

文章编号: 1005-5630(2026)02-0082-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202502110021

基于飞秒激光加工的光芯片后处理技术研究

李想¹, 李俊豪¹, 于志恒^{1,2}, 杨存亮¹, 郭洪菊³, 王晶晶¹, 冯吉军¹

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;

2. 嘉兴南湖学院机电工程学院, 浙江嘉兴 314001;

3. 出版印刷高等专科学校信息与智能工程系, 上海 201404)

摘要: 传统的集成光芯片在制造过程中受到工艺误差的影响, 易导致器件性能不确定, 因而限制了其在光学通信与信息处理中的应用。本研究展示了一种基于飞秒激光加工技术的光芯片后处理方法, 即在光芯片制造完成后, 通过飞秒激光诱导包层或芯层折射率发生变化, 进而灵活地修改或优化芯片中器件的性能。研究了不同芯层材料光芯片中的核心元件, 如平面波导光栅、微环谐振器和微环阵列的性能调控与结构优化。结果表明, 在制造完成的光芯片上, 飞秒激光加工技术可以使平面波导在 1550 nm 附近产生新的吸收峰, 使硅微环谐振峰实现约 6.1 nm 的偏移; 同时, 通过在微环阵列上方制备光栅, 可有效提升谐振波处光信号的出射效率。本文提出的光芯片后处理方法可为光子集成回路的高精度制造与功能拓展提供新的途径, 具有广阔的应用前景。

关键词: 飞秒激光; 光芯片; 平面波导光栅; 微环阵列

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A

Research on post-processing technology of optical chips based on femtosecond laser processing

LI Xiang¹, LI Junhao¹, YU Zhiheng^{1,2}, YANG Cunliang¹, GUO Hongju³,
WANG Jingjing¹, FENG Jijun¹

(1. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing Nanhu University, Jiaxing 314001, China;

3. Department of information and intelligent engineering, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 201404, China)

Abstract: Traditional integrated photonic chip is affected by the fabrication error in the manufacturing process, which easily leads to the uncertain performance of the device, thus limiting its application in optical communication and information processing. This study presents a post-

收稿日期: 2025-02-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFE0107400); 国家自然科学基金(U23A20381, 1933005); 上海市科学技术委员会项目(23010503600, 23530730500); 嘉兴市科技计划项目(2023AY31016)

第一作者: 李想(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超快激光加工。E-mail: 222180391@st.usst.edu.cn

通信作者: 冯吉军(1984—), 男, 教授, 研究方向为集成光电子器件、微纳光子传感器件、光波导相控阵技术、激光微纳加工技术。E-mail: fjjun@usst.edu.cn

trimming method of photonic chips based on femtosecond laser machining technology, which means that the refractive index of the cladding or core material is induced by femtosecond laser. After the photonic chip is manufactured, the performance of the device in the chip is corrected or optimized flexibly. The performance control and structure optimization of core components in photonic chips with different core layers, such as planar waveguide grating, microring resonator and microring array, were studied. The results show that femtosecond laser machining can produce an absorption peak near 1550 nm on the fabricated photonic chip. The resonant peak of the silicon microring is shifted about 6.1 nm. The output efficiency of resonant wavelength light can also be improved by preparing grating above the microring array. The photonic chip post-trimming method proposed in this paper can provide a new way for high-precision manufacturing and function expansion of photonic integrated circuits, and has broad application prospects.

Keywords: femtosecond laser; photonic chip; planar waveguide grating; microring array

光子集成回路 (photonic integrated circuits, PICs) 以其高带宽、高传输速率、低功耗、小体积、大数据容量、低串扰、广泛的工作范围以及扩展性强等优势, 已成为实现高速、低功耗、高可靠性数据传输的理想技术选择^[1-8]。传统的光子集成回路多采用半导体工艺制造, 然而受制造误差的影响, 器件性能往往偏离理论设计。这通常需要通过多次迭代和结构优化来适应实际的生产制造要求, 过程既耗时又昂贵。例如, 微环谐振器作为光通信或滤波器的核心元件^[9-11], 一般制造难以保证谐振波长完全符合设计值, 因此通常在制造后采用一些后处理手段来校准谐振波长^[12-15]。此外, 阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG) 和方向耦合器作为核心器件, 也广泛应用于光通信、光谱分析等领域^[16-18]。但受限于光子器件加工工艺, 波导几何形貌偏差、折射率分布不均及材料热效应等制备误差, 常会导致器件性能的下降, 例如波长选择性偏移、耦合效率降低以及插入损耗增加等, 进而影响器件的工作稳定性与可靠性。针对制备误差的后处理校正技术近年来受到了广泛关注。例如, 在 AWG 中, 精确控制阵列波导的相位关系, 可校正波长分离的非线性偏差; 在方向耦合器中, 调节波导间距或耦合长度, 可优化功率分配比例, 提升器件方向性和隔离度。

