复用集成器件。(a)整体结构图;(b)锥形结构示意图

Fig. 6 Silicon-based integrated device for electro-optic modulation assembly with mode-division multiplexing. (a) Overall structure diagram; (b) tapered structure diagram

本文将锥形结构的空气孔半径 r'_n 表示为 $r'_n = \frac{r}{c}(n-1)$ 且 $n \leq c+1$, 其中 r 为空气孔的半径, c 为锥形结构其中一侧空气孔的个数, n 为锥形结构其中一侧空气孔的编号。以图 6(b) 为例, 此时 $c=7$, $r'_8=0.14 \mu\text{m}$, 所以第一个空气孔 ($n=1$) 的半径为 $r'_1=0 \mu\text{m}$, 第二个空气孔 ($n=2$) 的半径为 $r'_2=0.02 \mu\text{m}$, 以此类推, 直到 $n=c+1=8$ 时, 即最后一个空气孔与原光子晶体平板的空气孔半径相等。利用时域有限差分法, 分别对具有不同 c 的锥形结构在波长为 $1550 \sim 1560 \text{ nm}$ 的光源下输出端口的透射率进行仿真, 可以得出最优透射率的锥形结构。

3 结构优化和性能分析

3.1 结构优化

利用仿真软件 Lumerical FDTD 模块的模式求

解器, 能够求出不同宽度的硅基纳米线波导所对应的传输模式, 以及各模式所对应的有效折射率。图 7 给出了波导宽度从 $0.5 \mu\text{m}$ 到 $1.3 \mu\text{m}$ 变化时 TE0 和 TE1 模式所对应的有效折射率的数值。由曲线图可以得出, 当单模波导宽度 $w_1=0.6 \mu\text{m}$ 、多模波导宽度 $w_2=1.20768 \mu\text{m}$ 时, TE0 和 TE1 的有效折射率均为 2.392757 。此时, 满足模式匹配(即有效折射率相等)的条件。

在此基础上, 将探测器置于模分复用模块的输出端口 3 处, 设置合适的波导间距 g , 调节波导耦合长度 L , 使耦合效率 η 达到最高。1550 nm 光源波长下不同波导间距 g 对应的耦合长度 L 与耦合效率 η 的关系如图 8 所示。当波导间距 $g=0.05 \mu\text{m}$, 耦合长度 $L=22 \mu\text{m}$, 波导 w_1 中 TE0 模式耦合到波导 w_2 中的效率最高, 达到 $\eta=0.9735$ 。其余情况

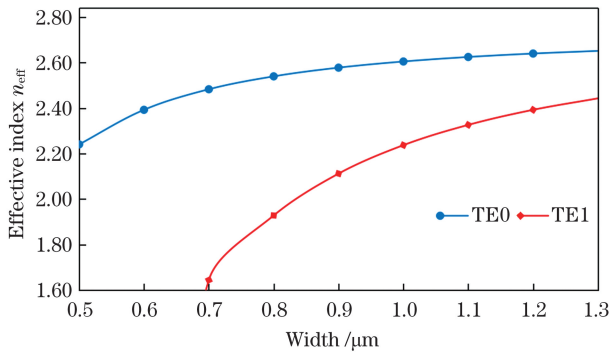


图 7 TE 模式有效折射率随波导宽度变化的曲线图

Fig. 7 TE mode effective refractive index change with waveguide width

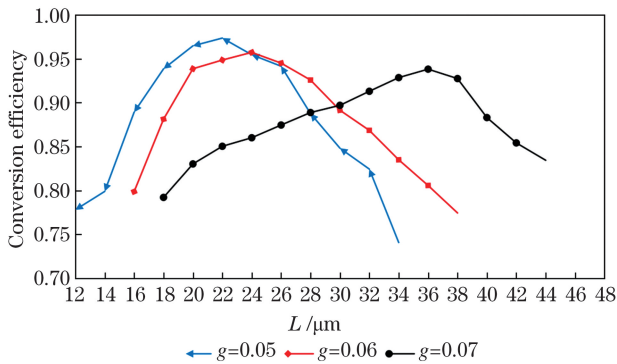


图 8 不同波导间距 g 对应的单模波导 w_1 的耦合长度与耦合效率的关系

Fig. 8 Relationship between coupling length and coupling efficiency of single-mode waveguide w_1 corresponding to different waveguide spacing g

