

引用格式: WANG Shuirou, CHEN Heming, LIU Xue, et al. An Integrated Device for Electro-optic Modulation and Wavelength Division Multiplexing with the Wavelength Channel Spacing of 3.2 nm[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(5):0551312
王水柔,陈鹤鸣,刘雪,等. 波长间隔为 3.2 nm 的电光调制和波分复用集成器件研究[J]. 光子学报, 2022, 51(5):0551312

波长间隔为 3.2 nm 的电光调制和波分复用集成器件研究

王水柔¹, 陈鹤鸣², 刘雪¹, 潘万乐¹

(1 南京邮电大学 电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023)

(2 南京邮电大学 贝尔英才学院, 南京 210023)

摘要:提出了一种基于光子晶体电光调制和波分复用的集成器件。该集成器件的电光调制器模块和波分复用器模块均采用一维光子晶体纳米梁腔结构。利用三维时域有限差分法进行仿真。结果表明,该器件可实现工作波长为 1 550.4 nm 和 1 553.6 nm 的电光调制和波分复用功能。该器件在工作波长 1 550.4 nm 和 1 553.6 nm 下的插入损耗分别为 0.89 dB 和 0.40 dB, 消光比分别为 17.13 dB 和 22.52 dB, 调制深度分别为 0.98 和 0.99, 信道串扰分别为 -24.20 dB 和 -23.37 dB, 器件尺寸仅为 71.34 μm \times 7.8 μm \times 0.22 μm 。该集成器件结构紧凑, 易于集成, 可望应用于光互连网络和数据中心。

关键词:光子晶体; 纳米梁腔; 纳米线波导; 电光调制器; 波分复用器

中图分类号: TN256

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20225105.0551312

0 引言

现代社会, 互联网深入人们生活的方方面面, 人们对通信容量和传输速度的需求也在不断增加。现如今, 针对单个器件的研究已趋近成熟, 但如何既保持器件的良好性能, 又巧妙地将多个器件级联在同一个芯片上是解决目前通信系统所面临瓶颈的重要路径之一^[1-2]。硅基光电子单片集成可以与互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 工艺高兼容, 具有集成度高、价格低、尺寸小等优点, 可进行大规模的生产。

硅基电光调制器主要有微环谐振腔型^[3-4]、马赫-曾德尔型 (Mach-Zehnder, MZ)^[5-7] 和光子晶体谐振腔型^[8-9] (Photonic Crystal Resonator, PCR) 等。2014 年, SHAKOOR A 等^[10] 研究设计出了具有高品质因数的一维光子晶体纳米梁腔型电光调制器, 但是该器件的消光比较低, 只有 11 dB。波分复用器结构主要有微环谐振腔型^[11]、马赫曾德尔干涉型^[12] 和 PCR 型^[13-15] 等。2018 年, YANG D 等^[16] 设计了一种基于一维光子晶体纳米梁腔的八信道波分解复用器, 实现了 8 个波长的解复用功能。

考虑到人们对小体积、大容量、大带宽和集成化的光互联技术的需求, 在同一芯片上实现光电集成是满足该需求的最佳途径。近几年来对基于光子晶体的电光调制器和波分复用器进行一体集成的研究也在逐步推进。2015 年, ITO H 等^[17] 提出了一种由硅基光子晶体 MZ 调制器、三角形耦合微环复用器和光开关组成的三通道集成器件, 调制器的驱动电压为 1.75 V, 消光比超过 3 dB, 相邻信道间的串扰值低于 -20 dB, 器件尺寸较大, 为 2.0 mm \times 0.7 mm。2019 年, PITRIS S 等^[18] 设计了一种波长间隔为 6.75 nm 的四通道电光调制和波分复用集成器件, 调制器的驱动电压为 1.82 V, 同样器件尺寸较大, 为 5.2 mm \times 2.7 mm。2020 年, LIU Xue 等^[19] 利用 L3 腔设计了一种用于电光调制和粗波分复用的集成器件, 该器件插入损耗小于 1 dB, 消

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61571237), 江苏省自然科学基金 (No. BK20151509)

第一作者: 王水柔 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为硅基电光调制与波分复用集成器件。Email: 1019020702@njupt.edu.cn

导师 (通讯作者): 陈鹤鸣 (1958—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光通信技术、信息光电子技术和光波技术。Email: chhm@njupt.edu.cn

收稿日期: 2022-01-14; 录用日期: 2022-03-22

<http://www.photon.ac.cn>

光比超过 20 dB, 调制深度均为 0.99, 信道串扰小于 -20 dB, 器件尺寸较小, 仅为 $17.83 \mu\text{m} \times 17.3 \mu\text{m} \times 0.22 \mu\text{m}$, 但波长间隔较大, 为 20 nm。本文提出了一种波长间隔为 3.2 nm 的电光调制和波分复用集成器件。该集成器件的电光调制器模块和波分复用器模块均采用一维光子晶体纳米梁腔的结构, 实现在工作波长 1 550.4 nm 和 1 553.6 nm 下的电光调制和双波长复用。

1 理论模型及原理分析

本文提出的电光调制和波分复用集成器件的工作原理如图 1 所示。左侧和右侧分别是由一维光子晶体纳米梁腔和纳米线波导构成的波分复用模块和电光调制模块。该集成器件利用一维光子晶体纳米梁腔和纳米线波导, 实现电光调制模块的不同波长的“通”“断”状态调制和波分复用模块的不同波长的下载功能。电光调制模块采用纳米梁腔与光子晶体波导侧耦合的方式。在无(有)外电压下, 如果输入的光信号波长与谐振腔的谐振波长一致(不一致), 在腔的作用下, 光信号不可以(可以)到达该模块左侧输出端口, 即可完成该模块中的“断”(“通”)状态下的调制。波分复用器模块中, 经过调制后光信号的波长与下载腔和反射腔的谐振波长一致时, 光信号会在谐振腔的作用下耦合至集成器件的输出端口, 实现复用功能。

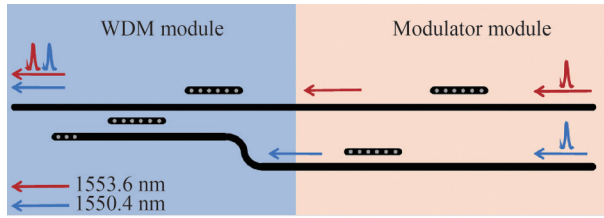


图 1 基于光子晶体的电光调制和波分复用集成器件的工作原理图

Fig.1 Working principle of integrated device based on photonic crystal electro-optic modulation and wavelength division multiplexing

电光调制和波分复用集成器件理论模型如图 2 所示。电光调制器的理论依据是等离子体色散效应, 即是通过向半导体硅材料中掺杂或注入自由载流子, 在外置电压的作用下电子和空穴的浓度变化会改变硅的有效折射率。当工作波长在硅基材料中为 1 550 nm 附近时, 硅基材料的吸收系数和折射率随着载流子浓度变化的对应关系式为

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -[8.8 \times 10^{-22} \Delta N_e + 8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}] \tag{1}$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \Delta N_h \tag{2}$$

