

硅基能谷光子晶体马赫曾德热光调制器

张昕妍¹, 林 瀚², 费宏明^{1,3*}

(1. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

2. 皇家墨尔本理工大学 科学学院 材料与纳米制造中心, 维多利亚 墨尔本 3000, 澳大利亚;

3. 山西大学 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要: 热调制器是光通信系统的关键组件, 其性能直接影响系统效能。随着硅基光电子技术的发展, 硅基热光调制器在光电芯片得到广泛应用。传统硅基调制器尺寸大、损耗高。近年来, 研究者提出利用光子晶体的慢光效应缩小调制器尺寸, 相关研究显示这些器件具有小尺寸和低驱动电压等优点。但基于光子晶体实现的热光调制器依然无法避免加工误差带来的缺陷对光传输的影响。能谷光子晶体光波导能够实现散射免疫的高效率单向光传输, 为实现高性能光子学器件提供了新思路。本文设计了新型基于能谷光子晶体马赫曾德干涉仪(MZI)的硅基热光调制器, 在 MZI 的其中一条波导上引入电压加热金属机制, 通过热光效应调制折射率, 实现对输出信号的精确调制, 该热光调制器器件面积仅为 $9.26 \mu\text{m} \times 7.99 \mu\text{m}$, 可实现 0.91 的高正向透射率、0.41 dB 插入损耗和 11.75 dB 调制对比度, 并可以使用互补金属氧化物半导体(CMOS)进行实验加工, 因此具有广泛的应用前景。该调制原理可以广泛应用于设计不同的热光调制器件。

关键词: 硅基光子学; 能谷光子晶体; 马赫曾德干涉仪; 热光调制器; 热光效应

中图分类号: O472; O481.1

文献标识码: A

Silicon valley photonic crystal Mach-Zehnder thermo-optic modulator

ZHANG Xin-Yan¹, LIN Han², FEI Hong-Ming^{1,3*}

(1. College of physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Centre for Atomaterials and Nanomanufacturing, School of Science, RMIT University, Melbourne 3000, Australia;

3. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Thermo-optic modulators are key components of optical communication systems, and their performance directly affects system efficiency. With the development of silicon optothermonic technology, silicon thermo-optic modulators have been widely used in optothermonic chips. Conventional silicon optical modulators are large in size and have high losses. In recent years, researchers have proposed to use the slow light effect of photonic crystals to reduce the footprint of modulators. Related studies have shown that these devices have advantages, such as small size and low driving voltage. However, the optical transmittance of thermo-optic modulators based on photonic crystals is still affected

收稿日期: 2024-11-11, 修回日期: 2025-11-21

Received date: 2024-11-11, revised date: 2025-11-21

基金项目: 国家自然科学基金委联合基金(U23A20375), 山西省自然科学基金面上项目(202403021211011), 量子光学与光量子器件国家重点实验室开放课题(KF202402), 山西省重点研发计划项目(2023021501010001), 基础科研条件与重大科学仪器设备研发(2023YFF0715700), 山西省回国留学人员科研教研资助项目(2024-032), 山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(20240006)

Foundation items: Supported by the Basic scientific research conditions and major scientific instrument and equipment development of Anhui Science and Technology Department (U23A20375), the Natural Science Foundation of Shanxi (202403021211011), the Project supported by the Program of State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices (KF202402), the Key Research project of Shanxi Province (2023021501010001), the Basic scientific research conditions and major scientific instrument and equipment development of Anhui Science and Technology Department (2023YFF0715700), the Research project Supported by Shanxi Scholarship Council of China (2024-032), the Fund Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province (20240006)

作者简介(Biography): 张昕妍(2002-), 女, 山西吕梁孝义人, 本科生, 主要研究方向为硅基光子学. E-mail: zhangxinyan0929@outlook.com

通讯作者(Corresponding author): E-mail: feihongming@tyut.edu.cn

by defects caused by fabrication errors. Valley photonic crystal optical waveguides can achieve scattering-immune high-efficiency unidirectional transmission, providing a new venue for realizing high-performance photonic devices. In this paper, a new silicon thermo-optic modulator based on a valley photonic crystal Mach-Zehnder interferometer (MZI) is designed. The electrical heating mechanism is introduced on one of the waveguides of the MZI. The thermo-optic effect modulates the refractive index to achieve precise phase modulation of the transmitted light. The thermo-optic modulator device has a small footprint of only $9.26 \mu\text{m} \times 7.99 \mu\text{m}$, which can achieve a high forward transmittance of 0.91, an insertion loss of 0.41 dB, and a modulation contrast of 11.75 dB. It can also be experimentally fabricated using complementary metal oxide semiconductor (CMOS) technology, so it will have broad application prospects. This modulation principle can be widely used in designing different thermo-optic modulation devices.

Key words: silicon photonics, valley photonic crystal, Mach-Zehnder interferometer, thermo-optic modulator, thermo-optical effect

引 言

随着光通信技术的发展,光电器件不断朝着宽频带、低成本、小型化集成器件的方向发展。光调制器是光电芯片中一个重要元件,是实现高速率大容量光通信网络的重要组成器件,其主要作用是把电信号转化为光信号,由于光相比于电信号有更高的处理速度和更宽的工作带宽,因此可以提升通信网络带宽、复杂度及速度,以满足指数爆炸式增长的数据要求^[1-4]。

