

MEMS静电驱动的2×2硅基波导光开关

崔博文 姚子君 陈丙根 沈吉 张海峰 武士潭 王自衡 周戡 王臣 何伟基 陈远金

2×2 silicon-based waveguide optical switch driven by mems electrostatic actuation

CUI Bo-wen, YAO Zi-jun, CHEN Bing-gen, SHEN Ji, ZHANG Hai-feng, WU Shi-tan, WANG Zi-heng, ZHOU Jian, WANG Chen, HE Wei-ji, CHEN Yuan-jin

引用本文:

崔博文, 姚子君, 陈丙根, 沈吉, 张海峰, 武士潭, 王自衡, 周戡, 王臣, 何伟基, 陈远金. MEMS静电驱动的2×2硅基波导光开关[J]. 中国光学, 2026, 19(5): 1–9. doi: 10.3724/CO.2026–0055

CUI Bo-wen, YAO Zi-jun, CHEN Bing-gen, SHEN Ji, ZHANG Hai-feng, WU Shi-tan, WANG Zi-heng, ZHOU Jian, WANG Chen, HE Wei-ji, CHEN Yuan-jin. 2×2silicon-based waveguide optical switch driven by mems electrostatic actuation[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(5): 1-9. doi: 10.3724/CO.2026-0055

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3724/CO.2026–0055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于扫描反射镜结构的多路光开关

Multi-channel optical switching based on scanning mirror instrumentation

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 136 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0020>

用于高压测量的MEMS硅-玻光纤FP压力传感器

MEMS silicon-glass fiber-optic FP pressure sensor for high-pressure measurements

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 771 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0224>

用于冲击波测量的硅MEMS光纤法珀压力传感器

Fiber-optic Fabry Perot pressure sensor for shock wave measurements based on silicon MEMS

中国光学 (中英文). 2025, 18(3): 452 <https://doi.org/10.37188/CO.2025–0010>

光子集成干涉阵列视场拼接子孔径光路设计

Photonic-integrated interferometric array field-of-view splicing subaperture optical path design

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1458 <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0030>

基于非对称混合等离子体结构的双槽超紧凑偏振分束器

Double-slot ultra-compact polarization beam splitter based on asymmetric hybrid plasmonic structure

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1215 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022–0028>

基于二维光子晶体非线性效应的全光逻辑门

All-optical logic gate based on nonlinear effects of two-dimensional photonic crystals

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 456 <https://doi.org/10.37188/CO.EN–2023–0021>

文章编号 2097-1842(2026)05-0001-09

MEMS 静电驱动的 2×2 硅基波导光开关

崔博文¹, 姚子君¹, 陈丙根¹, 沈吉¹, 张海峰¹, 武士潭¹, 王自衡¹,

周戡¹, 王臣³, 何伟基^{3*}, 陈远金^{2*}

(1. 华东光电集成器件研究所, 安徽 蚌埠 233042;

2. 杭州智元研究院有限公司, 浙江 杭州 311000;

3. 南京理工大学 光学前沿交叉研究中心, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了突破目前热光波导光开关开关速度慢、热量易积累、器件功耗高, 电光波导光开关传输损耗高, 以及现有传统光子集成电路波导光开关器件普遍存在的反馈控制复杂、难以实现大阵列规模应用且工作带宽较窄等问题, 以满足未来片上全光交换技术对快响应、低功耗、宽带、低成本、可实现大阵列规模制备应用的光开关器件为需求, 开展基于微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 驱动的硅基波导光开关器件研究。基于硅光波导技术和微机电技术交叉融合, 设计并制备了一种可实现光信号路由功能的 MEMS 静电驱动 2×2 硅基波导光开关(硅光 MEMS 光开关)。通过电子束光刻配合互补氧化物金属半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 工艺实现硅光波导和 MEMS 微执行器在晶圆上的一体化集成制备。器件在 192 μm×192 μm 尺寸下实现了 2×2 光开关功能, 开关响应速度达到 20 μs 及 15 μs, 光信号上升沿及下降沿时间分别为 15 μs 和 10 μs。在 1550 nm 消光比达到 35 dB, 插入损耗为 -0.8 dB, 在 1500 nm~1600 nm 波段消光比超过 20 dB, 器件在开启状态的保持功耗低于 0.5 μW。测试结果表明该硅光 MEMS 光开关响应速度快、调制功耗低、宽带性能良好, 在现有工艺平台下可实现大规模阵列化制备且控制方式简单, 在未来片上全光交换领域具有较大的应用价值。

关键词: 光子集成电路; 微机电系统; 硅光 MEMS; 光开关; 全光交换

中图分类号: TN491

文献标志码: A

doi: 10.3724/CO.2026-0055

CSTR: 32171.14.CO.2026-0055

2×2 silicon-based waveguide optical switch driven by mems electrostatic actuation

CUI Bo-wen¹, YAO Zi-jun¹, CHEN Bing-gen¹, SHEN Ji¹, ZHANG Hai-feng¹, WU Shi-tan¹,

WANG Zi-heng¹, ZHOU Jian¹, WANG Chen³, HE Wei-ji^{3*}, CHEN Yuan-jin^{2*}

(1. East China Institute of Photo-Electron IC, Bengbu 233042, China;

2. Hangzhou Zhiyuan Research Institute Co., Ltd, Hangzhou 311000, China;

3. Advanced Interdisciplinary Research Center for Optics, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: hewj@mail.njust.edu.cn; eoskevin@126.com

收稿日期: 2026-04-03; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 江苏省视觉传感与智能感知重点实验室开放基金 (No. JSSJCG2026013)