下,光波的耦合效率都无法达到该水平。综上分析,选取波导间距 $g = 0.05 \mu\text{m}$,耦合长度 $L = 22 \mu\text{m}$ 。

将电光调制模块和模分复用模块直接进行级联后,如图 9 所示,“通”状态下原中心波长处的透射率仅为 66.21%,且存在抖动,这表明二者直接级联后光子晶体波导和纳米线波导之间会产生大量的散射损耗,故本研究引入锥形结构。

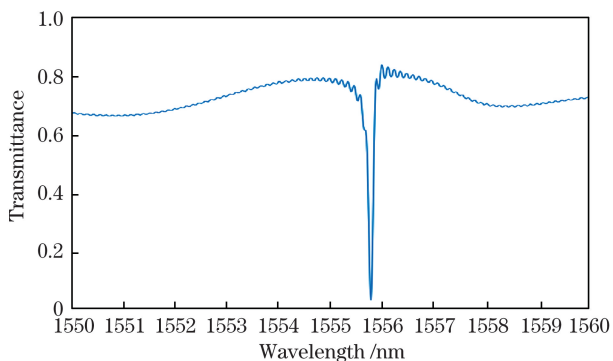


图 9 直接级联后电光调制模块的透射率

Fig. 9 Transmittance of electro-optic modulation module after direct cascade

在波长为 1550~1560 nm 的光源下,利用时域有限差分法分别对具有不同 c 的锥形结构的透射率进行仿真计算。 c 分别取 2~11,一共 10 个数值,电光调制模块在“通”状态下输出端的透射率和集成器件整体透射率的仿真结果分别如图 10 和图 11 所示。

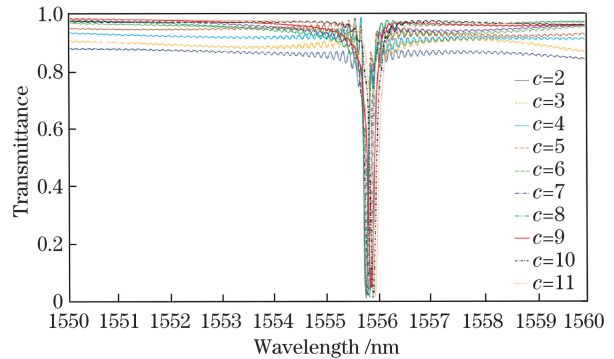


图 10 c 分别取 2~11 时电光调制模块在“通”状态下输出端的透射率

Fig. 10 Transmittance of the electro-optic modulation module under “on” state when c is 2 to 11, respectively

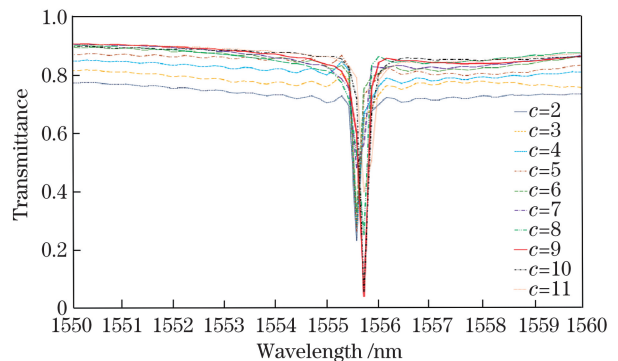


图 11 c 分别取 2~11 时集成器件的整体透射率

Fig. 11 Transmittance of the integrated device under “on” state when c is 2 to 11, respectively

由图 10 和图 11 可得,当锥形结构一侧空气孔数 $c=9$ 时,所设计锥形结构的透射率最高,也即集成器件的透射效果最优,在“通”状态下原中心波长处电光调制模块的透射率达 $T = 96.34\%$,集成器件整体的透射率达 $T = 89.86\%$ 。当 $c = 10$ 及 $c = 11$ 时,器件也具有较高的透射率,然而, c 变大意味着锥形结构的长度也要增加,也即集成器件的尺寸变大。本文所设计的集成器件一共包含 4 个相同的锥形结构,要保证集成后的器件尺寸相对紧凑,需选择 $c = 9$ 的锥形结构来级联光子晶体平板和纳米线波导。

3.2 性能分析

在本文所设计的硅基电光调制与模分复用集成

器件中,需要考虑的主要性能指标是消光比、插入损耗、调制深度和信道串扰。

消光比定义为

$$R_E = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_0} \right), \quad (16)$$

