

文章编号:1001-5078(2024)07-1172-05

· 光纤传感及光通信技术 ·

一种基于多模干涉波导的超低尺寸波分复用器

董锦晓^{1,2}, 刘世平¹

(1. 昆明理工大学 理学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明理工大学数据科学研究中心, 云南 昆明 650500)

摘要:波分复用/解复用器作为数据传输的核心器件,广泛应用于片上光互连网络中,其中最重要的指标就是器件的尺寸,插入损耗和串扰大小,为解决传统硅基阵列波导光栅尺寸较大,阵列波导光栅光强不均的问题,我们提出了一种基于绝缘体上硅(SOI)的环形反射器辅助多模干涉波导的四通道波分复用器,可以实现不同通道的波长分离。其核心尺寸仅为 $10\ \mu\text{m} \times 34\ \mu\text{m}$,最小相邻通道串扰为 $-14.42\ \text{dB}$ 。

关键词:硅光子学;波分复用器;多模干涉耦合波导;串扰;集成光学器件

中图分类号:TN252;O436 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.026

An ultra-low dimension wavelength division multiplexer based on multimode interference waveguide

DONG Jin-xiao^{1,2}, LIU Shi-ping¹

(1. College of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Data Science Research Center of Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: As a core component for data transmission, the wavelength division multiplexer/demultiplexer (WDM) is extensively utilized in on-chip optical interconnect networks, where the most crucial parameters for these devices include device size, insertion loss, and crosstalk levels. To address the issues of large size and uneven optical power distribution in conventional silicon-based arrayed waveguide gratings (AWGs), a 1×4 WDM based on a silicon-on-insulator (SOI) platform incorporating a ring reflector-assisted multimode interference waveguide is proposed, which can realize the wavelength separation of different channels. The core size of the device is only $10\ \mu\text{m} \times 34\ \mu\text{m}$, and the minimum crosstalk between adjacent channels is $-14.42\ \text{dB}$.

Keywords: silicon photonics; wavelength division multiplexer (WDM); multimode interference (MMI) coupler waveguide; crosstalk; integrated optical device

1 引言

光纤通信技术由于其传输带宽大、结构灵活的特点,在大规模、远距离的商业通信网络市场的份额持续爆炸式增长。波分复用(WDM)是其中的一项关键技术^[1-4]。硅基WDM器件由于其成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺以及微电子和光子之间的高度集成被广泛关注^[5-6],其中阵列波导

光栅(AWG)由于其低插入损耗和串扰^[7-9],广泛应用于多路复用器/多路分解器的设计,在过去二十年,应用于几微米或者几百纳米厚顶层硅的SOI晶片上报道了许多硅光子AWG的结果^[9-11],从几微米的器件尺寸到几百纳米不等,串扰普遍在 $-25\ \text{dB}$ 以上,薄顶层硅上AWG串扰较高的主要原因主要是,基于纳米线波导的AWG对制造误差、顶部硅层

作者简介:董锦晓(1999-),女,硕士,研究方向为系统分析与集成技术。E-mail:jx_dong@yeah.net

通讯作者:刘世平(2000-),男,硕士,研究方向为片上集成硅基光电子器件技术。E-mail:liushiping1010@163.com

收稿日期:2023-11-24;修订日期:2024-01-11

厚度变化带来的相位误差敏感、以及基于光栅圆原理的罗兰圆耦合到阵列波导中的分光比不均匀^[12]。为解决上述问题,本文提出一种基于多模干涉波导的紧凑型 1×4 波分复用器,利用多模干涉耦合器(MMI)的自映像原理,在 MMI 的自映像点放置阵列波导,以实现均匀的分光比,其中环形反射器可以倍数减小整个波分复用器的尺寸,从阵列波导返回光信号到 MMI 中实现解复用。实现 $10 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ 的超小核心尺寸,以及 -14.42 dB 的最小相邻通道串扰,可以为 WDM 系统的设计提供一种新的解决办法。

2 环形反射器辅助 MMI 原理

具有环形反射器的折叠硅光子波分复用器的示意图如图 1 所示。该结构由输入/输出波导、多模干涉波导、阵列波导、和环形反射镜组成。与常规 AWG 相比,其占地面积缩小了 50% 以上。在该结构中,多模干涉波导连接一个输入波导、四个输出波导,以及阵列波导和环形反射器。光信号从边缘输入波导耦合到多模干涉波导,形成输入场的五个自映像并且分别耦合进入阵列波导中,经过环形反射器返回后依次经过阵列波导和多模干涉波导,不同波长聚焦在不同的输出波导处,实现波长的分离。该折叠硅光子波分复用器的结构示意图如图 1 所示。