光调制器可以利用材料的电光效应或热光效应来改变光波的相位、振幅等特性,从而实现对光信号的调制。根据实现机理的不同,光调制器可以分为直接使用电光效应的电光调制器和通过电加热引起热光效应的热光调制器等。直接使用电光效应的电光调制器依赖于材料的电光效应^[5],即当外加电场作用于某些晶体材料时,会导致其折射率发生变化的现象。对于硅基材料而言,虽然其自然状态下的电光系数相对较小,但通过特定设计也可以实现有效的直接电光调制。不过,在实际应用中,由于成本和技术难度等因素限制,基于纯硅材料的直接电光调制方案有限。与直接电光调制不同,热光调制则是利用了物质受热后内部结构变化导致折射率改变的原理,达到控制光束传播状态的目的。由于硅本身具有较高的热导率以及良好的兼容性,使得基于热效应的光学器件非常适合于集成到现有的半导体工艺中。此外,相比于传统的电光调制方式,热光调制还具有结构简单、易于制造等优点^[6],因此在当前的研究与发展中受到了广泛关注。

热光调制器按照结构可以分为:谐振型和干涉型^[1]。谐振型热光调制器通常包含一个或多个谐振腔,如微环、光子晶体等。基于谐振增强原理,当温

度变化时,谐振腔的谐振条件发生改变,导致光信号的传输特性发生变化,从而实现调制,即通过精确控制谐振条件,实现对特定频率的光信号进行高效调制^[4]。谐振型和干涉型电光调制器各有特点和优势。谐振型热光调制器因其低功耗、高调制深度特性而广泛应用于高灵敏探测,干涉型热光调制器则因其高速度和宽带宽优势成为高速光通信和光计算系统的理想选择。干涉型热光调制器基于干涉原理工作,常见的有定向耦合式调制器和 MZI 干涉仪式调制器^{[1][5]}。定向耦合式调制器由两个亚波长间距的平行波导组成(通常称为“耦合臂”),两波导之间存在能量交换,这种能量交换的效率受到两波导间距离、波导宽度以及材料折射率等因素的影响。通过控制其中一个波导的温度,可以改变其折射率,从而影响两波导间的耦合效率,实现对光信号的调制^{[4][5]}。而 MZI 干涉仪式调制器输入光被分成两束,通过控制加热元件的温度,可以改变波导臂上有效折射率,导致两束光信号在输出端产生相位差,从而通过改变干涉条件实现对光信号的调制^[8]。

MZI 热光调制器作为光子集成芯片中用于热光调制的核心器件,具有结构简单、体积小、功耗低等优点,适用于高速光纤通信系统和光学传感器等领域,在光电集成芯片中发挥着十分重要的作用^{[9][10]}。根据其设计和实现方式的不同,可以分为基于光纤的 MZI 和基于传统光波导的 MZI 等^[10]。然而,传统的 MZI 设计体积较大,通常可达到百微米甚至毫米级别^{[11][12]},这种大型设计对集成的密度产生了影响,限制了其在微型化和集成化方面的应用。

为了克服这一问题,研究人员正在探索新的设计和实现方法,以减小体积并提高集成密度。例如,可以采用微纳加工技术来制造更小尺寸的光学元件^[13],或者可以利用光子晶体等新型材料来实现

更紧凑的光学结构^{[13][14]}。基于光子晶体^[14-21]的MZI热光调制器可以实现更高集成度和更小的器件尺寸。然而,该结构在传输中遇到大角度转弯、制备误差等引起的缺陷时,会受到强烈的散射影响,导致严重的散射损耗问题,影响透射率和器件性能^[22]。

能谷光子晶体是基于能谷霍尔效应实现的拓扑光子晶体结构,其独特的能谷—自旋锁定效应能够实现缺陷免疫的单向光传输^[22-30]。其波导可以由两个镜面对称的能谷光子晶体结构构成,设计简单并具有大工作带宽,而且其可以使用目前成熟的CMOS进行实验加工。其中硅基能谷光子晶体波导展示出了高效率单向光传输的优异性能^[27-31]。然而,目前尚无基于硅基能谷光子晶体的热光调制器的设计展示。

本文设计了硅基能谷光子晶体的MZI热光调制器。通过在其中一条干涉波导上方加入金属电控加热电极,实现通过电压精确控制能谷光子晶体波导的温度,通过热光效应实现折射率的精确调控,最终实现高效率热光调制。

1 能谷光子晶体马赫曾德干涉仪设计研究

图1(a)是硅基能谷光子晶体MZI热光调制器的概念图,其中能谷光子晶体结构由嵌入在独立硅

衬底中的气孔组成,其中MZI结构由两个镜面对称的能谷光子晶体结构VPC1和VPC2构成紫色和蓝色分别表示VPC1和VPC2。加热电极由金属材料构成,位于其中一条干涉波导的上方,绿色和红色对应不同的低温(a)和高温(b)。当温度从 T_1 增加到 T_2 时,干涉峰从 λ_1 位移到 λ_2 ,透射率相应增加。同一波长处通过不同温度实现谷到峰的调制,因此可以通过控制温度来实现“开”和“关”,如图1(b)所示(λ_2 处),其中 λ_1 和 λ_2 分别对应 T_1 和 T_2 温度下干涉峰的位置,TF为热光调制器的正向透射率。在设计中考虑了硅在不同温度下的色散折射率,只要保证最高温度低于硅的热损伤阈值温度(~ 973 K),器件就可以正常运行。

本文关注的是用于光通信波段的能谷光子晶体结构,特别是在光通信波段(1 550 nm)工作的波长。采用了常用的在硅基板上引入空气孔洞的方式来构建光子晶体结构。首先,设计了一个 C_6 旋转对称的蜂窝晶格光子晶体结构,如图2(a)所示,设定硅基板的厚度为 $h = 0.22 \mu\text{m}$,硅的折射率为其在不同温度下的色散折射率,晶格常数为 $a = 440 \text{ nm}$,格点为圆形空气孔。本工作采用时域有限差分(FDTD)软件Lumerical FDTD Solutions进行计算及仿真模拟。当空气孔的半径 $r_A = r_B = 80 \text{ nm}$ 时,如图2(c)红色虚线所示,可以在K(K')点观察到狄拉