式中, Δn 和 $\Delta \alpha$ 分别为硅材料的折射率变化量和吸收系数变化量, ΔN_e 和 ΔN_h 分别为单位体积内电子和空穴的浓度变化量。

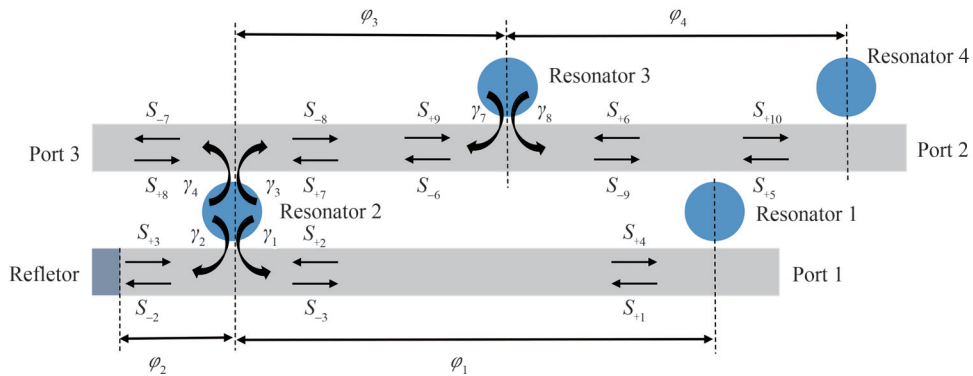


图 2 电光调制和波分复用集成器件理论模型

Fig.2 Theoretical model of integrated device based on photonic crystal electro-optic modulation and wavelength division multiplexing

波分复用器模块主要采用带有反射腔和反射壁的双通道波分复用器。分别用 S_{+i} 和 S_{-i} 代表图 2 中谐振腔 1、2、3 和 4 的输入和输出波幅值, γ_i 代表的是幅值衰减因子, 谐振腔 1 和 4 分别是调制器模块的谐振腔, 谐

谐振腔2和3分别为复用模块的下载腔和反射腔,在输入波导的末端添加反射壁结构。因整个腔的周围均采用对称性的结构设计,且腔和波导的使用材料均相同,因此可以令 $\gamma_i = \gamma (i = 1, 2, 3, \dots, 6)$,简化推导过程的计算量。利用时域耦合模理论进行分析。

对于谐振腔2有

$$\frac{dA}{dt} = i\omega_2 A - 4\gamma A + \sqrt{2\gamma} (S_{+2} + S_{+3} + S_{+7} + S_{+8}) \quad (3)$$

光信号输入谐振腔2的波幅值与从谐振腔2输出的波幅值之间存在关系:

$$S_{+2} = S_{+1} \cdot e^{j\phi_1} \quad (4)$$

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

$$S_{+3} = -S_{-2} \cdot e^{j2\phi_2} \quad (6)$$

$$S_{+7} = S_{-6} \cdot e^{j\phi_3} \quad (7)$$

$$S_{-6} = S_{+6} - \sqrt{2\gamma} B \quad (8)$$

$$S_{+6} = S_{+5} \cdot e^{j\phi_4} \quad (9)$$

式中, ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 和 ϕ_4 表示的是相位延迟, ω_2 是谐振腔2的谐振频率。

同理可得,对于谐振频率为 ω_3 的谐振腔3有

$$\frac{dB}{dt} = i\omega_3 B - 2\gamma B + \sqrt{2\gamma} (S_{+6} + S_{+9}) \quad (10)$$

$$S_{+6} = S_{+5} \cdot e^{j\phi_4} \quad (11)$$

$$S_{+9} = S_{-8} \cdot e^{j\phi_3} \quad (12)$$

$$S_{-8} = S_{+8} - \sqrt{2\gamma} A \quad (13)$$

调制状态为“通”时,当入射光仅从端口1输入进行分析,即 $S_{+8} = 0$ 和 $S_{+5} = 0$ 。由式(3)~式(9)可得

$$A = \frac{\sqrt{2\gamma} S_{+1} \cdot e^{j\phi_1} \cdot (1 - e^{j2\phi_2}) - 2\gamma \cdot e^{j\phi_3} \cdot B}{i(\omega - \omega_2) + 4\gamma - 2\gamma \cdot e^{j2\phi_2}} \quad (14)$$

同样,由式(10)~式(13)可得

$$B = \frac{-2\gamma \cdot e^{j\phi_3}}{i(\omega - \omega_3) + 2\gamma} \cdot A \quad (15)$$

假设 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$,结合以上两式可得

$$A = \frac{\sqrt{2\gamma} \cdot e^{j\phi_1} \cdot (1 - e^{j2\phi_2}) \cdot [i(\omega - \omega_0) + 2\gamma]}{[i(\omega - \omega_0) + 4\gamma - 2\gamma \cdot e^{j2\phi_2}][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma] - 4\gamma^2 \cdot e^{j2\phi_3}} \cdot S_{+1} \quad (16)$$

在端口3处的输出光信号为

$$S_{-7} = S_{+7} - \sqrt{2\gamma} A \quad (17)$$

联立式(7)~式(9)和式(17)可得

$$S_{-7} = -\sqrt{2\gamma} A - \sqrt{2\gamma} \cdot e^{j\phi_3} \cdot B \quad (18)$$

利用上述关系式可以计算光从端口1输入后从端口3输出的透射率 $T_1(\omega)$ 为

$$T_1(\omega) = \left| \frac{S_{-7}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{4\gamma^2 \cdot e^{j(\phi_1 + 2\phi_3)} \cdot (1 - e^{j2\phi_2}) - 2\gamma \cdot e^{j\phi_1} \cdot (1 - e^{j2\phi_2}) \cdot [i(\omega - \omega_0) + 2\gamma]}{[i(\omega - \omega_0) + 4\gamma - 2\gamma \cdot e^{j2\phi_2}][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma] - 4\gamma^2 \cdot e^{j2\phi_3}} \right|^2 \quad (19)$$

当 $\phi_1 = (2x + 1) \times \pi$ 、 $\phi_2 = (2y + 1/2) \times \pi$ 、 $\phi_3 = (2z + 1/2) \times \pi$ (x, y, z 均取正整数)时,式(19)可以经过化简得到

$$T_1(\omega) = \left| \frac{S_{-7}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{i4\gamma(\omega - \omega_0) + 16\gamma^2}{[i(\omega - \omega_0) + 6\gamma][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma] + 4\gamma^2} \right|^2 \quad (20)$$

同样地,根据以上的推导思路可以计算端口2的透射效率 $T_2(\omega)$ 。

$$S_{+10} = S_{-9} \cdot e^{i\phi_4} \quad (21)$$

$$S_{-9} = S_{+9} - \sqrt{2\gamma} B \quad (22)$$

由式(12)和(13)可得

$$S_{+10} = -\sqrt{2\gamma} \cdot e^{i(\phi_3 + \phi_4)} \cdot A - \sqrt{2\gamma} e^{i\phi_4} \cdot B \quad (23)$$

将式(15)和(16)代入式(23),当满足 $\phi_4 = (2m + 1/2) \times \pi$ (m 为正整数)时,端口2的透射效率 $T_2(\omega)$

$$T_2(\omega) = \left| \frac{S_{+10}}{S_{+1}} \right|^2 = \left| \frac{i4\gamma(\omega - \omega_0)}{[i(\omega - \omega_0) + 6\gamma][i(\omega - \omega_0) + 2\gamma] + 4\gamma^2} \right|^2 \quad (24)$$

经过上述理论推导可以得到在理想情况下,输出端口3的 $T_1(\omega)$ 可以达到100%,而输出端口2的 $T_2(\omega)$ 为0,这样可以完美地实现双通道调制和波分复用功能。但需要满足该模型的理想下载滤波条件为