Supported by Open Research Fund of Jiangsu Key Laboratory of Visual Sensing & Intelligent Perception under Grant (No. JSSJCG2026013)

Abstract: To overcome the limitations of current technologies, including the slow switching speed, heat accumulation, and high power consumption of thermo-optic waveguide switches, the high transmission loss of electro-optic waveguide switches, and the complex feedback control, difficulty in large-scale array integration, and narrow operating bandwidth commonly found in traditional photonic integrated circuit (PIC) waveguide switches, to meet the future demands of on-chip all-optical switching technologies for optical switches with fast response, low power consumption, broad bandwidth, low cost, and large-scale array fabrication capabilities, this study investigates micro-electro-mechanical systems (MEMS) driven silicon-based waveguide optical switch devices. By integrating silicon photonic waveguide technology with MEMS technology, we designed and fabricated an electrostatically driven MEMS 2×2 silicon waveguide optical switch (silicon photonic MEMS switch) capable of routing optical signals. The monolithic integration of silicon photonic waveguides and MEMS microactuators on a silicon wafer was achieved using electron-beam lithography combined with complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) processes. With a footprint of $192\text{ }\mu\text{m} \times 192\text{ }\mu\text{m}$, the device successfully demonstrated 2×2 optical switching functionality. The switching response times were measured at $20\text{ }\mu\text{s}$ and $15\text{ }\mu\text{s}$, with optical signal rise and fall times of $15\text{ }\mu\text{s}$ and $10\text{ }\mu\text{s}$, respectively. At a wavelength of 1550 nm , the device achieved an extinction ratio (ER) of 35 dB and an insertion loss (IL) of -0.8 dB . Over the $1500\text{--}1600\text{ nm}$ wavelength band, the ER remained above 20 dB , and the holding power consumption in the ON state was less than $0.5\text{ }\mu\text{W}$. Experimental results demonstrate that this silicon photonic MEMS optical switch features fast response, low modulation power consumption, and excellent broadband performance. Furthermore, it can be fabricated into large-scale arrays with simple control mechanisms using existing process platforms, indicating significant application potential in future on-chip all-optical switching networks.

Key words: photonic integrated circuit; micro-electro-mechanical system; silicon photonic MEMS; optical switch; optical circuit switching

1 引言

全光交换技术的发展解决了传统光网络在光-电-光转换时的延迟和损耗问题,然而,当前商用的光交换机系统中,谷歌公司基于二维微机电系统 (Micro-electro-mechanical system, MEMS) 微镜阵列的方案^[1-3]以及 Polatis 公司采用的直接光束偏转技术^[4-6],光路切换时间均在毫秒量级^{[2][4]},并且存在着系统体积仍然较大,功耗相对较高的问题。随着人工智能算力需求的进一步增加,对高速可重构光交互网络的需求日益紧迫,且对整体系统功耗的要求越发严苛,有必要在提升全光交换设备的切换速度同时,保持较低功耗运行。

近年来,基于集成波导光开关的片上光交换技术取得一系列研究进展,光子集成器件的快速调控能力可以将光链路切换速度提升至微秒甚至纳秒量级。然而,基于传统热光效应的波导光开

关,受到调谐机理的限制开关速度难以做到小于 $10\text{ }\mu\text{s}$,在进行大规模阵列集成时存在热串扰以及功耗较高的问题^[7-10]。基于等离子色散效应/普克尔效应的电光开关也被广泛报道^[11-14],电光开关器件的响应速度可以达到纳秒量级,然而,硅基电光开关由于载流子吸收导致波导区域光学损耗大。除此之外,基于薄膜铌酸锂电光效应的光开关器件展现了良好的电光调制性能。然而,由于加工难度及成本等因素的限制,在全面商业化落地方面仍然存在一定瓶颈。

为实现硅光子集成的低功耗、低损耗、兼容现有微纳加工工艺,具备可规模阵列集成且具有良好商业化落地潜力的光开关阵列芯片,伯克利大学的 Seok 等人设计了一种基于硅光和 MEMS 交叉融合技术的 1×2 光开关。在该团队提出的 Cross-Bar 架构的 64×64 光开关阵列中,实现了光信号的多端口路由。其中单个光开关开关速率达

到亚微秒量级, 开状态时, Drop 与 Through 端的消光比在 1465 至 1540 nm 范围内超过 20 dB^[15]。国内浙江大学的 Hu 等人也提出了一种基于静电梳齿驱动十字交叉节开合的硅光 MEMS 波导光开关, 实现 16×16 端口运行^[16]。公开报道显示, 基于硅光 MEMS 技术设计的光开关器件, 兼具硅光集成芯片尺寸小和 MEMS 设计灵活^[17]、低功耗运行的优点。在物理结构上, 波导分离时可实现高隔离度, 波导靠近时则表现出高效的光调制特性。因此, 基于该技术设计并制备的器件在功耗、损耗、大规模阵列扩展性以及开关控制复杂度等方面均表现良好。

目前, 伯克利大学等人提出的光开关主要为 1×2 光开关结构, 限制了其在一些光开关拓扑结构中的应用。鉴于此, 本文提出了一种使用静电平行板 MEMS 执行器控制的垂直耦合波导结构, 通过改变平行极板之间的电势差控制垂直耦合结构中两层波导的间距, 从而实现光场能量在两层波导之间的耦合传输。基于这种可动的垂直耦合波导结构, 设计并加工出可以应用在 Benes 和 PI-Loss 等拓扑结构中的 2×2 硅光 MEMS 波导光开关。