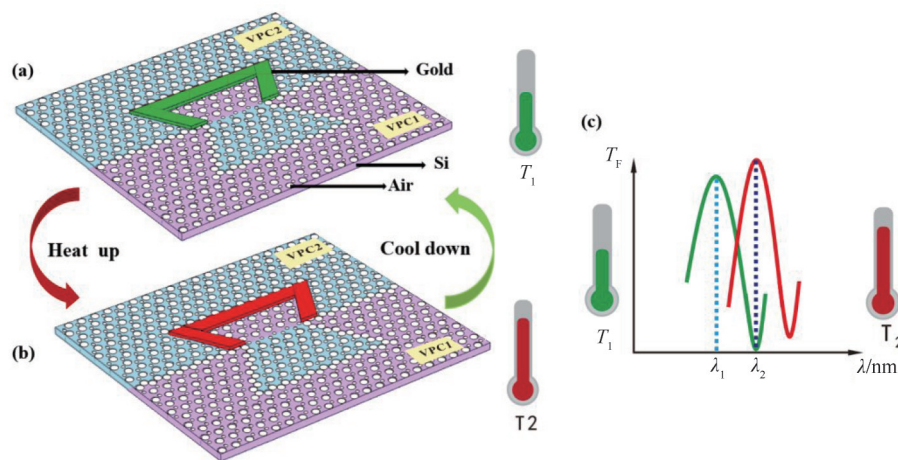


图1 能谷光子晶体MZI热光调制器结构示意图及干涉峰位移示意图:低温(a)和高温(b)分别为绿色和红色表,紫色和蓝色分别表示VPC1和VPC2;(c)温度变化引起的干涉峰位移示意图,其中 λ_1 和 λ_2 分别对应 T_1 和 T_2 温度下干涉峰的位置, T_F 为电光调制器的正向透射率。

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the MZI thermo-optical modulator and the displacement of the interference peak: (a), (b) Schematic diagram of the structure of the MZI electro-optic modulator based on valley photonic crystal (VPC), in which green and red colors represent low (a) and high (b) temperatures, purple and blue represent VPC1 and VPC2. (c) Schematic of the interference peak shift controlled by temperature change, where λ_1 and λ_2 correspond to the positions of the interference peaks at T_1 and T_2 temperatures, respectively. T_F is the forward transmittance of the electro-optic modulator (EOM).

克点^[31]。

为了打破光子晶体结构的旋转对称性并实现光子禁带,适当地调整了圆形空气孔的大小。通过将一组空气孔的半径调整为 120 nm ($r_A = 0.267$, $a = 120$ nm),另一组空气孔的半径调整为 40 nm ($r_B = 0.089$, $a = 40$ nm),从而打破了原有的 C_{6v} 旋转对称性。这种调整使得原始的光子晶体(PC)转变为能谷光子晶体 1(VPC1)。能谷光子晶体 2(VPC2)是 VPC1 的镜面对称结构。这意味着 VPC2 的结构与 VPC1 在几何上是镜像对称的,但具有相同的物理特性。VPC1 和 VPC2 在结构设计中构成

了最小的重复单元,即超元胞。超元胞的概念在光子晶体设计中非常重要,因为它允许通过重复这些基本单元来构建更大的结构。这种设计方法不仅简化了计算和制造过程,还使得光子晶体的性能可以通过调整超元胞的参数来优化。其打破 K 和 K' 点的简并,打开狄拉克点,在光通信波段实现光子禁带。VPC1 和 VPC2 的带隙宽度均为 271.89 nm (1 373.47–1 645.36 nm),即 2(c)图中的蓝色矩形区域。使用 VPC1 和 VPC2 构建波导有两种可能的组合,即锯齿型(zigzag型)和胡须形(beard型),其几何形状如图 2(d)和(e)所示,它们支持不同的拓扑