1)波分复用器部分的下载腔和反射腔的谐振频率要相同;

2) $\phi_1 = (2x + 1) \times \pi$ 、 $\phi_2 = (2y + 1/2) \times \pi$ 、 $\phi_3 = (2z + 1/2) \times \pi$ 和 $\phi_4 = (2m + 1/2) \times \pi$ (x, y, z 和 m 均为正整数)。

2 结构与优化

基于光子晶体纳米梁腔的电光调制和波分复用集成器件三维结构如图3所示。该器件由纳米线波导、纳米梁腔、Al电极以及二氧化硅包层组成。其中,纳米线波导、纳米梁腔、Al电极位于二氧化硅包层之中。硅(图中绿色部分)的折射率为3.4,二氧化硅包层(图中灰色部分)的折射率为1.44。组成一维光子晶体纳米梁腔的圆孔内填充与包层一样的折射率为1.44的二氧化硅。两侧的Al电极分别加在纳米梁腔的上下两侧,上侧为正极,下侧为负极。

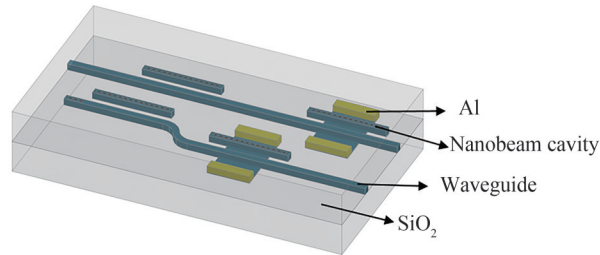


图3 电光调制和波分复用的集成器件的三维结构图

Fig.3 Three-dimensional structure of integrated devices based on electro-optic modulation and wavelength division multiplexing

2.1 一维光子晶体纳米梁腔侧耦合结构

图4为一维光子晶体纳米梁腔的结构。根据圆孔半径是否相同,纳米梁腔可划分为中间半径渐变型的微腔区域和两侧半径相等型的布拉格反射镜区域。其中布拉格反射镜区域可以降低光在此结构中的传输损耗,提高透射率。根据QUAN Q等^[20-21]提出的具有超高Q的一维光子晶体纳米梁腔设计方法,核心思想是将圆孔在波导上的占空比 f 的取值由腔中心 $f = 0.2$ 向两侧递减至 $f = 0.1$,其中 f 的计算公式为: $f = \pi R^2 / aW$, R 为圆孔的半径, a 为晶格周期常数, W 为波导宽度。确定晶格常数与波导宽度的取值后,再由 f 与 R 之间的关系式,可以得到腔中心 $f=0.2$ 时所对应的 R 值和 $f=0.1$ 时所对应的 R 值。根据选取的渐变孔的个数,等间隔的设置半径 R 的值。布拉格反射区域所有圆孔的半径均设置为 $f=0.1$ 时对应的 R 值,即与微腔两侧边界的圆孔半径取值相同。

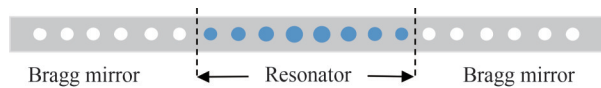


图4 一维光子晶体纳米梁腔的结构示意图

Fig.4 Structural diagram of one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity

一维光子晶体纳米梁腔与纳米线波导侧耦合的结构如图5所示,图中的结构参数为:选取 $a=340\text{ nm}$, $W=550\text{ nm}$,将一维光子晶体纳米梁腔与硅基纳米线直波导进行侧耦合,波导之间的耦合间隔 g 设置为 100 nm ,波导的厚度 H 均为 220 nm 。其中 N_r 代表的是微腔中心一侧半径渐变型圆孔的个数。

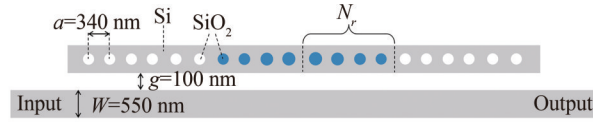


图5 一维光子晶体纳米梁腔与纳米线波导侧耦合的结构示意图

Fig.5 Structural diagram of side-coupling between one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity and nanowire waveguide

分析选取不同数目的 N_r 与谐振波长和透射率之间的关系。入射光波为TE基模,从纳米线波导左侧输入右侧输出,将探测器放置输出端口,利用Lumerical的3D-FDTD进行仿真分析,得到的透射谱如图6所示。从图6中可以看出,随着 N_r 值不断减小,谐振波长会向右偏移,透射率先减小后增大,但变化很微小。

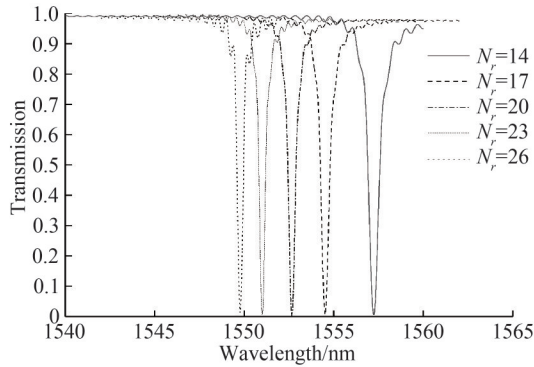


图6 谐振波长和透射率与 N_r 的关系

Fig.6 The influence of N_r on transmittance and resonance wavelength

分析选取不同圆孔半径的变化量 ΔR 与谐振波长和透射率之间的关系。固定 N_r 的值为17,则微腔区域的圆孔半径由中心 $R=109\text{ nm}$ 向两侧逐渐递减至 $R=77\text{ nm}$,布格拉反射区域的圆孔半径 $R=77\text{ nm}$ 。在此基础之上,调整 R 的取值,其中 ΔR 是半径的变化量,然后进行仿真可得到不同 ΔR 值对应的透射谱如图7所示。从图7中可分析得到,随着 ΔR 的减小,谐振波长向右移动,透射率减小,但下载品质因数出现明显减小。

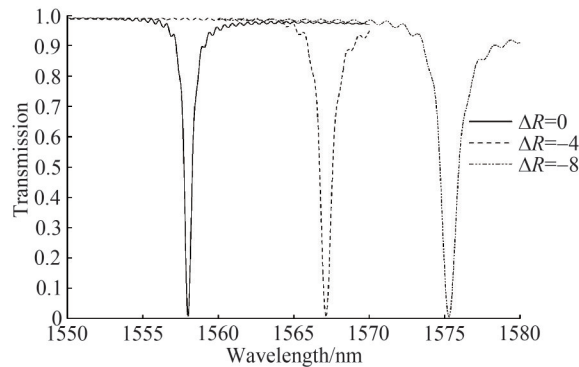


图7 谐振波长与透射率与 ΔR 的关系

Fig.7 The influence of ΔR on transmittance and resonance wavelength

通过上面的分析可以得到,一维光子晶体纳米梁腔与波导进行侧耦合时, N_r 和 ΔR 与谐振波长和透射率之间的关系。对比之下,可发现 N_r 和 ΔR 对谐振波长的影响很大,随着 N_r 或 ΔR 减小,会使谐振波长变大; ΔR 对透射率影响很大,随着 ΔR 的减小,会使透射率减小。这有助于接下来控制信道的输出波长值和优化