微加热器为常用的相位调控器件, 该结构通过额外制备电极和注入 Ge 进行加热和退火来改变材料的折射率实现相位校正^[12-15]。然而, 这种

方法需要实时控制, 且离子注入工艺较为复杂, 可能导致波导损耗增加, 限制了其应用范围。另有研究团队采用沉积相变材料作为包层, 利用微加热器诱导相变材料从非晶态转变为晶态, 进而实现相位校正^[19-20]。然而, 该方法增加了工艺复杂性, 且对沉积区域存在限制。此外, 这些后处理方法所用到的结构和材料都是在芯片制造中加入的, 芯片成形后无法调整, 这使得后处理在空间上不够灵活。激光退火通过精确控制激光的能量、时间和照射位置, 在材料局部区域实现快速加热, 随后通过快速冷却过程改变材料的结构与折射率^[21-23]。这种方法在空间上更具灵活性, 且不会增加工艺复杂度。然而, 激光退火过程通常存在较大的温度梯度, 易导致材料表面与内部产生热应力差, 进而引起形变或产生裂纹, 对器件造成不可逆损伤, 最终影响器件性能。飞秒激光加工具有无热效应、无表面接触、自由度高、加工效率高等优点, 可用于光芯片集成回路的后处理。2023年, 国内学者采用飞秒激光技术在覆盖二氧化硅包层的硅光子器件上补偿了微环谐振器和相位偏置马赫-曾德尔干涉仪开关的制造误差^[24]。

本文展示了基于飞秒激光加工技术, 对不同芯层材料光芯片进行优化处理的后处理方法以及相关应用。通过精确控制激光聚焦位置、脉冲功率、刻写速度以及光斑滞留时间, 在光芯片的不同深度上, 周期性诱导芯层和包层材料折射率发生变化, 实现了对硅微环、二氧化硅平面波导回

路(planar lightwave circuit, PLC)、氮化硅微环和硅微环阵列功能特性的调节。本文提出的飞秒激光后处理方法将为传统光子集成回路在三维空间上更复杂的结构加工提供更加便利的优化手段。

1 激光微纳加工系统

当飞秒激光聚焦到二氧化硅内部时会发生多光子吸收效应,其发生依赖于飞秒激光超短脉冲高峰值功率的特性。在这一过程中,多个光子通过非线性机制被介质中的电子同时吸收,其总能量超过材料的带隙,从而引发电子的非线性跃迁。该过程与激光强度高度相关,其中吸收速率 P 可表示为

$$P(I) = \sigma_k I^k \quad (1)$$

式中: σ_k 表示吸收过程中 k 个光子的多光子吸收系数; I 为激光强度。当一个电子被激发到导带后,此电子可以在导带中吸收足够的能量,使 $nh\nu \geq E_{BG}$, 其中 n 是吸收的光子数, h 为普朗克常数, ν 为光子的频率, E_{BG} 为带隙能量; 多余的能量可通过碰撞电离进一步激发另一个电子进入导带。随后,导带中的两个电子可以继续发生线性吸收与碰撞电离过程,最终实现自由电子的指数式增长。自由电子通过影响材料的介电常数和电导率进而改变材料的折射率。此外,这种雪崩电离还会产生高吸收性和致密的等离子体,促进能量从激光到二氧化硅的转移,导致焦点区域会产生一个局部的高压区。当压力达到阈值时,能量瞬间释放,产生冲击波,使材料的结构和密度永久性变化,最后导致折射率发生改变。

