

基于锥形多模干涉结构的紧凑型分束器

陈宗胜 李志刚 常亚婧 王亚辉 邓学松 刘丽萍

Compact beam splitter with tapered multi-mode interference structures

CHEN Zongsheng, LI Zhigang, CHANG Yajing, WANG Yahui, DENG Xuesong, LIU Liping

引用本文:

陈宗胜, 李志刚, 常亚婧, 等. 基于锥形多模干涉结构的紧凑型分束器[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 276–281. DOI: 10.5768/JAO202546.0201006

CHEN Zongsheng, LI Zhigang, CHANG Yajing, et al. Compact beam splitter with tapered multi-mode interference structures[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 276–281. DOI: 10.5768/JAO202546.0201006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0201006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自准直原理的紧凑型激光位移传感器光学系统设计

Optical system design of compact laser displacement sensor based on auto-collimation principle

应用光学. 2023, 44(4): 720–725 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401003>

一种紧凑型光纤显微物镜的设计

Design of compact fiber microscope objective

应用光学. 2021, 42(5): 802–809 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501007>

紧凑型连续大变倍比枪瞄镜光学系统设计

Design of compact continuous high zoom-ratio gun sighting telescope optical system

应用光学. 2021, 42(3): 423–428 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301008>

用于增强现实显示设备的表面浮雕光栅元件的设计

Design of surface relief grating elements for augmented reality display devices

应用光学. 2024, 45(4): 849–857 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0405001>

基于硫系玻璃的紧凑型大相对孔径长波红外光学系统无热化设计

Compact large relative aperture long wavelength infrared athermalization optical system with chalcogenide glasses

应用光学. 2021, 42(5): 790–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501005>

光纤分立式多点局部放电检测与定位技术

Discrete multi-point partial discharge detection and location technology of optical fiber

应用光学. 2023, 44(5): 1125–1132 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0508001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 02-0276-06

引用格式: 陈宗胜, 李志刚, 常亚婧, 等. 基于锥形多模干涉结构的紧凑型分束器[J]. 应用光学, 2025, 46(2): 276-281.

CHEN Zongsheng, LI Zhigang, CHANG Yajing, et al. Compact beam splitter with tapered multi-mode interference structures[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(2): 276-281.



在线阅读

基于锥形多模干涉结构的紧凑型分束器

陈宗胜¹, 李志刚¹, 常亚婧¹, 王亚辉¹, 邓学松², 刘丽萍¹

(1. 中国人民解放军国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;

2. 安徽大学 信息材料与智能感知安徽省实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要: 紧凑型光分束器对于提升集成光子系统性能或发展新的应用具有重要作用。根据自成像理论, 提出一种基于锥形多模干涉结构的紧凑型分束器。首先, 采用时域有限差分法对分束器的光学性能进行模拟分析, 将传输效率最大化后得到优化的结构参数为: 锥形波导长度 20 μm , 多模干涉波导长度 3.8 μm , 间隙宽度 0.50 μm 。然后对采用优化后的结构参数的分束器进行仿真分析。仿真结果表明, 在 1 480 nm~1 610 nm 波长范围内, 分束器 2 个分支的传输损耗优于 -3.46 dB, 并且 2 个分支之间的输出能量差小于 0.1%。最后, 对设计的器件进行加工和实验测试。测试结果表明: 在 1 581 nm 波长上, 设计加工的分束器 2 个通道的损耗达到最小, 分别为 -2.31 dB 和 -4.83 dB。该器件结构简单, 在集成度、设备制造和低成本方面具有较大优势, 在集成光子系统中有较好的应用前景。

关键词: 紧凑型分束器; 锥形结构; 多模干涉; 光波导

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0201006

Compact beam splitter with tapered multi-mode interference structures

CHEN Zongsheng¹, LI Zhigang¹, CHANG Yajing¹, WANG Yahui¹, DENG Xuesong², LIU Liping¹