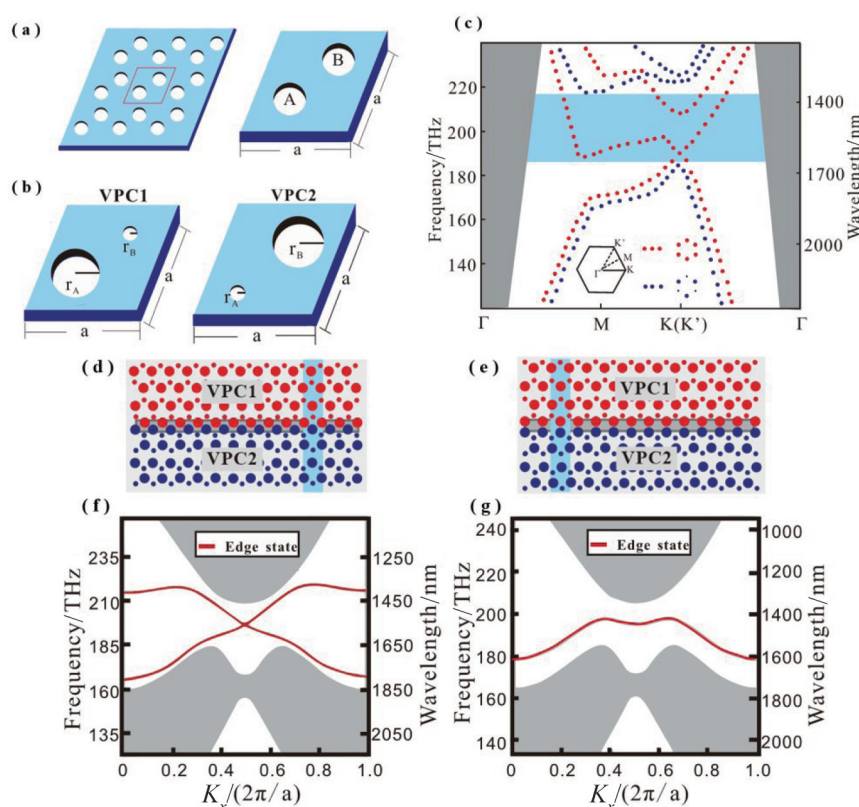


图2 结构参数示意图和光子能带图:(a)初始光子晶体结构参数示意图。平行四边形表示由两个空气孔(A和B)组成的蜂窝晶格,其中晶格常数 $a=0.44\text{ }\mu\text{m}$,圆半径 $r=0.08\text{ }\mu\text{m}$,硅基板厚度 $h=0.22\text{ }\mu\text{m}$;(b) VPC1(左)和VPC2(右)的结构示意图;(c)初始蜂窝PC(红色虚线)和VPC1(蓝色虚线)的光子能带图,蓝色矩形区域为带隙,灰色阴影为空气锥;(d)和(e)由VPC1和VPC2组成的锯齿形和胡须形边界的几何形状; (f)和(g)由VPC1和VPC2组成的锯齿形和胡须形边界的边缘状态能带图,所用的超元胞为(d)和(e)中的蓝色矩形区域。

Fig. 2 Schematic diagram of the structure parameters and photonic band diagram. (a) Schematic diagram of the initial structural parameters. The parallelogram represents the original honeycomb lattice consisting of two air holes (A and B), where the lattice constant $a = 0.44\text{ }\mu\text{m}$, the radius of the circular air hole is $r = 0.08\text{ }\mu\text{m}$, and the silicon substrate thickness is $h = 0.22\text{ }\mu\text{m}$; (b) Schematic diagram of VPC1 (left) and VPC2 (right); (c) Photonic band diagrams of the initial honeycomb PC (red dotted line) and VPC1 (blue dotted line), where the blue rectangular marks the photonic bandgap and the gray shading area mark the air cone; (d) and (e) geometry of zigzag-shape and beard-shape boundaries composed by VPC1 and VPC2; (f) and (g) Edge state band diagrams of zigzag-shape and beard-shape boundaries composed by VPC1 and VPC2, the supercells used are the blue rectangular regions in (d) and (e).

边缘状态,如图2(f)和(g)所示。与 beard 型边缘态相比, zigzag 型边缘态具有更强的自旋谷锁定效应,带宽更宽,透光率更高(见补充材料4)。因此,在本文选择使用 zigzag 型直波导来构建能谷光子晶体 MZI 热光调制器。

马赫曾德干涉仪的核心组件包括一个分光器(50:50)、两个臂(传感臂和参考臂),以及一个合束器(详见补充材料1)。本文设计的能谷光子晶体 MZI 结构如图3(a)所示,由两个拓扑直波导和两个干涉臂构成,这两个干涉臂(波导)分别被标记为 L1 和 L2(在图中分别用黑色和红色箭头表示)。MZI 两臂之间的相位差可以用公式表示出来^[32]

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi\Delta n_{\text{eff}}\Delta L}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为有效折射率, Δn_{eff} 为通过加热由热光效应导致的有效折射率差, ΔL 为马赫曾德干涉仪的两条臂的长度差。两个因素共同决定了两条臂中的光的相位差。为了实现相消干涉,从而在干涉谱中产

生接近零的谷值,需要 $\Delta\Phi$ 为 π 的奇数倍,而在干涉相长的位置相位差为 $\Delta\Phi$ 为 2π 的整数倍。

MZI 的输出光强可表示为^[33]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\Phi) \quad (2)$$

其中 I_1 和 I_2 分别表示干涉臂 L_1 和 L_2 的透射光强, $\Delta\Phi$ 为式(1)中所示的相位差,它决定了两束光在 MZI 中的干涉效果。

MZI 热光调制器中光的传输路线如图3(a)所示中箭头所示。光首先通过一个长度为 $L = 8a$ (其中 $a = 0.44 \mu\text{m}$) 的直线拓扑波导,然后分成两束光。这两束光分别通过不同长度的干涉臂 L_1 ($L_1 = 18a$) 和 L_2 ($L_2 = 23a$)。干涉臂之间的长度差为 $5a$ ($\Delta L = 5a$)。在中间有一个由小空气孔组成的波导,如图3中黄色框所示,这种设计利用了小气孔构成的锯齿形波导之间的模式不匹配特性,使得从输入波导进入的光无法耦合到中间的波导中,从而减少了光的损耗。在整个设计中,整个器件的物理尺寸为 $9.26 \mu\text{m} \times 7.99 \mu\text{m}$ 。