其中, P_1 为“通”状态下的信号光强, P_0 为“断”状态下的信号光强。消光比的单位为 dB, 电光调制器的消光比越大, 调制性能越好, 反之则越差。

插入损耗定义为

$$\gamma = 10 \log \left(\frac{I_{in}}{I_{out}} \right), \quad (17)$$

其中, I_{in} 是输入光强, I_{out} 是输出光强。插入损耗的单位为 dB, 在光波传输过程中, 插入损耗越小表明器件的性能越好。

调制深度定义为

$$D = \frac{P_1 - P_0}{P_1}, \quad (18)$$

其中, P_1 为电光调制器在“通”状态下的光功率, P_0 为“断”状态下的光功率。调制深度越大表明调制效果越好。

信道串扰定义为

$$C = 10 \log \left(\frac{I'_{out}}{I_{out}} \right), \quad (19)$$

其中, I'_{out} 为传输信道进入相邻信道的光强, I_{out} 为输出信道的输出光强。信道串扰的单位为 dB, 信道串扰越小表明器件的性能越好。

利用 Lumerical 仿真软件中的 2D-Device 模块对所设计的结构进行电学仿真。以 0.01 V 为步长, 施加的调制电压从 0 V 变化到 2 V。仿真结果如图 12 所示, 当调制电压达到 1.24 V 时, 电子浓度变化量 ΔN_e 为 $4.55 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 空穴浓度变化量 ΔN_h 为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 由(7)式可知, 此时光子晶体平板的折射率变化量为 $\Delta n = 0.004$ 。

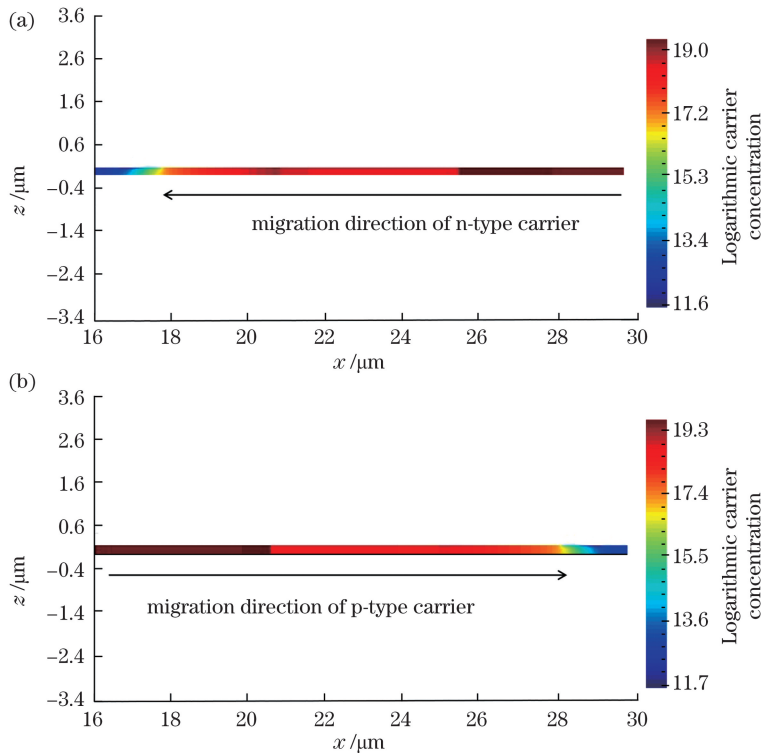


图 12 电光调制模块的载流子浓度分布。(a)调制电压为 1.24 V 时 n 型载流子浓度分布;(b)调制电压为 1.24 V 时 p 型载流子浓度分布

Fig. 12 Carrier concentration distribution of electro-optic modulation module. (a)n-type carrier concentration distribution under modulation voltage of 1.24 V; (b)p-type carrier concentration distribution under modulation voltage of 1.24 V

对所设计的硅基电光调制与模分复用集成器件的性能进行分析。如图 13 所示:当电光调制模块未施加调制电压时,即在“断”状态下中心波长 $\lambda = 1553.91 \text{ nm}$ 处的透射率为 $T = 0.010255$, 此时稳

