

## 光子晶体电光调制和粗波分复用集成器件研究

刘雪<sup>1</sup>, 陈鹤鸣<sup>2\*</sup>, 胡宇宸<sup>1</sup><sup>1</sup>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;<sup>2</sup>南京邮电大学贝尔英才学院, 江苏 南京 210023

**摘要** 提出了一种用于电光调制和粗波分复用的片上集成器件。该集成器件的电光调制器模块和粗波分复用器模块都是由硅基光子晶体波导和 L3 型谐振腔组成, 两个模块间采用硅基光子晶体波导连接。该器件根据等离子体色散效应, 采用 L3 型谐振腔和 PN 结实现了对波长的调制; 根据微腔与波导的直接耦合理论, 采用 L3 型谐振腔结构实现了滤波。利用基于三维时域有限差分法(3D-FDTD)的 Lumerical 软件对其进行仿真分析, 结果表明该集成器件在工作波长 1530 nm 和 1550 nm 下均可以先完成各自的电光调制再进行双通道波长的复用。该器件在工作波长 1530 nm 和 1550 nm 下的插入损耗分别为 0.70 dB 和 0.95 dB, 消光比分别为 20.97 dB 和 22.05 dB, 调制深度均为 0.99, 信道串扰分别为 -29.05 dB 和 -27.59 dB, 器件尺寸仅为 17.83  $\mu\text{m}$   $\times$  17.3  $\mu\text{m}$   $\times$  0.22  $\mu\text{m}$ 。该集成器件结构紧凑, 易于集成, 可应用于高速大容量波分复用光通信系统。

**关键词** 光通信; 粗波分复用; 电光调制器; L3 型谐振腔; 光子晶体

**中图分类号** TN256

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.0306002

## 1 引言

随着 5G 通信的到来, 人们对通信系统的容量和速度的需求日益增加, 而目前单元器件技术已基本成熟, 突破信息系统走向“高速率”、“低功耗”、“小尺寸”等瓶颈的必由之路是硅基光电子集成<sup>[1]</sup>。实现多种功能器件的系统集成已逐渐成为目前所关注的热点问题。硅基光电子集成是通过互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺, 在基于硅材料的衬底上, 将光子和光电子功能器件集成在同一个芯片上。硅基光电子具有封装成本低、尺寸小、集成度高等特性, 对未来信息技术的高速发展具有重大的研究意义。

电光调制器是光通信中的一个重要器件。近年来, 不少学者提出了不同结构的电光调制器, 如脊波导型调制器<sup>[2-3]</sup>、马赫-曾德尔型调制器<sup>[4-7]</sup>(MZM)、基于狭缝波导的聚合物型调制器<sup>[8]</sup>和光子晶体谐振腔(PCR)型调制器<sup>[9]</sup>等。2017 年 Daud 等<sup>[10]</sup>研究

设计出了高品质因数( $Q \sim 10^5$ )光子晶体谐振腔型电光调制器, 以微小的折射率差就可实现高达 GHz 量级的快速调制。但是脊波导型调制器和后三种调制器相比, 尺寸较大, 不利于集成。与基于狭缝波导的聚合物型调制器相比, 纯硅的 PCR 型调制器可以与标准的半导体工艺完美结合, 且制作成本更低<sup>[11]</sup>, 因此, 基于纯硅的 PCR 型调制器更适用于集成。

同样地, 波分复用器也在波分复用光通信中具有重要的地位。波分复用可以分为粗波分复用与密集波分复用, 两者之间最大的区别是波长间隔。粗波分复用的信道间隔是 20 nm, 而密集波分复用的信道间隔一般是 0.8 nm 或者 0.4 nm。目前也设计出许多不同结构的波分复用器, 如阵列波导光栅(AWG)型<sup>[12]</sup>、微环谐振腔(MRR)型<sup>[13-14]</sup>和 PCR<sup>[15-18]</sup>等。2018 年 Yang 等<sup>[19]</sup>提出了一种基于硅片集成八通道波分复用/解复用器的设计方案, 该解复用器由高 Q 值在  $10^5$  以上、自由光谱范围在

收稿日期: 2020-08-07; 修回日期: 2020-08-29; 录用日期: 2020-09-07

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

200 nm 以上平行排列的一维光子晶体纳米束腔组成。器件总尺寸大小仅为  $12\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 。从器件尺寸和自由光谱范围这两个方面考虑,PCR 型的波分复用器件因其尺寸小、自由光谱范围大,在硅基光电子器件集成领域更受欢迎。

综上所述,目前研究人员已提出多种结构的电光调制器和波分复用器,对这两类单一器件的研究日趋成熟,但对两者进行集成实现器件多种功能的研究却很少。本文提出一种基于光子晶体的电光调制和粗波分复用集成器件。该集成器件在工作波长 1530 nm 和 1550 nm 下都可以完成电光调制和双通道波长的复用,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,这对未来光子集成网络研究具有重要意义。

## 2 理论模型与原理分析

本文所提出的电光调制和粗波分复用集成器件的理论模型如图 1 所示。它由两个部分组成,包含光子晶体电光调制器模块和粗波分复用器模块。该集成器件是采用异质结构的光子晶体来实现电光调制模块的不同波长的“通”“断”状态调制和粗波分复用模块的不同波长的下载功能。两个模块均是采用 L3 型谐振腔来设计的。L3 型谐振腔是光子晶体微腔的一种,是通过在光子晶体平板中去除某一行的 3 个空气孔而形成的腔结构,L3 腔可以形成良好的光子局域。微调 L3 型谐振腔周围的空气孔,可以使腔的包络函数趋近于高斯函数,以降低腔能量的损耗。不同的是电光调制模块是采用 L3 型谐振腔(标记为圆圈)与光子晶体波导侧耦合的方式,而粗波分复用模块是采用直接耦合的方式。在无外加电