在 FDTD 中进行能谷光子晶体 MZI 仿真,得到

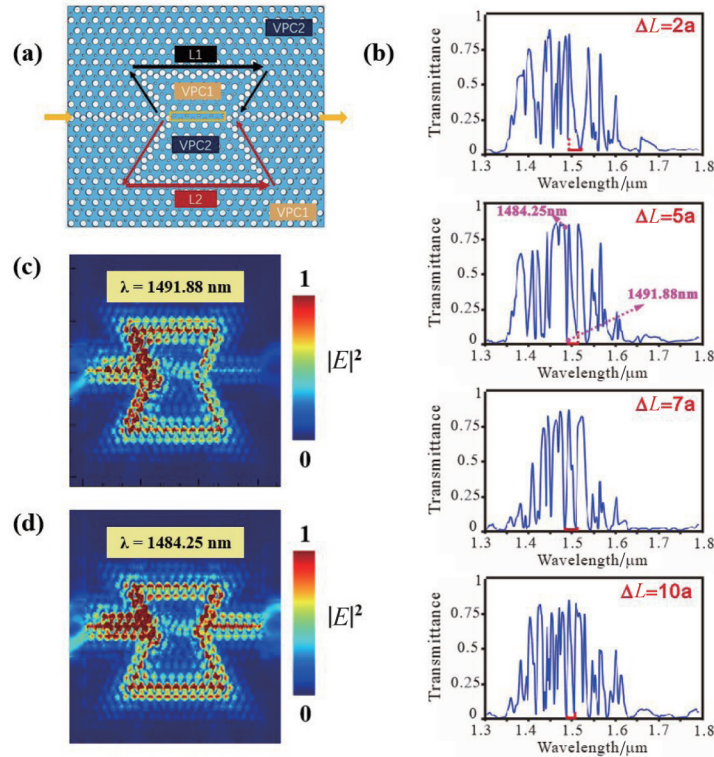


图3 能谷光子晶体 MZI 结构及光路示意图、透射率光谱曲线及电场强度分布:(a)能谷光子晶体 MZI 结构及光路示意图 ($\Delta L = 5a$);(b) $\Delta L = 2a, 5a, 7a, 10a$ 时的透射率光谱曲线;(c) (d) 分别为当 $\Delta L = 5a$ 时, MZI 在 1491.88 nm 和 1484.25 nm 处的电场强度分布(相应位置已在图 b 标出)。

Fig. 3 Schematic diagram and the optical path of MZI structure, transmittance spectra and the electric field intensity distributions in the MZI: (a) Schematic diagram and the optical path of MZI structure based on VPC ($\Delta L = 5a$); (b) Transmittance spectra of $\Delta L = 2a, 5a, 7a, 10a$; (c) (d) The electric field intensity distributions in the MZI at 1491.88 nm and 1484.25 nm when $\Delta L = 5a$.

的正向透射光谱如图 3(b)所示。为了展示不同臂长差 ΔL 对于 MZI 透射光谱的影响,本工作计算了不同臂长差 ΔL 的透射率曲线,如图 3(b)所示。从图中可以观察到,在 1.3 μm 到 1.8 μm 的波长范围内,由于两条臂的正向透过率高,光谱中出现了明显的干涉峰(接近 1)和谷(接近 0),实现了充分的相干相长和相干相消,MZI ($\Delta L = 5a$)在不同波长下的电场分布如图 3(c) (d) 所示,对应于 1 491.88 nm 和 1 484.25 nm,展示了一个理想的 MZI 所需要的性能^[24]。这种光谱特性使得能谷光子晶体 MZI 结构在光通信和光电子集成器件中具有潜在的应用价值。

2 硅基能谷光子晶体马赫曾德热光调制器设计与分析

热光调制器是一种将热信号转换为光信号的器件,其结构主要由光学结构和热学结构两部分组成。光学结构主要用于传输光信号,而热学结构则将热信号的变化反映到光信号通路上,通过引起介质材料的物理特性发生变化,从而使光信号发生特定的变化,实现热信号到光信号的转换^[34]。

本文设计的能谷光子晶体 MZI 热光调制器能够通过控制加热电极的电压来调整两束光信号的相位差(如图 1(a)和(b)所示),其中为了实现加电压的热光调制,在其中一条臂 L_1 的上方放置了电极结构完全覆盖 L_1 的 Ω 型波导。当没有施加电信号时,调制器中的两臂为固定的长度差(此处以 $\Delta L = 5a$ 的结构进行研究),且折射率相同。当以加电压的方式施加一个电信号到其中一个臂 L_1 的电极上时,电极升温,导致该臂中的介质折射率会发生改变,实现对于该臂光波相位 $\Delta\Phi$ 调制,最终实现输出光谱调制。通过精确控制施加的电压,根据方程(2)可以有效实现对光强的精确控制,实现了将电信号转换为光信号的功能。

其中电极的设计需要考虑多个因素,包括电阻率、抗氧化能力和熔点。在这里,我们选择金作为加热器,因为它具有较低的电阻率、良好的抗氧化性能和较高的熔点。为了确保调制臂 L_1 的温度分布均匀,我们将 L_1 分为三个部分单独进行加热,为了简化操作和降低调制器的制作难度,每部分(总共三个部分)加热器施加的电压通过并联保持一致,即整个系统只需要一个电源供应,这样每块加热器的电压就是图 4(b)中所示的电压值,可以减少电源的复杂性,降低系统的功耗和成本。这就需要在实际应用精确控制加热器的尺寸和电源所施加

的电压。这种方法可以提高加热过程的灵活性和效率,同时减少因过热或不均匀加热导致的潜在的结构损伤。这种设计通过 COMSOL 仿真得到了验证,在理想条件下模拟电加热过程,不同电压下温度分布如图 4(c)所示。通过逐步增加电压,可以观察到 MZI 热光调制器金电极的温度变化,其温度随电压变化的曲线如图 4(c)所示。

插入损耗(insertion loss, IL)通常用来描述光通过一个系统或组件后功率的减少量。在光通信系统中,插入损耗可能由多种因素引起,包括耦合效率不高、光纤或器件中的吸收、散射、反射等。光传输过程中,插入损耗越小,则器件性能越优。插入损耗通常以分贝(dB)为单位来表示,计算公式为^[35]:

$$IL(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} \quad (3)$$

其中, P_{in} 是输入光强, P_{out} 是输出光强。输出光强与输入光强的比值为折射率,在 L_1 温度为 750 K 时最高透射率为 0.91,代入公式可得插入损耗约为 0.41 dB。

消光比是判断热光调制器调制效果的一个关键指标,计算公式为^[35]

$$\text{EXT}(\text{dB}) = 10 \log \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}} \quad (4)$$

其中, P_{max} 是“通”状态下的透射率, P_{min} 是“断”状态下的透射率,消光比越大,光强调制效果越好。图 4(d)为 1 528.95 nm 波长的光信号折射率随电压变化曲线图,光信号在施加 35.20 mV 的电压时透射率为 0.91, 10.3 mV 时透射率为 0.06 可计算得消光比为 11.75 dB。