态场分布如图 14(a) 所示;当施加 1.24 V 的调制电压, 折射率变化量为 $\Delta n = 0.004$, 即 WM 腔处有效折射率达到 2.814 时, 在“通”状态下中心波长发生了 1.92 nm 的偏移, 原中心波长处的透射率

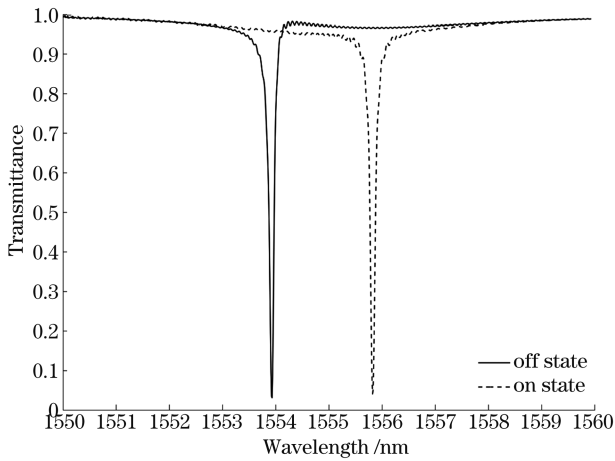


图 13 集成器件的电光调制模块在“断”、“通”状态下的透射率

Fig. 13 Transmittance of electro-optic modulation module of the integrated device under “off” and “on” states

为 $T=96.34\%$, 此时稳态场分布如图 14(b) 所示, Q 值达 1.5×10^4 。

通过(16)式和(18)式计算得到该集成器件的消光比为 19.73 dB, 调制深度为 0.9894。在集成器件的端口 A、B 和端口 3、4 分别放置探测器, 测得输出端口 TE₀ 模式的性能参数。通过(17)式和(19)式计算该集成器件的插入损耗和信道串扰, 可得: 所设计的集成器件的插入损耗最小为 0.05 dB, 最大为 0.46 dB; 信道串扰最小为 -34.33 dB, 最大为 -14.66 dB。表 1 对比了参考文献所提出的光子晶体电光调制器和两模式硅基模分复用器的性能, 发现本文所设计的器件不仅做到了电光调制与模分复用模块的一体集成, 而且相比于分立器件来说, 集成器件的调制与模分复用性能良好。

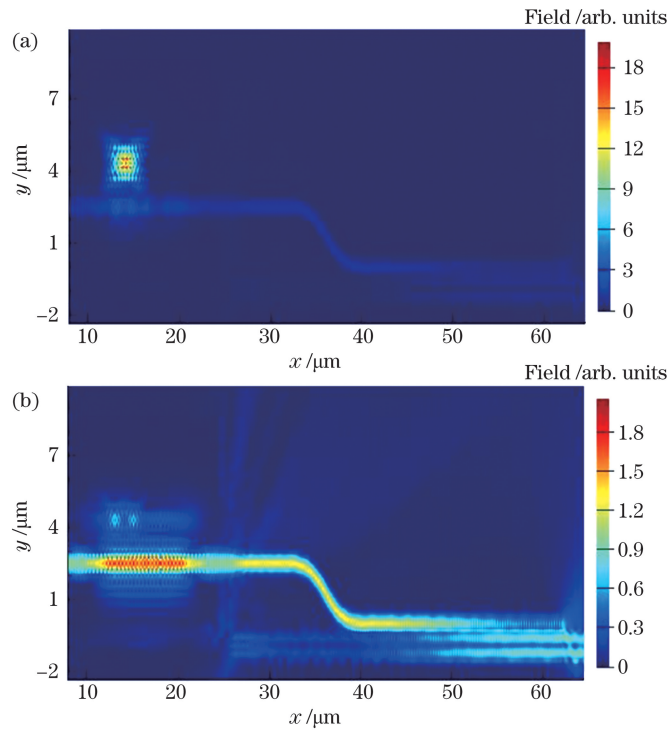


图 14 集成器件稳态场分布。(a)“断”状态;(b)“通”状态

Fig. 14 Steady-state field distribution of the integrated device. (a) “off” state; (b) “on” state

表 1 光子晶体电光调制器及两模式模分复用器与本文的集成器件性能对比

Table 1 Performance comparison of photonic crystal electro-optic modulator and two-mode-division multiplexer with our proposed integrated device