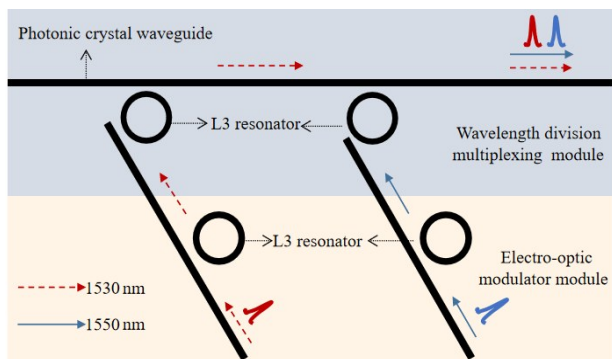


图 1 基于光子晶体的电光调制和粗波分复用的集成器件的理论模型

Fig. 1 Theoretical model of integrated device based on photonic crystal electro-optic modulation and coarse wavelength division multiplexing

压下,当入射光与调制模块的 L3 腔的谐振波长匹配时,入射光会被 L3 腔捕获,此时调制器处于“断”的状态。相反,在有外加电压下,当入射光与调制模块的 L3 腔的谐振波长失配时,入射光始终会沿着光子晶体波导输入到粗波分复用模块,此时调制器处于“通”的状态。经调制后的入射光再与粗波分复用模块 L3 腔的谐振波长进行匹配,此时入射光被 L3 腔捕获,并隧穿耦合至输出波导进行传输,实现了粗波分复用器的滤波功能。

电光调制模块的工作原理是等离子体色散效应,当工作波长在 1550 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<sup>[20]</sup>

$$\Delta\alpha_c = 8.5 \times 10^{-18} \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \Delta N_h, \quad (1)$$

$$\Delta n_c = -8.8 \times 10^{-22} \Delta N_e - 8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}, \quad (2)$$

式中: $\Delta\alpha_c$  为单位长度吸收系数的变化; $\Delta n_c$  为材料中折射率的变化; $\Delta N_h$ 、 $\Delta N_e$  分别为空穴和电子浓度变化(单位: $\text{cm}^{-3}$ )。由(1)式和(2)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。根据(2)式,可得到调制模块 L3 谐振腔中的载流子浓度变化量与折射率变化量的关系。

粗波分复用模块则是利用 L3 腔与波导直接耦合形成的滤波器,其理论模型如图 2 所示,图中  $S_{+i}$  表示谐振腔的输入波幅值, $S_{-i}$  表示谐振腔的输出波幅值, $\gamma_i$  表示幅值耦合衰减系数。光从下侧端口  $S_{+1}$  输入,经过谐振腔的作用后,从端口  $S_{-1}$  输出。图 2 中灰色区域表示的是光子晶体窄带波导结构,通过改变窄波导的宽度,可实现对入射光的反射。图 2(b)是图 2(a)简化后的理论模型图。由于结构具有对称性,令  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ 。此时,谐振腔中的谐振模振幅  $A$  的时域变化为<sup>[21]</sup>

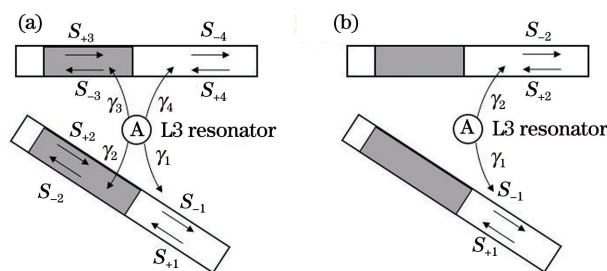


图 2 L3 型谐振腔-波导滤波器理论模型。(a)简化之前的模型;(b)简化之后的模型

Fig. 2 Theoretical model of L3 resonator-waveguide filter. (a) Model before simplifying; (b) simplified model

$$\frac{dA}{dt} = -i\omega_0 A - 2\gamma A + \sqrt{2\gamma}(S_{+1} + S_{+2}), \quad (3)$$

$$S_{-1} = -S_{+1} + \sqrt{2\gamma}A, \quad (4)$$

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

式中  $\omega_0$  为谐振腔的谐振频率。

当光仅从  $S_{+1}$  入射至  $S_{+2} = 0$  时, 联立 (3) ~ (5) 式可得

$$T(\omega) = \left| \frac{S_{-2}}{S_{+1}} \right|^2 = \frac{4\gamma^2}{(\omega - \omega_0)^2 + 4\gamma^2}. \quad (6)$$

经过上述分析可知, 当入射光的谐振频率与 L3 腔的谐振频率一致时, 通过调节窄波导的宽度就可实现良好的滤波功能。

### 3 结构设计与参数优化

基于光子晶体的电光调制和粗波分复用的集成器件的结构如图 3 所示。整个器件设计采用三角晶

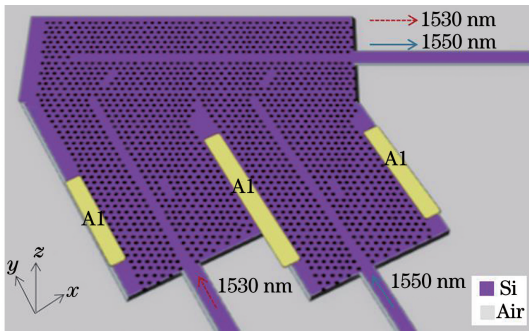


图 3 光子晶体的电光调制和粗波分复用的集成器件的结构  
Fig. 3 Structure of integrated device of photonic crystal electro-optic modulation and coarse wavelength division multiplexing

格圆形空气孔型的光子晶体平板和硅基纳米线波导, 其材料均为硅, 折射率为 3.4。为了方便器件级联, 提高集成器件的兼容性, 硅基纳米线波导的厚度和光子晶体平板的厚度一样, 均采用 220 nm。电极 (图 3 中标记为 A1 部分) 分别加在 L3 腔的两侧, 中间电极接负极, 两侧电极接正极。