透射率。

2.2 电光调制器模块

本文设计的电光调制器模块结构如图8所示。沿用2.1节的纳米梁腔与硅基纳米线波导侧耦合的方式,中间用厚度为20 nm硅基薄层连接。该模块的参数为:晶格周期 $a=340$ nm,波导宽度 $W=550$ nm,波导与谐振腔间隔距离 $g=100$ nm,组成谐振腔微腔部分的中心一侧半径渐变型圆孔个数 N_r 为20个,所有圆孔半径的变化量 $\Delta R=+8$ nm。此时中心微腔一侧的渐变型圆孔的半径 R 由117 nm等间隔的递减至85 nm。但为了使谐振波长精确至1 550.4 nm,调整微腔中心两个圆孔半径(图中标记为红色)为118.5 nm。分别在谐振腔上下两侧放置电极,上侧为负极,下侧为正极。

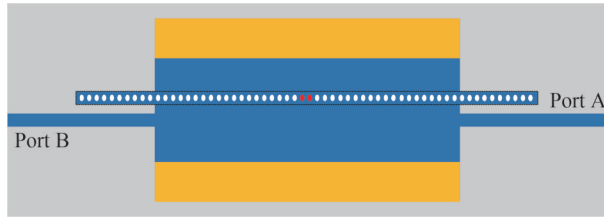


图8 电光调制器结构图

Fig.8 Electro-optic modulator structure diagram

图9是电光调制器模块的电学掺杂示意图。在纳米梁腔的左右两侧进行掺杂形成p-n结,其中P+型区掺杂浓度为 $5.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,P型区掺杂浓度为 $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,N+型区掺杂浓度为 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,N型区掺杂浓度为 $1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。采用Device软件对该器件进行仿真分析,可得到在不同电压下的载流子浓度的分布和变化情况。当驱动电压为1.25 V时,电子浓度变化量 $\Delta N_e = 1.58 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,空穴浓度变化量 $\Delta N_h = 1.95 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (如图10)。根据式(1)电子和空穴浓度变化量与折射率变化量之间的关系,再将上述仿真结果值代入,可得纳米梁腔周围折射率改变量为0.005,即可实现对1 550.4 nm的“通”状态调制。图11是利用3D-FDTD仿真得到的谐振波长为1 550.4 nm的入射光分别在“通”和“断”状态下的透射谱图,一维纳米梁腔在 $V=0$ 时,入射光波长与谐振腔的工作波长一致,该入射光被耦合在腔内,实现“断”状态的调制;在 $V=1.25$ V时,谐振腔的谐振波长发生偏移,与入射光波长不一致,此时入射光波不再被耦合在腔内,实现“通”状态的调制。

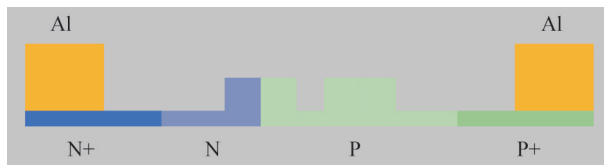


图9 电光调制器载流子掺杂示意图

Fig.9 Schematic diagram of electro-optic modulator doping structure

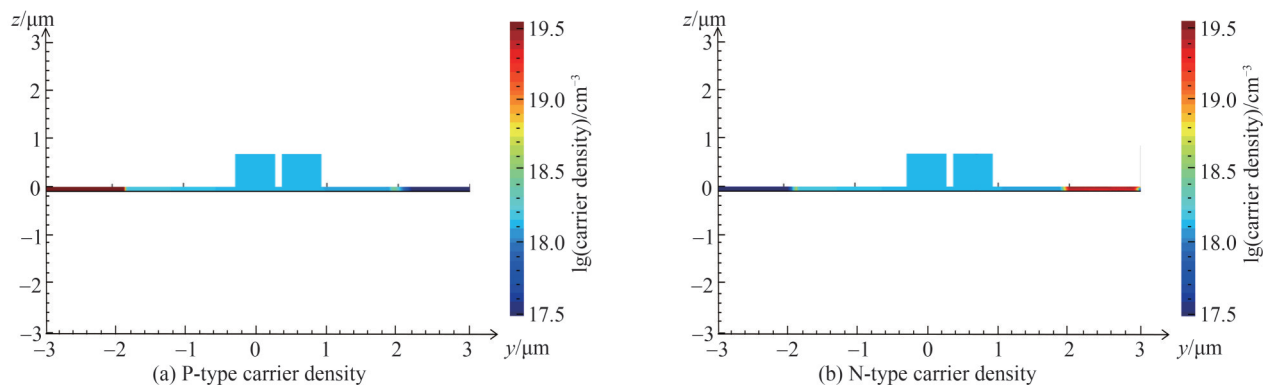


图10 两端电压为1.25 V时P型和N型载流子浓度分布

Fig.10 Carrier density distribution diagram when the voltage across both ends is 1.25 V

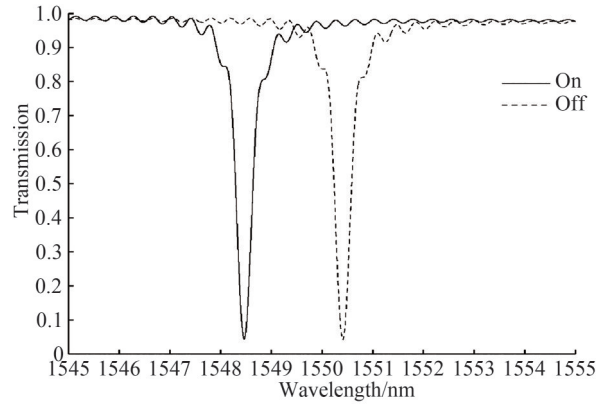


图 11 调制器分别在“通”和“断”状态下的透射谱图
Fig.11 Modulation reflectance spectra "on" and "off" states

2.3 波分复用器模块

图 12 是信道间隔为 3.2 nm 的双通道波分复用器的结构示意图。该模块是通过将两个谐振腔和两个直波导等间隔地交替排列而成,其中在最下侧的波导中增加了反射壁结构,用于反射特定波长的光波,增加输出端口 C 处的透射率。两个谐振腔分别是下载腔 C_1 和反射腔 C_2 ,它们均是采用一维光子晶体纳米梁的设计结构。由于两个腔之间互相影响,波分复用模块的谐振波长会发生偏移,因此结构参数会在电光调制器模块的基础上进行微调。该模块腔 C_1 和腔 C_2 的晶格周期 a 、波导宽度 W 、波导与谐振腔间隔距离 g 、组成谐振腔微腔部分的中心一侧半径渐变型圆孔个数 N_r 、布拉格反射区域圆孔个数均与电光调制器模块一致。腔 C_1 的所有圆孔半径变化量 $\Delta R = +2$ nm,腔 C_2 的所有圆孔半径变化量 ΔR 为 0 且腔最中心的两个圆孔(图中标记为红色)半径为 111 nm。反射壁由半径为 77 nm 的 10 个圆孔组成,其晶格常数与两个腔一致。