Reference	Extinction ratio /dB	Insertion loss /dB	Q value	Channel crosstalk /dB	Footprint
Mohamed <i>et al</i> ^[4]	11.43	1.65			34 μm
Rajib <i>et al</i> ^[5]	28	2			7 μm × 5 μm
Yosuke <i>et al</i> ^[7]	4	1			200 μm
Ooka <i>et al</i> ^[8]		0.8	2.2×10^5		

Reference	Extinction ratio /dB	Insertion loss /dB	Q value	Channel crosstalk /dB	Footprint
Ooka <i>et al</i> ^[9]	10.7	25.6	4.6×10^4		$110 \mu\text{m}^2$
Daud <i>et al</i> ^[11]	6.37		1.4×10^5		$90 \mu\text{m} \times 58.9 \mu\text{m}$
Garcia <i>et al</i> ^[20]		0.8		-23.4	$12.3 \mu\text{m}$
Minz <i>et al</i> ^[21]		2.74		-8.53	
Mehrabi <i>et al</i> ^[22]		0.87		-10	$11.67 \mu\text{m}$
Mehrabi <i>et al</i> ^[23]		0.49		-32.7	
Ours	19.73	0.05	1.5×10^4	-34.33	$54 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$

4 容差分析

在对器件进行实际加工制作的过程中,实际几何参数(器件尺寸、几何形状、相互位置等)与理想几何参数之间存在一定的偏差,故会对器件的理想性能造成影响。采用 Lumerical 仿真软件中的 FDTD 模块对器件的工艺误差情况进行仿真分析,通过改变一些重要的结构参数来观察器件性能的变化,得到工艺误差的容差范围。

图 15(a)为消光比与插入损耗随空气孔半径的

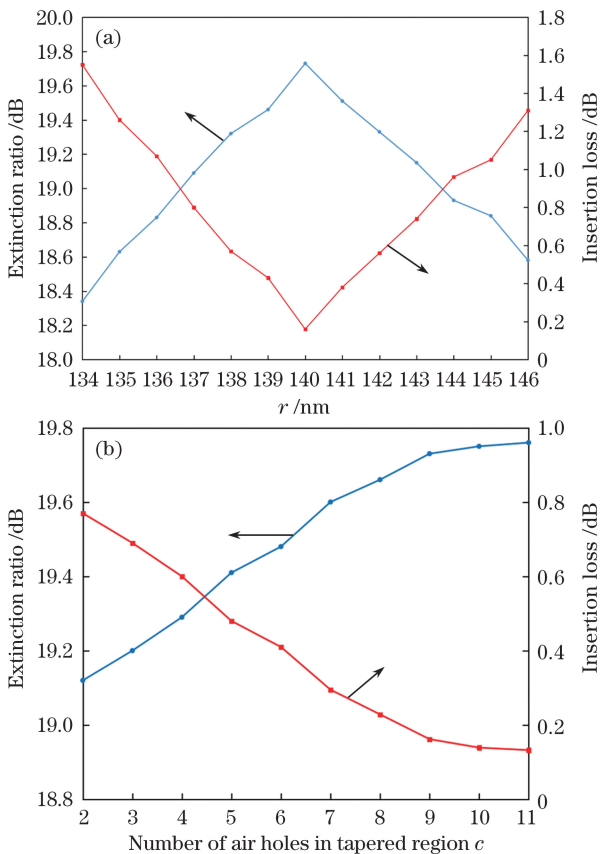


图 15 集成器件消光比与插入损耗。(a)随空气孔半径变化的关系;(b)随锥形区域其中一侧空气孔数量 c 变化的关系

Fig. 15 Extinction ratio and insertion loss of the integrated device. (a) As a function of air hole radius; (b) as a function of air holes number in tapered region c

变化关系。选取光子晶体结构中空气孔半径为 140 nm,改变空气孔半径,观察器件性能的变化。由图 15(a)可以看出,当空气孔半径在 139.0~141.9 nm 的范围内变化时,器件仍然具有良好的性能(透射率 $>90\%$),否则将会对性能造成较大的影响,其原因是空气孔半径的变化会导致光子晶体的禁带范围发生偏移,从而影响光子晶体谐振腔对光波的束缚能力。在实验制作器件时,空气孔半径的精确度需在纳米量级,在保证透过率高于 90%的前提下,空气孔的半径在 139.0~141.9 nm 范围内均可。

