

基于光子晶体 WM 腔和纳米线波导的电光调制与模分复用集成器件

李琦¹, 陈鹤鸣^{2*}

(1. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学 贝尔英才学院, 南京 210023)

摘要: 为了提高通信速率, 扩展信道容量, 提出了一种采用宽度调制(WM)谐振腔和纳米线波导将电光调制模块和模分复用器模块进行耦合的集成器件, 详细介绍了电光调制器模块和模分复用器模块的原理、结构设计和性能, 并采用 Lumerical 软件对该集成器件进行了仿真和容差分析。仿真结果表明: 该集成器件在工作波长为 1550 nm 时可以先进行电光调制, 再进行 TE₀ 模与 TE₁ 模复用; 2 种模式的插入损耗分别为 0.186 dB 和 0.18 dB, 消光比分别为 29.6 dB 和 24.5 dB, 信道串扰分别为 -49.57 dB 和 -49.12 dB, 调制深度均为 0.999。

关键词: 宽度调制; 电光调制; 模分复用; 光子晶体; 纳米线波导

中图分类号: TN256 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)06-0010-08

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Electro-optic modulation and mode division multiplexing integrated device based on photonic crystal WM cavity and nanowire waveguide

LI Qi¹, CHEN Heming^{2*}

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

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

Abstract: In order to improve the communication rate and expand the channel capacity, an integrated device using width modulation(WM) resonator and nanowire waveguide is proposed to couple the electro-optical modulation module and the mode division multiplexer module. The principle, structure design and performance of the electro-optical modulation module and the mode division multiplexer module are introduced in detail. The Lumerical software is used for simulation and tolerance analysis. The simulation results show that when the working wavelength of the integrated device is 1550 nm, the electro-optical modulation can be performed first, and then the TE₀ mode and TE₁ mode can be multiplexed. The insertion loss of the two modes is 0.186 dB and 0.18 dB respectively, the extinction ratio is 29.6 dB and 24.5 dB respectively, the channel crosstalk is -49.57 dB and -49.12 dB respectively, and the modulation depth is 0.999.

Key words: width modulation electron-optic modulation, mode division multiplexing, photonic crystal, nanowire waveguide

0 引言

硅基光电子集成技术采用互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺, 把光子器件和光电子器件集成在由

收稿日期: 2022-02-22。

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

作者简介: 李琦(1997—), 男, 硕士研究生, 现就读于南京邮电大学电子与光学工程学院光学工程专业, 主要研究方向为基于光子晶体的电光调制与硅基波导模分复用集成器件, 参与了国家自然科学基金项目“高速光纤波分—模分混合复用传输系统复用/解复用器研究”的研究工作。

*** 通信作者:** 陈鹤鸣(1958—), 男, 二级教授, 主要研究方向为光纤通信与光波技术、光通信与光信息处理。



硅材料作为衬底的芯片上, 具有低功耗、高集成度和高可靠度等突出优势, 是实现电光调制器与模分复用器小型化、光通信系统集成化的最佳途径^[1-2]。

电光调制器是光通信系统的核心器件之一, 主要包括基于 PN 结或 PIN 自由载流子色散效应的硅基电光调制器^[3]、硅有机物聚合物电光调制器^[4]、基于载波损耗效应的调制器^[5]和基于电光效应的铌酸锂电光调制器^[6]。这些器件的缺点是体积和插入损耗较大。2018 年, JAVID M 等人^[7]提出了基于一维光子晶体纳米梁腔的混合等离子体电光调制器, 整个器件尺寸仅为 3.6 μm², 虽然比上述电光调制器的体积小, 但其插入损耗同样较大, 达到了 1.14 dB。

模分复用器作为模分复用系统中的关键器件,主要分为多模干涉型^[8]、绝热耦合型^[9]、Y 结型^[10]、非对称定向耦合型^[11]、锥形定向耦合型^[12]和光栅辅助反向耦合型^[13]。2020 年,XIE H 等人^[14]设计了一款基于像素化波导的模分复用器,该器件可以承受一定的制造容差和温度变化,但与前几种模分复用器类似,同样存在插入损耗较大的问题(约为 1.5 dB)。

在光通信系统集成技术研究方面,一些学者做了大量的有益尝试。2016 年,KODAMA Y 等人^[15]设计了一款用于模分复用的铌酸锂集成光调制器,将 2 个马赫-曾德尔型调制器和模分复用器组成的双模式多路复用调制器集成在单个铌酸锂芯片上,模式串扰小于 -20 dB,但消光比高于 20 dB,且器件整体尺寸长度约为 1500 μm 。2018 年,DU J B 等人^[16]设计了带有阵列光栅耦合器的用于空分复用光互连的四通道硅微环调制器,可以将输入光分束后分别进行调制和复用,但消光比为 16 dB,插入损耗高达 22 dB。同年,WU X R 等人^[17]设计了一款硅基微环调制和模分复用集成器件,在 1551.52 nm 波长下实现了三模式的电光调制及模分复用功能,但插入损耗和信道串扰较大,分别为 13.2 dB 和 -24.1 dB。2020 年,WANG J Q 等人^[18]设计了基于石墨烯的电光调制与模分复用集成器件,在 1550 nm 波长下实现了两模式的调制与复用功能,插入损耗小于 0.6 dB,调制电压为 8.16 V,但调制器尺寸较大,长度为 700 μm 。同年,项彤等人^[19]设计了一种硅基电光调制模分复用集成器件,该集成器件在 1553.91 nm 波长下可以实现两模式调制和复用功能,插入损耗为 0.46 dB,消光比为 19.73 dB,信道串扰仅低于 -14.66 dB,但消光比和信道串扰仍需改进。