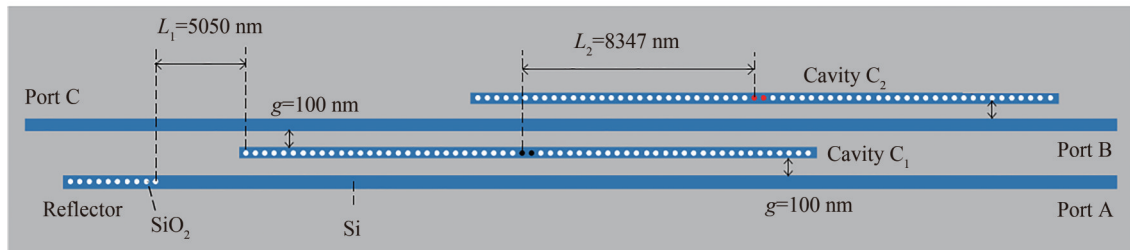


图 12 波分复用器模块结构图
Fig.12 Structure diagram of wavelength division multiplexing module

根据上面集成器件的理论分析可知,为了提高输出端口 C 的透射率,腔 C_1 与 C_2 之间相位延迟参数和腔 C_1 与反射壁之间的相位延迟参数均要为 $\pi/2$ 的整数倍。因此设置 $L_1=5\ 050$ nm, $L_2=8\ 347$ nm,如图 12 所示。利用 FDTD 模块进行 3D 仿真,可以得到输出端口 B 和输出端口 C 处的透射谱如图 13 所示。从图 13 中可以看出,波长为 1 550.4 nm 在端口 B(虚线)和 C(实线)分别有明显的凹陷和凸起,说明 1 550.4 nm 的光信号在端口 B 处的透射率几乎为 0,而在端口 C 处的透射率比较高。该器件可以实现 1 550.4 nm 的波长下载功能。此外,波长为 1 550.4 nm 的波在端口 C 的透射率为 86.7%。

如图 14 所示,从端口 A 和 B 分别输入波长为 1 550.4 nm 和 1 553.6 nm 的 TE 模光信号,可得到不同波长传输过程中的稳态场分布。图 14(a)中,输入工作波长为 1 550.4 nm 光信号可以经过谐振腔的作用后,从左侧端口 C 输出;图 14(b)中,输入工作波长为 1 553.6 nm 的光信号与谐振腔的谐振波长不一致,因此可以直接从右侧输入端口 B 传输至左侧输出端口 C,因此该器件可以实现波长为 1 550.4 nm 和 1 553.6 nm 的波分复用功能。

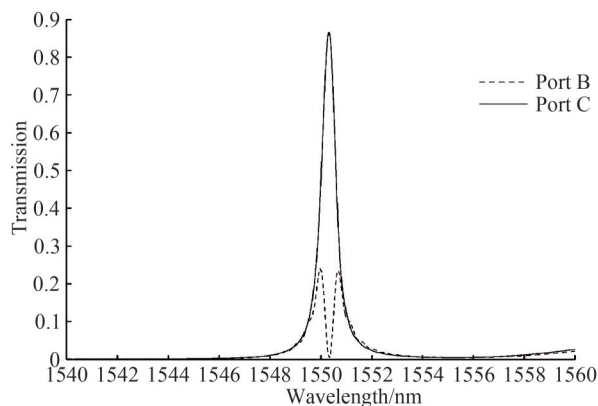


图 13 波分复用器各端口透射谱图

Fig. 13 Transmission spectrum of each port of wavelength division multiplexing module

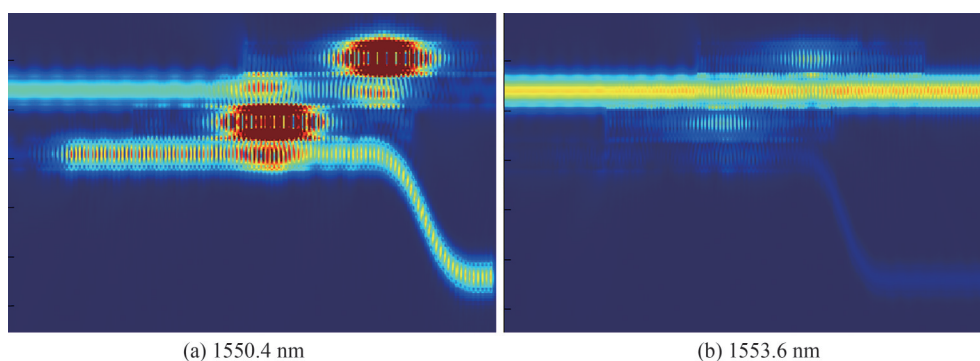


图 14 波分复用器的稳态场分布图

Fig.14 Steady-state field distribution diagram of wavelength division multiplexing

2.4 电光调制器与波长间隔为 3.2nm 的波分复用器级联模块

将两个电光调制器模块与波分复用器模块级联,其结构如图 15 所示。M1 是调制波长为 1 553.6 nm 模块,M2 是调制波长为 1 550.4 nm 模块,M3 为波分复用模块。M2 与 M3 之间采用长度为 $s=8\ 000\ \text{nm}$ 的弯曲波导进行连接,以便放置电极;而 M1 与 M3 则使用等宽度的纳米线波导直接连接。由前面理论分析中的式(20)可知,电光调制器模块与波分复用模块之间涉及两个相位延迟参数须满足以下关系 $\phi_1=(2x+1)\times\pi$ 和 $\phi_4=(2m+1/2)\times\pi$,因此设置 $L_3=25\ 070\ \text{nm}$, $L_4=34\ 800\ \text{nm}$ 。由于三个模块之间相互影响,使谐振波长发生偏移,所以需要微调各个模块的谐振腔中心两个红色圆孔(图中用椭圆标记区域)的半径。经过优化后整个集成器件的参数设计为:所有模块的晶格常数 $a=340\ \text{nm}$,波导宽度为 $W=550\ \text{nm}$,波导间隔宽度 $g=100\ \text{nm}$, $N_r=20$,微腔渐变型空气孔半径值范围为 $109\ \text{nm}\sim 77\ \text{nm}$ 。M1 模块: $\Delta R=+8\ \text{nm}$,微腔两个中心圆孔半径 $R_1=112\ \text{nm}$;M2 模块: $\Delta R=+8\ \text{nm}$,微腔两个中心圆孔半径 $R_2=118.6\ \text{nm}$;M3 模块:下载腔 $\Delta R=+2\ \text{nm}$,反射腔两个中心圆孔半径 $R_3=114.5\ \text{nm}$ 。

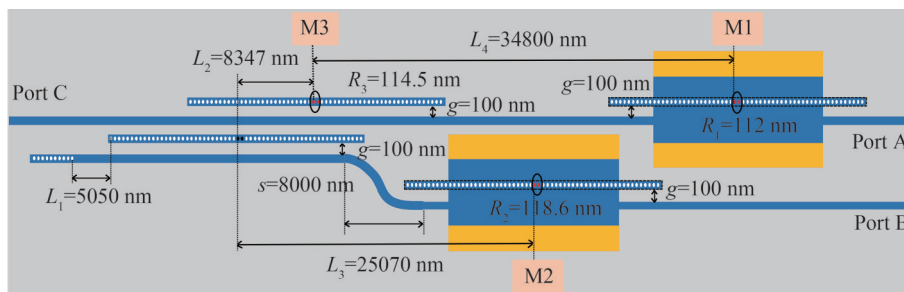


图 15 整体集成器件结构图

Fig.15 Overall integrated device structure diagram

3 性能分析

本文采用 Lumerical 仿真软件中的 3D-FDTD 分析集成器件的调制电压、插入损耗、消光比、调制深度、信道串扰值和调制速率。

仿真计算时,如图 16 所示,将波长 1 550.4 nm 的 TE 光信号放置在输入端口 B,当驱动电压为 1.25 V 时,此时调制器为“通”状态,其对应的稳态场分布图如图 16(a)所示;当驱动电压为 0 时,此时调制器为“断”状态,其对应的稳态场分布图如图 16(b)所示。同样地,将波长 1 553.6 nm 的光信号放置在输入端口 A,当驱动电压分别为 1.25 V 和 0 时,调制器分别处于“通”和“断”状态,其对应的稳态场分布图如图 16(c)、图 16(d)所示。