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Hefei

230037, China; 2. The Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui

Province, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Compact optical beam splitters are important for enhancing the performance of integrated photonic system or developing new applications. A compact beam splitter based on a tapered multi-mode interference structure was proposed according to the self-imaging theory. Firstly, the optical performance of the beam splitter was simulated by time-domain finite difference method, and the optimized structure parameters were obtained after maximizing the transmission efficiency: the tapered waveguide length was 20 μm , the multi-mode interference waveguide length was 3.8 μm , and the gap width was 0.50 μm . Secondly, the beam splitter with the optimized structure parameters was simulated and analyzed. The results show that in the wavelength range from 1 480 nm to 1 610 nm, each output has a low loss of more than -3.46 dB while the energy difference between the two splitting paths is less than 0.1%. Finally, the designed device structure was processed and experimentally tested. The results show that, at the wavelength of 1 581 nm, the loss of the two channels of the beam splitter reaches the minimum values, which are -2.31 dB and -4.83 dB, respectively. The device has a simple structure and has major advantages in terms of integration, device fabrication and low cost,

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2024-11-14

基金项目: 国家自然科学基金 (12104508)

作者简介: 陈宗胜 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光电隐身与防护研究。E-mail: chen宗sheng_17@nudt.edu.cn

通信作者: 刘丽萍 (1992—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事光电功能材料与器件研究。E-mail: liuliping10@nudt.edu.cn

which has promising applications in integrated photonic systems.

Key words: compact beam splitter; tapered structure; multi-mode interference; optical waveguide

引言

集成光子芯片(PIC)凭借高集成度、高性能和低功耗优势,已成为新一代通信系统的首选研究平台。受规模限制,各类系统对光子器件的尺寸要求越来越高。然而,现有的微纳制造工艺还难以实现激光器、光路和探测器的高度一体化集成,信号的上传与下载仍需要经过光纤耦合完成。但是光纤模场(约 $10\ \mu\text{m}^2$)与单模波导(约 $500\ \text{nm} \times 220\ \text{nm}$)之间存在显著的模场失配问题,通常需要长度大于 $300\ \mu\text{m}$ 的锥形模式转换器将光纤模场转换成波导模式再进行处理^[1-2],这大幅降低了光子芯片系统的集成度。同时,分束器(BS)也是集成光学系统中的关键部件,涉及多种器件级联时,传统BS会显著增加系统复杂度,不利于大规模集成光子芯片系统的发展^[3-5]。因此,如何进一步缩短锥形模式转换器和分束器的尺寸,降低光学芯片系统的复杂程度,已成为当前研究的热点。

近年来,围绕锥形模式转换器和分束器的研究取得了一系列进展。LIU X等^[6]报道了一种超紧凑锥形波导分束器的设计与制造,该结构利用绝缘体上硅(SOI)平台上的绝热硅波导,实现了一种超宽带、结构紧凑的3 dB分束器,将模式演化所需的空間缩小至 $78\ \mu\text{m}$ 。此外,研究者还提出了基于亚波长结构和表面等离子元效应的超紧凑型分束器^[7-9]、可调谐分束器^[10-11]、多功能集成分束器^[12]以及量子光学分束器^[13-14]。同时,锥形波导在非线性光学和光通信应用中也取得了进展^[15-16],特别是在实现高效非线性光学效应方面。因此光学信息系统对高集成度和低成本分束器的需求依然巨大。

多模干涉仪(MMI)能够显著缩小设备尺寸,并基于自成像原理提升功率分配器和组合器的性能^[17]。基于MMI的分束器、干涉仪、波长解复用器和模式转换器已得到证实,并显示出紧凑、高效、宽带以及高制造容差的优势^[18-22]。这些研究表明,MMI结构可用于设计高性能锥形模式转换分束器。

本文设计并制备了一种基于锥形多模干涉的光纤到芯片的分束器,为高效率、结构紧凑的锥形器件设计提供了新方法。该光子器件能够有效提升光学芯片系统的集成度,为未来大规模通信系统的研究提供重要参考。

