

引用本文:余闰,杨岚翌,牛磊,等.硅基 Sb_2Se_3 相变材料非易失性电控光开关[J].光通信技术,2025,50(1):65–71.

硅基 Sb_2Se_3 相变材料非易失性电控光开关

余闰¹,杨岚翌¹,牛磊³,王荣平³,吕业刚¹,徐培鹏^{1,2*}

(1. 宁波大学 信息科学与工程学院,浙江 宁波 315211;

2. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所,上海 200050;3. 宁波大学 高等技术研究院,浙江 宁波 315211)

摘要:为解决硅基光子集成电路因热光/载流子效应调控机制导致的器件尺寸大、静态功耗高及易失性问题,设计了2种基于硅基 Sb_2Se_3 相变材料的非易失性电控光开关结构——非对称方向耦合器(ADC)与马赫-曾德干涉仪(MZI)。通过硅基PIN掺杂电热调制器调控 Sb_2Se_3 的晶态。实验结果表明,ADC光开关在1 550 nm波长下非晶态与晶态的串扰分别为-11 dB和-22 dB,插入损耗约为0.4 dB与1 dB,耦合长度优化至23.65 μm ,结构紧凑且具备多级调控能力;MZI光开关的消光比超过14 dB,单次最大调控能耗仅为0.32 mJ,展现出良好的低功耗特性。

关键词:光开关;相变材料;多级操作;方向耦合器;马赫-曾德干涉仪

中图分类号:TN252 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0065-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.011

Silicon-based Sb_2Se_3 phase-change material nonvolatile electrically controlled optical switch

YU Run¹, YANG Lanzhao¹, NIU Lei³, WANG Rongping³, LYU Yegang¹, XU Peipeng^{1,2*}

(1. Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China;

2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

3. Advanced Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo Zhejiang 315211, China)

Abstract: To address the issues of large device size, high static power consumption, and volatility caused by thermo-optic/carrier effect modulation mechanisms in silicon-based photonic integrated circuits, two types of non-volatile electrically controlled optical switch structures based on silicon-based Sb_2Se_3 phase-change materials are designed—an asymmetric directional coupler (ADC) and a Mach-Zehnder interferometer (MZI). The crystalline state of Sb_2Se_3 is modulated using a silicon-based PIN doped electro-thermal modulator. Experimental results show that the ADC optical switch achieves crosstalk values of -11 dB and -22 dB in the amorphous and crystalline states, respectively, at a wavelength of 1 550 nm, with insertion losses of approximately 0.4 dB and 1 dB. The coupling length is optimized to 23.65 μm , resulting in a compact structure with multi-level modulation capability. The MZI optical switch exhibits an extinction ratio exceeding 14 dB, with a single modulation energy consumption of only 0.32 mJ, demonstrating excellent low-power characteristics.

Key words: optical switch, phase-change material, multi-level operation, directional coupler, Mach-Zehnder interferometer

0 引言

硅基光子集成电路(PICs)通常由可调分束器和移

收稿日期:2025-02-21。

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2801300)资助;浙江省自然科学基金(LZ24F050001)资助。

作者简介:余闰(1999—),男,湖北鄂州人,硕士研究生,现就读于宁波大学信息科学与工程学院光电信息工程专业,研究方向为硅基相变材料光开关。作为主要成员参与国家及省部级科研项目2项,包括国家重点研发计划及浙江省自然科学基金项目。

***通信作者:**徐培鹏(1985—),男,博士,副研究员,主要从事集成光电子器件的研究。



相器阵列构成^[1],其应用已从光互连扩展到光学计算^[2]、可编程光学阵列^[3]以及量子信息处理^[4]等领域。为实现大规模集成,器件需兼具多功能性、微型化与低功耗特性。目前,PICs的调控主要依赖热光效应^[5]和自由载流子效应^[6]等弱调谐机制,这些机制的折射率变化较小导致器件尺寸较大且需持续供电以维持状态,从而产生较高的静态能耗,严重制约了PICs发展^[7-9]。硫系非易失性相变材料(PCM)通过晶态-非晶态双稳态相变实现显著的折射率变化,其调谐能力较传统热光/载流子效应提升2个数量级,使可重构光子