#### 3.1 电光调制器模块

图 4(a) 是本文设计的电光调制器模块结构图, 图中采用光子晶体 L3 腔的设计, 并将去除一排空气孔的纳米线波导与 L3 腔相级联。此时, 光子晶体波导与 L3 腔的耦合方式是侧耦合, 相当于一个带阻型滤波器。光子晶体的晶格常数为 411 nm, 空气孔半径为  $r = 0.25a$ 。图中 L3 腔上下两个虚线黑色空气孔沿着箭头方向的位移大小为  $S = 0.15a$ , 通过调节这一距离可以进一步提高 L3 腔的本征品质因数。光子晶体波导的宽度为  $W_0 = \sqrt{3}a$ 。光从端口 A 输入, 从端口 B 输出。设 L3 腔的宽度为  $W_1$ , 通过沿着黑色箭头方向调节 L3 腔两侧的 8 个空气孔的位置 [图 4(a) 中标记为黑色实心圆圈] 来控制  $W_1$ 。当  $W_1$  取不同值时, L3 腔的谐振波长与反射率 [1-T(透射率)] 的变化如图 4(b) 所示, 从图中可以发现, 随着 L3 腔宽度的增加, 谐振波长向右偏移, 反射率增大。带阻型的滤波器反射率越大越好。但为了实现对 1530 nm 的光调制, 本研究采用  $W_1 = 0.972W_0$  的设计。

调制器模块的电学掺杂结构如图 5 所示。在调制器模块平行于波导的上下两侧施加电极 (上侧接负极, 下侧接正极), 采用倾斜掺杂形成 PN 结。其

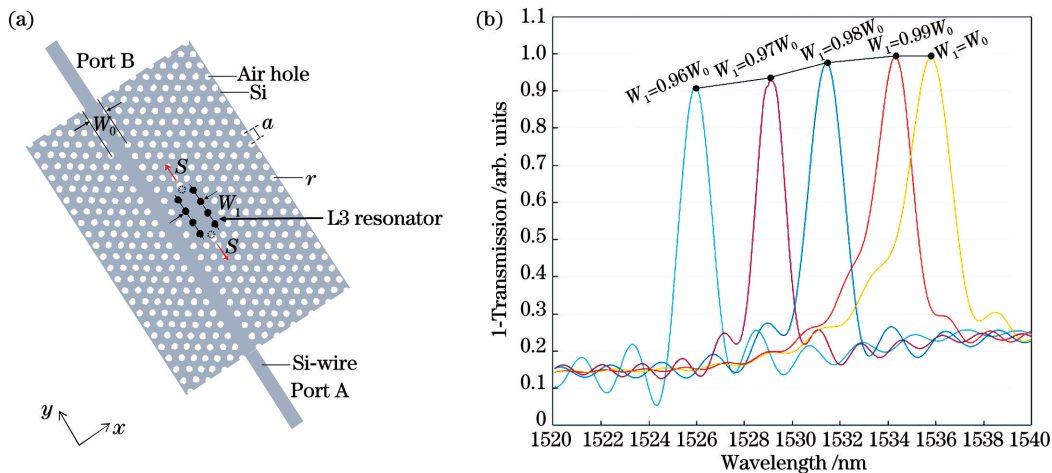


图 4 电光调制器模块的结构图和参数变化曲线图。(a)电光调制器结构示意图;(b)L3 腔的谐振波长与反射率随谐振腔宽度  $W_1$  的变化图

Fig. 4 Structure diagram and parameter change curves of electro-optic modulator module. (a)Schematic diagram of electro-optic modulator structure; (b) variation of the resonant wavelength and reflectivity of the L3 resonator with the resonator width  $W_1$

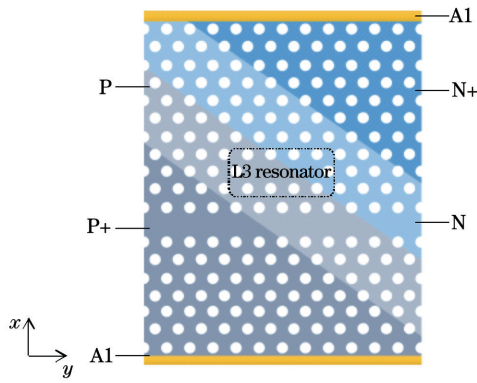


图 5 电光调制器掺杂结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of electro-optic modulator doping structure

中 P+ 型区掺杂浓度(粒子数分数,下同)为  $9.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , P 型区掺杂浓度为  $2.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , N+ 型区掺杂浓度为  $8.3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , N 型区掺杂浓度为  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。采用 Lumerical 中的 Device 模块进行分析,当驱动电压为 1.505 V 时,电子浓度变化量  $\Delta N_e$  达到  $6.31 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,空穴浓度变化量  $\Delta N_h$  达到  $7.94 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (图 6)。根据(2)式,可以发现此时硅基平板折射率变化量可以达到 0.015,实现了对 1530 nm 的“通”状态调制。图 7 是由 3D-FDTD 仿真得到的反射谱图[1-T(透射率)],从中可以看出:L3 腔在  $V=0$  时,对 1530 nm 的光进行反射,实现了“断”状态的调制;在  $V=1.505 \text{ V}$  时,谐振波长发生