飞秒激光加工系统由 1030 nm 的飞秒激光、三维气浮平台、CCD 相机以及相关光学器件组

成,光路原理示意图如图 1 所示,其中,采用的飞秒激光的脉冲宽度可达到 300 fs,脉冲能量最大可达 2 mJ,重复频率可调范围为 1~200 kHz。飞秒激光准直后的线偏光束经过半波片、四分之一波片、孔径光阑、衰减片、电动快门后,由反射镜 1 和 2 引入上龙门支架,然后经过二向色镜反射,最后经过物镜(Mitutoyo T1.1 NIR, 50×, NA=0.42)聚焦到三维气浮平台上。其中,半波片和四分之一波片的工作波长均为 1030 nm。孔径光阑用于滤除准直光束的外围部分以提高激光光束质量。衰减片的透过率为 1%~90% 连续可变,用于无极调节激光功率。电动快门(Thorlabs, SH101" Beam Shutter/SC10)的关闭响应时间为 10 ms,用于在制作光栅的过程中控制激光脉冲的通断。装有同轴光源的 CCD 相机用于实时监控加工过程。二向色镜的截止波长为 805 nm,可透射可见光并反射 1030 nm 波长的光,用于将 CCD 相机的监控光路引入加工光路。光芯片在后处理过程中的运动控制采用了三维气浮平台(北京瑞邦精控, QFL-XY-SG),其最大行程为 100 mm×100 mm×20 mm, x 轴和 y 轴的定位精度约 50 nm,最大速度可达 100 mm/s, z 轴的定位精度约为 300 nm,最大速度为 10 mm/s。实验中,在垂直和水平方向上精确调整光芯片的位置后,根据激光能量、雕刻速度和聚焦位置的不同,对光芯片进行后处理优化。

实验过程中通过在软件操作界面设置脉冲重复频率和泵浦源电流来调节激光功率,对于不同材料元器件的激光加工参数如表 1 所示,其中“-”表示对应原件无此参数,激光功率在物镜前由功率计(Thorlabs, S405C)测量得到,其探测范围为 100 μ W~5 W。除表 1 中参数以外,激光聚焦高度如下:制作 PLC 光栅时激光聚焦

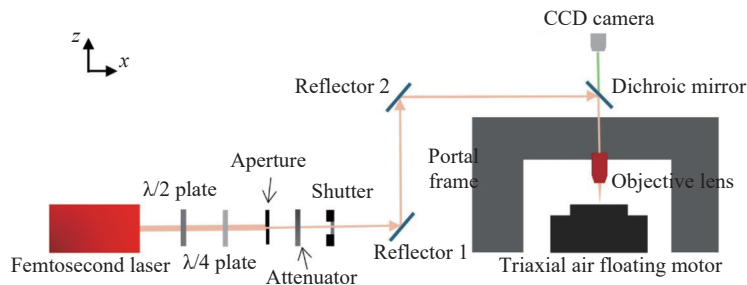


图 1 飞秒激光加工系统光路原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path of femtosecond laser machining system

位置在 PLC 中; 制作 Si_3N_4 和 Si 微环光栅时激光聚焦高度在微环上方 $2\ \mu\text{m}$ 处; 在对微环谐振腔的微环与耦合区域进行激光后处理时, 激光聚焦高度在耦合区域基底材料上方 $2\ \mu\text{m}$ 处。

表 1 飞秒激光加工参数

Tab. 1 Femtosecond laser processing parameters

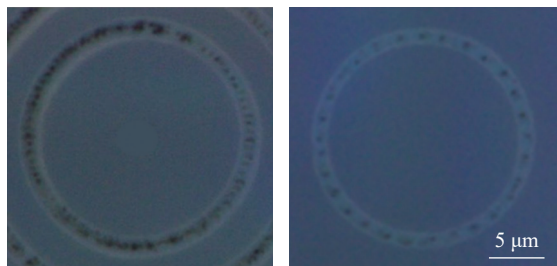
Device type	Laser power/mW	Repetition rate/kHz	Engraving speed/ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	Grating period/nm
(SiO_2)PLC	0.3	1	0.15	1603
(Si_3N_4) Microring (with aperture)	2.2	1	Retention time 25 ms	550
(Si) Microring resonator	1	1	0.05	-
(Si) Microring array (with aperture)	3	1	Retention time 25 ms	550

2 结果分析与讨论

2.1 氮化硅基光芯片的后处理验证

微环阵列可以作为光学相控阵来产生和调制涡旋光, 在微环阵列上添加光栅以利于光从微环表面出射。本文采用交错法加工微环光栅, 即将一次加工过程分为多次加工过程的交错叠加, 其中每次加工过程的点距是光栅常数的整数倍。通过这种方式可以使所加工的微环光栅的均匀性得到改善。采用连续逐次加工的微环光栅如图 2(a)所示, 在一个微环光栅内部, 加工点的痕迹逐渐变深, 这不利于微环中出射光的均匀性。而采用交错法加工的微环光栅如图 2(b)所示, 均匀性得到了很大改善。