余闰,杨岚墨,牛磊,等:硅基 Sb_2Se_3 相变材料非易失性电控光开关

器件尺寸得以显著缩小^[10-11]。其非易失特性支持零静态功耗运行^[12-13],且与硅基/氮化硅平台兼容,可通过溅射/热蒸发实现互补金属氧化物半导体(CMOS)集成^[14]。然而,传统硫系材料锗锑碲($\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, GST)和锗化碲(GeTe)^[15]在近红外通信波段表现出较高的吸收损耗^[16],限制了其在可重构非易失光子器件中的应用。为此,新型宽带隙硫系材料(如 Sb_2Se_3 、 Sb_2S_3)因兼具低损耗、高折射率变化成为研究焦点^[17]。其中, Sb_2Se_3 因其低吸收损耗在近红外波段表现出优异的光学性能,为开发紧凑、低功耗的可编程光子器件提供了新路径^[18]。2024年,FANG Z等人^[19]制作了基于 Sb_2Se_3 的硅基方向耦合器开关,其插入损耗约0.36 dB,在晶态与非晶态下的消光比分别为15 dB和8 dB,器件耦合长度为33 μm ,并成功实现了多级操作功能,但该器件结构尺寸较大。同年,SHANG K等人^[20]设计了基于 Sb_2Se_3 材料的多模干涉耦合器(MMI)。该器件在35 nm带宽范围内插入损耗仅约为1 dB,串扰为-15 dB,但仅展示了晶态和非晶态的切换,并没有实现多级操控。

为此,本文设计基于非对称方向耦合器(ADC)和马赫-曾德尔干涉仪(MZI)2种结构的硅基 Sb_2Se_3 相变材料非易失性电控光开关。

1 器件设计与理论分析

本文基于硅基 Sb_2Se_3 相变材料混合波导,设计2种非易失性电控光开关结构:ADC光开关和MZI光开关。这2种结构分别基于不同的光学原理,但都利用相变材料的晶态调控实现光路的非易失性切换。

1.1 ADC光开关设计

1.1.1 工作原理及结构

根据耦合模理论,当2根平行波导相互靠近且满足相位匹配条件时,光能量在足够的耦合长度下会发生交换,即光从一根波导完全耦合至另一根波导;而在相位失配时,则仅产生部分耦合。基于这一原理,本文将纯硅波导与硅基相变材料混合波导相组合。通过集成PIN加热器调控相变材料的晶态,利用其晶态变化引起波导折射率的显著改变,从而控制光能量的耦合行为,最终实现光开关的功能。集成相变材料的ADC的三维结构图与横截面图如图1所示,该器件基于绝缘体上硅(SOI)平台设计。ADC结构采用非对称设计,由平板厚为90 nm、脊高为130 nm的脊形硅波导组成,混合波导顶部集成厚为30 nm的 Sb_2Se_3 相变材料。考虑到工艺容差,混合波导中相变材料的宽度比硅基部分小100 nm。2根平行波导由4根倾斜的波导

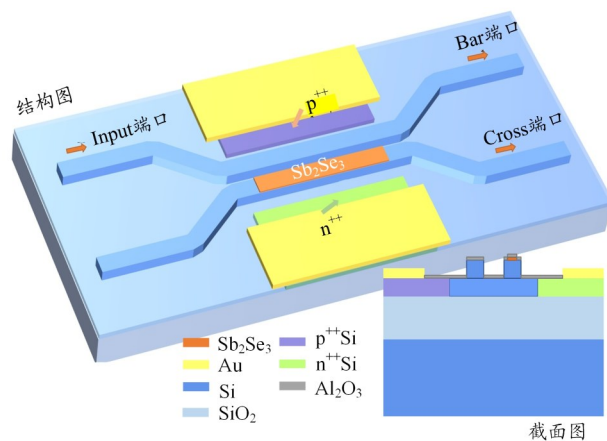


图1 ADC的三维结构图与截面图

引出(斜率为1/16),并在器件表面覆盖1层40 nm厚的 Al_2O_3 保护层,以防止相变材料在加热过程中被氧化。这种结构设计不仅保证了良好的光学性能,还兼顾了工艺可行性和稳定性。器件工作时,横电(TE)偏振光从硅波导的Input端口输入。当相变材料处于非晶态时,混合硅波导与纯硅波导之间满足相位匹配条件,光在耦合区域内高效转移至混合波导,并从Cross端口输出。相反,处于晶态时,其较高的折射率显著改变混合波导的模式分布,破坏与纯硅波导之间的相位匹配条件,导致耦合效率大幅降低。输入光主要保持在纯硅波导中,并从Bar端口输出。通过切换相变材料状态,光开关可实现灵活的光路控制。

1.1.2 关键参数优化设计

为实现非晶态下的相位匹配,本文通过三维有限差分法系统仿真优化波导参数,确定了纯硅波导宽度为455 nm与混合波导硅宽度为413 nm的最佳组合,确保在非晶态下两波导有效折射率的精确匹配($n_{\text{eff}} = 2.34$)。同时,为满足非晶态与晶态耦合长度比值为2的设计条件^[21],进一步确定了两波导间距为320 nm,对应的耦合长度分别为28 μm (非晶态)和14 μm (晶态)。此参数组合为初始设计依据。

在此基础上,本文利用三维有限差分法(3D-FDTD)对光开关进行优化,发现倾斜引出波导(斜率1/16)的耦合效应可显著缩短耦合长度^[22]。优化后参数为:纯硅波导宽度为455 nm、混合波导中硅的宽度为417 nm、相变材料宽度为317 nm、波导间距为364 nm、耦合长度为23.65 μm 。相变材料在非晶态和晶态下的光场分布情况如图2所示。可以看出,非晶态的光路状态为交叉式场分布,晶态则是直通的,表明器件具有良好的光路切换特性。非晶态与晶态相变材料的光仿真损耗图如图3所示。在非晶态下,