2 硅光 MEMS 波导光开关器件设计

2.1 2×2 光路由器件工作原理

图 1(a) 所示为基于垂直耦合波导结构的 2×2 硅光 MEMS 光开关三维结构, 器件包括上下两层硅光波导结构, 其中 2 个输入及输出光学端口制作在下层, 通过一个十字交叉节连接形成总线波导, 光在总线波导中以基模形式传输。在上层同步制作了 2 组由 90°弯曲波导连接的正交布置的耦合波导结构以及 4 个 MEMS 执行器。器件通过静电驱动实现开关状态切换, 在关闭状态下, 如图 1(b) 所示, 输入端口进入的光信号经过交叉节直接传输到对应的输出端口; 在开启状态下, 如图 1(c) 所示, 在电压驱动下 MEMS 执行器进入吸合状态, 使耦合波导与总线波导的间距缩小, 输入光信号从下层耦合到上层, 经过 90°弯曲波导转弯后, 重新从上层耦合到下层, 实现光信号输出端口切换功能。

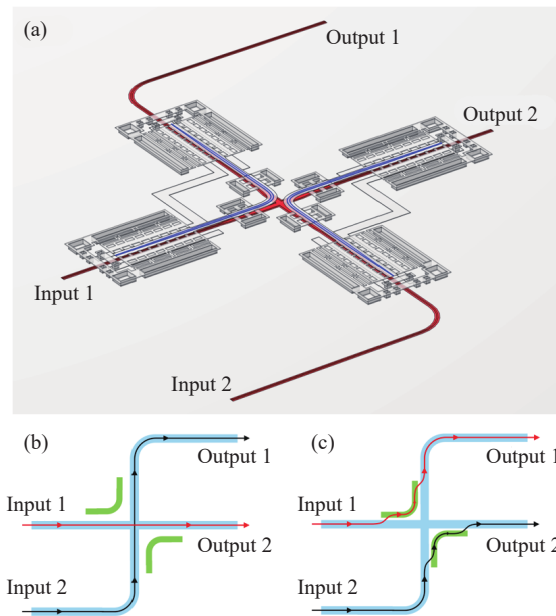


图 1 2×2 MEMS 光开关工作原理。(a) 三维结构; (b) 关闭状态下光信号传输路径; (c) 开启状态下光信号传输路径。

Fig. 1 Working principle of a 2×2 MEMS optical switch. (a) 3D structure; (b) Optical signal transmission path in the OFF state; (c) Optical signal transmission path in the ON state.

2.2 垂直耦合波导结构设计

垂直耦合波导结构的工作原理如图 2(a) 所示, 在进入开启状态后, 上层耦合波导在 MEMS 执行器的带动下与下层总线波导的间距缩小为 130 nm, 形成耦合区域, 在该耦合区域内, 下层总线波导的光场逐步转移到上层耦合波导中, 随后借助耦合波导末端连接的悬臂梁结构实现上下层

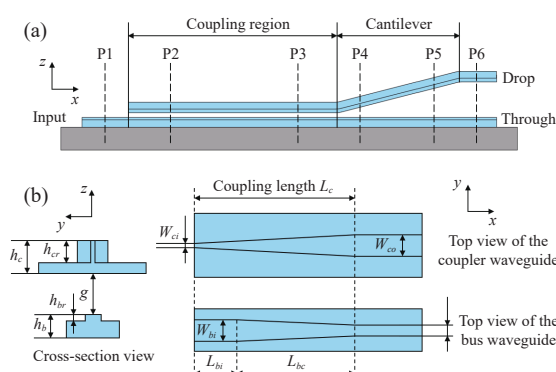


图 2 垂直耦合波导结构工作原理。(a) 开启状态示意图; (b) 耦合区域波导几何结构。

Fig. 2 Working principle of the vertical coupling waveguide structure. (a) Schematic diagram of the ON state; (b) Geometric structure of the coupling region waveguide.

波导光场的强隔离, 确保上下层波导之间无法产生耦合。

图 2(b) 为耦合区域波导的几何结构示意图。两层波导均为脊形结构, 其中位于下层的总线波导厚度为 h_b , 脊高为 h_{br} 。位于上层的耦合波导厚度为 h_c , 脊高为 h_{cr} 。两层波导均采用渐变结构提高耦合效率, 在总线波导脊宽收窄的同时耦合波导的脊宽逐渐增加, 下层总线波导的初始宽度为 W_{bi} , 在保持 L_{bi} 长度后逐步收窄到 W_{bo} , 上层耦合波导初始宽度为 W_{ci} , 经过 L_c 长度后逐步增加为 W_{co} , L_c 为耦合长度, g 为两层波导的耦合间距。

垂直耦合波导结构的下层总线波导基于厚度为 220 nm 的绝缘体上硅 (Silicon on insulator, SOI) 晶圆进行开发, 脊高 h_{br} 设计为 60 nm, 上层耦合波导基于厚度 300 nm 的多晶硅进行开发, 脊高 h_{cr} 设计为 200 nm。使用时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 进行垂直耦合波导结构的仿真设计, 为降低器件的插入损耗, 在开启状态下垂直耦合波导结构在 1550 nm 处的耦合效率预期超过 95%, 在 1400 nm~1700 nm 波段的宽带耦合效率预期超过 90%, 在关闭状态下, 在 1400 nm~1700 nm 波段的整体宽带耦合效率预期低于 0.001%, 从而确保开关消光比大于 30 dB, 并且为尽可能减小光开关器件的整体尺寸, 利用双渐变耦合波导结构可将垂直耦合波导结构的长度控制在 50 μm 以内。