使用飞秒激光加工系统在单个氮化硅微环上

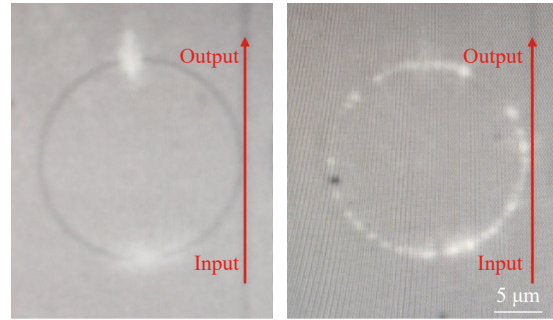


(a) 连续逐次加工的光栅的光学显微图 (b) 交错法加工的光栅的光学显微图

图 2 两种加工方式的光栅的光学显微图对比

Fig. 2 Comparison of the optical micrographs of the gratings from the two trimming methods

方放置微环光栅。单个氮化硅微环如图 3(a)所示, 其直径为 $20\ \mu\text{m}$, 由于没有沿着微环放置光栅, 因此光将从波导直通端出来。通过飞秒激光加工对微环进行后处理, 光栅可以放置在微环的正上方, 因此微环内共振波长的光可以从其表面出射, 如图 3(b)所示。



(a) 飞秒激光后处理前的氮化硅微环 (b) 飞秒激光后处理后的氮化硅微环

图 3 飞秒激光后处理前后的氮化硅微环

Fig. 3 Silicon nitride microcavities before and after femtosecond laser post-trimming

2.2 硅基光芯片的激光处理验证

微环谐振腔作为一种高灵敏度的光学元件, 可以对光信号进行精确的波长选择和测量, 在光通信和光谱分析领域广泛应用, 对其制备误差进行校正有着重要意义。图 4(a)和(b)分别是飞秒激光后处理前后微环谐振腔的光学显微图。图 4(b)虚线方框中为飞秒激光后处理区域, 通过飞秒激光加工系统改变微环与波导之间耦合区域包层材料的折射率可以使微环谐振器的谐振波长产生红移或蓝移。飞秒激光对微环谐振器进行后处理前后的透射光谱如图 4(c), 经过激光修正后, 谐振波长偏移了约 $6.1\ \text{nm}$, 但是损耗略高。原因可能是飞秒激光造成折射率改变的范围些许超出耦合区域覆盖到波导与微环结构本身, 更换具有更高数值孔径的物镜并将准直光束进行扩束可以改善这一现象。

类似地, 对硅基底的微环阵列进行了优化研究。采用的加工方法与氮化硅基光芯片处理方法相同。实验中, 采用的硅微环阵列如图 5(a)所示, 每个微环的直径均为 $20\ \mu\text{m}$, 每列微环之间间隔 $37\ \mu\text{m}$, 第一行与第二行之间, 第三行与第四行之间间隔 $37\ \mu\text{m}$, 第二行与第三行之间间隔 $33.5\ \mu\text{m}$ 。飞秒激光加工前, 光全部从波导直

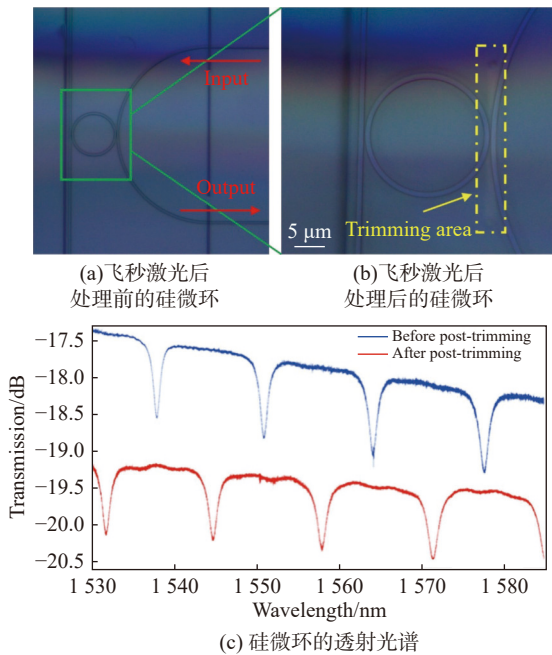


图 4 飞秒激光后处理的硅微环及透射光谱
 Fig. 4 Femtosecond laser post-trimming of silicon microring and transmission spectra