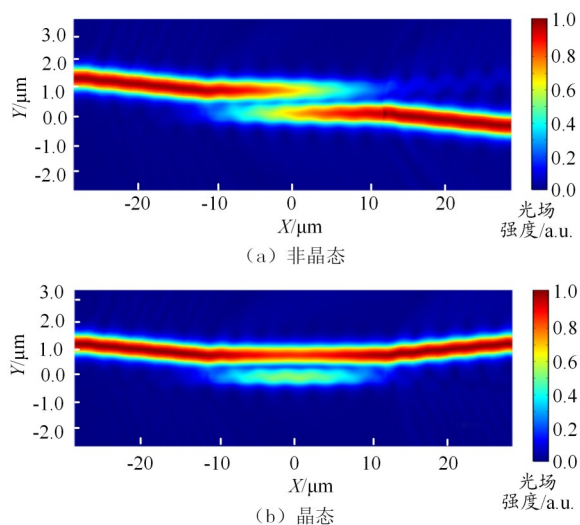
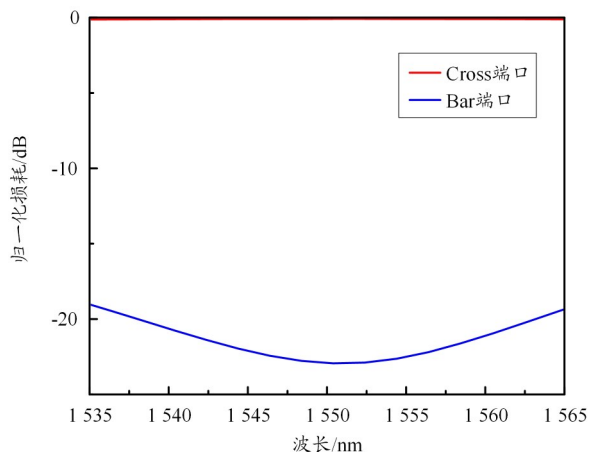
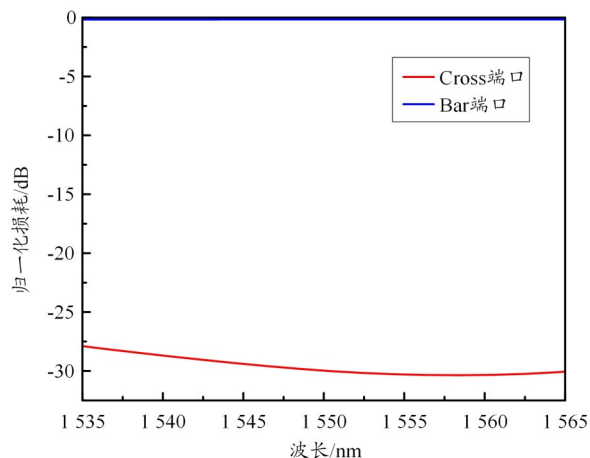


图2 光场仿真图



(a) 非晶态



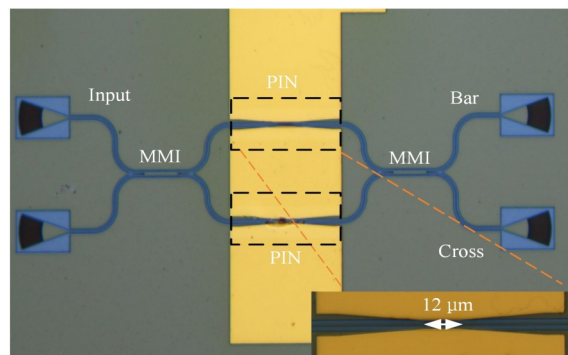
(b) 晶态

图3 非晶态与晶态相变材料的光仿真损耗图

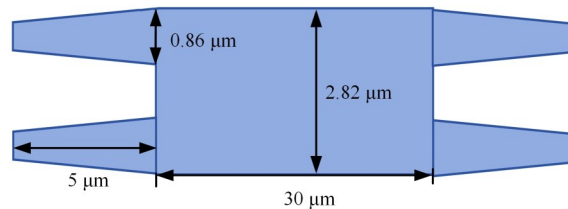
Cross 端口输出, 其归一化损耗接近 0 dB (插入损耗低); 而泄露到 Bar 端口的功率 (串扰) 低于 -18 dB; 在晶态下, 光从 Bar 端口输出, 其归一化功率接近 0 dB; 而泄露到 Cross 端口的损耗 (串扰) 低于 -25 dB。此外, 利用 Comsol 多物理场仿真计算和系统参数优化 PIN 加热器的结构, 得出掺杂区与波导的距离为 $0.3\ \mu\text{m}$, 能有效降低自由载流子吸收损耗 (约 $70\ \text{dB/cm}$), 使器件在电功耗与光损耗之间实现良好平衡。