调制速率与调制器的器件总响应时间成反比,计算公式如下:

$$V(\text{GHz}) = \frac{1}{T} \quad (5)$$

其中 T 为材料响应时间和器件稳定时间之和,在 comsol 中计算得调制器通断时间约为 120 ps,当电压为 0~2 V 时,硅材料的材料响应时间为 30 ps^[36],可计算得调制器的调制速率约为 6.7 GB。

由于硅的热光系数是正值,这意味着随着温度的升高,硅的折射率会相应增大^[37]。基于不同工作温度下硅的色散折射率的结果^[38](详见补充材料 2),选择温度范围是从 100 K 到 750 K,对应加热电压的范围从 0~36 mV(其中假设器件开始的工作温度为 100 K),并且选择了 50 K 的温度间隔用 FDTD

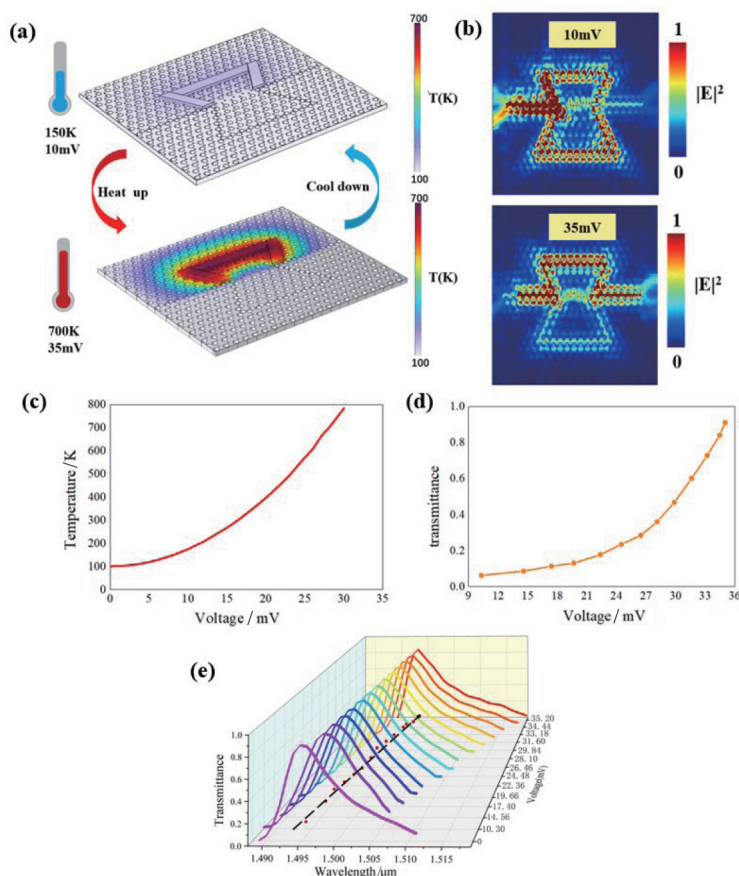


图4 热光调制器不同电压下温度分布图、电场强度分布和干涉峰位置的移动趋势图:(a)硅基能谷光子晶体 MZI 电光调制器不同电压下温度分布图;(b) 电压为 10 mV 和 35 mV 时 MZI 在 1 528.95 nm 处的电场强度分布;(c) L_1 温度随电压变化曲线图;(d) 1 528.95 nm 波长的光信号折射率随电压变化曲线图;(e) 不同电压下干涉峰位置的移动趋势图

Fig. 4 Thermo-optical modulator temperature distribution, electric field intensity distribution, and moving trend of interference peak positions at different voltages: (a) Temperature contour plots of the MZI electro-optic modulator at different voltages; (b) Distribution of the electric field intensity of MZI at 1 528.95 nm at voltages of 10 mV and 35 mV; (c) Plot of temperature versus voltage of L_1 ; (d) Plot of transmittance versus voltage in the MZI at 1 528.95 nm; (e) Plots of the interference peak positions at different voltages

进行仿真。在 250 K 到 300 K 这一区间,特别选择了 293 K 的温度,即常用的室温点进行研究,得到不同温度下透射率曲线(具体见补充材料 6),最高的透射率可达 0.91。选择一个固定的波长 $\lambda = 1\,528.95\text{ nm}$ 进行研究,信号折射率随电压变化曲线图如图 4(d)所示,电压为 10 mV 和 35 mV 时 MZI 在 1 528.95 nm 处的电场强度分布如图 4(b)所示,可以通过改变电压调节折射率。如图 4(e)所示为不同电压下干涉峰位置,从图中可以观察到,随着电压的增加,透射率峰值逐渐增高(从 0.87 增长到 0.91)。同时随着工作温度的升高,带隙的中心波长由于硅的正热光系数而红移,工作带宽从 100 K 时的 1 450.00~1 759.10 nm 变化到 750 K 时的 1 481.11~1 801.99 nm,带隙宽度变得更大(从 100 K 时的 309.1 nm 增长为 750 K 时的 320.88 nm),即透

射光谱的波长位置随温度的升高而发生红移,可实现精确的电压调控。

在实验中,加工误差是不可避免的,可能导致结构中圆形空气孔尺寸不均匀,为了研究加工误差的影响,随机的模拟了全通陷波调制器圆形空气孔尺寸具有 10% 加工误差,这些误差随机分布在整个结构中。全通陷波滤波器在 1 528.95 nm 波长附近无误差和有误差的透射光谱几乎保持不变。因此,10% 的制造误差并不会影响拓扑全通陷波滤波器的性能,验证了该器件在实际制造中的可行性。

综上所述,本文设计并研究的能谷光子晶体马赫曾德热光调制器能够通过控制电加热器的电压来调整波长在 1 528.95 nm 的光信号“通”“断”状态下的透射率分别为 0.91、0.061,消光比为 11.75 dB,调制器具有插入损耗低至 0.41 dB,和 6.7 GB 的调