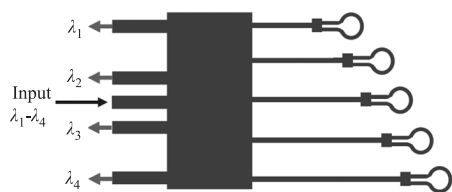


图 1 环形反射器辅助折叠硅光子波分复用器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a ring reflector-assisted folded silicon photonic wavelength division multiplexer

该新型波分复用器结构借鉴了多模干涉耦合器、阵列波导光栅、环形反射器的结构特点,输入波长 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 通过限制光场方向的条形单模波导进入多模干涉波导,也叫做多模干涉区,尺寸为 $10 \mu\text{m} \times 32 \mu\text{m}$ 。利用多模波导中各阶模的干涉形成自映像效应(即沿着多模干涉波导的传输方向,在周期性的间隔处出现输入场的多个复制的映像)。根据自映像原理,通过在首次出现输入场的五个复制映像处,放置阵列波导,锥形波导的引入,可以均匀地将输入光平稳过渡到阵列波导中。其中,阵列波导采用脊形波导(强限制波导),脊高 90 nm ,平板高 130 nm ,波导宽度 500 nm ,仿真表明该结构的脊形波导传输模式为

TE_0 传输,为单模波导,具有低损耗和稳定性的优点,适合作为阵列波导,保障相邻阵列波导之间恒定的相位差,避免相位误差造成的器件旁瓣和消光比等性能的损耗。相邻阵列波导间存在固定长度的光程差,使得不同波长的光会有不同相位差,所以在不同的空间位置上产生干涉相长或者相消现象,从而在不同的输出波导中分别输出 $\lambda_1 \sim \lambda_4$,实现波长解复用的功能。多模干涉波导、环形反射器以及总体结构的设计与仿真在以下章节中详细分析。

3 对称干涉型均匀分光比 MMI 设计

MMI 耦合器利用的是光的自映像原理^[13],在多模干涉区多个导模沿 z 方向传播时会互相干涉,周期性地出现输入场的一个或者多个复制映像^[14],通过在映像形成的位置设置输出波导可以实现均匀分光比进入阵列波导中^[15-16],以解决 AWG 中由于光的衍射,罗兰圆耦合到阵列波导中光强不均导致相邻输出通道串扰较高的问题^[17]。对称干涉型 MMI 根据模式对称性,只有偶数阶模被激发,多模区的长度相比一般干涉型减小了 $1/4$,在传播方向 $z = \frac{3L_\pi}{4N}$ 上,可以得到 N 个输入光场的像,这 N 个输入像的成像位置为 $x_i = p(2i - N) \frac{W_e}{N}$ ^[18]。表 1 列出了 1×5 MMI 的主要设计参数,工作在 220 nm 厚的顶层硅 SOI 晶圆上,为了满足单模条件,采用高 220 nm ,宽 500 nm 的条形阵列波导,引入锥形波导,降低杂散光泄露和模式失配引起的损耗。

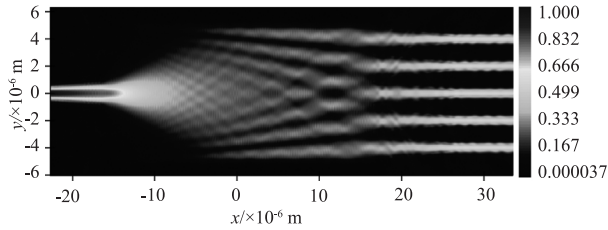
表 1 MMI 设计参数表

Tab. 1 Design parameters table for the Mach-Zehnder interferometer (MMI)