1.2 MZI 光开关设计

MMI 光开关采用经典的双光束干涉原理, 其结构如图 4(a) 所示。器件整体尺寸为 $0.48\ \text{mm} \times 0.33\ \text{mm}$, 核心由 2 个相同的 MMI 构成, 其结构如图 4(b) 所示。工作时, 左侧 MMI 将输入光均分至干涉仪的上、下两臂; 随后, 2 束光在右侧 MMI 中重新合并并发生干涉, 其输出状态由两臂引入的相位差进行调控。每条干涉臂集成 1 段长为 $12\ \mu\text{m}$ 、厚为 $30\ \text{nm}$ 的 Sb_2Se_3 相变材料以及在混合波导两侧重掺杂形成一个 PIN 加热器。当 2 束光在输出端 MMI 重新合并时, 其相位差决定干涉结果。相位差为波长的整数倍时, 发生相长干涉, 光从 Cross 端口输出; 相位差为半波长的奇数倍时, 发生相消干涉, 光从 Bar 端口输出。通过调控 2 个 PIN 加热器, 可精确控制光路的相位差, 从而实现光信号的动态调制。



(a) MZI 光学显微镜图



(b) MMI 结构示意图

图4 MZI 光开关结构图

余闰,杨岚墨,牛磊,等:硅基 Sb_2Se_3 相变材料非易失性电控光开关

2 制备工艺与测试方法

MZI与ADC均基于6次电子束曝光(EBL)的核心制备工艺流程如图5所示,具体步骤如下:流程始于商用绝缘体上硅晶圆。1)通过第一次EBL和电感耦合等离子体刻蚀,对220 nm厚的顶层硅进行部分刻蚀(深度130 nm),形成脊形波导基础结构。2)掺杂区域通过第二、三次EBL分别定义P型与N型掺杂区域窗口,使用600 nm厚的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光刻胶分别进行掩膜,依次进行硼(p)离子(剂量为 2×10^{15} ions/cm²,能量为15 keV)和磷(n)离子(剂量为 2×10^{15} ions/cm²,能量为25 keV)注入,并经快速热退火激活,构建PIN型电热调制器结构。3)通过第四次EBL定义电极接触区域,采用电子束蒸发沉积铬/金叠层金属,再经剥离工艺形成金属电极。4)在沉积前,使用缓冲氧化物刻蚀溶液短暂处理表面以优化欧姆接触。5)通过第五次EBL定义图形化窗口,利用磁控溅射技术选择性沉积30 nm厚的非晶 Sb_2Se_3 相变材料薄膜于混合波导区域。6)采用原子层沉积技术在150 °C下生长40 nm厚的 Al_2O_3 薄膜作为钝化层,实现器件表面保护与相变材料防氧化。7)通过第六次EBL定义电极接触区域,并利用缓冲氧化物刻蚀选择性去除焊盘上方的钝化层,完成电学接触通道的开启。

3 实验结果

3.1 ADC光开关性能分析

对ADC光开关的性能测试表明,其工作波段覆盖了1 535~1 565 nm的通信窗口,测试结果如图6所示。从图6(a)可以看出,当 Sb_2Se_3 相变材料处于非晶态时,光信号从Cross端口输出。在此状态下,整个波段内的

串扰(Bar端口的归一化输出功率)均低于-10 dB。特别在中心波长1 550 nm处,两端口之间的光功率损耗差(串扰)为-11 dB,而Cross端口的插入损耗经测量为0.7 dB。若扣除测试结构中PIN掺杂引入的额外损耗,该非对称方向耦合器本身在非晶态下的插入损耗可优化至约0.4 dB。在非晶态测试完成后,通过向集成PIN加热器施加一系列5.5 V、约0.4 ms的电脉冲,成功将 Sb_2Se_3 相变材料转换至晶态,如图6(b)所示。器件状态随之切换,光信号转为从Bar端口输出。在此晶态下,器件在1 535~1 565 nm的通信波段内表现出优异的隔离度,串扰低于-20 dB。特别在中心波长1 550 nm处,串扰达到-22 dB。若不计入PIN掺杂引入的额外损耗,Bar端口在晶态下的插入损耗约为1 dB。在器件结构方面,本文提出的ADC光开关的耦合长度优化至23.65 μm ,与文献[19]中基于同类材料的器件(耦合长度33 μm)相比,结构更为紧凑,集成度更高。对比图3的仿真结果(串扰<-25 dB)与图6(b)的实验测量结果(串扰-22 dB),可见实际性能与仿真预期存在一定偏差。这主要源于方向耦合器对耦合长度和波导间距的高度敏感性^[22]。此外,制备过程中的工艺误差(如光刻、刻蚀、对准的精度限制)、波导几何尺寸的波动以及相变材料沉积的不均匀性等因素,共同导致了光传输效率的波动,进而造成实验与仿真结果的差异。