设置耦合波导的初始宽度 W_{ci} 为 0.15 μm (较窄的锥头宽度更有利于耦合, 考虑加工制程限制将其设置为 0.15 μm), 耦合波导的末端宽度 W_{co} 设置为 1 μm , 总线波导初始宽度 W_{bi} 设置为 1 μm , 保持长度 L_{bi} 始终为 0 μm , 总线波导收窄后的宽度 W_{bo} 设置为 0.6 μm 。图 3 为不同耦合间距 g 下, 耦合效率随耦合长度 L_c 的变化曲线。如图 3(a) 所示, 较小的耦合间距 g 在较短的耦合长度 L_c 下更易实现高耦合效率。在 L_c 为 25 μm , g 为 130 nm 时其耦合效率超过 90%, 且耦合效率随耦合长度变化不再明显。在耦合长度 L_c 为 25 μm 的条件下, 不同间距下垂直耦合波导结构的耦合效率如图 3(b) 所示, 垂直耦合波导结构的 drop 端口透过率随着间距的增大而降低, 在开启状态下, 即间距为 130 nm 时, drop 端口在 1400 nm~1700 nm 波段的宽带透过率超过 90%, 插入损耗低于 0.5 dB,

在间距分别为 800 nm 和 1000 nm 时, 宽带消光比超过 40 dB 和 50 dB, 因此为提高器件消光比, 理想的关闭状态下波导间距需要保证大于 800 nm。

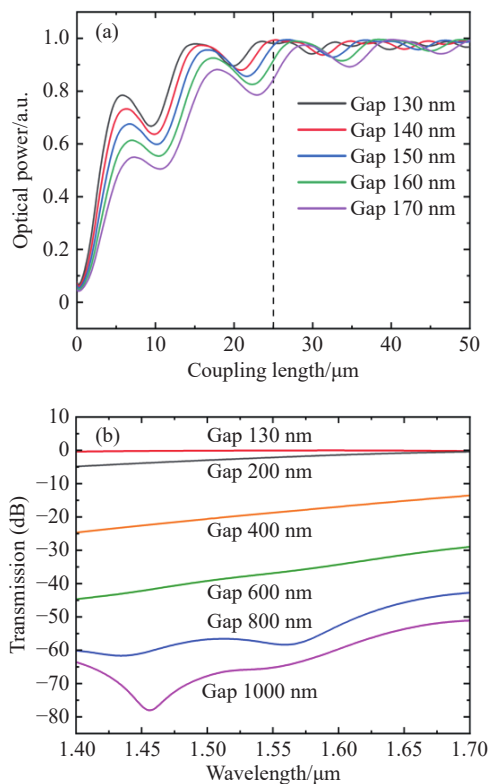


图 3 垂直耦合波导结构仿真设计。(a) 不同耦合间隔下 1550 nm 耦合效率随耦合长度变化曲线; (b) 耦合长度 25 μm 时不同间隔的宽带耦合效率。

Fig. 3 Simulation design of the vertical coupling waveguide structure. (a) Coupling efficiency at 1550 nm versus coupling length under different coupling gaps; (b) Broadband coupling efficiency for various gaps with a coupling length of 25 μm .

图 4 为垂直耦合波导结构的模式耦合过程仿真结果, 总线波导中输入光场模式分布如图 4(a) 所示, 进入耦合区域后总线波导与耦合波导之间产生模式耦合, 如图 4(b)、(c) 所示, 随着总线波导脊宽的收窄以及耦合波导脊宽的增加, 下层总线波导中的光场逐渐耦合进上层耦合波导中。在耦合波导末端连接的悬臂梁结构中, 波导的脊宽不再变化。借助悬臂梁在两端高度差作用下产生的形变, 如图 4(d)、(e)、(f) 所示, 在沿着光传输方向上总线波导与悬臂梁波导的间距逐步增加, 悬臂梁末端与总线波导的间距达到 1 μm , 在该间距下, 上下层波导耦合末端之间形成了较强的光学隔离。

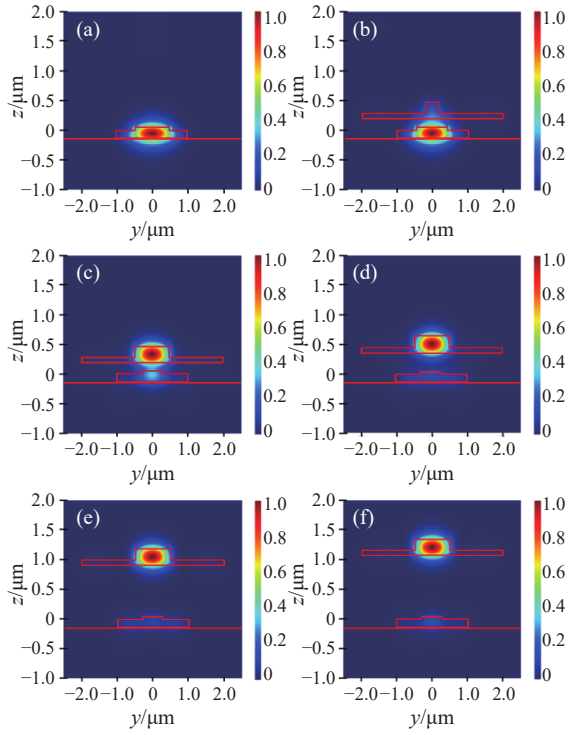


图4 开启状态下垂直耦合波导结构光场分布。(a)输入端口(图2(a)中位置P1);(b)耦合区域起始端(图2(a)中位置P2);(c)耦合区域末端(图2(a)中位置P3);(d)悬臂梁起始端(图2(a)中位置P4);(e)悬臂梁末端(图2(a)中位置P5);(f)输出端口(图2(a)中位置P6)。

Fig. 4 Optical field distribution of the vertical coupling waveguide structure in the ON state. (a) Input port (P1 in Fig. 2(a)); (b) Beginning of the coupling region (P2 in Fig. 2(a)); (c) End of the coupling region (P3 in Fig. 2(a)); (d) Beginning of the cantilever beam (P4 in Fig. 2(a)); (e) End of the cantilever beam (P5 in Fig. 2(a)); (f) Output port (P6 in Fig. 2(a)).