针对上述光电调制器的不足,本文提出一种基于光子晶体宽度调制(WM)型谐振腔(下文简称 WM 腔)和纳米线波导的电光调制与模分复用集成器件,不仅提高了消光比和信道串扰,还能在 1550 nm 波长下实现 TE_0 模和 TE_1 模的调制与复用功能。

1 理论模型与原理分析

1.1 硅基光子晶体电光调制模块原理

本文设计的基于 WM 腔和纳米线波导的电光调制与模分复用集成器件分别由硅基光子晶体电光调制器模块和纳米线波导模分复用器模块构成。其中,光子晶体电光调制器采用了经过改进的 WM 腔,属于点腔,与通过去除一排空气孔所得到的光子晶体波导构成侧耦合结构,理论模型如图 1 所示。入射光波从光

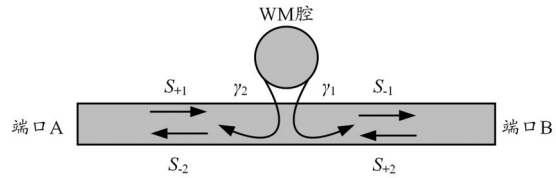


图 1 侧耦合型结构理论模型图

子晶体波导左侧的端口 A 输入,经过 WM 腔的作用,最终从光子晶体波导右侧的端口 B 输出。

本文根据时域耦合模理论推导侧耦合型结构的时域耦合模方程。图 1 中, S_1 、 S_2 为输入波幅值, S_{+1} 、 S_{+2} 为输出波幅值, γ_1 、 γ_2 为谐振腔与波导耦合产生损耗时的幅值耦合衰减系数,谐振腔的谐振频率为 ω_0 ,谐振模式的振幅为 α 。于是,得到时域耦合模方程^[20]如下:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -i\omega_0 \alpha - \gamma_1 \alpha - \gamma_2 \alpha + x_l S_{+1} + x_2 S_{+2} \quad (1)$$

$$S_{+l} = y_l S_l + z_l \alpha \quad (2)$$

其中, $l=1,2$, x_l 和 z_l 分别为波导到谐振腔和谐振腔到波导的耦合系数, y_l 为波导内部的耦合系数,且耦合系数 x_l 、 y_l 和 z_l 都是未知量,但均可以通过能量守恒定律和时间反演对称性消去,最终式(1)和式(2)中仅保留谐振频率 ω_0 和幅值耦合衰减系数 γ_l 。取 $z_l = -\sqrt{2\gamma_l}$,再利用时间反演对称性求解得其耦合系数 $y_l=1$, $x_l=\sqrt{2\gamma_l}$ 。此时,图 1 所示的侧耦合结构的时域耦合模方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -i\omega_0 \alpha - (\gamma_1 + \gamma_2) \alpha + \sqrt{2\gamma_1} S_{+1} + \sqrt{2\gamma_2} S_{+2} \quad (3)$$

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

由式(3)和式(4)可以求解其理论透射率谱 $T(\omega)$,它是关于频率 ω 的函数。令 $S_{+1}=1$, $S_{+2}=0$,即光波仅从端口 A 输入,并且 $\frac{\partial \alpha}{\partial t} = -i\omega_0 \alpha$;令 $\gamma_1=\gamma_2=\gamma$,代入式(3)

和式(4)可求得侧耦合结构的透射率谱 $T(\omega)$ 为

$$T(\omega) = \left| \frac{S_2}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{(\omega - \omega_0)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + 4\gamma^2} \quad (5)$$

该电光调制模块采用 PN 结掺杂结构,基于等离子体色散效应(当半导体材料中有载流子注入或者抽出时,将会改变半导体材料的自由载流子浓度,从而改变半导体材料的有效折射率和吸收系数)来控制光波的通断。当电光调制模块的工作波长为 1550 nm 时,硅基材料的单位长度吸收系数变化量 $\Delta\alpha_c$ 和有效折射率变化量 Δn 的对应关系式^[21]为

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

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

其中, ΔN_e 和 ΔN_h 分别为电子和空穴浓度的变化量。由式(6)和式(7)可以推断出,随着载流子浓度的增大,单位长度吸收系数将逐渐增大,而折射率将逐渐减小。

本文设计的电光调制器在不施加调制电压时,若从端口 A 处入射光的波长 λ 与 WM 腔的谐振波长 λ_0 一致,即 $\lambda=\lambda_0$,光波将被束缚在 WM 腔内,端口 B 处谐振波长的透射率可以达到最低,接近于 0,相当于电光调制器处于“断”状态;当电光调制器两端加上调制电压,空穴浓度和电子浓度将会发生变化,引起硅基材料的有效折射率发生变化,从而导致 WM 腔的谐振波长发生改变,此时从端口 A 处入射光的波长与 WM 腔的谐振波长不一致,即 $\lambda \neq \lambda_0$,端口 B 的透射率可以达到最高,接近于 1,相当于电光调制器处于“通”状态。因此,可以通过是否施加电压,达到通断调制的目的。

1.2 纳米线波导模分复用模块原理

模分复用模块采用了由单模波导和多模波导构成的非对称定向耦合型模分复用模块,其理论模型如图 2 所示。

根据横向耦合模理论,2 个耦合模的线性微分方程^[22]可以表示为

$$\frac{dA_1(Z)}{dZ} = -j\beta_1 A_1(Z) + jcA_2 \quad (8)$$

$$\frac{dA_2(Z)}{dZ} = -j\beta_2 A_2(Z) + jcA_1 \quad (9)$$

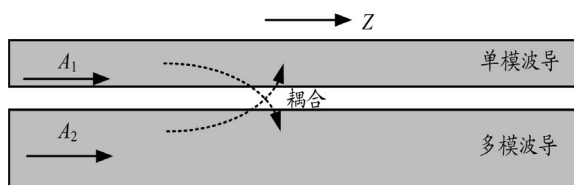


图 2 非对称定向耦合型理论模型图

其中, Z 为光波的传播方向, A_1 、 A_2 分别为单模波导、多模波导中传输的光波振幅, β_1 、 β_2 分别为单模波导与多模波导中的传播常数, c 是单模波导与多模波导之间的耦合系数且为常数。引入边界条件,当 $Z=0$ 时, $A_1(0)=1$, $A_2(0)=0$ 。经推导,可以得出耦合功率方程为