从Cross端口输出的多级光功率损耗如图7(a)所示。为提升数据可读性,光谱应用了窗口大小为100的Savitsky-Golay滤波器进行平滑处理,其原始未平滑数据在背景中以阴影显示。在初始状态(0级)下, Sb_2Se_3 处于完全非晶态,Cross端口的光损耗接近0 dB。

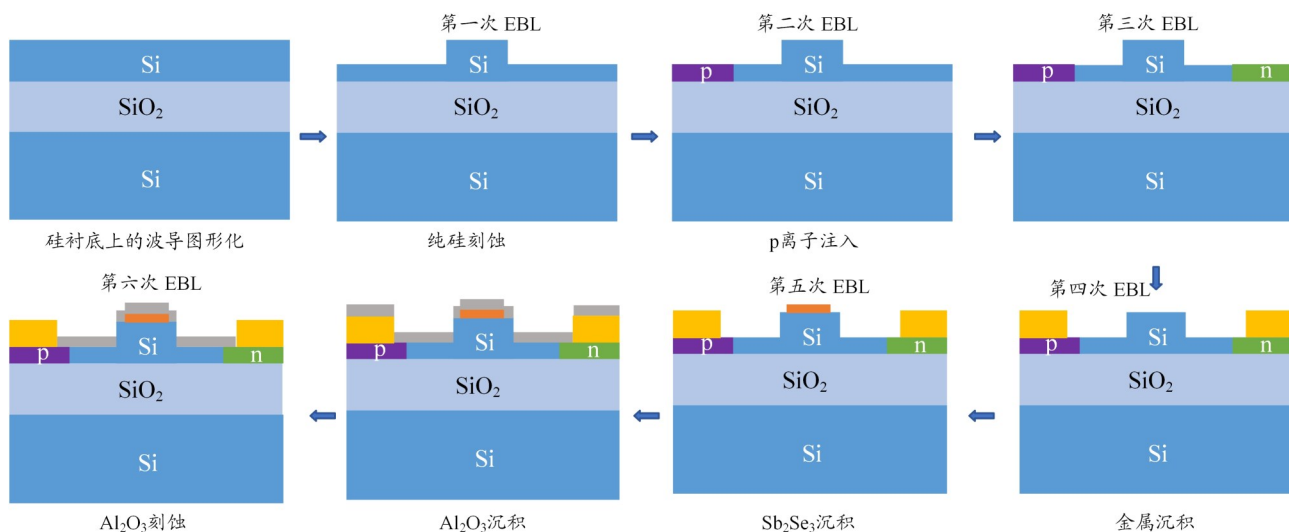
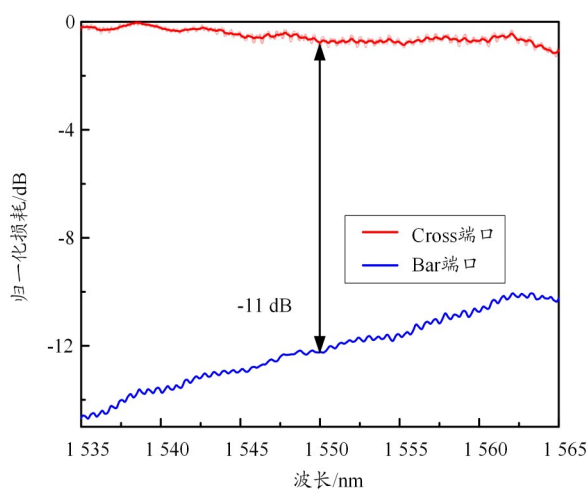
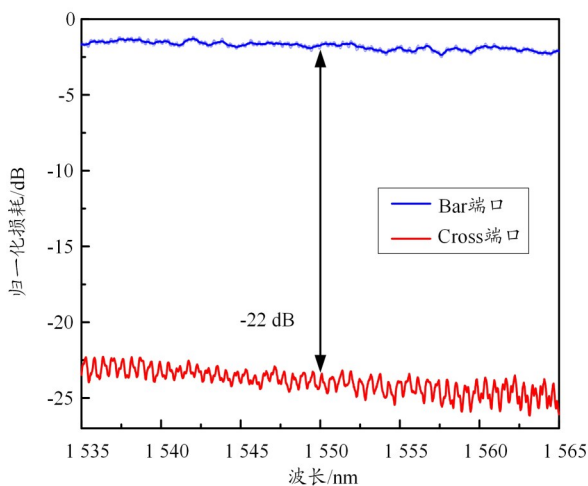