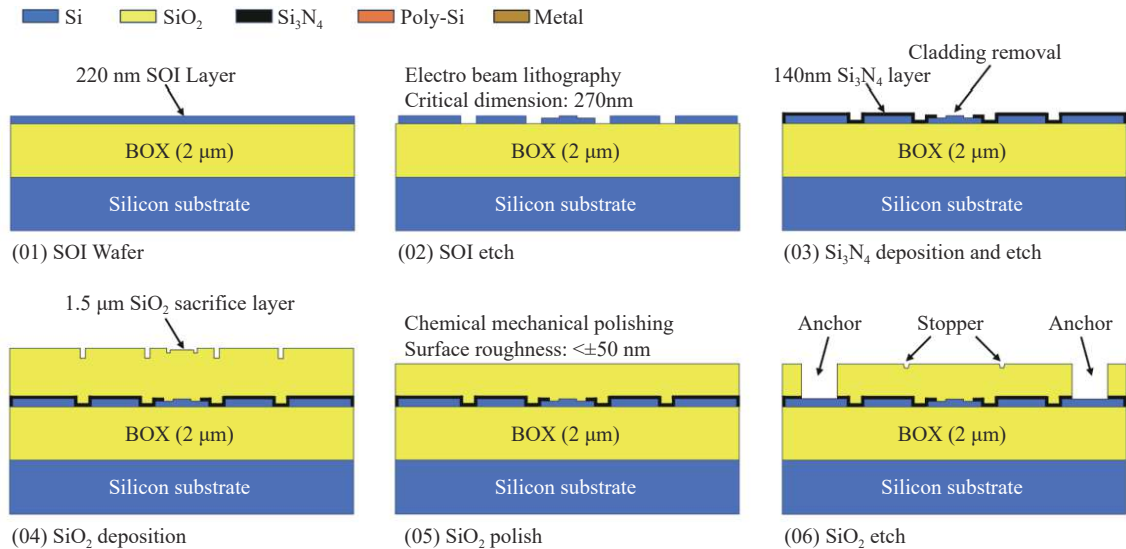
3 硅光 MEMS 波导光开关加工及测试

3.1 硅光波导与微执行器单片集成工艺流程

硅光 MEMS 波导光开关包括的垂直耦合波导以及静电 MEMS 执行器均为双层结构, 在进行工艺流程设计时将硅光波导及 MEMS 加工工艺进行整合, 同时结合光开关的垂直位移需求, 将整体工艺划分为下结构层、牺牲层以及上结构层的加工, 具体工艺流程如图5所示。其中步骤1~3为硅光 MEMS 下结构层的加工过程, 使用6英寸220 nm SOI 晶圆, 埋氧层厚度为2 μm, 通过深度为60 nm 的浅刻蚀和深度为220 nm 的全刻蚀加工出下层波导和 MEMS 微电极结构, 随后使用低压化学气相沉积工艺沉积一层氮化硅薄膜作为保护层, 最后进行一次全刻蚀去除波导上方的氮化硅覆盖。

步骤4~6为硅光 MEMS 牺牲层的加工过程, 首先采用基于四乙氧基硅烷(Tetraethyl orthosilicate, TEOS)前驱体的低压化学气相沉积工艺沉积一层厚度为1.5 μm 的二氧化硅薄膜, 随后通过化学机械抛光(Chemical mechanical polishing, CMP)将厚度减薄到1 μm 以形成平整的上表面, 在此基础上完成深度为90 nm 的浅刻蚀和深度为1 μm 的全刻蚀, 加工出 MEMS 执行器的止动点和锚点结构。

步骤7~9为硅光 MEMS 上结构层的加工过程, 上结构层材料为300 nm 厚的多晶硅薄膜, 使用低压化学气相沉积工艺进行制备, 通过深度为



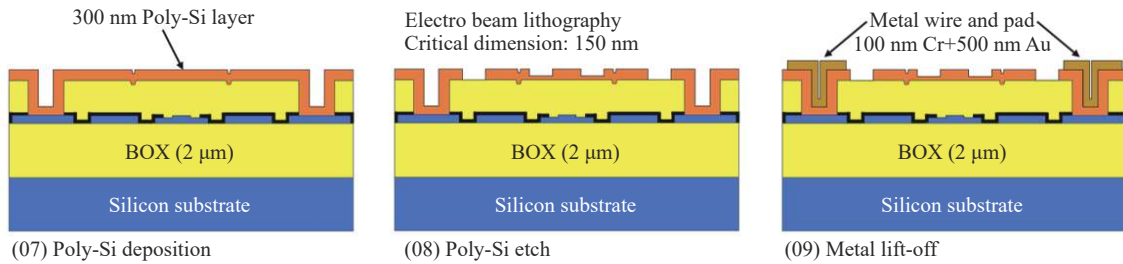


图 5 硅光 MEMS 波导光开关工艺流程。

Fig. 5 Fabrication process of the silicon photonic MEMS waveguide optical switch.