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

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

其中, P_1 、 P_2 分别为单模波导中基模、多模波导中一阶模的功率,相位匹配因子 $Q = \frac{2c}{\beta_1 - \beta_2}$ 。当 $Q=\infty$,即 $\beta_1=\beta_2$

时,2 个波导中光波的振幅可以表示为

$$A_1(Z) = \cos(cZ) \quad (12)$$

$$A_2(Z) = \sin(cZ) \quad (13)$$

由式(12)和式(13)可知,当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时,传输功率在单模波导和多模波导之间能够完全周期性耦合。为了使得耦合效率达到最高,需要选择合适的波导耦合长度。

2 结构设计与性能

2.1 硅基光子晶体电光调制模块设计

本文提出的基于 WM 腔的光子晶体电光调制器结构如图 3 所示。光子晶体空气孔的晶格常数 $a=415 \text{ nm}$,半径 $r=128 \text{ nm}$,腔内空气孔半径 $r_m=111.64 \text{ nm}$ 。在光子晶体结构中引入一条用于光波传输的线缺陷主波导 A,其宽度为 $1.05 \times \sqrt{3} a$ 。在主波导 A 的上方再引入一条线缺陷主波导 B,其宽度为 $0.98 \times \sqrt{3} a$ ^[23],同时引入了 WM 腔(通过将 3 种不同颜色空气孔的位置分别上下移动 5 nm、8 nm 和 11 nm 来形成腔体),与主

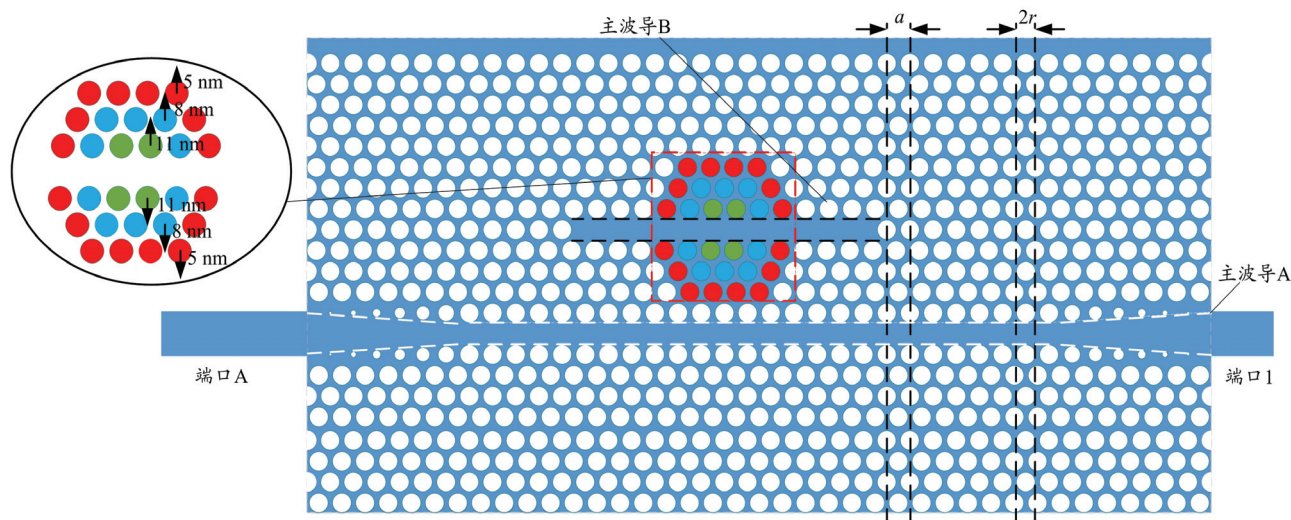


图 3 硅基光子晶体电光调制器结构示意图

波导 A 形成侧耦合结构。主波导 A 的左端引入同样为硅材料的纳米线波导用于输入光源。

硅基光子晶体电光调制器模块的电学掺杂结构图如图 4 所示。本文采用倾斜掺杂的方式形成 PN 结,其中 P⁺型区、P 型区、N⁺型区和 N 型区的掺杂浓度分别为 $8.5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 、 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 、 $7.8 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ 和 $1.8 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 。采用 Lumerical 中的 Device 模块进行分析,当施加电压为 1.37 V 时,电子浓度的变化量 ΔN_e 可以达到 $3.6 \times 10^{18}/\text{cm}^3$,空穴浓度变化量 ΔN_h 为 $4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 。将电子浓度变化量和空穴浓度变化量代入式(7)可知,此时硅基平板的折射率变化量为 0.01,可以对波长为 1550 nm 的光波实现“通”状态调制。