1 基本原理

多模干涉分束器基于光的自成像原理^[23],当光从较窄的单模波导入射到较宽的多模波导时,多模波导中会激发出很多导模,这些导模在光的传播方向上相互干涉,沿着波导的传播方向,在周期性间隔处会出现一个或多个输入场的复制影像,即所谓的“自成像现象”。通过合理的波导结构设计,光场的这些模式相互干涉,在波导的某些特定位置再现输入场的图像。

设输入波导支持 N 个导模,输入场 $E(x, 0)$ 可以表示为导模的线性叠加,即:

$$E(x, 0) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m \psi_m(x) \quad (1)$$

式中: a_m 为第 m 个导模的模场系数; ψ_m 为第 m 个导模的模式分布函数。

在传播过程中,各个模式会获得不同的相位因子,因此在 z 位置处的光场分布为

$$E(x, z) = \sum_{m=0}^{N-1} a_m \psi_m(x) \exp(-i \beta_m z) \quad (2)$$

式中, β_m 为第 m 个导模的传播常数。

对于一个支持 N 个导模的矩形多模波导,自成像位置可以用以下公式描述:

$$L = \frac{4L_\pi}{p}, \quad p = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

式中, L_π 为自成像周期长度,定义为

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \quad (4)$$

式中, β_0 和 β_1 为波导中基模($m=0$ 和 $m=1$)的传播常数。自成像现象使得在 L 处重现输入场的一个或多个图像。

利用自成像原理,可以将输入光分配到多个输出波导,从而实现光开关;也可以通过调整输入光场的位相关系,使输入光场的功率按特定的分光比输出到各个波导,实现分光比可调的分束器等功能。根据输入光位置的不同,自成像干涉现象可分为一般对称干涉、中心对称干涉以及限制对称干涉3种形式。本文采用中心对称干涉形式进行设计,整个MMI耦合器的尺寸主要由多模干涉区决定,长度和宽度之间的关系依赖于特定的参数和仿真结果,可以表现出近似平方关系。

2 结构设计

根据上述自成像原理,本文设计了如图1所示的分束器,分束器包括2个基本结构,一个锥形波导和一个1×2 MMI。图1中, W_{Ti} 和 W_{To} 分别为锥形波导的输入和输出端口宽度, L_{taper} 为锥形波导长度, L_{MMI} 为 MMI 长度, g 为 MMI 的间隙宽度。该分束器是基于典型 SOI 平台设计,导波层为 240 nm 厚的 Si 层(图中蓝色部分),缓冲层为 2 μm 厚的 SiO_2 层(图中红色部分)。首先,基阶模式的人射光线通过锥形波导从宽区转换为窄区,转换为一阶模式(TE_1/TM_1)。随后,光场经过 MMI 后被转换回基模,并从 2 个规则的带状单模波导(连接到光纤)输出。结构设计中,关键参数如锥形波导长度、MMI 长度和 2 个输出单模波导间的间隙宽度可以作为可调自由度,以便优化传输率。

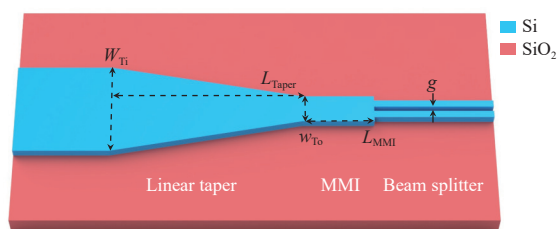


图1 1×2 MMI 分束器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of proposed 1×2 MMI beam splitter structure

3 实验结果与分析

3.1 仿真计算与分析

本文使用 FDTD 软件^[24]对设计的 MMI 分束器进行数值模拟与参数优化,网格大小为 $0.02 \mu\text{m} \times 0.02 \mu\text{m}$,时间步长为 0.1。通过多次仿真,锥形波导的输入和输出端口宽度分别设定为 $W_{Ti}=10 \mu\text{m}$ 和 $W_{To}=2 \mu\text{m}$,此时输入端能有效接收和引导入射光,输出端能与单模波导匹配,从而实现高效的模式转换和光传输,确保最佳的耦合效率和传输特性。1×2 分束器归一化传输系数与各变量的关系如图2所示。首先研究锥形波导长度 L_{taper} 对传输系数的影响,如图2(a)所示,优化的主要目标是实现几乎无损耗的模式转换。从图2(a)可以看出,随着 L_{taper} 的增大,传输系数逐渐提升,在 L_{taper} 不小于 $20 \mu\text{m}$ 时传输系数达到 99%,这表明,实现最大传输效率的最短锥形波导长度应不小于 $20 \mu\text{m}$ 。对于 MMI 区域的设计,结构优化的依据是,减少