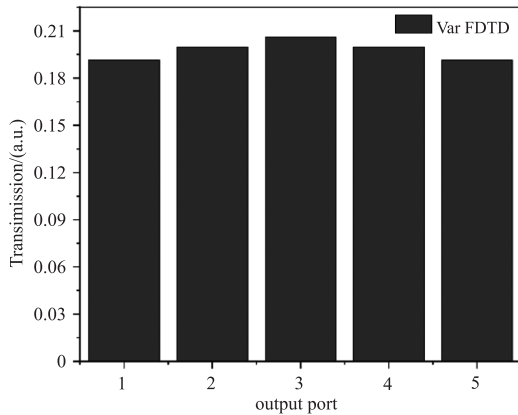
对称型 1×5 MMI 设计参数			
结构	参数	结构	参数
顶层硅厚度/nm	340	阵列波导宽度/nm	500
中心波长/nm	1550	输入/阵列波导 taper 宽度/ μm	1.87
多模耦合区宽度/ μm	10	阵列波导间距/ μm	2
多模耦合区长度/ μm	33.5	输出波导 taper 宽度/ μm	1.3
阵列波导数	5	输出波导间距/ μm	2.5

使用 lumerical 软件的 FDTD 仿真方法获得了 1×5 对称型 MMI 的模拟光场分布,发射波长为 1550 nm 。在仿真模型中, x 轴是光信号的传输方向; y 轴垂直于器件集成平面内的传输方向; z 轴垂直于 XY 平面,表示波导的高度方向。模拟结果的俯视图如图 2 所示,表明光信号从输入波导近乎均

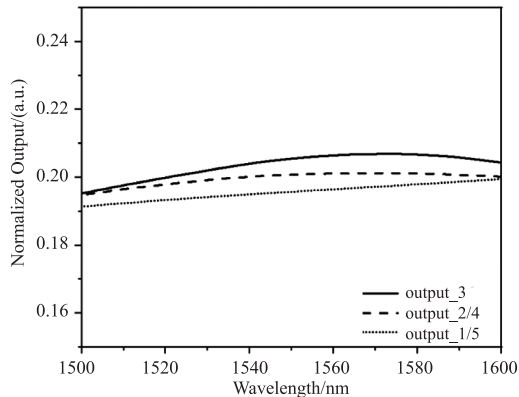
匀地分布到五个输出通道中,锥形波导确保了光学模式的平稳转换。另一方面,通过 MMI 输出通道(归一化)波长相关输出响应的处理,输出通道的分光比如图 2(b)所示,采用 Mode 求解器的 var-FDTD 模块,在 1550 波长处,所有输出端口保持在接近 0.2 的分光比,图 2(c)为 1500~1600 波长下各端口输出光功率随波长的变化。



(a) 1×5 MMI光场图



(b) MMI输出通道归一化分光比图



(c) 输出通道光信号归一化光谱图

图2 对称型均匀分光比 MMI 设计

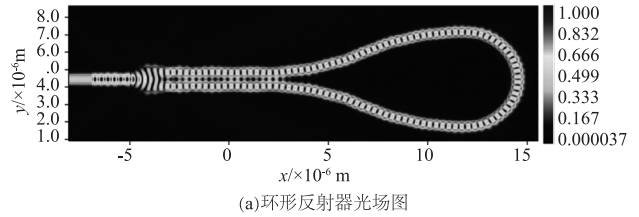
Fig. 2. Symmetrical uniform light splitting ratio

MMI design

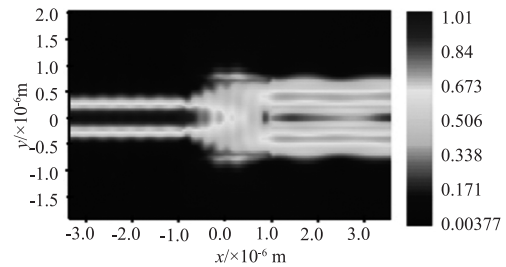
4 环形反射器的仿真实验

均匀分光比 MMI 的设计可以确保耦合进入每条阵列波导的光强近似一致,在本文中另外一个关键器件是环形反射器的引入,我们参考了本课题组 2018 年在折叠 AWG 上的工作^[19-21],通过引入 1×2 MMI 和弯曲波导,光信号通过环形反射器依次返回阵列波导和多模干涉波导,实现波长的解复用,图 3