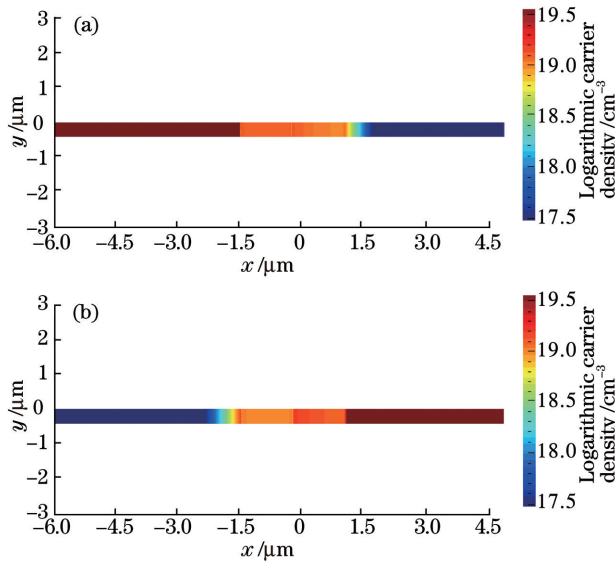


图 6 两端电压为 1.505 V 时载流子浓度分布图。

(a) P 型载流子浓度; (b) N 型载流子浓度

Fig. 6 Carrier density distributions diagram when the voltage across both ends is 1.505 V. (a) P-type carrier density; (b) N-type carrier density

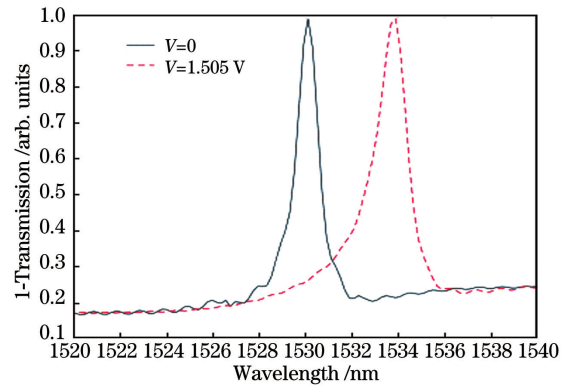


图 7 调制分别在  $V=1.505 \text{ V}$ “通”和  $V=0$ “断”状态下的反射谱图

Fig. 7 Modulation reflectance spectra under  $V=1.505 \text{ V}$  “on” and  $V=0$  “off” states

3.89 nm 偏移,此时不再对 1530 nm 的光进行反射,实现了“通”状态的调制。

### 3.2 粗波分复用器模块

粗波分复用器模块的本质是由多信道的滤波器组成。该模块采用两个晶格常数不同的异质结构光子晶体,分别实现波长为 1530 nm 和 1550 nm 的滤波功能,如图 8 所示,左侧部分滤波器过滤的波长为 1530 nm,其晶格常数、空气孔半径与前面提到的调制波长为 1530 nm 的电光调制器模块相同,均为  $a=411 \text{ nm}$ ,  $r=0.25a$ ; 同样地,右侧部分滤波器过滤的波长为 1550 nm,晶格常数和空气孔半径为  $a'=418.4 \text{ nm}$  和  $r'=0.25a'$ ,与其对应的波长为 1550 nm 的电光调制器参数相同。粗波分复用模块同样采用与电光调制器模块相同的 L3 型谐振腔设计,简化了器件设计的难度。不同的是,此时光子晶体波导与 L3 腔耦合的方式是直接耦合,相当于一个带通滤波器。由于 L3 腔所处的位置与电光调制器模块的 L3 腔不同,其谐振波长也有所不同。此时,只需调节图中 16 个空气孔(黑色实心圆圈标记)的位置,使 L3 腔的宽度  $W_3$  为  $0.954W_0$ ,  $W'_3$  为  $0.955W'_0$ ,使谐振波长分别为 1530 nm 和 1550 nm。入射光 1530 nm 和 1550 nm 分别从端口 A 和 B 输入,均从端口 C 输出。为了提高输出端口 C 的透射率,使用窄波导结构可实现对特定波长 1530 nm 和 1550 nm 的反射,因此本研究分别沿着箭头方向移动蓝色和黄色区域空气孔的位置,使  $W_1$  的宽度为  $0.950W_0$ ,  $W_2$  的宽度为  $0.930W_0$ ,  $W'_1$  的宽度为  $0.948W'_0$ ,  $W'_2$  的宽度为  $0.930W'_0$ 。两个光子晶体平板的异质结处也起到了反射波长的作用。1530 nm 和 1550 nm 在输出端口 C 处的透射谱如图 9 所示,从中可以看出此模