器件尺寸的同时保证良好的传输效率;由于锥形波导的输出端口同时是 MMI 的输入端口,因此,MMI 的宽度设定为 $2 \mu\text{m}$ 。根据自成像原理,输入光场投影的像沿传播方向在拍长 L_π 的整数倍处周期性出现,拍长 L_π 是从 MMI 输入端到第一个自成像位置的纵向距离,或 2 个相邻自成像之间的距离。MMI 的最小长度为 1 个拍长 L_π ,其值可通过以下公式计算:

$$L_{MMI} = L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{4n_{\text{eff}}W_e^2}{3\lambda_0} \quad (5)$$

式中: n_{eff} 和 W_e 分别为 MMI 导波层的有效折射率和有效宽度; λ_0 为自由空间中入射光波长。

假设 MMI 的间隙宽度为 $0.5 \mu\text{m}$,当入射光波长为 1550 nm 时,输入 TE 模式的传输系数与 MMI 长度的关系如图2(b)所示。从图2(b)可以看出,当 MMI 长度为 $3.8 \mu\text{m}$ 时,传输效率达到最大值,损耗最小为 -3.29 dB ;在 MMI 长度为 $3.5 \mu\text{m} \sim 3.9 \mu\text{m}$ 之间时,分束器 2 个分支的传输效率均大于 44.9% (即传输损耗优于 -3.46 dB)。

考虑到 MMI 的间隙宽度也会影响分束器的性能,本文基于优化后的 MMI 参数,模拟了 2 个输出单模传输效率与间隙宽度之间的关系,如图2(c)所示。从图2(c)可以看出,当间隙宽度在 $0.4 \mu\text{m} \sim 0.55 \mu\text{m}$ 之间时,2 个分支的传输效率均大于 44% (即传输损耗优于 -3.56 dB)。综合传输效率和分束比进行分析,最终将 MMI 的间隙宽度优化为 $0.50 \mu\text{m}$ 。图2(d)给出在 $1400 \text{ nm} \sim 1700 \text{ nm}$ 波长范围内,传输系数随波长的变化情况。从图2(d)可以看出,在 $1480 \text{ nm} \sim 1610 \text{ nm}$ 范围内,2 个分支的输出损耗均优于 -3.46 dB ,且 2 个分支之间的能量差小于 0.1%。

在入射波长为 1550 nm 时,分束器中电场强度分布的仿真结果如图3所示。从图3可知,通过锥形波导和 1×2 MMI 结构后,输入光场被均匀地分离到两条输出路径。

将本文设计的光子器件与先前报道的进行比较,通过对比可以客观地评价出传输效率和稳定性等指标,如表1所示。

3.2 器件制造与性能测试

基于 1×2 MMI 的分束器的优化参数如表2所示。利用表2中的优化参数,本文将基于 1×2 MMI 的分束器制作在商业 SOI 芯片上。该芯片包含 $2 \mu\text{m}$ 厚的衬底氧化层和 240 nm 厚的 Si 导波层,通过标准电子束光刻工艺结合 ICP-RIE 干法蚀刻将图案