制速率。因此,通过精确控制施加的电压,可以有效地调制光信号的强度,实现对光强的精确控制。

3 结论

本文基于拓扑能谷光子晶体的抗散射特性及其结构简单特点设计了硅基能谷光子晶体 MZI 热光调制器。这种设计克服传统波导和光子晶体 MZI 热光调制器面临的尺寸庞大和反向散射等问题。通过加入加热器外加电压,实现局部升温来通过热光效应调节其中一条臂(波导)的有效折射率,实现相位调控,改变干涉条件。该热光调制器设计紧凑,其面积仅为 $9.26\ \mu\text{m} \times 7.99\ \mu\text{m}$ 。同时实现了高前向透射率 0.91,低插入损耗 0.41dB。此外,本文所设计的硅基能谷光子晶体 MZI 热光调制器能够通过 CMOS 纳米加工技术进行实验制备,展示了良好的实验可行性。因此,该研究为硅基热光调制器等领域的发展提供了新设计方案,可以在光通信和集成光子器件等多个领域拥有广泛应用前景。

References

- [1] Lin J J, Bo F, Cheng Y, et al. Advances in on-chip photonic devices based on lithium niobate on insulator[J]. Photonics Research 2020 8(12): 1910-1963.
- [2] Jin M, Wei Z Y, Meng Y F, et al. January. Silicon-based graphene electro-optical modulators[J]. In Photonics 2022 9(2): 82.
- [3] Han C G, Jin M, Tao Y S, et al. Recent progress in silicon-based slow-light electro-optic modulators[J]. Micromachines 2022 13(3): 400.
- [4] Sinatka G, Christopoulos T, Tsilipakos O, et al. Electro-optic modulation in integrated photonics.[J] Journal of Applied Physics 2021 130(1): 011101.
- [5] GUO Hong-Jie, LIU Hai-Feng, WANG Zhen-Nuo, et al. Design of a novel Y-junction electro-optic modulator based on thin film lithium niobate[J]. J. Infrared Millim. Waves 2022 41(3): 626-630.
(郭宏杰,刘海峰,王振诺,等.基于铌酸锂薄膜的Y波导集成调制器设计[J].红外与毫米波学报), 2022 41(3): 626-630.
- [6] WEI Hong-Zhen, YU Jin-Zhong, XIA Jin-Song, et al. Fast response SOI Mach-Zehnder thermo-optical modulator[J]. Journal of Semiconductors, 2002, 23(5): 509-512.
(魏红振,余金中,夏金松,等.快速响应SOI马赫曾德热光调制器[J].Journal of Semiconductors), 2002, 23(5): 509-512
- [7] TIAN Long, ZENG Li-Ang, ZHANG Xiao-Li, et al. Development and Application of Resonant Electro-Optical Phase Modulation and Photoelectric Detection Devices[J]. Acta Phys. Sin. 2023, 72(14): 148-502.
(田龙,郑立昂,张晓莉,等.谐振型电光相位调制及光电探测功能器件的研发及应用[J].物理学报), 2023, 72(14): 148-502.
- [8] Chen Xuechun, Wang Nan, He Chaojian, et al. Development of all-fiber nanosecond oscillator using actively Q-switched technologies and modulators [J]. Optics & laser technology, 2023, 157: 108709.
- [9] WANG Xing-Jun, SU Xiao-Tang, ZHOU Zhi-Ping Recent Advances in Silicon-based Optoelectronics[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica 2015, 45(1): 14201.
(王兴军,苏昭棠,周治平.硅基光电子学的最新进展[J].中国科学:物理学力学天文学), 2015, 45(1): 14201.
- [10] YU Si-Yuan. Main Technologies and Challenges of Photonic Integration[J]. Optics & Optoelectronic Technology 2019, 17(2): 6-12
(余思远.光子集成主要技术及主要挑战[J].光学与光电技术), 2019, 17(2): 6-12.
- [11] Pang F F, Liu H H, Guo H R, et al. In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on double cladding fibers for refractive index sensor. IEEE Sensors Journal [J]. IEEE Sensors Journal 2011 11(10): 2395.
- [12] Liu Y, Peng W, Liang Y Z, et al. Fiber-optic Mach-Zehnder interferometric sensor for high-sensitivity high temperature measurement. Optics Communications [J]. 2013 300:194-8.
- [13] LI Geng-Lin, JIA Yue-Chen, CHEN Feng. Research progress on on-chip photonics devices of lithium niobate thin film on insulators[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(15): 234-249.
(李庚霖,贾曰辰,陈峰.绝缘体上铌酸锂薄膜片上光子学器件的研究进展[J].物理学报), 2020, 69(15): 234-249.
- [14] CHEN Hong-Xiang, LIU Mo-Dian, FAN Zhi-Bin, et al. Topological light transport in valley photonic crystals with low symmetry performance[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(10): 181-189.
(陈鸿翔,刘墨点,范智斌,等.低对称性能谷光子晶体中的拓扑光传输[J].物理学报), 2024, 73(10): 181-189.
- [15] HAN Xue-Ting, FEI Hong-Ming, LIN Han, et al. Design of heterostructure of complete photon bandgap optical waveguide for asymmetric transmission of circularly polarized light[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(09): 152-160.
(韩雪婷,费宏明,林瀚,等.实现圆偏振光非对称传输的完全光子禁带光波导异质结构的设计[J].光学学报), 2021, 41(09): 152-160.
- [16] ZHI Wen-Qiang, FEI Hong-Ming, HAN Yu-Hui, et al. One-way transmission of funnel-type complete photonic bandgap optical waveguide[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(03): 321-329.
(智文强,费宏明,韩雨辉,等.漏斗型完全光子带隙光波导单向传输[J].物理学报), 2022, 71(03): 321-329.
- [17] WU Min, FEI Hong-Ming, LIN Han, et al. Design of asymmetric transport heterostructure of photonic crystals based on two-dimensional hexagonal boron nitride materials[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(02): 422-430.
(武敏,费宏明,林瀚,等.基于二维六方氮化硼材料的光子晶体非对称传输异质结构设计[J].物理学报), 2021, 70(02): 422-430.
- [18] FEI Hong-Ming, YAN Shuai, LIN Yu-Cheng, et al. Au-