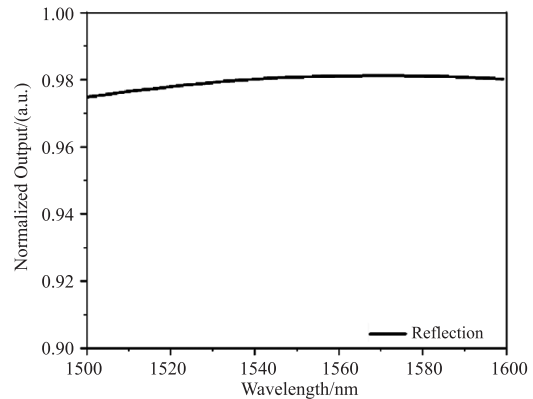
(a)、(b)分别是 1550 nm 波长下,基于 3D FDTD 模型的器件光场图,其中,1×2 MMI 的分光比近似于 50:50 一致且相位相等,弯曲波导采用上下对称的结构,经过仿真验证,反射回来光信号的光功率归一化光谱如图 3(c)所示,环形反射器引入的损耗大概在 0.08 dB,损耗基本源于 MMI。



(a) 环形反射器光场图



(b) 1×2 MMI光场图



(c) 反射光信号归一化光谱图

图3 环形反射器仿真实验

Fig. 3 Simulation verification of ring reflector

5 环形反射器辅助 MMI 的波分复用器设计优化

器件的总体结构由一条输入波导,四条输出波导、一个聚焦平板波导(多模干涉区)和四条阵列波导构成,这些结构集成在 220nm 的顶层硅上,阵列波导之间的间距相等(取决于多模干涉波导自映像点的位置),输出波导间距相等,主要取决于多模干涉区的长度,参数由下式确定:

$$\frac{d_o}{\Delta\lambda_{ch}} = \frac{N_g \Delta L L_{MMI}}{\lambda_0 n_s d_g}$$

其中, d_o 为输出波导间距、 $\Delta\lambda_{ch}$ 为通道间隔、 N_g 为阵列波导群折射率、 ΔL 为相邻阵列波导长度差、 λ_0 为中心波长、 L_{MMI} 为多模干涉波导的长度、 n_s 为多模干涉波导有效折射率、 d_g 为相邻阵列波导间距。

由于多模干涉耦合波导的自映像点位置由 L_{MMI} 的长度确定,自由衍射区的长度即 L_{MMI} 在 $1 \times 5\text{MMI}$ 的结构设计后被确定为一个定值,设计密集波分复用结构,其中输出通道间隔 $\Delta\lambda_{\text{ch}}$ 取 0.8 nm ,考虑到输出波导间距对串扰的影响,在不超出多模干涉波导的宽度范围内,综合考虑阵列波导长度的影响,在本文中,输出波导间距取 $2.5 \mu\text{m}$,呈中心对称分布, ΔL 为 $143.64 \mu\text{m}$,考虑到折叠结构光场的往返,阵列波导的长度差设置为 $71.82 \mu\text{m}$ 。通过 3D-FDTD 的模拟仿真,验证了不同波长干涉聚焦的光场图,成功实现了分波的功能,如图 4 所示,右边波导为阵列波导返回光场,左边为该波长干涉增强输出位置图 4(a) 为 1548.4 nm 波长光场在多模干涉波导中传输,从输出通道 1 中输出,图 4(b) 为 1549.2 nm 波长在输出通道 2 中输出,图 4(c) 为 1550 nm 波长在输出通道 3 中输出,图 4(d) 为 1550.8 nm 波长在输出通道 4 中输出。