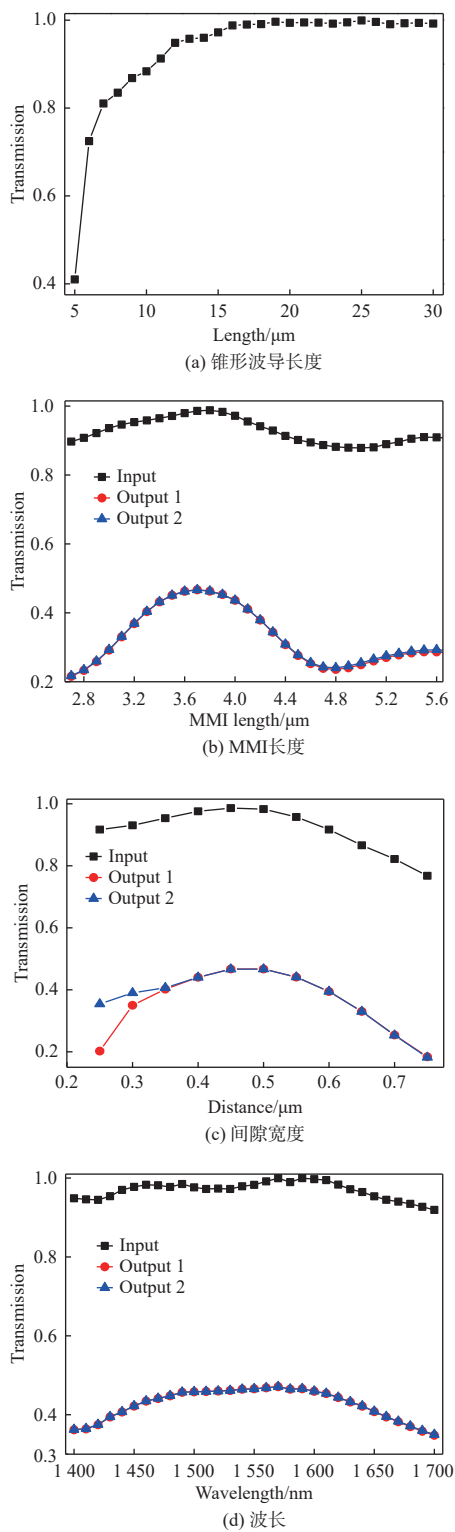


图2 1×2分束器归一化传输系数与各变量的关系

Fig. 2 Normalized transmission coefficients of 1×2 beam splitter versus variables

转移至 Si 薄膜, 器件的电子显微镜扫描图像如图 4 所示。在输入和输出端口, 引入了一对用于光耦合和器件测试的 TE 模式光子晶体光栅耦合器。器件测试原理如图 5 所示。测试系统包括一个超

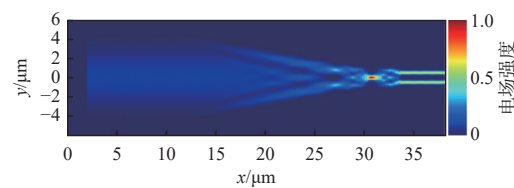


图3 工作波长 $\lambda=1\,550\,\text{nm}$ 时分束器中归一化电场强度分布模拟结果

Fig. 3 Simulation results of normalized electric field intensity distribution in beam splitters when operated wavelength λ is 1 550 nm

表1 多模干涉分束器性能比较表

Table 1 Performance comparison with reported multi-mode interference beam splitter

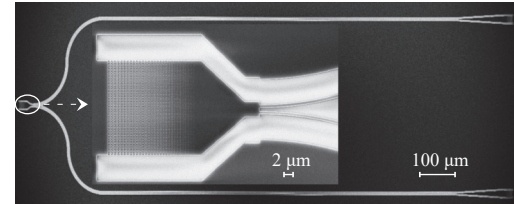
Design methods	Insertion loss/dB	Device length/ μm	Reference
Adiabatic tapers	0.18	78	[6]
Subwavelength structure	1	3.75	[25]
MZI	0.5	200	[26]
MMI	0.414	23.8	this work

连续谱激光器(CW)作为输入光源(波长范围 1 500 nm~1 640 nm, 81608A Keysight 大功率可调谐光源), 一个用于输出传输读数的光学光谱分析仪(OSA, 波长测量范围 600 nm~1 700 nm), 以及一个用于调整 TE 偏振的偏振控制器(PC), 在 1 520 nm~1 620 nm 波长范围内的透射光谱测量结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 在 1 581 nm 波长上, 分束器 2 个分支输出效率分别为 58.7% 和 32.9%(对应传输损耗-2.31 dB 和-4.83 dB), 整体传输效率超过 91%, 实现了在较小尺寸下的高效传输。