- tocollimation effect photonic crystal heterostructure that can realize asymmetric transmission of broadband light waves[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(18): 276–283.
(费宏明, 严帅, 徐瑜成, 等. 可实现宽频带光波非对称传输的自准直效应光子晶体异质结构[J]. *物理学报*), 2020, 69(18): 276–283.
- [19] FEI Hong-Ming, WU Min, LIU Hui-Yang, et al. Research on unidirectional transmission performance of waveguide heterostructure based on total reflection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(03): 399–408.
(费宏明, 武敏, 刘辉阳, 等. 基于全反射的波导异质结构单向传输性能研究[J]. *光学学报*), 2018, 38(03): 399–408.
- [20] Fei Hongming, Zhang Qi, Wu Min, et al. Asymmetric transmission of light waves in a photonic crystal waveguide heterostructure with complete bandgaps. [J]. *Applied optics*, 2020, 59(14): 4416–4421.
- [21] Wu Min, Fei Hongming, LIN Han, et al. A hexagonal boron nitride super self-collimator for optical asymmetric transmission in the visible region [J]. *Optical Materials*, 2021, 112: 110483.
- [22] Wu Min, Yang Yibiao, Fei Hongming, et al. Unidirectional transmission of visible region topological edge states in hexagonal boron nitride valley photonic crystals. [J]. *Optics express*, 2022, 30(4): 6275.
- [23] LI Xue-Mei, ZHANG Ming-Da, ZHU Xiao-Dong, et al. Unidirectional waveguide based on valley Hall effect in optical communication band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(19): 175–181.
(李雪梅, 张明达, 朱小冬, 等. 光通信波段中基于谷霍尔效应的单向波导[J]. *光学学报*), 2021, 41(19): 175–181.
- [24] Wang Xiaorong, Fei Hongming, Lin H, et al. High-performance chiral all-optical OR logic gate based on topological edge states of valley photonic crystal[J]. *Chinese Physics B*, 2023, 32(07): 455–461.
- [25] Kang Lijuan, Fei Hongming, Lin Han, et al. Thermal tunable silicon valley photonic crystal ring resonators at the telecommunication wavelength. [J]. *Optics express*, 2023, 31(2): 2807.
- [26] ZHANG Ya-Ming, FEI Hong-Ming, LIN Han, et al. Design of Low-Symmetry All-Dielectric Elliptical Lattice Energy Valley Photonic Crystal[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40: 547–553.
(张娅敏, 费宏明, 林瀚, 等. 设计低对称性全电介质椭圆格点能谷光子晶体[J]. *红外与毫米波学报*), 2021, 40: 547–553.
- [27] Fei Hongming, Wu Min, Lin Han, et al. Tunable hexagonal boron nitride topological optical delay line in the visible region [J]. *Chinese Optics Letters*, 2024, 22 (05) : 129–135.
- [28] He Xintao, Liang Entao, Yuan Jiajun, et al. A silicon-on-insulator slab for topological valley transport [J]. *Nature communications*, 2019, 10, : 872.
- [29] Han Yuhui, Fei Hongming, Lin Han, et al. Design of broadband all-dielectric valley photonic crystals at telecommunication wavelength [J]. *Optics Communications*, 2021, 488: 12486.
- [30] Wang Xiaorong, Han Yuhui, Fei Hongming, et al. Design of wavelength division multiplexing devices based on tunable edge states of valley photonic crystals [J]. *Optics express*, 2023, 31(9): 13933.
- [31] Shalaev M I, Walasik W, Tsukernik A, et al. [29] Robust topologically protected transport in photonic crystals at telecommunication wavelengths [J]. *Nature nanotechnology* 2019 14(1): 31.
- [32] Rizal C, Niraula Compact. Si-based asymmetric MZI waveguide on SOI as a thermo-optical switch [J], *Opt. Commun.* 2018, 410, 947–955.
- [33] TANG Chang-Ping, DENG Ming, ZHU Tao, et al. Research on refractive index sensor based on photonic crystal fiber M-Z interferometer [J]. *Optoelectronics. Laser*, 2011, 22(09): 1304–1308.
(唐昌平, 邓明, 朱涛, 等. 基于光子晶体光纤 M-Z 干涉仪的折射率传感器研究[J]. *光电子. 激光*), 2011, 22(09): 1304–1308.
- [34] Tong Ruijie, Zhao Yong, Hu Huafeng, et al. Large measurement range and high sensitivity temperature sensor with FBG cascaded Mach-Zehnder interferometer [J], *Opt. Laser Technol.* 2022, 125: 10603.
- [35] JIANG Peng-Peng Unidirectional conduction and application of topological optical waveguide based on valley Hall effect [D]. *University of Electronic Science and Technology of China*, 2022
(蒋鹏鹏. 基于谷霍尔效应的拓扑光波导单向传导及应用研究[D]. *电子科技大学*, 2022.
- [36] Terada K, Miyasaka K, Kondo N, et al. Optimized optical coupling to silica-clad photonic crystal waveguides [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 4695 – 4698.
- [37] Kumar A, Gupta M, Pitchappa P, et al. Active Ultrahigh-Q (0.2×10⁶) THz Topological Cavities on a Chip [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(27): 2202370.
- [38] Li Hai. Refractive index of silicon and germanium and its wavelength and temperature derivatives [J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1980, 9 (3) : 561–658.