200 nm 的浅刻蚀和深度为 300 nm 的全刻蚀加工出上层波导和 MEMS 执行器结构, 随后采用剥离光刻工艺制作出金属走线及电极, 金属薄膜材料为厚度 500 nm 的金, 采用厚度 100 nm 的铬作为黏附层, 最后使用气态氢氟酸释放形成垂直可动结构。

3.2 硅光 MEMS 波导光开关加工情况

硅光 MEMS 波导光开关采用 2 种光刻工艺相结合的方式完成加工, 对于硅光波导等特征尺寸达到 200 nm 的精细结构使用电子束光刻工艺进行图形化, 而 MEMS 微电极、锚点以及金属引线层等特征尺寸在 1 μm 的微结构则使用紫外光刻加工以降低开发成本。使用 ZEISS Axioscope 5 光学显微镜以及 ZEISS Crossbeam 350 扫描电子显微镜观察微观形貌。图 6(a) 为硅光 MEMS 波导光开关的整体结构, 包括核心的 2×2 硅光 MEMS 路由单元, 用于片上光信号输入/输出

的 6 通道光栅阵列, 以及用于硅光 MEMS 工作状态控制的 3 条金属引线及焊盘。图 6(b) 为硅光 MEMS 路由单元结构图像, 单元整体尺寸为 192 μm×192 μm。图 6(c) 为硅光波导结构和 MEMS 微执行器的 SEM 表征图像。

3.3 硅光 MEMS 波导光开关性能测试

使用 Tektronix AFG3052C 信号发生器以及 Aigtek ATA-2022H 电信号放大器为器件提供幅值为 45 V, 频率 100 Hz, 占空比 50 % 的方波驱动信号, 使用 APD430C 光电探测器获取输出端口的光信号响应, 得到硅光 MEMS 波导光开关的响应速度测试结果如图 7(a)、(b) 所示, 在执行开启动作时, 从电信号加载到光信号接近稳定值的“开启”响应时间约为 20 μs, 光信号的上升沿时间为 15 μs 左右; 在执行关断动作时, 从电信号开始切断到光信号接近零值的“关断”响应时间约为 15 μs, 其中光信号的下降沿时间为 10 μs 左右。

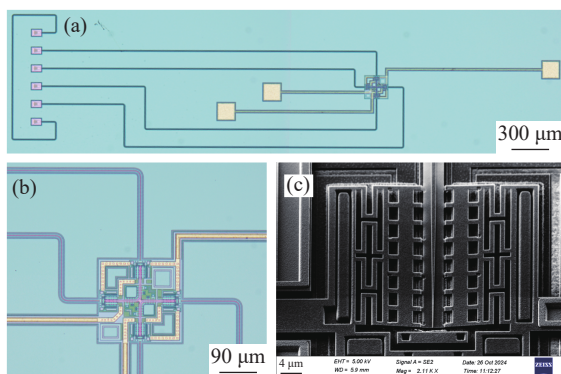


图 6 2×2 硅光 MEMS 波导光开关。(a) 器件整体结构光学显微镜图像; (b) 硅光 MEMS 光学显微镜图像; (c) 硅光波导和 MEMS 微执行器 SEM 图像。

Fig. 6 2×2 silicon photonic MEMS waveguide optical switch. (a) Optical microscope image of the overall device structure; (b) Optical microscope image of the silicon photonic MEMS; (c) SEM image of the silicon photonic waveguide and MEMS microactuator.

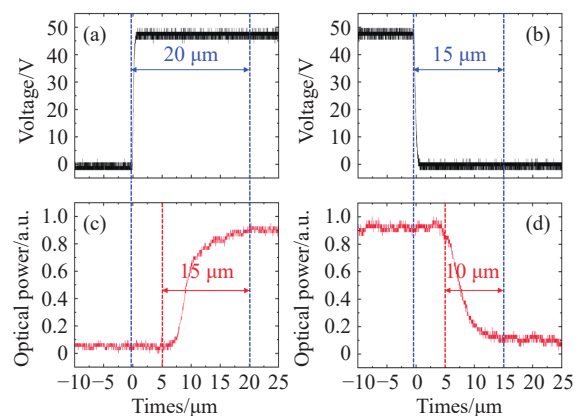


图 7 器件开关速度测试。(a) 开启状态下开关响应时间和光信号上升沿时间; (b) 关闭状态下开关响应时间和光信号下降沿时间。

Fig. 7 Switching speed test of the device. (a) Switching response time and optical signal rise time in the ON-state; (b) Switching response time and optical signal fall time in the OFF-state.

对硅光 MEMS 波导光开关在宽光谱范围内的性能表现进行测试, 图 8(a) 为 1 500~1 620 nm 波段的光谱响应测试结果, 光开关器件在 1 550 nm 波长处的消光比超过 35 dB, 在 1 500~1 600 nm 波段的消光比超过 20 dB, 具有良好宽带性能。

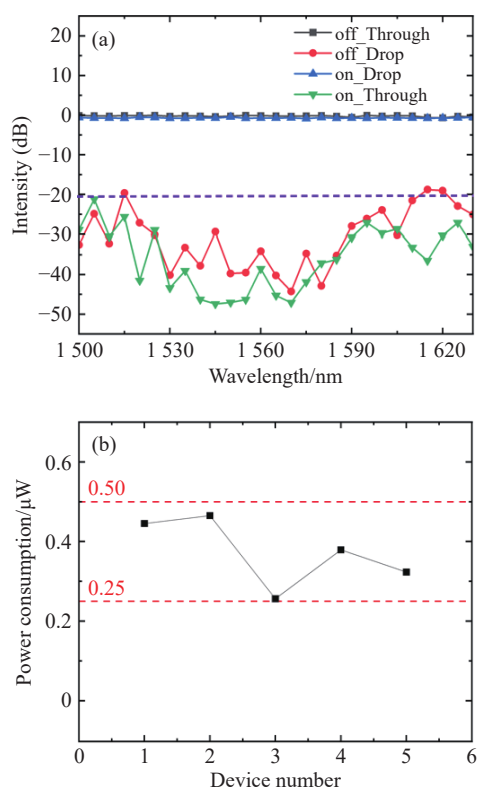


图 8 器件光学性能及功耗测试。(a) 1 500~1 620 nm 波段光谱响应测试; (b) 开启状态下的器件保持功耗测试。

Fig. 8 Optical performance and power consumption test of the device. (a) Spectral response test in the 1 500–1 620 nm wavelength band; (b) Holding power consumption test in the ON state.