图5 EBL制备工艺流程图



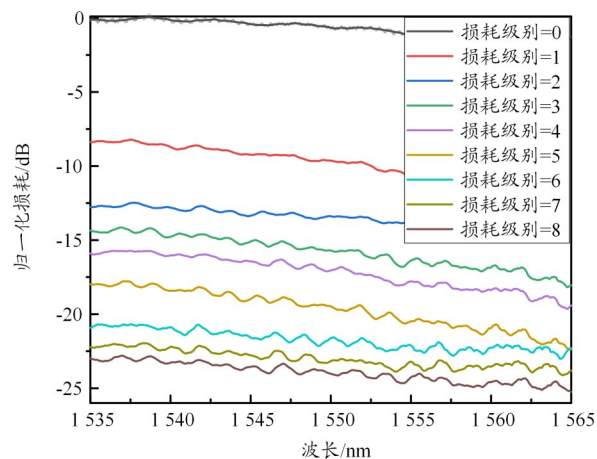
(a) 非晶态



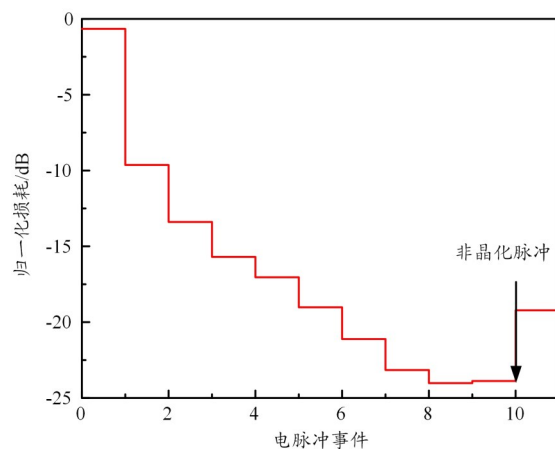
(b) 晶态

图6 定向耦合器非晶态与晶态归一化光功率损耗图

施加第一次晶化脉冲(5.5 V, 1 ms)后,光损耗显著增大约9 dB,损耗级别达到第1级。为实现更精细的中间状态调控,后续脉冲的持续时间缩短至约0.4 ms。随着第2~第4次相同电压(5.5 V)的短脉冲施加,光损耗稳步上升,但相邻级别间的损耗差值逐渐缩小,这表明随着非晶态区域减少,实现相同晶化程度所需的能量阈值增高,调控灵敏度下降。为克服此饱和趋势并继续提高晶化度,从第5级开始,逐步增加单次脉冲的持续时间(每次增加约10 μs)。此操作成功驱动损耗水平达到第8级。在此状态下,即使继续增加脉冲时间,光损耗也不再发生显著变化,表明 Sb_2Se_3 材料的晶化过程已趋于完全饱和,实现了最大程度的相变。在1550 nm波长下,Cross端口光功率损耗随电脉冲事件的变化如图7(b)所示。在第1~第8次晶化电脉冲(5.5 V, 约0.4 ms)事件下,光损耗呈现连续、稳定的阶



(a) 不同损耗级别曲线图



(b) 光功率损耗与电脉冲事件关系图

图7 ADC Cross端口的多级光功率损耗与电脉冲事件的关系图

梯式上升,第9次晶化电脉冲事件后,损耗达到最大值并趋于稳定,表明 Sb_2Se_3 相变材料已完全晶化。第10次非晶化电脉冲(8 V, 5 μs)事件后,光损耗显著回落至第5级附近(误差为0.3 dB)。这一结果表明,相变材料在多次晶化-非晶化循环后,仍能通过电脉冲调控可逆地切换至某一特定的中间状态,展现了器件良好的多级可控性。然而,第10次事件后再次施加非晶化电脉冲,光损耗并未继续降低。这是由于相变材料在多次相变过程中发生相分离现象^[23],导致其成分或相态分布不均,从而引发光学性能的不可逆劣化,限制了更高级数的调控和循环寿命。

3.2 MZI 光开关性能分析

在MZI光开关性能测试的过程中,本文对2个PIN加热器进行了电学表征,发现下臂的加热器未能成功激活。已激活的加热器表现出正常的二极管特性,其截止电压约为1 V,串联电阻约为450 Ω ;而未激活的

余闰,杨岚翌,牛磊,等: 硅基Sb₂Se₃相变材料非易失性电控光开关

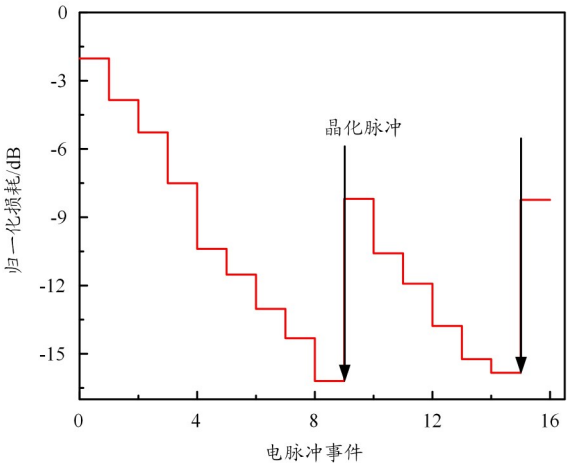
加热器则呈现极高的电阻(兆欧级别),表明掺杂离子未被充分激活。本文将其归因于快速热退火工艺(1 100 ℃,15 s)的均匀性与条件不足。为此,本文在工艺制作中将退火条件调整为950 ℃并持续10 min^[19],以确保PIN加热器被充分激活。