表2 基于 1×2 MMI 的分束器的优化参数

Table 2 Optimized parameters of 1×2 MMI-based beam splitter

参数	W_{ti}	W_{to}	L_{taper}	L_{MMI}	g
指标/ μm	10	2	20	3.8	0.5



(注: 插图为基于 1×2 MMI 分束器的放大图像)

图4 制造的器件的扫描电子显微镜图像

Fig. 4 Scanning electron microscope image of fabricated devices

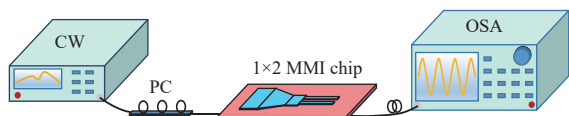


图 5 测量平台原理图

Fig. 5 Schematic diagram of measurement platform

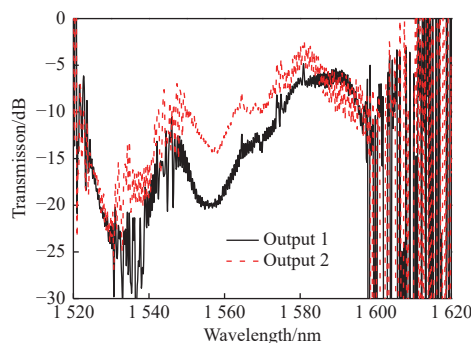


图 6 1×2 MMI 分束器测量透光率

Fig. 6 Measured transmittance of 1×2 MMI-based beam splitter

4 结论

本文设计了一种基于锥形多模干涉的光纤到芯片的分束器,通过理论设计、数值仿真和实验测试对其性能进行了全面研究。仿真结果表明,当锥形波导长度不小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,传输系数可达 99% 以上;同时,合理的设计可以使分束器 2 个分支的传输损耗优于 -3.46 dB ,且 2 个分支间的输出能量差小于 0.1%。实验测试结果表明,在 1581 nm 波长上。分束器 2 个通道的损耗分别为 -2.31 dB 和 -4.83 dB ,达到了最优状态。与文献中报道的典型分束器相比,本文提出的基于锥形多模干涉结构无需使用传统的大于 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的锥形模式转换器,显著提高了分束器的集成度,降低了制造成本。这种紧凑型分束器为未来集成光子系统的高集成度和低成本发展提供了新的途径。

参考文献:

- [1] DAI D X, LIU L, GAO S M, et al. Polarization management for silicon photonic integrated circuits[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, 7(3): 303-328.
- [2] WANG Z, XIAO Y H, LIAO K, et al. Metasurface on integrated photonic platform: from mode converters to machine learning[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(16): 3531-3546.
- [3] DING J F, HUANG L R, LIU W B, et al. Mechanism and performance analyses of optical beam splitters using all-dielectric oligomer-based metasurfaces[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32721-32737.
- [4] BHANDARI B, IM C S, SAPKOTA O R, et al. Highly efficient broadband silicon nitride polarization beam splitter incorporating serially cascaded asymmetric directional couplers[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(21): 5974-5977.
- [5] 谭祺瑞, 葛廷武, 王智勇. 熔融侧面泵浦耦合器光纤夹角对耦合效率的影响[J]. *应用光学*, 2014, 35(6): 1104-1108.
TAN Qirui, GE Tingwu, WANG Zhiyong. Influence of fused side-pump coupler fiber angle on coupling efficiency[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(6): 1104-1108.
- [6] LIU X, ZHAO Y X, SHENG Z, et al. Compact and ultra-broadband silicon photonic adiabatic directional coupler using rib waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2024, 36(10): 637-640.
- [7] WANG F, CHEN Y K, LI C Q, et al. Ultracompact and broadband mid-infrared polarization beam splitter based on an asymmetric directional coupler consisting of GaAs-CaF_2 hybrid plasmonic waveguide and GaAs nanowire[J]. *Optics Communications*, 2022, 502: 127418.
- [8] 富新民, 韩亚娟, 王甲富, 等. 基于人工表面等离子元的隐身材料与结构研究进展[J]. *信息技术对抗技术*, 2022, 1(1): 43-54.
FU Xinmin, HAN Yajuan, WANG Jiafu, et al. Research progress of stealth materials/ structures based on spoof surface plasmon polaritons[J]. *Information Countermeasure Technology*, 2022, 1(1): 43-54.
- [9] ZHENG X Z, ZHAO C X, MA Y J, et al. High performance on-chip polarization beam splitter at visible wavelengths based on a silicon nitride small-sized ridge waveguide[J]. *Optics Express*, 2023, 31(23): 38419-38429.
- [10] KE B X, LO K H, TSAI D W, et al. Non-invasively monitoring tunable 2-by-2 mach-zehnder interferometers in programmable si photonic integrated circuits[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 34: 1-6.
- [11] 丁畅, 孟繁义, 王甲富, 等. 基于近零介电常数超材料的液晶可调带通滤波器设计方法研究[J]. *信息对抗技术*, 2023(1): 78-86.
DING Chang, MENG Fanyu, WANG Jiafu, et al. Design of liquid crystal tunable bandpass filter based on epsilon near zero meta-materials[J]. *Information Countermeas-*