进一步测试了 5 个硅光 MEMS 波导光开关器件在开启状态下的保持功耗, 结果如图 8(b) 所示, 器件保持功耗最低值为 0.256 μW , 所有测试器件的保持功耗均不超过 0.5 μW 。该硅光 MEMS 器件具有较低的状态保持功耗, 在大规模阵列应用中相比于热光开关和电光开关具有明显优势。

3.4 加工检验及后仿真

对硅光 MEMS 波导光开关进行切片检查, 得到垂直耦合波导结构的剖面图像如图 9(a) 所示, 尺寸测量结果表明硅光波导结构尺寸与设计符合

度较高, 主要的加工误差出现在上层波导多晶硅薄膜的沉积厚度与刻蚀深度上, 根据测量得到的参数对模型进行修正仿真, 与预期设计进行对比如图 9(b) 所示, 加工误差导致垂直耦合波导结构在 L 波段的耦合效率出现明显下降。

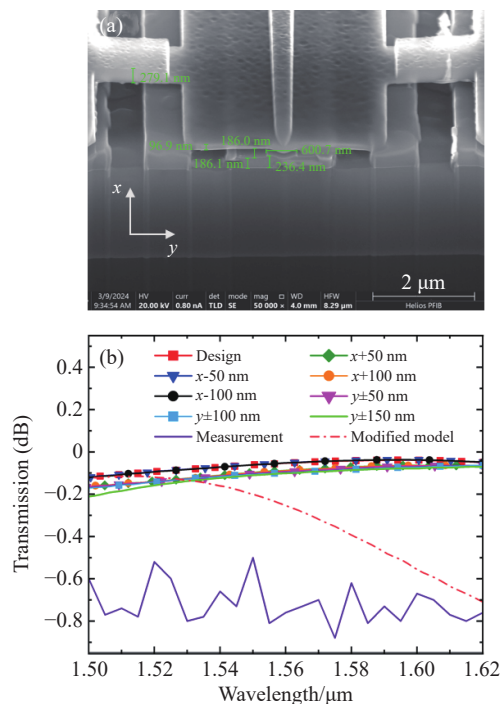


图 9 器件加工检验及仿真验证。(a) 硅光 MEMS 光开关剖面结构 SEM 图像; (b) 垂直耦合波导结构修正模型及工艺容差仿真。

Fig. 9 Device fabrication inspection and simulation verification. (a) SEM image of the cross-sectional structure of the silicon photonic MEMS optical switch; (b) Modified model and process tolerance simulation of the vertical coupling waveguide structure.

进一步开展了垂直耦合波导结构工艺容差的仿真研究, 结果如图 9(b) 所示, 图中 x、y 方向与图 9(a) 中标识的一致, 数值表示以耦合波导为基准, 下层总线波导在 x/y 方向上的偏移量。针对 y 方向套刻偏差的仿真结果表明, 当 y 方向套刻偏差控制在小于 150 nm 范围内时, 上下层波导中线偏移对宽带耦合效率的影响较低, 不超过 0.1 dB。针对 x 方向套刻偏差的仿真结果表明, 总线波导在 x 负方向套刻偏差小于 100 nm 时, 垂直耦合波导结构的宽带透过率与预期设计高度一致, 几乎不受影响, 而在 x 正方向的套刻偏差在达到 50 nm 时, 整体透过率会稍微降低, 对宽带耦合效率的影响仍然属于较低水平。

4 结 论

本文设计并加工了静电微执行器驱动的 2×2 硅光 MEMS 波导光开关, 器件通过对 MEMS 执行器施加电压控制光信号的传输路径, 开启和关断的响应时间分别为 $20 \mu\text{s}$ 和 $15 \mu\text{s}$, 基本功能单元的尺寸为 $192 \mu\text{m} \times 192 \mu\text{m}$ 。该光开关通过控制两层波导结构的垂直间距变化实现光场的高效

耦合及隔离, 实现了在 $1500 \text{ nm} \sim 1600 \text{ nm}$ 波段超过 20 dB 的消光比, 在开启状态下具有远低于传统热光开关和电光开关的微瓦级保持功耗, 有利于大规模阵列扩展, 并且通过改进执行器结构以及优化真空封装工艺等, 可以将开关速度降低到 $5 \mu\text{s}$ 以下, 进一步扩大在片上全光交换领域的应用优势。

参考文献:

- [1] URATA R, LIU H, YASUMURA K, *et al.*. Apollo: large-scale deployment of optical circuit switching for datacenter networking[C]. *2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, IEEE, 2023: 1-3.
- [2] URATA R, LIU H, YASUMURA K, *et al.*. Mission Apollo: landing optical circuit switching at datacenter scale[J]. arXiv: 2208.10041, 2022. (查阅网上资料, 不确定文献类型及格式是否正确, 请核对).
- [3] WANG H, WANG ZH G, GONG CH, *et al.*. Using light to image millimeter wave based on stacked meta-MEMS chip[J]. *Light: Science & Applications*, 2025, 14(1): 59.
- [4] RASTEGARFAR H. *Optical switching in next-generation data centers*[D]. Toronto: University of Toronto, 2014. (查阅网上资料, 未能确认本条文献修改是否正确, 请确认).
- [5] <https://www.polatis.com/polatis-all-optical-switch-technology-lowest-loss-highest-performance-directlight-beam-steering.asp>. (请补充完整本条文献信息).
- [6] WANG X J, VAN MECHELEN T, BHARADWAJ S, *et al.*. Exploiting universal nonlocal dispersion in optically active materials for spectro-polarimetric computational imaging[J]. *eLight*, 2024, 4(1): 22.
- [7] 高小勇, 刘阳阳, 胡光熹, 等. 基于马赫-曾德尔干涉仪的 1×8 硅基热光开关[J]. *光学学报*, 2024, 44(8): 0813001.
GAO X Y, LIU Y Y, HU G X, *et al.*. 1×8 Silicon-based thermo-optic switch based on Mach-Zehnder interferometers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(8): 0813001. (in Chinese).
- [8] 程派. 低功耗平面光波导热光开关阵列的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2025.
CHENG P. *Study on low-power planar optical waveguide thermal optical switch array*[D]. Changchun: Jilin University, 2025. (in Chinese).
- [9] WANG J, SHI SH Q, NIU H SH, *et al.*. Ultrahigh extinction ratio and a low power silicon thermo-optic switch[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(10): 2705-2708.
- [10] SUN B H, YAO CH H, LI T Y, *et al.*. Tri-layer SiN-on-Si 8×8 optical switches with thermo-optic and electro-optic actuators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(11): 5400-5406.
- [11] DING Y ZH, ZHANG D M, ZHANG P, *et al.*. Dual-mode 2×2 electro-optic switch on a SOI platform[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(21): 6125-6128.
- [12] WU Y T, CHU T. Low-crosstalk silicon optical switch with switching time $< 5.5 \text{ ns}$ [C]. *2025 30th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2025 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC)*, IEEE, 2025: 1-4.
- [13] ZHOU J J, LV L M, YAO ZH SH, *et al.*. High-performance thin-film lithium Niobate Mach-Zehnder modulator on 8-inch silicon substrates[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36(17): 1077-1080.
- [14] LI Q Y, YI Q Y, SUN A L, *et al.*. Ultra-broadband near- to mid-infrared electro-optic modulator on thin-film lithium niobate[J]. *Nature Communications*, 2026, 17(1): 1138.
- [15] SEOK T J, QUACK N, HAN S, *et al.*. Large-scale broadband digital silicon photonic switches with vertical adiabatic couplers[J]. *Optica*, 2016, 3(1): 64-70.
- [16] HU Y P, SUN Y, LU Y, *et al.*. Silicon photonic MEMS switches based on split waveguide crossings[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 331.
- [17] 杜立群, 李奥奇, 李蒙, 等. 双向高过载硅基差压敏感元件的研制[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(2): 209-219.
DU L Q, LI A Q, LI M, *et al.*. Development of bi-directional high overload silicon-based differential pressure sensitive

element[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(2): 209-219. (in Chinese).

作者简介:



崔博文 (2000—), 男, 黑龙江绥化人, 本科, 助理工程师, 2022 年于清华大学获学士学位, 主要从事硅光波导与 MEMS 器件交叉融合方面的研究。E-mail: CBW18697088823@163.com

陈丙根 (1971—), 男, 安徽望江人, 本科, 研究员, 主要从事 MEMS、EMCCD 和 LTCC 方面的研究。E-mail: cbg214@163.com

张海峰 (1985—), 男, 安徽淮北人, 硕士, 高级工程师, 主要从事半导体集成电路、功率器件方面的研究。E-mail: zhfeng124@163.com

王自衡 (1994—), 男, 江苏苏州人, 博士, 工程师, 主要从事硅基光电子器件设计与光通信系统方面的研究。E-mail: wangzihengrowpien@163.com

王 臣 (1992—), 男, 江苏睢宁人, 博士研究生, 主要从事激光雷达、信号处理、光子集成器件和微系统集成方面的研究。E-mail: conan_chen@njust.edu.cn



何伟基 (1981—), 男, 广东兴宁人, 博士, 研究员, 2009 年于南京理工大学获博士学位, 主要从事新型光场编码成像、激光的三维主动/被动复合成像、利用单光子探测以及光子集成器件和微系统集成方面的研究。E-mail: hewj@mail.njust.edu.cn



姚子君 (1988—), 男, 宁夏石嘴山人, 博士, 高级工程师, 主要从事硅基光子集成器件, 非线性光学器件及光传感应用等方面的研究。E-mail: zijunyao1988@163.com

沈 吉 (1988—), 男, 江苏海门人, 硕士, 高级工程师, 主要从事光电器件与组件科研开发方面的研究。E-mail: njustshenji@126.com

武士潭 (1995—), 男, 山西孝义人, 硕士, 工程师, 主要从事先进封装与混合集成的制造工艺与可靠性方面的研究。E-mail: 1310645768@qq.com

周 骥 (1996—), 男, 江苏丹阳人, 博士, 工程师, 主要从事硅光器件设计与光电先进封装方面的研究。E-mail: 835139040@qq.com

何伟基 (1981—), 男, 广东兴宁人, 博士, 研究员, 2009 年于南京理工大学获博士学位, 主要从事新型光场编码成像、激光的三维主动/被动复合成像、利用单光子探测以及光子集成器件和微系统集成方面的研究。E-mail: hewj@mail.njust.edu.cn