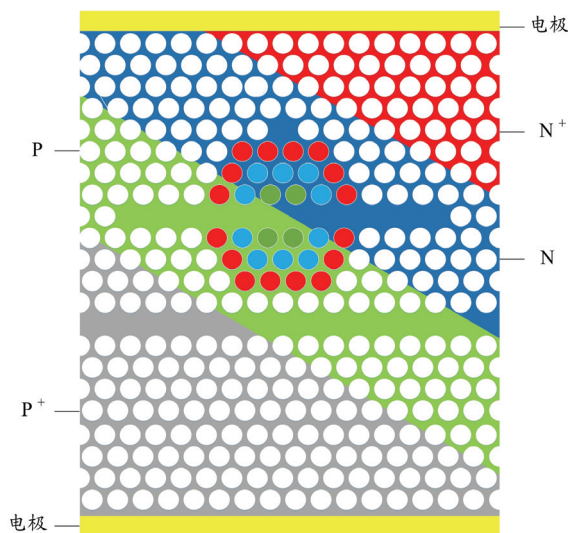


图4 硅基光子晶体电光调制器电学掺杂结构图

2.2 纳米线波导模分复用模块设计

图5是基于纳米线波导的两模式模分复用器结构图。当波长为 1550 nm 的 TE₀ 模从端口 1 输入时,TE₀ 模会在模式转换区从单模波导耦合至多模波导中,并转换成 TE₁ 模;当波长为 1550 nm 的 TE₀ 模从端口 2 输入时,仍然以 TE₀ 模的形式在多模波导中传输,仅仅是模场的横向分布随着波导宽度的增加而展开,而不会在模式转换区与单模波导中的 TE₀ 模发生耦合。最终,在端口 3 处将输出 TE₀ 模、TE₁ 模的光束完成了复用。图6为纳米线波导有效折射率随波导宽度变

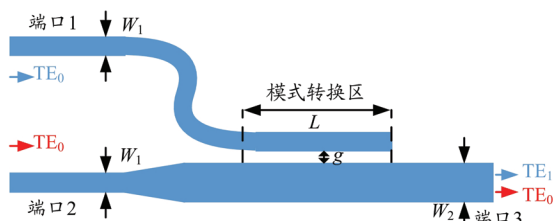


图5 两模式复用结构示意图

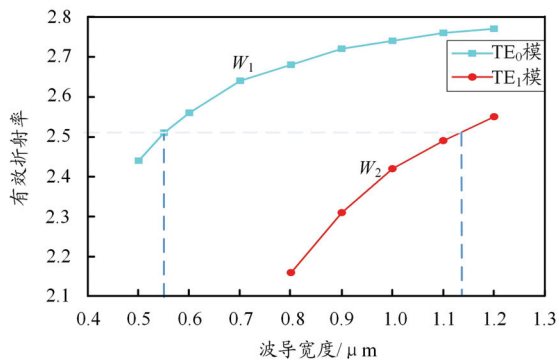


图6 纳米线波导有效折射率随波导宽度变化曲线图

化曲线图。当单模波导的宽度 W_1 为 $0.55 \mu\text{m}$ 时,TE₀ 模的有效折射率为 2.51;多模波导的宽度 W_2 为 $1.13 \mu\text{m}$ 时,TE₁ 模的有效折射率为 2.51。此时,2 个波导中的不同模式满足了有效折射率匹配条件,因此可以实现模式转换。为了满足单模波导中 TE₀ 模和多模波导中 TE₁ 模之间的高效耦合转换,同时减小耦合拍长和非目标模式之间的耦合串扰,需要设置合适的耦合间距 g 以及耦合长度 L ^[24]。图7是波长为 1550 nm 时耦合效率随不同耦合间距 g 与耦合长度 L 变化的关系图。可以看出,当波导耦合间距 g 为 100 nm、耦合长度 L 为 $29 \mu\text{m}$ 时,耦合效率达到最高。然后,固定耦合间距为 100 nm,耦合长度为 28~30 μm ,以 $0.1 \mu\text{m}$ 为步长进行优化,结果如图8所示,当耦合长度 L 为 $28.6 \mu\text{m}$ 时,耦合效率能达到 99.22%。