图 15(b)为消光比与插入损耗随锥形区域其中一侧空气孔数量 c 的变化关系。选取空气孔数量为 $c=9$,用于减小光子晶体波导与纳米线波导之间的级联损耗。改变空气孔数量 c ,观察器件的性能变化。由图 15(b)可以看出,当空气孔数量 c 在 6~11 范围内时,性能没有受到太大的影响(透射率均高于 90%)。在实验制作器件时,在 6~11 范围内均可。

图 16 为插入损耗随模分复用模块耦合间距 g 的变化关系。选取耦合间距为 $g=0.05 \mu\text{m}$,改变耦合间距 g ,观察器件性能的变化。由图 16 可以看到,当耦合间距 g 在 0.044~0.06 μm 的范围内变

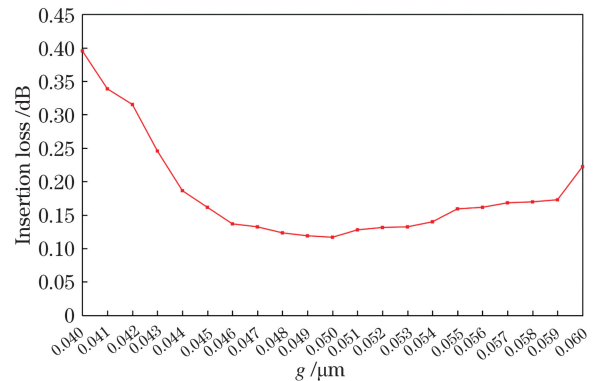


图 16 插入损耗随耦合间距 g 变化的关系

Fig. 16 Insertion loss as a function of coupling distance g

化时,器件仍然具有良好的性能(透射率 $>95\%$)。在实验制作器件时,耦合长度的容差率较高,在保证透射率高于 95% 的前提下,耦合间距 g $0.044 \sim 0.06 \mu\text{m}$ 的范围内均可。

5 结 论

提出了一种硅基电光调制与模分复用的集成器件,其中电光调制模块由硅基光子晶体波导和 WM 型谐振腔组成,模分复用模块由硅基非对称平行纳米线波导组成,光子晶体波导与纳米线波导的连接处采用锥形结构来减少级联损耗。所设计的集成器件在调制电压为 1.24 V 时,可以实现中心波长为 1553.91 nm 的 TE₀ 模和 TE₁ 模的窄带通断调制及复用功能,插入损耗低,信道串扰小,消光比高,调制深度大, Q 值高,结构紧凑,尺寸约为 $54 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$,可应用于高速大容量光通信系统,对提高系统集成度具有重要价值。

参 考 文 献

- [1] Chu T. Silicon-based optoelectronic integrated devices [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2019, 17(4): 5-9.
储涛. 硅基光电子集成器件[J]. *光学与光电技术*, 2019, 17(4): 5-9.
- [2] Liu X, Chen H M, Hu Y C, et al. An integrated device for photonic-crystal electro-optic modulation and coarse wavelength-division multiplexing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(3): 0306002.
刘雪, 陈鹤鸣, 胡宇宸, 等. 光子晶体电光调制和粗波分复用集成器件研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(3): 0306002.
- [3] Huang Y J, Wang Y, Zhang L F, et al. Tunable electro-optical modulator based on a photonic crystal fiber selectively filled with liquid crystal[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(9): 1903-1908.
- [4] Li M X, Ling J W, He Y, et al. LiNbO₃ photonic crystal optical modulator[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 10-15, 2020, Washington, DC, United States. Washington, D. C.: OSA, 2020: STu4J.3.
- [5] Abdelatty M Y, Badr M M, Swillam M A, et al. Compact silicon electro-optical modulator using hybrid ITO tri-coupled waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 4198-4204.
- [6] Ghosh R R, Bhardwaj P, Dhawan A, et al. Numerical modeling of integrated electro-optic modulators based on mode-gap shifting in photonic crystal slab waveguides containing a phase change material [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(8): 2287-2298.
- [7] Terada Y, Tatebe T, Hinakura Y, et al. Si photonic crystal slow-light modulators with periodic p-n junctions [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(9): 1684-1692.
- [8] Ooka Y, Tetsumoto T, Fushimi A, et al. CMOS compatible high-Q photonic crystal nanocavity fabricated with photolithography on silicon photonic platform[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11312.
- [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] Song B S, Noda S, Asano T, et al. Photonic devices based on in-plane hetero photonic crystals [J]. *Science*, 2003, 300(5625): 1537.
- [11] Daud N A B, Ooka Y, Tabata T, et al. Electro-optic modulator based on photolithography fabricated p-i-n integrated photonic crystal nanocavity [J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2017, E100.C(8): 670-674.
- [12] Le Y S, Wang Z, Li Z Y, et al. Three-mode all-optical (de) multiplexing on a SOI chip [J]. *Optics Communications*, 2018, 406: 173-176.
- [13] Saitoh K, Hanzawa N, Sakamoto T, et al. PLC-based mode multi/demultiplexers for mode division multiplexing [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 35: 80-92.
- [14] Fu P D, Chen H M. Design of three-mode multi/demultiplexer based on 2-D photonic crystals for mode-division multiplexing transmission [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 844: 012011.
- [15] Huang Q D, Wu Y F, Jin W, et al. Mode multiplexer with cascaded vertical asymmetric waveguide directional couplers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(14): 2903-2911.
- [16] Fu P D, Chen H M. Design and performance analysis of three-mode division multi/demultiplexer based on two-dimensional photonic crystals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 020602.
付培栋, 陈鹤鸣. 基于二维光子晶体三模式模分复用/解复用器的设计与性能分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 020602.
- [17] Chen J Y, Shi Y C. Polarization-insensitive silicon waveguide crossing based on multimode interference couplers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 5961-5964.
- [18] Xu L H, Wang Y, Mao D, et al. Ultra-broadband and compact two-mode multiplexer based on subwavelength-grating-slot-assisted adiabatic coupler for the silicon-on-insulator platform [J]. *Journal of*