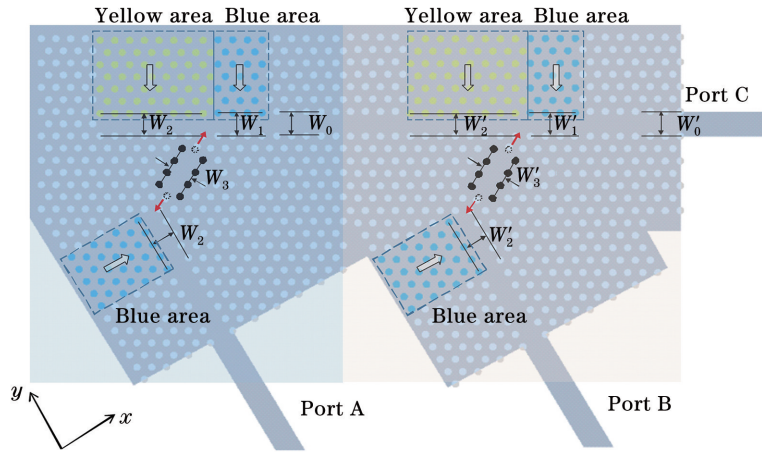


图 8 粗波分复用模块结构图

Fig. 8 Structure diagram of coarse wavelength division multiplexing module

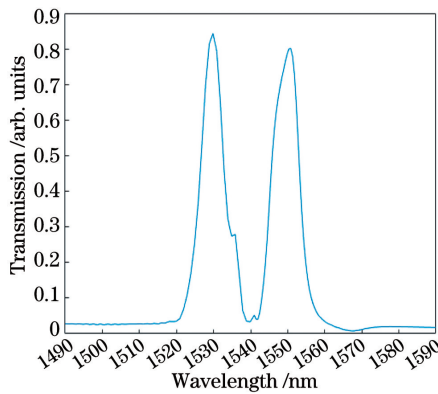


图 9 粗波分复用模块的透射谱图

Fig. 9 Transmission spectrum of coarse wavelength division multiplexing module

块实现了 1530 nm 和 1550 nm 的波分复用功能。

### 3.3 电光调制器与粗波分复用器级联模块

将 1530 nm 的电光调制器与其对应的滤波器级联,如图 10(a)所示。为了减小光在输入端口的纳米线波导和光子晶体平板连接处带来的耦合损耗,可利用锥形波导来减少光子晶体平板与纳米线波导之间的模式不匹配带来的影响<sup>[22]</sup>,提高透射率。设输入端口的红色区域的波导的宽度增量为  $\Delta W$ [图 10(a)]。图 10(b)是锥形波导的具体参数示意图,波导宽度增量  $\Delta W_n$  表示为  $\Delta W_n = \frac{n}{N} \Delta W$ , 其中  $n$  为锥形区域的光子晶体空气孔的编号,  $N$  为设计的锥形区域移动的空气孔排数, 值为 5, 则  $\Delta W_5$

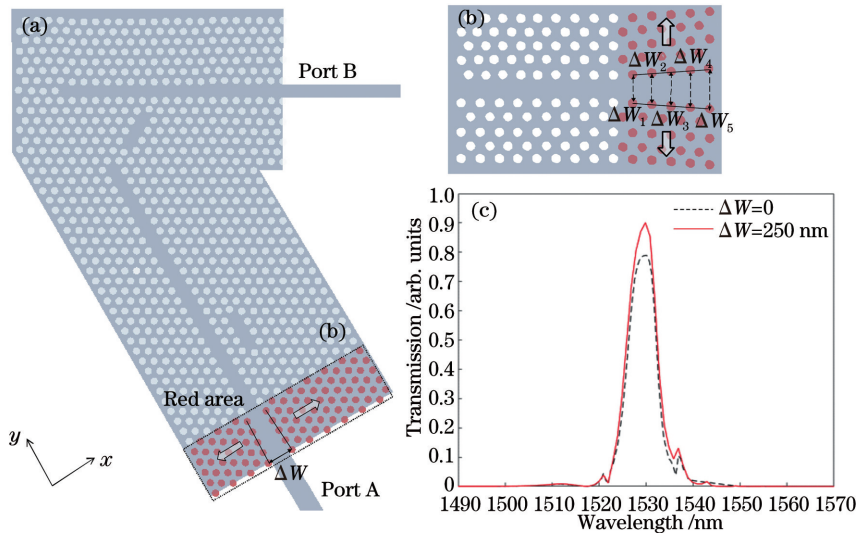


图 10 波长为 1530 nm 的电光调制器和滤波器级联设计图。

(a) 级联器件的结构参数示意图; (b) 锥形波导结构参数示意图; (c) 输入波导优化前后透射谱图

Fig. 10 Design of cascaded electro-optic modulator and filter with a wavelength of 1530 nm. (a) Schematic diagram of structural parameters of cascaded devices; (b) schematic diagram of tapered waveguide structure parameters; (c) input transmission spectrum before and after optimization of the waveguide

的值即为  $\Delta W$ 。图 10(c) 分别是  $\Delta W = 0$  和  $\Delta W = 250 \text{ nm}$  时在“通”状态下光从端口 A 输入从端口 B 输出[图 10(a)]的透射率,从图中可以看出,当波导增量为  $250 \text{ nm}$  时,光在输出端口 B 的透射率提高了  $10\%$ 。因此,在整体集成器件结构中,如图 11 所示,分别在波长为  $1530 \text{ nm}$  和  $1550 \text{ nm}$  调制的输入端口、波分复用的输出端口采用锥形波导,以提高透射率。

图 11 是双波长的电光调制器和粗波分复用器级联的结构图。左侧部分为  $1530 \text{ nm}$  级联模块,右侧为  $1550 \text{ nm}$  级联模块。由于级联后,L3 腔的谐振波长会出现偏移,因此只需要通过控制 L3 腔周围 8 个空气孔的位置来微调 L3 腔的宽度即可。图 11 中左侧部分具体参数为:光子晶体平板的晶格常数

$a_1 = 411 \text{ nm}$ ,空气孔半径  $r_1 = 0.25a_1$ ,黑色虚线空气孔的位移大小  $S = 0.15a_1$ 。光子晶体波导的宽度为  $W_0 = \sqrt{3}a_1$ ,窄波导宽度分别为  $W_1 = 0.950W_0$ 、 $W_2 = 0.930W_0$ 。粗波分复用部分的 L3 腔的宽度  $W_3 = 0.955W_0$ ,而电光调制部分的 L3 腔的宽度为  $W_4 = 0.968W_0$ 。由于整个集成器件可以看成  $1530 \text{ nm}$  和  $1550 \text{ nm}$  两个波长的电光调制和滤波器的级联,且  $1530 \text{ nm}$  和  $1550 \text{ nm}$  的级联设计除了光子晶体的晶格常数不同,其余设计思想完全一样,这里不再赘述。因此,图 11 中右侧部分波长为  $1550 \text{ nm}$  的电光调制器和粗波分复用器级联的结构具体参数为: $a'_1 = 418.4 \text{ nm}$ 、 $r'_1 = 0.25a'_1$ 、 $S' = 0.15a'_1$ 、 $W'_0 = \sqrt{3}a'_1$ 、 $W'_1 = 0.948W'_0$ 、 $W'_2 = 0.930W'_0$ 、 $W'_3 = 0.953W'_0$  和  $W'_4 = 0.967W'_0$ 。