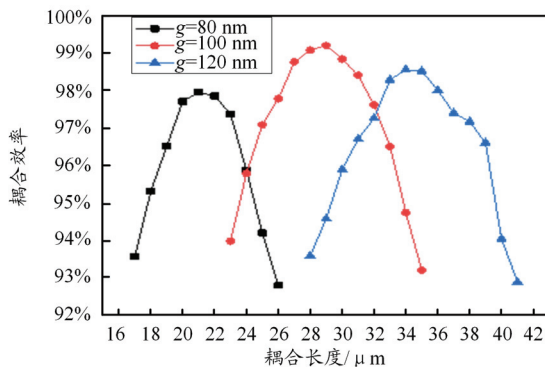


图7 不同耦合间距下耦合效率随耦合长度变化关系图

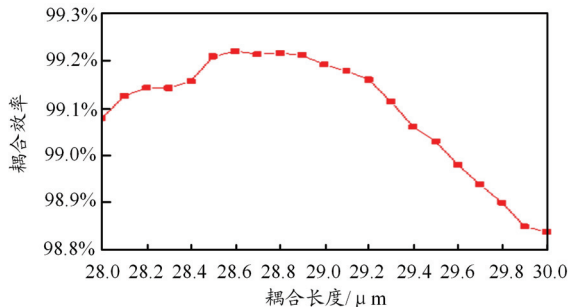


图8 耦合效率随耦合长度变化关系图

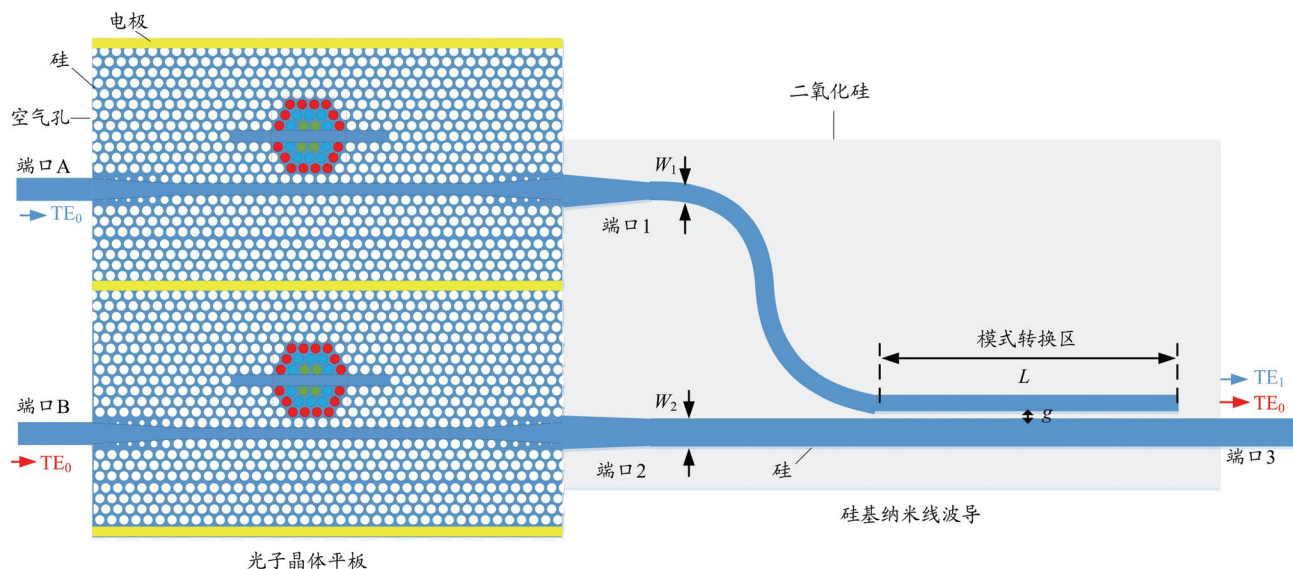


图9 电光调制与模分复用集成器件结构图

2.3 电光调制器与模分复用器级联模块

图9是电光调制和模分复用集成器件结构图。整个集成器件采用了三角晶格圆形空气孔型光子晶体平板(包含WM微腔部分和光子晶体波导)和硅基纳米线波导。光子晶体平板部分为空气桥结构,即平板上下包层为空气。光子晶体波导的厚度与纳米线波导的厚度一样,均为220 nm。光子晶体波导和纳米线波导的材料均为硅,其在1550 nm光波段的折射率为3.47。纳米线波导的衬底材料为二氧化硅,厚度为4.2 μm,其对应的折射率为1.44。铝作为电极分别加在WM腔的两侧,中间电极接负极,两侧电极接正极。

由于纳米线波导(与电光调制器输入、输出端口相连接的)、光子晶体波导分别基于全内反射效应、禁带效应的导光机制,光波在这2种波导中的传播常数不同,因此两者进行级联会出现模式失配的情况,将产生一定的散射损耗^[25]。为了尽可能地减小散射损耗对电光调制器带来的性能影响,本文在纳米线波导与光子晶体波导的连接处引入了空气孔锥形波导结构,如图10所示。

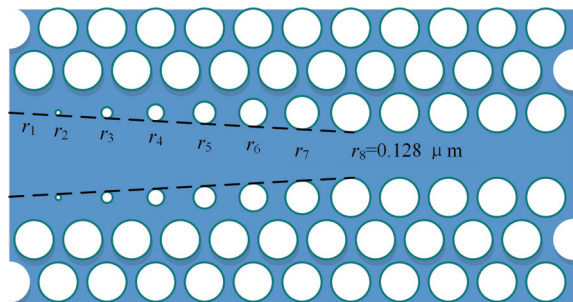


图10 空气孔锥形波导结构示意图

设锥形结构中空气孔的半径为 r_n , n 为锥形结构中空气孔的编号。 r_n 与 r 满足关系式: $r_n = \frac{r}{N}(n-1)$,且 $n \leq N+1$ 。其中, N 为锥形结构中一侧采用的空气孔总数。例如,当 $N=7$ 时,纳米线波导与光子晶体波导连接处的第一个空气孔半径 $r_1=0$ nm,第二个空气孔半径 $r_2=18$ nm,以此类推,直到 $n=N+1=8$ 时, $r_8=128$ nm,即锥形结构中最后一个空气孔半径与原光子晶体空气孔半径相等。锥形结构另一侧空气孔半径的计算方法相同。本文利用三维时域有限差分法(3D-FDTD)对采用了不同空气孔总数的锥形波导结构分别计算其在波长为1540~1560 nm的光源下调制器输出端的透射率,得出具有最优透射率的锥形波导结构。当 N 分别取2~13(共12个整数值)时,电光调制器在“通”状态下的输出端透射率的仿真结果如图11所示。可以看出,当锥形波导结构中一侧的空气孔的个数 $N=10$ 时,所设计的电光调制器输出端口的透射率最优,此时在

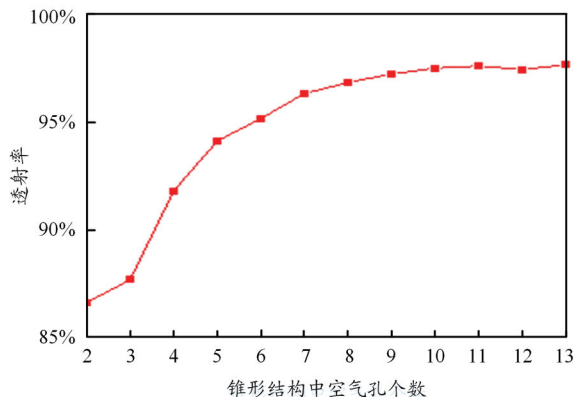


图11 锥形波导中空气孔个数与透射率关系图

“通”状态下 1550 nm 处的光波透射率可达 97.52%。当 $N>10$ 时,虽然器件也具有较高的透射率,但是与 $N=10$ 时相比,在输入端口和输出端口都另增加了锥形波导中空气孔个数,将导致器件尺寸增加。综合考虑,本文设计的电光调制器采用 $N=10$ 的锥形波导结构来级联光子晶体线缺陷波导和纳米线波导。