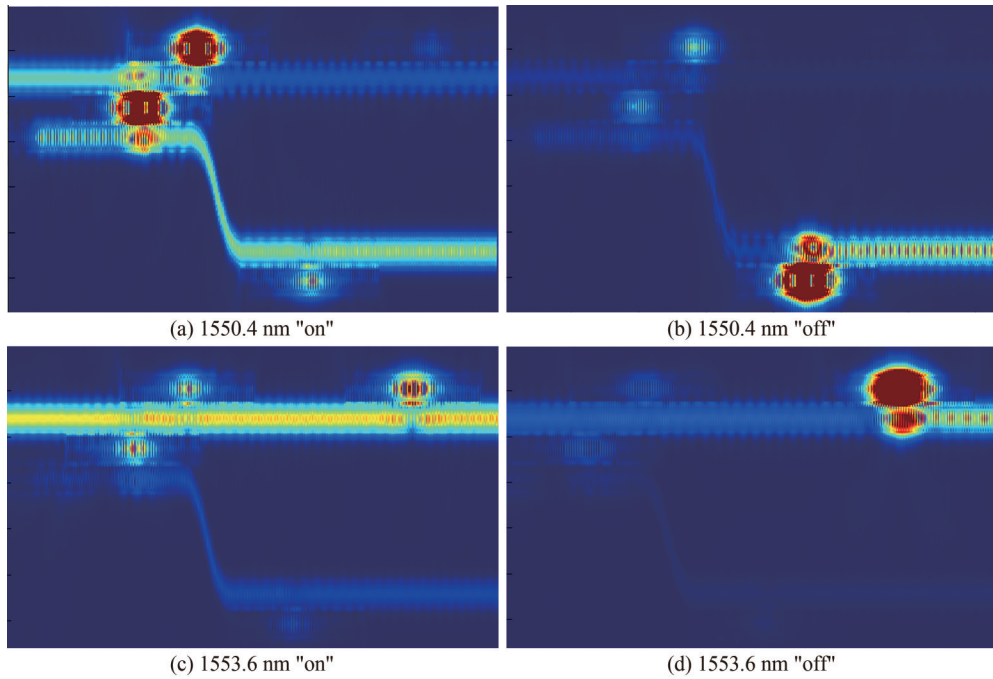


图 16 集成器件的稳态场分布图

Fig.16 Steady-state field distribution diagram of integrated devices

图 17(a)和(b)分别是波长为 1 550.4 nm 和 1 553.6 nm 的 TE 光波在集成器件输出端口 C 处对应的透射谱图。图 17(a)中,当在端口 B 输入中心波长为 1 550.4 nm 的宽光谱时,“通”状态下,1 550.4 nm 的入射光耦合至主波导并从端口 C 输出,透射率为 81.50%,“断”状态下,1 550.4 nm 的光耦合至调制器的腔内不再继续向前传输,此时透射率为 1.58%;图 17(b)中,当在端口 A 输入中心波长为 1 553.6 nm 的宽光谱时,“通”状态

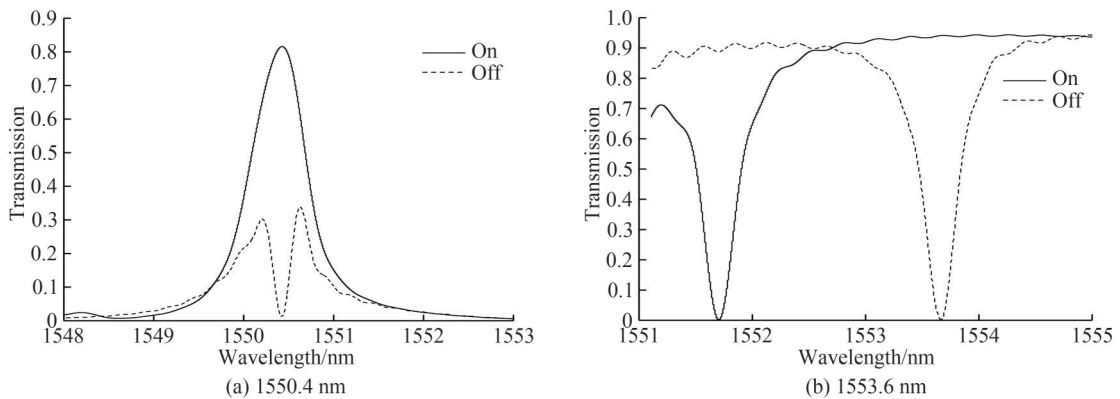


图 17 集成器件“通”和“断”状态下透射谱图

Fig.17 Transmission spectrum of integrated device when the modulation state is "on" and "off"

下, 1 553.6 nm 的入射光沿着主波导传输并从端口 C 输出, 透射率为 91.21%, “断”状态下, 1 553.6 nm 的光耦合至调制器的腔内不再继续向前传输, 透射率为 0.51%。

在输入波长分别为 1 550.4 nm 和 1 553.6 nm 下, 该集成器件分别对应的总插入损耗 γ_{IL} 、消光比 η_{ER} 、调制深度 D 和信道串扰值 C_{CT} 如表 1 所示。

表 1 集成器件性能参数
Table 1 Performance parameters of integrated devices

λ/nm	γ_{IL}/dB	η_{ER}/dB	D	C_{CT}/dB		V/GHz
				Port A	Port B	
1 550.4	0.89	17.13	0.98	—	-24.20	—
1 553.6	0.40	22.52	0.99	-23.37	—	12.50

针对该集成器件的调制速率这一性能指标来说, 由于整体器件可以看成是两个不同工作波长的调制和滤波模块级联, 且两者的设计结构一致, 因此以入射波长 1 553.6 nm 为例, 当该集成器件分别处于“通”和“断”状态下时, 利用 3D-FDTD 进行仿真, 得到对应的稳定时间, 如图 18 所示。由于器件的调制响应时间应以“通”状态至“断”状态、“断”状态至“通”状态中的较大值为准, 因此选取“通”状态下的稳定时间约为 50 ps。当电压为 0~2 V 时, 硅在电场控制下的材料响应时间为 30 ps。