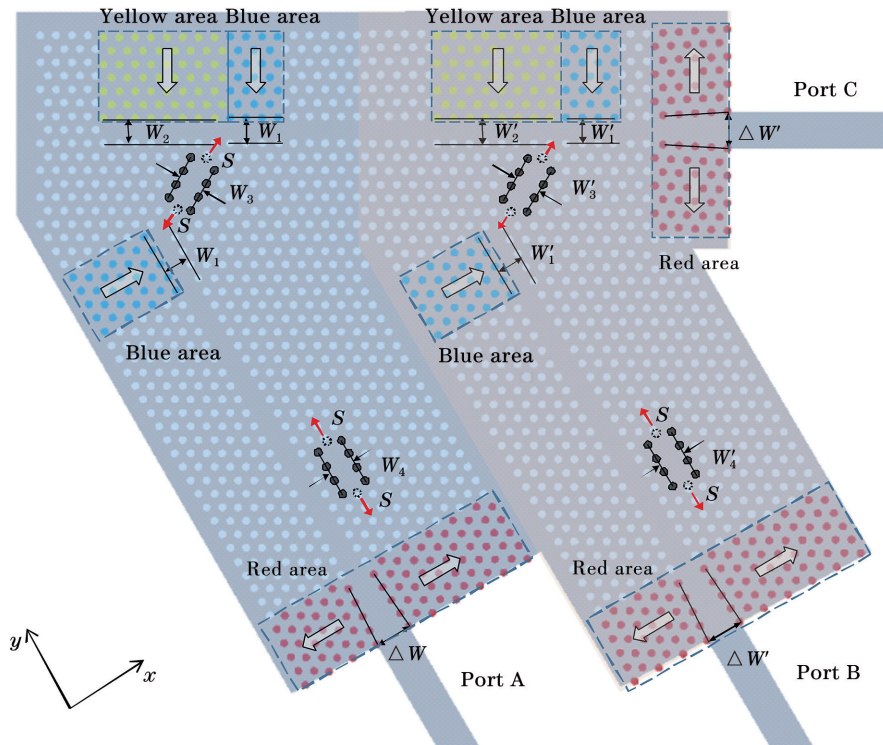


图 11 整体集成器件结构图

Fig. 11 Overall integrated device structure diagram

#### 4 性能分析

电光调制器的性能指标有调制电压、插入损耗、消光比、调制深度、调制速率和能耗等。调制深度越大,表示调制器越有利于长距离、低误码率传输,调制效果越好。调制速率是指调制设备单位时间可调制的码元速率,在电光调制器中能反映“通”、“断”调制的转换速度。能耗是指传输  $1 \text{ bit}$  的信息所需要的平均能量。粗波分复用器的性能指标有插入损耗

和信道串扰等。

本研究采用 Lumerical 仿真软件中的时域有限差分法 (3D-FDTD) 分析了集成器件的调制电压、插入损耗、消光比、调制深度和信道串扰值。仿真计算时,如图 11 所示, $1530 \text{ nm}$  和  $1550 \text{ nm}$  的光源分别设置在输入端口 A 和 B,探测器放置在输出端口 C,当向调制器施加的调制电压为  $1.505 \text{ V}$  时,波长为  $1530 \text{ nm}$  和  $1550 \text{ nm}$  的光波分别从端口 A 和 B 入射后从端口 C 输出,此时调

制器为“通”状态,其稳态场分布如图 12(a)和图 12(c)所示。当调制电压为 0 时,此时调制器为

“断”状态,其稳态场分布如图 12(b)和图 12(d)所示。

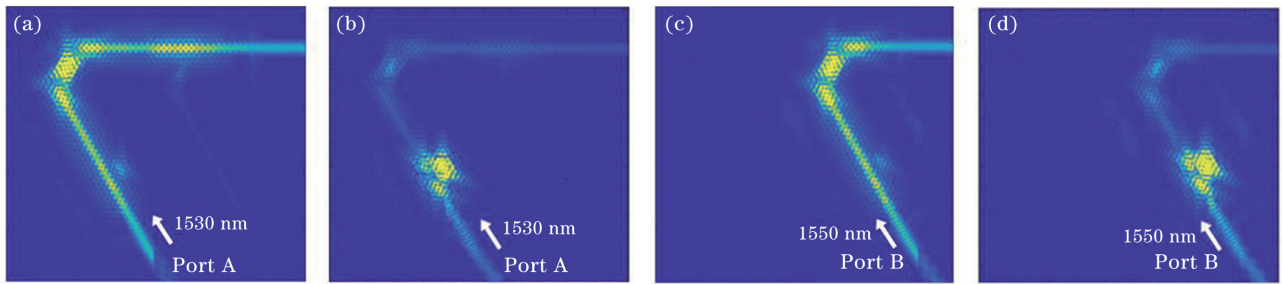


图 12 集成器件的稳态场分布图。(a)1530 nm 的调制状态为“通”;(b)1530 nm 的调制状态为“断”;(c)1550 nm 的调制状态为“通”;(d)1550 nm 的调制状态为“断”

Fig. 12 Steady-state field distribution diagrams of integrated devices. (a) Modulation state of 1530 nm is “on”; (b) modulation state of 1530 nm is “off”; (c) modulation state of 1550 nm is “on”; (d) modulation state of 1550 nm is “off”

图 13 是集成器件在调制器为“通”和“断”状态下输出口 C(图 11)的透射谱图。从图 13 中可以看出,波长为 1530 nm 和 1550 nm 在“通”状态下的