通端出射，微环阵列表面没有光泄漏。通过飞秒激光加工对微环阵列进行后处理，在每个微环的正上方放置光栅，光可以在共振波长处从微环发出，如图 5(b)所示。详细的相位相关调制在旋涡光相关应用中仍在研究中，但激光后处理的便利性已得到证实。

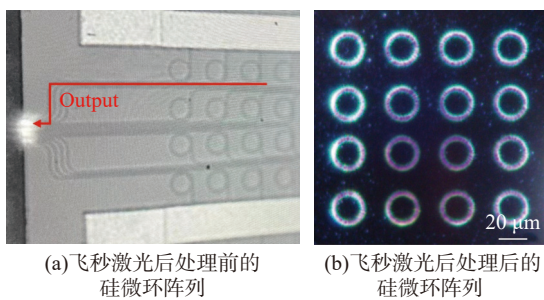


图 5 飞秒激光后处理的硅微环阵列
 Fig. 5 Femtosecond laser post-trimming of silicon microring arrays

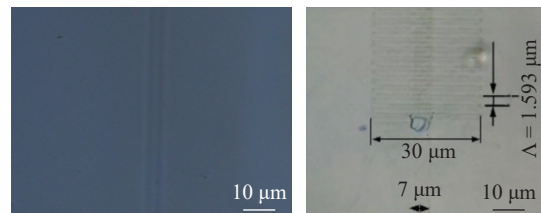
2.3 二氧化硅基光芯片的后处理验证

波分复用技术因可以大幅提高通信传输容量而广泛应用于光通信中；布拉格光栅因具有可被设计的反射波长而成为波分复用技术中重要的结构之一。其反射光中心波长满足

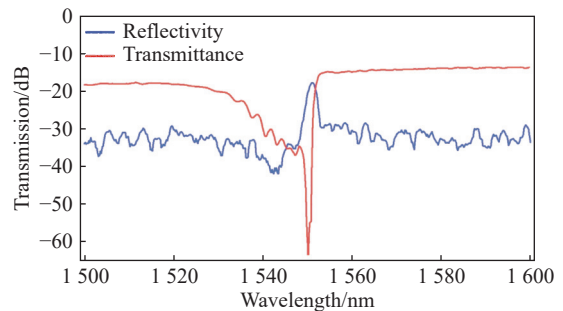
$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n\Lambda, \tag{2}$$

式中： n 为芯层折射率； Λ 为光栅周期。通过飞秒激光加工系统设定激光雕刻路径改变光栅周期，并通过改变激光功率和雕刻速度改变芯层折射率来确定反射峰中心波长。

二氧化硅 PLC 光学显微图如图 6(a)所示。PLC 飞秒激光处理效果的光学显微图如图 6(b)所示，在二氧化硅波导的顶部成功制备了周期为 1.593 μm 、占空比为 0.75 的光栅，光栅线数为 1000 条。经过飞秒激光处理后 PLC 的反射和透射光谱如图 6(c)所示，可以看出，在 1550 nm 附近，PLC 有较小的透射率及较大的反射率。



(a) 二氧化硅 PLC 的光学显微图
 (b) 所制备光栅的光学显微图



(c) 经周期性处理的平面波导的透射谱与反射谱

图 6 飞秒激光后处理的二氧化硅 PLC 及透射谱与反射谱
 Fig. 6 Femtosecond laser post-trimming of SiO₂ PLC and transmission spectra and reflection spectra

3 结 论

综上，本文演示了基于飞秒激光加工的在氮化硅基、硅基和二氧化硅基光芯片上的后处理方法。在氮化硅微环和硅微环阵列的上方制作光栅，有利于微环中的光的出射，这将有利于微环天线的制备；实现硅微环谐振波长的偏移，经过激光修正后，谐振波长偏移了约 6.1nm；在二氧化硅平面波导上制备了布拉格光栅。以上结果证明，基于飞秒激光加工的后处理方法具有良好的