电光调制器与模分复用器级联后,电光调制器的谐振波长会出现红移现象,此时只需要重新调整谐振腔内空气孔的半径即可。最终电光调制与模分复用集成器件的参数为:2 个调制器的光子晶体波导的晶格常数 $a=415$ nm,腔外空气孔半径 $r=128$ nm,上侧电光调制器腔内空气孔半径 $r_{up}=112.47$ nm,下侧电光调制器腔内空气孔半径为 $r_{down}=112.49$ nm,上下两侧电光调制器的腔内空气孔均按照图颜色不同分别上下移动了 5 nm、8 nm 和 11 nm。光子晶体波导的宽度均为 $1.05 \times \sqrt{3} a$,腔内窄波导的宽度均为 $0.98 \times \sqrt{3} a$ 。模分复用器模块中单模波导宽度为 $0.55 \mu\text{m}$,多模波导宽度为 $1.13 \mu\text{m}$,2 个波导之间的间隔为 $0.1 \mu\text{m}$,耦合长度为 $28.6 \mu\text{m}$ 。

3 性能仿真

本文采用 Lumerical 仿真软件中的三维时域有限差分法(3D-FDTD) [26-28] 分析所提集成器件的调制电压、插入损耗、消光比、调制深度、信道串扰和调制速率。当不施加调制电压时,此时电光调制器处于“断”状态,稳态场分布如图 12(a)和图 12(b)所示;当施加调

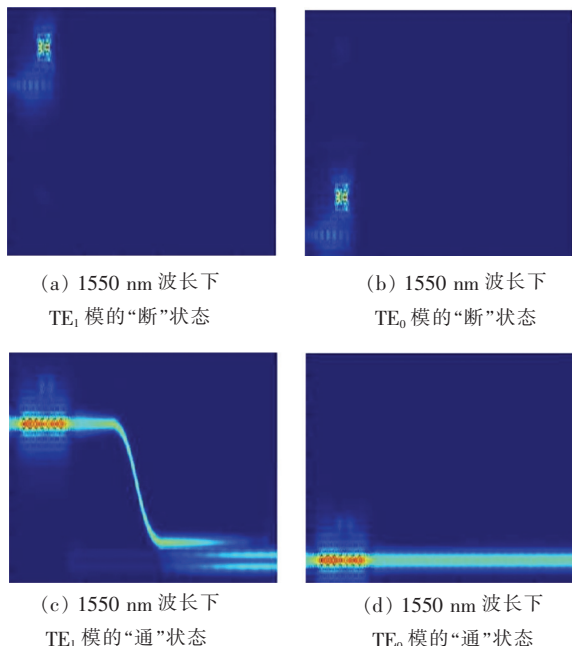
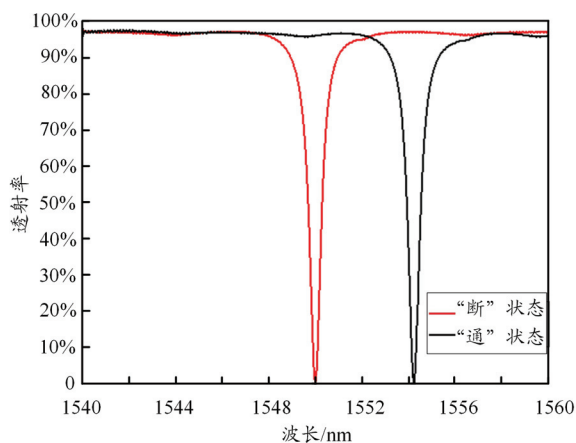


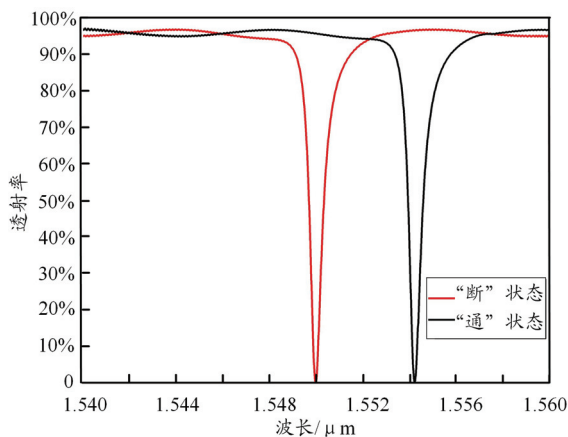
图 12 集成器件的稳态场分布图

制电压时,结合图 9 可知,波长为 1550 nm 的光波分别从端口 A 和端口 B 入射后,从端口 3 输出。其中从端口 A 入射的波长为 1550 nm 的光波经过模式转换,即从 TE₀ 模转化 TE₁ 模后,从端口 3 输出;从端口 B 入射的波长为 1550 nm 的光波不需要经过模式转换,仍以 TE₀ 模形式从端口 3 输出,此时电光调制器处于“通”状态。稳态场分布如图 12(c)和图 12(d)所示。

集成器件的透射谱如图 13 所示。可以看出,在 1550 nm 处,进行模式转换(TE₁ 模调制)的光路在“通”状态和“断”状态的透射率分别为 95.81%和 0.34%;而未进行模式转换(TE₀ 模调制)的光路在“通”状态和“断”状态的透射率分别为 95.95%和 0.11%。



(a) 1550 nm 的 TE₁ 模调制状态分别为“通”和“断”



(b) 1550 nm 的 TE₀ 模调制状态分别为“通”和“断”