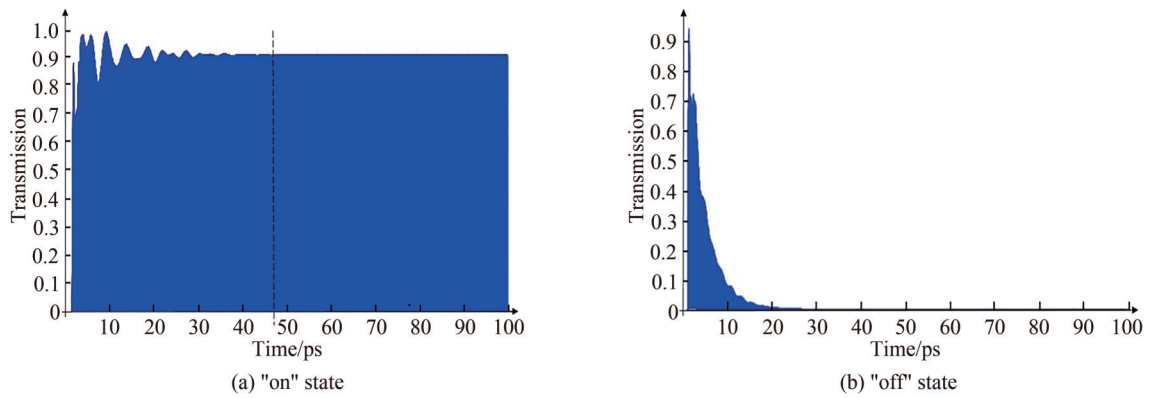


图 18 “通”“断”状态稳定时间仿真模拟计算

Fig.18 Simulation calculation of the stable time in the "on" and "off" states

调制速率 V 是与集成器件的系统总响应时间 T 成反比, 计算公式为

$$V = \frac{1}{T} \quad (25)$$

$$T = t_{re} + t_s \quad (26)$$

式中, t_{re} 为材料的响应时间, t_s 为器件的稳定时间。

因此, 该集成器件的系统响应时间为 80 ps, 由式(25)和式(26)可得, 调制速率为 12.50 GHz。

从表 1 中可以看出两波长对应的总插入损耗分别为 0.89 dB 和 0.40 dB, 按照光信号 1 550.4 nm 和 1 553.6 nm 在该集成器件的传播路径, 首先分别计算得到了两波长对应电光调制器模块的损耗为 0.13 dB 和 0.08 dB, 在波分复用模块中的损耗分别对应为 0.69 dB 和 0.26 dB; 其余剩下的能量损耗是由于光在硅基纳米线波导的传输过程中会发生散射, 两波长对应的损耗值分别为 0.07 dB 和 0.06 dB。总插入损耗均低于 0.89 dB, 消光比 η_{ER} 均大于 17 dB, 调制深度 D 均大于 0.98, 信道串扰值均低于 -23.37 dB, 调制速率为 12.50 GHz。器件尺寸大小仅为 $71.34 \mu\text{m} \times 7.8 \mu\text{m} \times 0.22 \mu\text{m}$ 。

将本文提出的集成器件的性能与其他文献进行对比, 见表 2。从表 2 可以看到, 本文提出的调制与波分复用集成器件的波长间隔相对于其他文献更小, 驱动电压相比之下也更低, 仅为 1.25 V。此外, 该集成器件的结构尺寸相比较于文献[17]、[18]更小, 有利于大规模片上集成。

由于器件在加工过程中存在着制作的工艺误差, 实际制作出的器件的几何参数与仿真时理想情况下器

表2 电光调制与波分复用集成器件的性能对比
 Table 2 Comparison with state-of-the-art integrated device for electro-optic modulation and wavelength-division multiplexing

Reference	Channel spacing /nm	η_{ER}/dB	V_{pp}/V	C_{CT}/dB	Footprint/ μm
[17]	—	>3	1.75	<-20	$2\,000\times 700$
[18]	6.75	—	1.82	—	$5\,200\times 2\,700$
[19]	20	>20	1.505	<-27	17.83×17.3
Our device	3.2	>17	1.25	<-23	7.8×71.34

件的几何参数存在一定的误差,因此会对器件的性能造成影响。光子晶体纳米梁腔最中心的两个圆孔的半径对器件的性能有着较明显的影响,为了分析器件的工艺误差,利用3D-FDTD对该参数仿真分析得出器件的透射率,得到工艺误差的容差范围。

图19是器件的工作波长为1550.4 nm时插入损耗与光子晶体纳米梁腔最中心的两个圆孔的半径变化量之间的关系。在纳米梁腔的设计中,腔中心两圆孔的半径的取值不同导致器件的谐振波长发生微小偏移,进而影响器件的透射率。本文在波长为1550.4 nm时选取的中心空气孔半径为111 nm。当空气孔半径变化量在-0.3 nm和+0.3 nm范围之间时,从图19中可以看出器件的插入损耗均小于1.22 dB(透射率仍然大于75%),表明器件的性能良好。

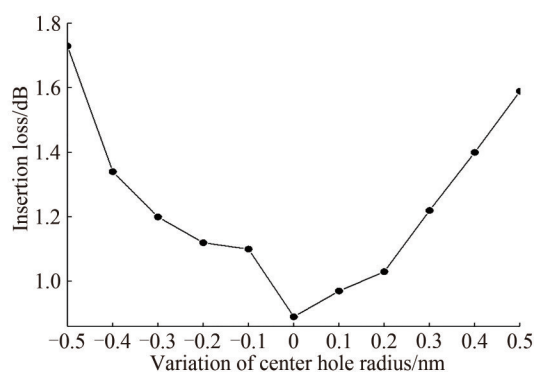


图19 插入损耗与中心圆孔半径变化量的关系
 Fig.19 The influence of variation of center holes radius on insertion loss

4 结论

利用一维光子晶体纳米梁腔结构,实现了在工作波长1550.4 nm和1553.6 nm下TE光的电光调制和双波长复用。仿真结果表明该集成器件需要的调制电压仅为1.25 V时,即可完成“通”状态下的调制与波分复用功能。此外集成器件具有插入损耗较低,消光比较高,调制深度大和信道串扰小的特点,性能优良,该器件对于光互联技术具有应用价值。

参考文献

- [1] BO Yaowei, MENG Xianjia. Development status and trend of optoelectronic integrated chip technology [J]. China SciTechnology Business, 2017(8): 1-3.
傅耀威, 孟宪佳. 光电子集成芯片技术发展现状与趋势[J]. 科技中国, 2017(8): 1-3.
- [2] ZHU Ninghua, LI Ming, HAO Yue. Optoelectronic devices and integration technologies[J]. Science in China: Information Science, 2016, 46(8): 1156-1174.
祝宁华, 李明, 郝跃. 光电子器件与集成技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(8): 1156-1174.
- [3] ZHANG H, JIANG X, QIU C. Large 10-dB Bandwidth and Low Insertion Loss Silicon Dual-ring Modulator[C]. 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2018.
- [4] JAYATILLEKA H, MURRAY K, CAVERLEY M, et al. Crosstalk in SOI microring resonator-based filters[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(12): 2886-2896.
- [5] YOSUKE T, KEISUKE K, RYOTARO A, et al. Full C-band Si photonic crystal waveguide modulator[J]. Optics Letters, 2017, 42(24): 5110-5112.