重复性, 适合批量生产。本文提出的飞秒激光后处理方法在传统平面波导平台上制造更复杂的结构方面具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] REN W B, LIANG Q Q, FENG J J, et al. Free-space beam shaping and steering based on a silicon optical phased array[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(12): 2093.
- [2] CHEN Y S, FENG J J, CHEN J, et al. Optical bistability in a tunable gourd-shaped silicon ring resonator[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(14): 2447.
- [3] YUAN S, FENG J J, YU Z H, et al. Silicon nanowire-assisted high uniform arrayed waveguide grating[J]. *Nanomaterials*, 2022, 13(1): 182.
- [4] LIU H P, FENG J J, CHEN J, et al. Silicon nano-bridge waveguide assisted polarizing beam splitter[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 167: 109684.
- [5] LIU H P, FENG J J, GE J M, et al. Tilted nano-grating based ultra-compact broadband polarizing beam splitter for silicon photonics[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(10): 2645.
- [6] LIAO K, LIAN Y X, YU M T, et al. Hetero-integrated perovskite/Si₃N₄ on-chip photonic system[J]. *Nature Photonics*, 2025, 19(4): 358 – 368.
- [7] FENG X L, WU T W, GAO Z H, et al. Non-Hermitian hybrid silicon photonic switching[J]. *Nature Photonics*, 2025, 19(3): 264 – 270.
- [8] HONG S H, WU J C, XIE Y W, et al. Versatile parallel signal processing with a scalable silicon photonic chip[J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 288.
- [9] SHU H W, CHANG L, TAO Y S, et al. Microcomb-driven silicon photonic systems[J]. *Nature*, 2022, 605(7910): 457 – 463.
- [10] CHAO C Y, GUO L J. Design and optimization of microring resonators in biochemical sensing applications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(3): 1395 – 1402.
- [11] KAZAKOV D, LETSOU T P, BEISER M, et al. Active mid-infrared ring resonators[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 607.
- [12] JAYATILLEKA H, FRISH H, KUMAR R, et al. Post-fabrication trimming of silicon photonic ring resonators at wafer-scale[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(15): 5083 – 5088.
- [13] HAGAN D E, TORRES-KULIK B, KNIGHTS A P. Post-fabrication trimming of silicon ring resonators via integrated annealing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(16): 1373 – 1376.
- [14] SPECTOR S, KNECHT J M, JUODAWLKIS P W. Localized in situ cladding annealing for post-fabrication trimming of silicon photonic integrated circuits[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 5996.
- [15] YU X S, CHEN X, MILOSEVIC M M, et al. Ion implantation and electrical annealing for trimming silicon MZIs and facilitating one-time programmable photonic circuits[C]//Proceedings of 2019 IEEE 16th International Conference on Group IV Photonics. Singapore: IEEE, 2019: 1 – 2.
- [16] PROIETTI R, CAO Z, NITTA C J, et al. A scalable, low-latency, high-throughput, optical interconnect architecture based on arrayed waveguide grating routers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(4): 911 – 920.
- [17] ISMAIL N, CHOO-SMITH L P, WÖRHOFF K, et al. Raman spectroscopy with an integrated arrayed-waveguide grating[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4629.
- [18] WEI Z P, KONG A R, HU J B, et al. Parallel arrayed waveguide grating for wavelength-mode hybrid multiplexing[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(17): 4311.
- [19] ADYA U, STURM D, CHEN R, et al. Post-processing of phase change material in a zero-change commercial silicon photonic process[J]. *Optics Express*, 2024, 32(16): 27552.
- [20] RÍOS C, DU Q Y, ZHANG Y F, et al. Ultra-compact nonvolatile phase shifter based on electrically reprogrammable transparent phase change materials[J]. *Photonix*, 2022, 3(1): 26.
- [21] LU F L, TSAI C E, WONG I H, et al. Dopant recovery in epitaxial Ge on SOI by laser annealing with device applications[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(7): 2925 – 2931.
- [22] LI J Y, WANG L C, XU X R, et al. Local laser annealing for amorphous/polycrystalline silicon hybrid photonics on CMOS[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111799.
- [23] CHEN C J, ZHENG J J, GU T Y, et al. Selective tuning of high-*Q* silicon photonic crystal nanocavities via laser-assisted local oxidation[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12480.
- [24] WU Y T, SHANG H P, ZHENG X R, et al. Post-processing trimming of silicon photonic devices using femtosecond laser[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(6): 1031.

(编辑: 张 磊)