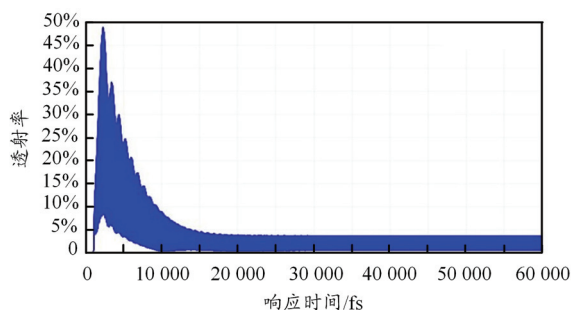
图 13 集成器件的透射谱图

本文提出的集成器件的插入损耗、消光比、调制深度、信道串扰和调制速率值如表 1 所示。可以看出,插入损耗最大值为 0.186 dB,最小值为 0.18 dB。集成器件的插入损耗分别来源于以下几部分:输入硅基纳米线波导与光子晶体波导连接处的反射损耗(0.036 dB 和 0.036 dB)、电光调制器中的损耗(0.065 dB 和 0.024 dB)、

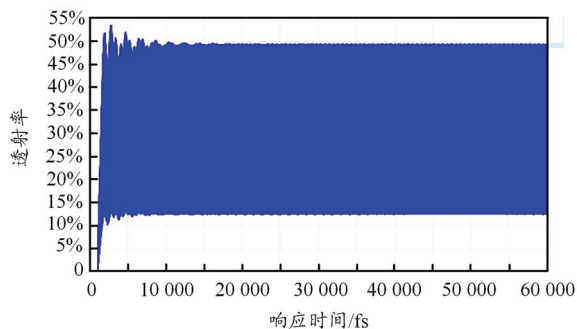
表 1 集成器件在 1550 nm 波长下不同模式的性能参数

模式	插入损耗 /dB	消光比 /dB	调制 深度	信道串扰/dB		调制速率 /(Gb·s ⁻¹)
				端口 A	端口 B	
TE ₀	0.186	29.6	0.999	-49.57	—	—
TE ₁	0.18	24.5	0.999	—	-49.12	36.4

输出纳米线波导与模分复用器连接处损耗 (0.065 dB 和 0.024 dB) 以及模分复用器中损耗 (0.02 dB 和 0.096 dB)。消光比均大于 24 dB, 调制深度均为 0.999, 信道串扰均低于 -49 dB, 调制速率为 36.4 Gb/s。该集成器件在“断”状态和“通”状态下的响应时间分别如图 14 所示, 集成器件的“通”状态和“断”状态稳定所需的响应时间均为 25 000 fs。此外, 集成器件采用的硅材料响应时间为 30 000 fs, 因此整个集成器件的响应时间为 55 000 fs。本文将参考文献中的器件与本文设计的集成器件进行对比, 结果如表 2 所示。可以看出, 本文设计的集成器件性能优良。



(a) “断”状态稳定时间



(b) “通”状态稳定时间

图 14 集成器件状态稳定时间图

4 容差分析

器件加工过程中, 实际成品参数与仿真设计参数间会存在一些误差, 从而影响器件的理想性能。因此, 本文采用 FDTD 模块对器件的加工误差进行仿真分析, 调整一些重要设计参数来研究分析器件性能的变化, 得出器件在保持一定性能的情况下可容纳的误差范围。

表 2 其它器件与本文集成器件性能对比情况

器件	插入损耗 /dB	消光比 /dB	信道串扰 /dB	调制速率 /(Gb·s ⁻¹)	尺寸
文献[5]	6	6.6	—	40	—
文献[7]	1.14	10.9	—	224	3.6 μm ²
文献[8]	0.5	—	-20	—	42 μm×3 μm
文献[12]	0.3	—	-16	—	—
文献[15]	—	20	-20	400	—
文献[16]	22	16	—	100	0.45 μm ²
文献[19]	0.46	19.73	-14.66	—	54 μm×22 μm
文献[20]	2	—	-25	—	—
文献[23]	0.8	—	—	—	—
本文	0.18	29.6	-49.57	36.4	56 μm×21 μm

4.1 光子晶体空气孔半径

集成器件的插入损耗和消光比随光子晶体空气孔半径的变化关系图如图 15 所示。由于光子晶体空气孔半径的变化, 导致光子禁带范围的变化, 从而影响了器件插入损耗和消光比的变化。因此, 光子晶体空气孔半径在器件加工过程中精度要求很高。本文设计的集成器件中光子晶体的空气孔半径为 128 nm, 空气孔半径的变化量在 -5~+2 nm 时, 集成器件的性能依旧良好, 透射率依然大于 90%。

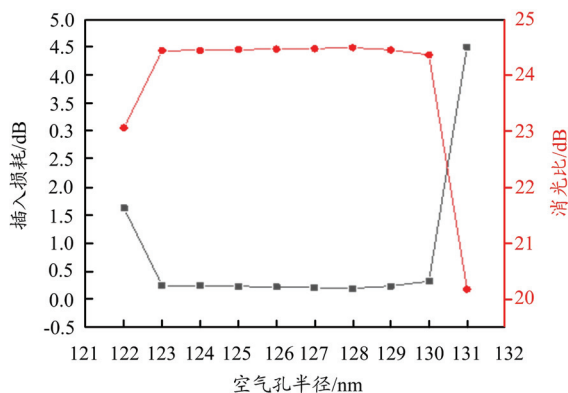
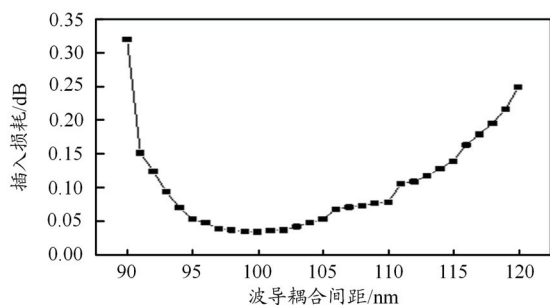