光最初从器件Cross端口输出,Sb₂Se₃处于晶态。实验时对器件施加了一系列非晶化电脉冲(电压8 V,初始脉宽约5 μs,单次脉冲能量约6.4 μJ)。在施加过程中,若光损耗变化不明显,则单次脉冲宽度以20 ns的步长递增,直至损耗响应饱和。从Input端口到Cross端口的多级光损耗情况,如图8(a)所示。为提升曲线可读性,原始数据应用了窗口大小为100的Savitsky-Golay滤波器进行平滑,其未平滑的原始数据在背景中以阴影显示。可以看出,每一级的光损耗变化清晰可见,表明每次脉冲事件均导致光损耗逐步增加,反映了相变材料在脉冲作用下的非晶化过程。器件从完全晶态切换至完全非晶态时,消光比超过14 dB。

图8(b)进一步展示了1 550 nm波长下光功率损耗随脉冲事件的变化。前8次脉冲为非晶化脉冲,第9次和第15次脉冲为晶化脉冲(4 V,1 ms,能量约为0.32 mJ),展现出低能耗的特性。2次循环的过程表明,器件可通过调节电压与时间实现多级操作,且脉冲事件引起的损耗变化呈现规律性,进一步说明器件具有良好的可控性。施加晶化脉冲后,光功率损耗显著下降并恢复至较低水平,展现了相变材料在不同状态间灵活切换的能力。

3.3 讨论对比

综上所述,ADC光开关凭借其亚微米级耦合长度(23.65 μm)和较高的串扰抑制能力,更适用于尺寸严苛、追求高集成度的场景,但其性能对波导间距、刻蚀



(b) 光功率损耗与电脉冲事件关系图

图8 MZI Cross端口的多级光功率损耗与电脉冲事件的关系图

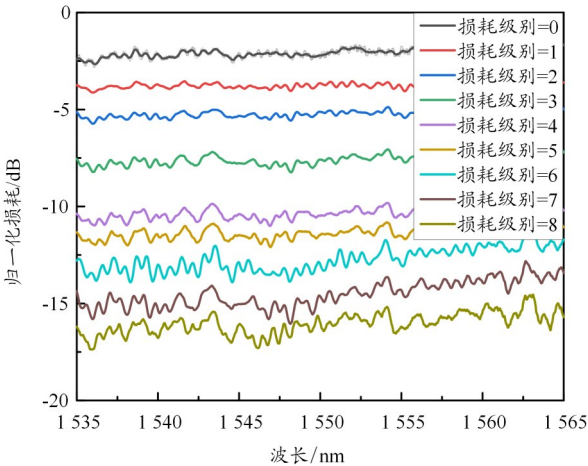
精度等工艺因素极为敏感,需依托高精度制备工艺保障一致性。而MZI光开关虽尺寸较大,但结构容差性强,在工艺精度受限或对能耗敏感的应用中更具优势,其单次调控最大能耗仅为0.32 mJ,且可通过优化退火工艺(如调整为950 ℃、10 min)进一步提升PIN加热器激活率与稳定性。然而,当前器件在循环次数与调控级数方面仍受限于相变材料的疲劳特性(如相分离)及工艺均匀性。后续研究可通过优化Sb₂Se₃沉积工艺、引入梯度脉冲调控策略,进一步提升器件的可靠性与级数精度。2种结构性能对比情况如表1所示。

表1 2种结构的性能对比

性能参数	ADC光开关	MZI光开关
串扰 (非晶/晶态)/dB	-11/-22	消光比>14
插入损耗/dB	~0.4/1	未明确
耦合长度/ 器件尺寸	23.65 μm (紧凑型)	0.48 mm×0.33 mm (较大)
单次调控能耗/mJ	未明确	~0.32
多级调控能力	支持8级 可逆调控	支持非晶-晶态 循环调控
工艺敏感性	高(依赖波导间距与耦合精度)	低(结构容差性较好)

4 结束语

本文提出了一种硅基Sb₂Se₃相变材料混合波导集成的非易失性光开关,并验证了2种结构下的光开关性能。其中,在1 550 nm处,ADC光开关展现非晶态/晶态串扰为-11/-22 dB,插入损耗分别约为0.4 dB与