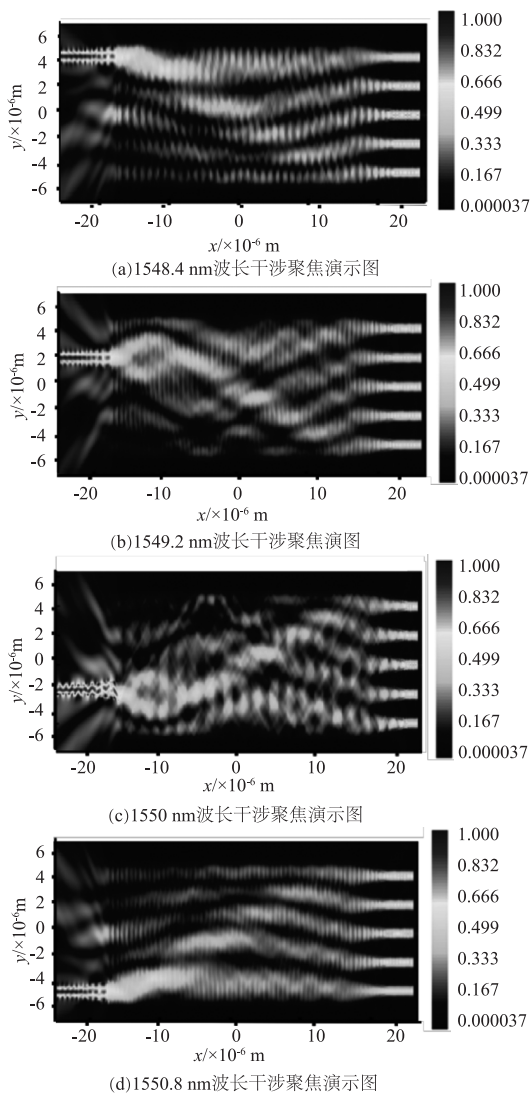


图4 集成器件单波长模拟光场图

Fig. 4 Integrated device single-wavelength simulated optical field images

输出通道的频谱图如图 5 所示,最小的相邻通道串扰为 -14.42 dB ,插入损耗非均匀性最大为 0.9 dB ,通道间隔为 0.8 nm , 3 dB 带宽为 0.53 nm ,整体的旁瓣水平较高,考虑是 MMI taper 设计预留的工艺极限在仿真中产生的杂散光耦合引起的相位误差。该紧凑型 4 通道波分复用器成功实现了波长的分离,串扰性能可以通过设计更大尺寸的多模干涉波导以增大相邻输出波导间距来提高,所提出的器件可以扩展为更多的通道数目,为密集波分复用提供了一种新的解决方案。

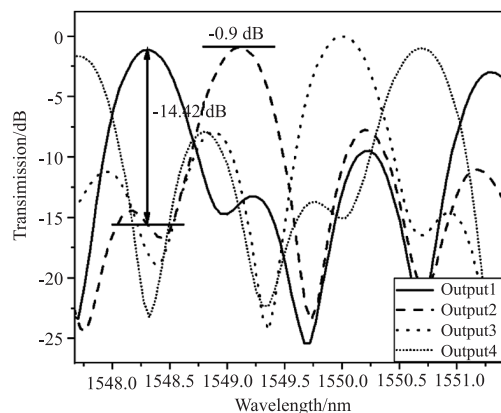


图5 四通道波分复用器的输出模拟光场图

Fig. 5. Simulated optical field of four-channel wavelength division multiplexer (WDM) output

在实际流片过程中,采用 SOITEC 公司提供的硅晶圆,考虑到薄顶层硅厚度均匀性一般由于工艺的原因存在 5% 的误差,会使得多模干涉波导自映像点的位置与仿真相比,产生蓝移/红移现象,拟采用多设计共同流片补偿偏差。通过纳米硅光子制造工艺在绝缘体硅片 (220 nm 顶部硅层) 上制造,采用 248 nm 深紫外光刻技术,对于脊形波导首先通过部分蚀刻顶部硅层形成脊形,蚀刻高度为 90 nm ,剩余的硅板高度为 130 nm ,二次刻蚀 130 nm 后形成脊形波导,随后通过等离子体增强化学气相沉积工艺沉积上 SiO_2 包覆层进行钝化, SiO_2 层厚度为 400 nm 。最后通过 PECVD 在芯片上沉积 $2 \mu\text{m}$ 厚的二氧化硅材料作为保护层。该集成器件均为无源器件,加工工艺较为简单,由于特征尺寸限制的工艺极限导致的仿真偏差以及顶层硅厚度均匀性的问题拟通过片上多设计共同流片测试补偿。

6 结论

我们设计并演示了一种基于多模干涉波导的紧凑型波分复用器,引用环形反射器倍数降低波分复用结构的尺寸,其中进行解复用的结构核心尺寸仅为 $10 \mu\text{m} \times 34 \mu\text{m}$ 。利用多模干涉波导的自映像原

理,与常用的阵列波导光栅相比,极大的减小了阵列波导的数目,降低了因工艺误差导致的阵列波导相位误差的可能性;同时解决了阵列波导中光强不均的问题,理论上可以实现与常规 AWG 相比更低的串扰和更小的尺寸,通过仿真验证了该结构的可行性,实现了最小 -14.42 dB 的相邻通道串扰,其中通道间隔为 0.8 nm。进一步提高器件的性能可以设计更宽宽度的多模干涉波导,增大输出波导的间距,以及信道的数量。基于该结构信道数量的扩展可以实现近些年对大通道密集波分复用的需求,在进一步工作中将设计具有最佳功分比的多通道 MMI。

参考文献:

- [1] P Dong. Silicon photonic integrated circuits for wavelength-division multiplexing applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2016, 22 (6): 370 - 378.
- [2] X Guan, W Shi, L A Rusch. Ultra-dense wavelength-division multiplexing with microring modulator [J]. *Journal of Lightwave Technology* 2021, 39(13): 4300 - 4306.
- [3] Z Wang, Q Wang, X Han, et al. A low-cost high-resolution solid-state lidar with wavelength division multiplexed components and interleaved orthogonal polarization grating couplers [J]. *Journal of Lightwave Technology* 2022, 40 (7): 2072 - 2079.
- [4] X Wu, C Huang, K Xu, et al. Mode-division multiplexing for silicon photonic network-on-chip [J]. *Journal of Lightwave Technology* 2017, 35(15): 3223 - 3228.
- [5] J Sharma, Z Xuan, H Li, et al. Silicon photonic microring-based 4 × 112 Gb/s WDM transmitter with photocurrent-based thermal control in 28 nm CMOS [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 2022, 57(4): 1187 - 1198.
- [6] D W U Chan, X Wu, Z Zhang, et al. Ultra-wide free-spectral-range silicon microring modulator for high capacity WDM [J]. *Journal of Lightwave Technology* 2022, 40 (24): 7848 - 7855.
- [7] C Xie, X Zou, F Zou, et al. A 32-channel 100 GHz wavelength division multiplexer by interleaving two silicon arrayed waveguide gratings [J]. *Chinese Physics B* 2021, 30(12).
- [8] Y Liu, X Wang, Y Yao, et al. Silicon photonic arrayed waveguide grating with 64 channels for the 2 μm spectral range [J]. *Optics Letters* 2022, 47(5): 1186 - 1189.
- [9] S Weng, P Yuan, W Zhuang, et al. SOI-based multi-channel AWG with fiber bragg grating sensing interrogation system [J]. *Photonics* 2021, 8(6): 214.
- [10] P Yuan, S Weng, S Ji, et al. Performance analysis of fiber bragg grating sensor interrogators based on arrayed waveguide gratings [J]. *Optical Engineering* 2021, 60 (6): 738930.
- [11] J Zhou, J Wang, L Zhu, et al. Silicon photonics for 100 Gbaud [J]. *Journal of Lightwave Technology* 2021, 39 (4): 857 - 867.
- [12] D Dai. Silicon nanophotonic integrated devices for on-chip multiplexing and switching [J]. *Journal of Lightwave Technology* 2017, 35(4): 572 - 587.
- [13] L Zhang, J Xiao. Compact and broadband mode demultiplexer using a subwavelength grating engineered MMI coupler [J]. *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics* 2021, 38(10): 2830 - 2836.
- [14] Z L Hussain, R S Fyath. Design and simulation of 4-mode (de) multiplexers implemented in conventional and sub-wavelength grating Si/SiO₂ platforms [J]. *Optik*, 2022, 251: 168449.
- [15] Z L Hussain, R S Fyath. Design and simulation of a compact three-mode (de) multiplexer based on a sub-wavelength grating multimode interference coupler [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* 2021, 47: 100966.
- [16] J Wang, J J Wang, X Xu, et al. Dual-polarization operating hybrid plasmonic 2 × 2 multimode interferometer with mode converter for SOI platform [J]. *Journal of Modern Optics* 2020, 67(20): 1534 - 1544.
- [17] J Zou, F Sun, C Wang, et al. Silicon-based arrayed waveguide gratings for WDM and spectroscopic analysis applications [J]. *Optics and Laser Technology* 2022, 147, 107656.
- [18] A Taha, S Chandran, J Viegas, et al. Compact MMI-based AWGs in a scalable monolithic silicon photonics platform [J]. *IEEE Photonics Journal* 2021, 13(4): 1 - 6.
- [19] H Hu, Q Fang, S Wang, et al. Folded 15-channel arrayed waveguide gratings on silicon nitride platform with loop reflector [J]. *Optics Communications*, 2021, 500: 127321.
- [20] F Qing, C Xiaoling, Z Yingxuan, et al. Folded silicon-photonics arrayed waveguide grating integrated with loop-mirror reflectors [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 1 - 8.
- [21] S Liu, H Hu, X Ma, et al. Low-crosstalk silicon-photonics arrayed waveguide gratings integrated with micro-ring filter [J]. *Frontiers in Physics* 2022, 10.