透射率分别为 85.10% 和 80.38%, 1530 nm 和 1550 nm 分别在“断”状态下的透射率分别为 0.68% 和 0.5%。

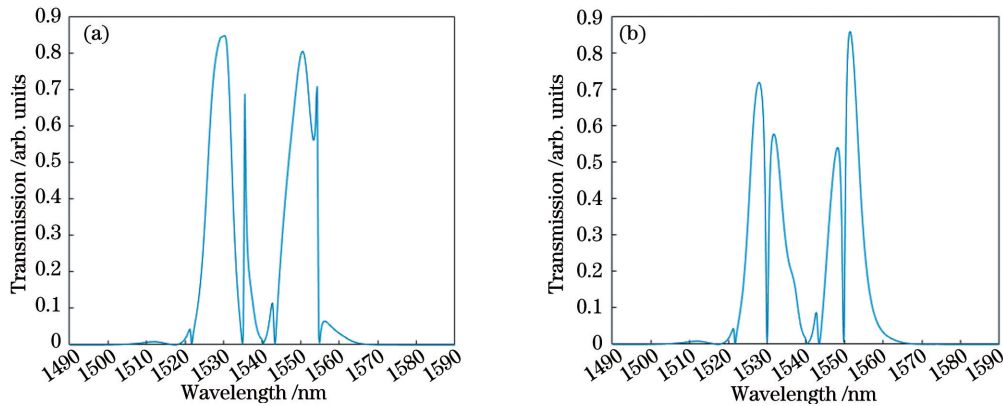


图 13 集成器件的透射谱图。(a)调制状态为“通”;(b)调制状态为“断”

Fig. 13 Transmission spectra of integrated device. (a) Modulation state is “on”; (b) modulation state is “off”

该集成器件在波长分别为 1530 nm 和 1550 nm 时的总插入损耗  $\gamma_{IL}$ 、消光比  $\eta_{ER}$ 、调制深度  $D$  和信道串扰值  $C_{CT}$  如表 1 所示,从表中可以看出这两波长的总插入损耗分别为 0.70 dB 和 0.95 dB,总插入损耗总共有源于以下 4 个部分:输入/输出硅基纳米线波导与光子晶体波导连接处产生的反射损耗(0.09 dB 和

0.18 dB)、光子晶体波导的散射损耗(0.17 dB 和 0.15 dB)、电光调制模块中的损耗(0.20 dB 和 0.28 dB)以及粗波分复用模块中的损耗(0.24 dB 和 0.34 dB)。总插入损耗均低于 0.95 dB,消光比  $\eta_{ER}$  均大于 20 dB,调制深度  $D$  均为 0.99,信道串扰值均低于 -27.59 dB,这表明器件的调制和波分复用性能良好。

表 1 集成器件在不同波长下的性能参数

Table 1 Performance parameters of integrated devices at different wavelengths

Wavelength /nm	Insertion loss	Extinction ratio	Modulation depth	Crosstalk $C_{CT}$ /dB	
	$\gamma_{IL}$ /dB	$\eta_{ER}$ /dB		Port A	Port B
1530	0.70	20.97	0.99	—	-29.05
1550	0.95	22.05	0.99	-27.59	—

## 5 结 论

提出一种用于电光调制和粗波分复用的片上集

成器件。采用光子晶体 L3 型谐振腔和硅基光子晶体波导之间的耦合,通过调节波导宽度和谐振腔宽度,可以实现调制和波分复用功能。采用锥形结构

的输入/输出波导可以减小耦合损耗,提高透射率,仿真结果表明该集成器件可以完成两个波长的调制及复用。与之前的研究成果相比,该集成器件不再是功能单一的器件。此外,该结构紧凑,易于集成,可应用于高速光通信系统,在集成光学器件的发展及高速大容量通信系统中有巨大的应用潜力。

## 参 考 文 献

- [1] Zhu N H, Li M, Hao Y. Optoelectronic devices and integration technologies[J]. Scientia Sinica (Informations), 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.
- [2] Gosciniak J, Tan D T H, Corbett B. Enhanced performance of graphene-based electro-absorption waveguide modulators by engineered optical modes [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2015, 48 (23): 235101.
- [3] Wang S L, Ye Z W, Peng X L, et al. Study of highly-efficient composite waveguide modulator based on graphene[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0513003.  
王少亮, 叶子威, 彭希亮, 等. 基于石墨烯的高效复合波导调制器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0513003.
- [4] Hu Y C, Chen H M, Zhou H T. 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.
- [5] Liang F C, Li M, Wu D M. Optimized design of low driving and high modulation X-cut LiNbO<sub>3</sub> electro-optical modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (7): 0713001.  
梁凤超, 李敏, 吴东岷. 低驱动、高调制 X-Cut 铌酸锂电光调制器的优化设计[J]. 光学学报, 2018, 38 (7): 0713001.
- [6] Hinakura Y, Terada Y, Arai H, et al. Electro-optic phase matching in a Si photonic crystal slow light modulator using meander-line electrodes[J]. Optics Express, 2018, 26(9): 11538-11545.
- [7] Terada Y, Kondo K, Abe R, et al. Full C-band Si photonic crystal waveguide modulator [J]. Optics Letters, 2017, 42(24): 5110-5112.
- [8] Enami Y, Nakamura H, Luo J, et al. Analysis of efficiently poled electro-optic polymer/TiO<sub>2</sub> vertical slot waveguide modulators [ J ]. Optics Communications, 2016, 362: 77-80.
- [9] Zhou H T, Chen H M. A novel compact electro-optic modulator based on photonic crystals [J]. Study on Optical Communications, 2019(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(5): 46-51.
- [10] 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.
- [11] Huang Q S. Novel low driving-voltage optical modulators on silicon [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.  
黄强盛. 新型低驱动电压硅基光调制器的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [12] 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.
- [13] Zhang Z, Li H, Huang B J, et al. Multi-channel silicon photonic receiver based on compact second-order microring resonators [ J ]. Optics Communications, 2019, 437: 168-173.
- [14] Park S, Kim K J, Kim I G, et al. Si micro-ring MUX/DeMUX WDM filters [J]. Optics Express, 2011, 19(14): 13531-13539.
- [15] An J M, Zhang J S, Wang Y, et al. Study on wavelength division multiplexer for silicon photonics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51 (11): 110006.  
安俊明, 张家顺, 王玥, 等. 硅光子中波分复用技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51 (11): 110006.
- [16] Wu R, Liu Z, Yan Q B, et al. Eight-channel photonic-crystal wavelength-division multiplexer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56 (9): 091302.  
吴蓉, 刘振, 严清博, 等. 光子晶体八通道波分复用器研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091302.
- [17] Ooka Y, Tetsumoto T, Daud N A, et al. Ultrasmall in-plane photonic crystal demultiplexers fabricated with photolithography [J]. Optics Express, 2017, 25 (2): 1521-1528.
- [18] Dong X W, Ni P P, Liu W K. Investigation of four-channel photonic crystal wavelength division demultiplexer [ J ]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 030603.  
董小伟, 倪品品, 刘文楷. 四通道光子晶体解波分复用器的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53