- Lightwave Technology, 2019, 37(23): 5790-5800.
- [19] Chen X, Meng W, Lou C B, et al. Structure of adiabatic coupled supersymmetric waveguides [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0223001. 陈欣, 孟伟, 楼慈波, 等. 绝热耦合超对称光波导结构 [J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0223001.
- [20] Chen W, Wang P, Yang T, et al. Silicon three-mode (de) multiplexer based on cascaded asymmetric Y junctions [J]. Optics Letters, 2016, 41(12): 2851-2854.
- [21] Qiu H Y, Yu H, Hu T, et al. Silicon mode multi/demultiplexer based on multimode grating-assisted couplers [J]. Optics Express, 2013, 21(15): 17904-17911.
- [22] Rodriguez D G, Corral J L, Griol A, et al. Dimensional variation tolerant mode converter/multiplexer fabricated in SOI technology for two-mode transmission at 1550 nm [J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1221-1224.
- [23] Minz M, Mishra D, Sonkar R K, et al. Design of a hybrid mode and polarization division multiplexer [C]// Asia Communications and Photonics Conference, November 2-5, 2019, Chengdu, China. Washington, D.C.: OSA, 2019: M4A.282.
- [24] Mehrabi K, Zarifkar A, Babaei M, et al. Compact, high-performance, and fabrication friendly two-mode division multiplexer based on a silicon bent directional coupler [J]. Applied Optics, 2020, 59(12): 3645-3651.
- [25] 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.
- [26] Li C L, Dai D X. Mode conversion and coupling in silicon-based nanometer photonic integrated circuits [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050003. 李晨蕾, 戴道锌. 硅基纳米光子集成电路中的模式转换与耦合 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050003.
- [27] Krauss T F, de la Rue R M, Brand S, et al. Two-dimensional photonic-bandgap structures operating at near-infrared wavelengths [J]. Nature, 1996, 383(6602): 699-702.
- [28] Qian J R. Coupled-mode theory and its application to fiber optics [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1188-1192. 钱景仁. 耦合模理论及其在光纤光学中的应用 [J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1188-1192.
- [29] Hu Y C, Chen H M, Zhou H T, et al. Mach-Zehnder modulator based on photonic crystal and nanowire waveguide [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(4): 499-507. 胡宇宸, 陈鹤鸣, 周昊天, 等. 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.