- [6] XU H, XIAO X, LI X, et al. High speed silicon Mach-Zehnder modulator based on interleaved PN junctions[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15093-15099.
- [7] HU Yuchen, CHEN Heming, ZHOU Haotian. 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. 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.
- [8] YAN Feixu, CHEN Heming. Low driving voltage electro-optic modulator based on wavy PN junction[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2020, 296(2): 13-17.
闫飞旭, 陈鹤鸣. 基于波状PN结的低驱动电压电光调制器[J]. *光电子·激光*, 2020, 296(2): 13-17.
- [9] ZHOU Haotian, CHEN Heming. A novel compact electro-optic modulator based on photonic crystals[J]. *Study on Optical Communications*, 2019, 45(5): 46-51.
周昊天, 陈鹤鸣. 基于光子晶体的紧凑型电光调制器[J]. *光通信研究*, 2019, 45(5): 46-51.
- [10] SHAKOOR A, NOZAKI K, KURAMOCHI E, et al. Compact 1D-silicon photonic crystal electro-optic modulator operating with ultra-low switching voltage and energy[J]. *Optics Express*, 2014, 22(23): 28623-28634.
- [11] XIAO S, KHAN M H, SHEN H, et al. Multiple-channel silicon micro-resonator based filters for WDM applications[J]. *Optics Express*, 2007, 15(12): 7489-7498.
- [12] HORST F, GREEN W M J, ASSEFA S, et al. WDM filters for silicon photonics transceivers[C]. *Opto-electronics & Communications Conference*, 2011.
- [13] KANNAIYAN V, SAVARIMUTHU R, DHAMODHARAN S K. Performance analysis of an eight channel demultiplexer using a 2D-photonic crystal quasi square ring resonator[J]. *Opto-Electronics Review*, 2017, 25(2): 74-79.
- [14] ZHUANG Y, CHEN H, JI K, et al. On-chip hybrid demultiplexer for mode and coarse wavelength division multiplexing[J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(1): 12.
- [15] WANG Yifei, WANG Mengmeng, WEN Feng, et al. Three-channel wavelength division demultiplexer based on photonic crystal[J]. *Optical Communication Technology*, 2019, 43(12): 27-29.
王一飞, 王梦梦, 文丰, 等. 基于光子晶体三通道解波分复用器[J]. *光通信技术*, 2019, 43(12): 27-29.
- [16] YANG D, CHEN X, ZHANG X. Ultrasmall in-plane demultiplexer enabled by an arrayed one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(10): 107103.
- [17] ITO H, TERADA Y, ISHIKURA N, et al. WDM transmitter using Si photonic crystal optical modulators[C]. *Lasers & Electro-optics, IEEE*, 2015.
- [18] PITRIS S, MORALIS-PEGIOS M, ALEXOUDI T, et al. A 4×40 Gb/s O-band WDM silicon photonic transmitter based on micro-ring modulators[C]. *Optical Fiber Communication Conference*, 2019.
- [19] LIU Xue, CHEN Heming, HU Yuchen. Research on integrated devices of 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. 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.
- [20] QUAN Q, DEOTARE P B, LONCAR M. Photonic crystal nanobeam cavity strongly coupled to the feeding waveguide[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(20): 203102.
- [21] QUAN Q, LONCAR M. Deterministic design of wavelength scale, ultra-high Q photonic crystal nanobeam cavities[J]. *Optics Express*, 2011, 19(19): 18529-18542.

An Integrated Device for Electro-optic Modulation and Wavelength Division Multiplexing with the Wavelength Channel Spacing of 3.2 nm

WANG Shuirou¹, CHEN Heming², LIU Xue¹, PAN Wanle¹

(1 College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

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

Abstract: In recent years, the internet has been used in almost every aspect of life, and the demands for communication capacity and transmission speed are increasing. The unit device technology has basically matured, but how to maintain the good performance of unit devices and place multiple devices on the same chip to solve the bottleneck of the current communication system is still under study. Nowadays, electro-optical modulators and wavelength division multiplexers with various structures have been proposed.

Research on these two types of single devices has become increasingly mature, but there are few studies on silicon-based optoelectronic integration that integrating the two devices to achieve multiple functions, which means more research on integrated devices is still needed. Considering the requirements of optical inter-connected networks and data centers for small size, large bandwidth and integration, we propose an on-chip integrated device for electro-optic modulation and wavelength division multiplexing. The two devices are cascaded together using silicon waveguides, which has the characteristics of small size, small modulation voltage, low insertion loss, low channel crosstalk and large modulation depth.

In this paper, an integrated device based on photonic crystal nanobeam cavity electro-optical modulator and wavelength division multiplexer is proposed. Both the electro-optical modulator module and the wavelength division multiplexer module are composed of a one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity. The integrated device consists of nanowire silicon waveguide, one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity, Al electrode, and silicon dioxide cladding. Among them, the nanowire silicon waveguide, the one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity, and the Al electrode are located in the silicon dioxide cladding. The whole integrated device can realize the "on" and "off" state modulation of different wavelengths of the electro-optical modulation module and download different wavelengths through the wavelength division multiplexing module. In this paper, simulation analysis is carried out based on the FDTD module and Device module in the commercial optical simulation software Lumerical. First of all, by analyzing the side-coupling structure of the one-dimensional photonic crystal nanobeam cavity, the parameters affecting its transmittance and resonance wavelength are found. Afterwards, based on the plasmonic dispersion effect, wavelength modulation is realized through the nanobeam cavity and the PN junction to complete the design of the electro-optic modulation module. Then based on side-coupling theory, wavelength division multiplexing is realized through the nanobeam cavity to complete the design of wavelength division multiplexer module. In the end, the two modules are integrated together. Since the resonant wavelength of the nanobeam cavity will shift after integration, the nanobeam cavity is fine-tuned to complete electro-optic modulation and wavelength division multiplexing at 1 550.4 nm and 1 553.6 nm.

The integrated device has great performance. It has small modulation voltage. When the modulation voltage is 1.25 V, the change in electron concentration ΔN_e reaches $1.58 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, and the change in hole concentration ΔN_h reaches $1.95 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, which can realize the modulation of the wavelength. According to the simulation, the transmittances of 1 550.4 nm and 1 553.6 nm in the "on" state are 81.50% and 91.21%, and the transmittance of 1 550.4 nm and 1 553.6 nm in the "off" state are 1.58% and 0.51%, respectively. It can be calculated that the total insertion loss is less than 0.89 dB, the extinction ratio is greater than 17 dB, the modulation depth is greater than 0.98, and the channel crosstalk values are all less than -23 dB, which indicates the modulation and wavelength division of the device has good performance. Compared to previous research results, it is no longer a single-function device. Compared to other integrated devices proposed in table 2, the wavelength interval of the integrated device proposed in this paper is smaller, and the modulation voltage is also lower, only 1.25 V. In addition, the structure size of the integrated device is smaller, which is beneficial to large-scale on-chip integration.

In conclusion, an integrated device based on photonic crystal one-dimensional nanobeam cavity electro-optical modulator and wavelength division multiplexer is proposed, which realizes "on" and "off" state modulation and wavelength downloading at 1 550.4 nm and 1 553.6 nm. The insertion loss of the device at the working wavelengths of 1 550.4 nm and 1 553.6 nm are 0.89 dB and 0.40 dB, respectively. The extinction ratio is 17.13 dB and 22.52 dB. The modulation depth is 0.98 and 0.99 and the channel crosstalk is -24.20 dB and -23.37 dB, respectively. The footprint is $71.34 \mu\text{m} \times 7.8 \mu\text{m} \times 0.22 \mu\text{m}$. The integrated device has large modulation depth, low insertion loss, high extinction ratio and low channel crosstalk. It also has a compact structure and is easy to be integrated, which can be used in optical inter-connected networks and data centers.

Key words: Photonic crystal; Nanobeam cavity; Nanowire waveguides; Electro-optic modulators; Wavelength division multiplexers

OCIS Codes: 060.4080; 060.4250; 060.4510