- (3): 030603.
- [19] 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.
- [20] Soref R, Bennett B. Electrooptical effects in silicon[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(1): 123-129.
- [21] 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): 1-9.
- [22] Terada Y, Miyasaka K, Kondo K, et al. Optimized optical coupling to silica-clad photonic crystal waveguides[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(22): 4695-4698.

## An Integrated Device for Photonic-Crystal Electro-Optic Modulation and Coarse Wavelength-Division Multiplexing

Liu Xue<sup>1</sup>, Chen Heming<sup>2\*</sup>, Hu Yuchen<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Bell Honors School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

### Abstract

**Objective** With the advent of 5G communication, the demands for communication systems with increased capacity and speed are growing rapidly. Unit-device technology has basically matured, and the only way to break through the bottleneck of information systems to achieve high-speed, low power consumption, and small size is to use silicon-based optoelectronic integration. Various structures have been proposed for electro-optical modulators and wavelength-division multiplexers, and research on these two types of individual devices has become increasingly mature. However, there have been few studies which integrate the two devices in a single device to achieve multiple functions. Because silicon-based optoelectronic integration has the characteristics of low packaging cost, small size, and high integration, we propose here an on-chip integrated device for electro-optic modulation and coarse wavelength-division multiplexing. Integrating these two functions on the same silicon-based photonic-crystal plate yields a device with the desirable characteristics of small size, low insertion loss, small modulation voltage, large modulation depth, and low channel crosstalk. We therefore anticipate that this integrated-device study will be helpful for the rapid development of information technology in the near future.

**Methods** The integrated device described in this paper consists of two modules, a photonic-crystal electro-optic modulator and a coarse wavelength-division multiplexer. The integrated device is a photonic crystal with a heterogeneous structure, which achieves “on” and “off” state modulation of different wavelengths in the electro-optical modulation module, and the download function for the different wavelengths is provided by the coarse wavelength-division multiplexing module. This article is based on a simulation analysis using the FDTD and DEVICE modules in the commercial optical-simulation software Lumerical. First, an L3 resonant cavity and PN junction employ plasma dispersion to modulate the wavelength of the input signal. Then, using direct coupling between the microcavity and waveguide, the device utilizes the L3 resonant-cavity structure to obtain coarse wavelength-division multiplexing, and complete the design of the coarse wavelength division multiplexing module. Finally, the two modules are cascaded together, and the modulated input port and the wavelength-division-multiplexing output port utilize tapered waveguides to reduce the impact of mode mismatch between the photonic-crystal plate and the nanowire waveguide. Cascading the two modules shifts the resonant wavelength of the L3 cavity, so it is fine-tuned to complete the electro-optic modulation and coarse wavelength-division multiplexing at 1530 nm and 1550 nm design wavelengths.

**Results and Discussions** The integrated device has excellent performance, and the modulation voltage is small. When the modulation voltage is 1.505 V, the change in electron concentration reaches  $\Delta N_e = 6.31 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , and the change in hole concentration reaches  $\Delta N_h = 7.94 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (**Fig. 6**), which modulates the wavelength (**Fig. 7**). According to the simulation, the transmittances of the integrated device at 1530 nm and 1550 nm in the “on” state are respectively 85.10% and 80.38%, while the corresponding transmittances in the “off” state are

0.68% and 0.5%, respectively. We calculate that the total insertion loss is less than 0.95 dB, the extinction ratio is greater than 20 dB, the modulation depths  $D$  are both 0.99, and the channel crosstalk values are all less than  $-27.59$  dB (**Table 1**), which indicates good device performance for both modulation and wavelength division.

**Conclusions** This paper presents an on-chip integrated device for electro-optical modulation and coarse wavelength-division multiplexing. The L3 resonant cavity of the photonic crystal and the silicon-based photonic-crystal waveguide are coupled together, and the modulation and wavelength-division multiplexing functions are obtained by adjusting the width of the waveguide and the resonant cavity. The tapered structure of the input/output waveguide reduces the coupling loss and increases the transmittance. The simulation results show that the integrated device can complete the modulation and multiplexing of two wavelengths. Compared with previous research results, this is no longer a single-function device. The insertion loss of the device at the working wavelengths of 1530 nm and 1550 nm is 0.70 dB and 0.95 dB, respectively, the extinction ratios are 20.97 dB and 22.05 dB, the modulation depths are both 0.99, the channel crosstalk is  $-29.05$  dB and  $-27.59$  dB, and the device size is only  $17.83 \mu\text{m} \times 17.3 \mu\text{m} \times 0.22 \mu\text{m}$ . The compact structure of the modulator makes it easy to integrate into applications for high-speed optical-communication systems. We therefore believe that this device has huge application potential for the development of integrated optical devices and high-speed large-capacity communication systems.

**Key words** optical communication; coarse wavelength-division multiplexing; electro-optic modulator; L3 resonant cavity; photonic crystals

**OCIS codes** 060.4510; 060.4080; 060.4230; 060.4510