Silicon-Based Integrated Device for Electro-Optic Modulation Assembly with Mode-Division Multiplexing

Xiang Tong¹, Chen Heming^{2*}, Hu Yuchen¹

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

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

Abstract

Objective As the package size of high-speed optical communication devices becomes smaller, and the performance requirements get higher, it is not easy for traditional electro-optic modules with separated components to meet the demands of modern communication. Currently, electro-optic devices are developing toward highly integrated miniaturization. There have been many studies on photonic-crystal-based electro-optic modulators and silicon-based mode division multiplexers. However, there are few studies on the integration of the two devices. During the evolution of optical communications in the future, the demands for small size, large-capacity, and high integration have become increasingly prominent. Thus, we propose a silicon-based integrated device for electro-optic modulation assembly with mode division multiplexing, which has low insertion loss, low channel crosstalk, high extinction ratio, and large modulation depth. The integrated device has a compact structure and excellent performance. It has broad application prospects in the field of high-speed and large-capacity optical communication and optoelectronic

integration.

Methods The proposed integrated device consists of electro-optic modulation and mode division multiplexing modules. The electro-optic modulation module consists of silicon-based photonic crystal waveguides and a width-modulated (WM) resonant cavity. The mode division multiplexing module consists of silicon-based asymmetric parallel nanowire waveguides. A tapered structure is used at the junction of photonic crystal and nanowire waveguides to reduce the cascade loss between the two waveguides. We used the finite-difference time-domain (FDTD) and device methods in the commercial optical simulation software Lumerical for simulation analysis. According to the time-domain coupled-mode theory and plasma dispersion effect, WM-type resonant cavity and PN doping structure are used to achieve the on-off modulation of TE₀ mode. According to the transverse coupled-mode theory, asymmetric parallel nanowire waveguides are used to achieve the conversion from TE₀ to TE₁ modes. The integrated device can achieve a narrow-band on-off modulation and mode multiplexing function of TE₀ and TE₁ modes with a center wavelength of 1553.91 nm.

Results and Discussions The integrated device has excellent performance. To achieve low insertion loss, a tapered structure with $c = 9$ is selected using simulation analysis to cascade photonic crystal slab and nanowire waveguides. The proposed structure can achieve narrow-band on-off modulation and mode division multiplexing for TE₀ and TE₁ modes with a center wavelength of 1553.91 nm. When the modulation voltage is 1.24 V, the variation of electron concentration ΔN_e reaches $4.55 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, and the variation of hole concentration ΔN_h reaches $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (Fig. 12). The transmittance of the integrated device under “off” and “on” states are $T = 0.010255\%$ and $T = 96.34\%$, respectively (Fig. 13), and the Q value reaches 1.5×10^4 . The extinction ratio of the integrated device is 19.73 dB, and the modulation depth is 0.9894. Through detection on ports A, B, 3, and 4, the performance parameters of each mode at output ports are measured. The calculation results showed that the minimum and maximum insertion losses of the integrated device are 0.05 dB and 0.46 dB, respectively. The minimum and maximum channel crosstalk are -34.33 dB and -14.66 dB, respectively. Besides, after comparing the performance of the photonic crystal electro-optic modulators and two-mode silicon-based mode division multiplexers proposed in the existing references (Table 1), the proposed device can integrate the electro-optic modulation and mode division multiplexing modules. Besides, the proposed device has excellent performance.

Conclusions This study proposed a silicon-based integrated device for electro-optic modulation assembly with mode division multiplexing. WM-type photonic crystal resonator and silicon-based asymmetric parallel nanowire waveguides can be used to achieve on-off modulation and mode division multiplexing. The tapered structure can reduce the cascading loss between photonic crystal and nanowire waveguides. The proposed integrated device can achieve a narrow-band on-off modulation and multiplexing function of TE₀ and TE₁ modes with a center wavelength of 1553.91 nm. When the modulation voltage is 1.24 V, it can achieve low insertion loss, low channel crosstalk, high extinction ratio, large modulation depth, and high Q value. The extinction ratio of the integrated device is 19.73 dB, and the modulation depth is 0.9894. The minimum and maximum insertion losses of the integrated device are 0.05 dB and 0.46 dB, respectively. The minimum and maximum channel crosstalk are -34.33 dB and -14.66 dB, respectively. It has a compact size of $\sim 54 \mu\text{m} \times 22 \mu\text{m}$. It can be applied to high-speed and large-capacity optical communication systems and has significant value for improving system integration.

Key words optical communications; silicon-based photonic crystal; coupling mode theory; electro-optic modulation; mode division multiplexing; integrated device

OCIS codes 060.4080; 060.4230; 130.3120; 130.5296