(a) 不同级别损耗曲线图

1 dB,耦合长度优化至 23.65 μm ,且成功实现了多级电控操作,展现出优异的串扰性能、高紧凑性和良好的可控性。在 MZI 光开关中,同样实现了多级电控调制,非晶态与晶态之间的消光比超过 14 dB,且单次调控时最大能量消耗仅~0.32 mJ,表现出低能耗与良好的可控性。这一结果充分证明,该 MZI 光开关能够通过调节电脉冲的电压与时间,实现对光损耗的可逆、多级调控。脉冲事件与损耗水平之间呈现的规律性和可重复性,展现了相变材料在不同状态间灵活切换的能力,凸显了相变材料在低功耗、非易失光开关与光调制应用中的巨大潜力。该研究结果为低功耗、紧凑型、非易失可编程集成光子开关的实现提供了重要技术支持。

参考文献

- [1] Chen R, Fang Z, Perez C, et al. Non-volatile electrically programmable integrated photonics with a 5-bit operation[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 3465-1-3465-10.
- [2] Shen Y, Harris N C, Skirlo S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. Nature Photonics, 2017, 11(7): 441-446.
- [3] Capmany J, Gasulla I, Pérez D. The programmable processor[J]. Nature Photonics, 2016, 10(1): 6-8.
- [4] Harris N C, Steinbrecher G R, Prabhu M, et al. Quantum transport simulations in a programmable nanophotonic processor[J]. Nature Photonics, 2017, 11(7): 447-452.
- [5] Zhang W, Yao J. Photonic integrated field-programmable disk array signal processor[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 406-1-406-9.
- [6] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. Nature, 2018, 562: 101-104.
- [7] Pérez D, Gasulla I, Cradgington L, et al. Multipurpose silicon photonics signal processor core[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 636-1-636-9.
- [8] Bogaerts W, Pérez D, Capmany J, et al. Programmable photonic circuits[J]. Nature, 2020, 586(7828): 207-216.
- [9] Yang X, Lu L, Li Y, et al. Non-volatile optical switch element enabled by low-loss phase change material[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(42): 2304601-1-2304601-10.
- [10] Chen R, Fang Z, Miller F, et al. Opportunities and challenges for large-scale phase-change material integrated electro-photonics[J]. ACS Photonics, 2022, 9(10): 3181-3195.
- [11] Yang X, Nisar M S, Yuan W, et al. Phase change material enabled 2×2 silicon nonvolatile optical switch[J]. Optics Letters, 2021, 46(17): 4224-4227.
- [12] Chen R, Fang Z, Froch J E, et al. Broadband nonvolatile electrically controlled programmable units in silicon photonics[J]. ACS Photonics, 2022, 9(6): 2142-2150.
- [13] Fang Z, Chen R, Zheng J, et al. Ultra-low-energy programmable non-volatile silicon photonics based on phase-change materials with graphene heaters[J]. Nature Nanotechnology, 2022, 17(8): 842-848.
- [14] RiOs C, Du Q, Zhang Y, et al. Ultra-compact nonvolatile phase shifter based on electrically reprogrammable transparent phase change materials[J]. Photonix, 2022, 3(1): 26-1-26-13.
- [15] 朱炳达,郭丽君,朱葳,等. 基于相变材料锗锑碲的非易失性光开关设计与仿真[J]. 功能材料与器件学报, 2024, 30(6): 318-322.
- [16] Chen R, Tara V, Dutta J, et al. Low-loss multilevel operation using lossy PCM-integrated silicon photonics[J]. arXiv Preprint arXiv, 2024, 2402.08803-1-2402.08803-23.
- [17] Delaney M, Zeimpekis I, Lawson D, et al. A new family of ultralow loss reversible phase-change materials for photonic integrated circuits: Sb_2S_3 and Sb_2Se_3 [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(36): 2002447-1-2002447-10.
- [18] Wu C, Deng H, Huang Y S, et al. Freeform direct-write and rewritable photonic integrated circuits in phase-change thin films[J]. Science Advances, 2024, 10(1): eadk1361-1-eadk1361-7.
- [19] Fang Z, Mills B, Chen R, et al. Arbitrary programming of racetrack resonators using low-loss phase-change material Sb_2Se_3 [J]. Nano Letters, 2024, 24(1): 97-103.
- [20] Shang K, Niu L, Jin H, et al. Non-volatile 2×2 optical switch using multimode interference in an Sb_2Se_3 -loaded waveguide[J]. Optics Letters, 2024, 49(3): 722-725.
- [21] Teo T Y, Krbal M, Mistrik J, et al. Comparison and analysis of phase change materials-based reconfigurable silicon photonic directional couplers[J]. Optical Materials Express, 2022, 12(2): 606-621.
- [22] 庄瑞,洪晶晶,刘爱萍,等. 三维集成光学芯片中波导之间的耦合研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 352-357.
- [23] Zhou W, Shen X, Yang X, et al. Fabrication and integration of photonic devices for phase-change memory and neuromorphic computing[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(2): 022001-1-022001-26.