图 15 集成器件插入损耗和消光比与空气孔半径变化关系图

4.2 波导耦合间距

本文设计的集成器件中单模波导与多模波导之间的间距均为 100 nm, 在固定耦合长度为 28.6 μm 的情况下, 研究光子晶体波导与纳米线波导耦合间距与插入损耗的关系, 如图 16 所示。当波导耦合间距 g 的变化量在 -9~+19 nm 之间时, 器件的插入损耗较低 (低于 0.25 dB), 耦合效率大于 95%。

图 16 插入损耗与波导耦合间距 g 变化的关系图

5 结束语

本文提出了一种基于光子晶体 WM 腔和纳米线波导的电光调制与模分复用集成器件, 器件由光子晶体 WM 腔和纳米线波导耦合而成。通过调节光子晶体谐振腔中空气孔半径大小和纳米线波导的宽度, 可以分别实现调制和模分复用的功能; 在电光调制器的输入端和输出端采用了锥形波导结构来减小光子晶体波导和纳米线波导连接处的耦合损耗, 从而提高透射率。该集成器件能够实现工作波长为 1550 nm 的光波调制和复用, 器件功能丰富, 插入损耗低, 消光比大, 调制深度高和信道串扰小, 易于集成, 可应用于高速大容量光通信系统中。

参考文献:

- [1] 周培基, 李智勇, 俞育德, 等. 硅基光子集成研究进展[J]. 物理学报, 2014(10): 5-12.
- [2] 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] LIU A, LIAO L, RUBIN D, et al. High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide[J]. Optics Express, 2007, 18(2): 660-668.
- [4] ALLOATTI L, KORN D, PALMER R, et al. 42.7 Gbit/s electro-optic modulator in silicon technology[J]. Optics Express, 2011, 19(12): 11841-11851.
- [5] ZIEBELL M, MARRIS-MORINI D, RASIGADE G, et al. 40 Gbit/s low-loss silicon optical modulator based on a p-i-n diode [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 10591-10596.
- [6] TERLEVICH L, BALSAMO S, PENSA S, et al. Design and characterization of a 10-Gb/s dual-drive Z-cut Ti: LiNbO₃ electro-optical modulator [J]. Journal of lightwave technology, 2006, 24(6): 2355-2361.
- [7] JAVID M, MIRI M, ZARIFKAR A. Design of a compact high-speed optical modulator based on a hybrid plasmonic nanobeam cavity [J]. Optics Communications, 2018, 410: 652-659.
- [8] EL-SABBAN S, KHALIL D. Compact Si photonic multimode interference-based optical circuit for mode division multiplexing applications [J]. Optical Engineering, 2016, 55(7): 076102-1-076102-7.

- [9] 陈欣, 孟伟, 楼慈波. 绝热耦合超对称光波导结构[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 352-357.
- [10] NICOLAS R, JOHN D L. Design of mode-sorting asymmetric Y-junctions[J]. Applied Optics, 2012, 51(15): 2778-2783.
- [11] 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.
- [12] DING Y, XU J, DA R F, et al. On-chip two-mode division multiplexing using tapered directional coupler-based mode multiplexer and demultiplexer [J]. Optics Express, 2013, 21(8): 10376-10382.
- [13] NAWWAR O M, SHALABY 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.
- [14] XIE H, LIU Y, WANG S, et al. Highly compact and efficient four-mode multiplexer based on pixelated waveguides[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(3): 166-169.
- [15] KODAMA Y, YAMAGUCHI Y, KANNO A, et al. Mode-division multiplexing LiNbO₃ modulator using directional coupler [EB/OL]. [2022-02-22]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7718305>.
- [16] DU J B, ZHENG L, KE X, et al. High speed and small footprint silicon micro-ring modulator assembly for space-division-multiplexed 100-Gbps optical interconnection[J]. Optics Express, 2018, 26(11): 13721-13729.
- [17] WU X R, HUANG C R, XU K, et al. 3 × 104 Gb/s single-λ interconnect of mode-division multiplexed network with a multicore fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(2): 318-324.
- [18] WANG J Q, ZHANG X Y, CHEN Y Z, et al. Design of a graphene-based silicon nitride multimode waveguide-integrated electro-optic modulator[J]. Optics Communications, 2021, 481: 126531-1-126531-11.
- [19] 项彤, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 硅基电光调制与模分复用集成器件[J]. 中国激光. 2021, 48(11): 137-148.
- [20] 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: Lasers and Optics. 2019, 125(1): 12.1-12.9.
- [21] 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): 61-70.
- [22] 季珂, 陈鹤鸣. 光子晶体粗波分 - 模分混合复用 / 解复用器[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(1): 50-59.
- [23] OOKA Y, TETSUMOTO T, FUSHIMI A, et al. CMOS compatible high-Q photonic crystal nanocavity fabricated with photolithography on silicon photonic platform [EB/OL]. [2022-02-22]. <https://www.nature.com/articles/srep11312>.
- [24] 庄煜阳. 基于光子晶体和纳米线波导的波分—模分混合复用 / 解复用集成器件研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [25] 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.
- [26] TAFLOVE A, HAGNESS S. The finite-difference time-domain method [J]. Computational Electrodynamics, 2005, 5(15): 629-670.
- [27] ELSHERBENI A, DEMIR V. The finite difference time domain method for electromagnetics[M]. Boston: Scitech Pub, 2009.
- [28] SAITOH I, SUZUKI Y, TAKAHASHI N. The symplectic finite difference time domain method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(5): 3251-3254.