- ure Technology, 2023(1): 78-86.
- [12] PRADEEP D M, JEYACHITRA R K. Numerical analysis of annular photonic crystal based reconfigurable and multifunctional nanoring symmetrical resonator for optical networks[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2024, 23: 223-230.
- [13] LUO J W, WANG G Y. High-fidelity universal quantum gates for hybrid systems via the practical photon scattering[J]. *Chinese Physics B*, 2023, 32(3): 99-107.
- [14] 刘翊钊, 左小杰, 闫智辉, 等. 基于光学参量放大器的量子干涉仪的分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(3): 206-213.
LIU Yizhao, ZUO Xiaojie, YAN Zhihui, et al. Analysis of quantum interferometer based on optical parametric amplifier[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(3): 206-213.
- [15] BUTT M A, KAZANSKIY N L, KHONINA S N. Tapered waveguide mode converters for metal-insulator-metal waveguide plasmonic sensors[J]. *Measurement*, 2023, 211(16): 112601.
- [16] KAZANSKIY N L, BUTT M A, KHONINA S N. Silicon-tapered waveguide for mode conversion in metal-insulator-metal waveguide-based plasmonic sensor for refractive index sensing[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(32): 8678-8685.
- [17] WANG W K, WANG Q, SUN R L, et al. Mode thermo-optic coefficient engineering of sub-wavelength gratings and its application for a mode-insensitive switch[J]. *Optics Express*, 2023, 31(22): 35864-35879.
- [18] MALKA D, DANAN Y, RAMON Y, et al. A photonic 1 × 4 power splitter based on multimode interference in silicon-gallium-nitride slot waveguide structures[J]. *Materials*, 2016, 9(7): 516.
- [19] SAMOI E, BENEZRA Y, MALKA D. An ultracompact 3×1 mmi power-combiner based on si slot-waveguide structures[J]. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, 2020, 39(17): 100780.
- [20] ZHANG J J, SHI X D, ZHANG Z J, et al. Polarization-insensitive ultra-short waveguide taper[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 5027-5030.
- [21] LIANG Y F, LYU H L, LIU B C, et al. Compact low loss ribbed asymmetric multimode interference power splitter[J]. *Photonics*, 2024, 11(5): 472.
- [22] FARHADI S, MIRI M, ALIGHANBARI A, et al. Design and simulation of a compact and ultra-wideband polarization beam splitter based on sub-wavelength grating multimode interference coupler[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(7): 1-11.
- [23] 何赛灵, 戴道铎. 微纳光子集成[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 45-68.
HE Sailing, DAI Daoxin. Micro-nano photonic integration[M]. Beijing: Science Press, 2010: 45-68.
- [24] Lumerical Inc. FDTD solutions version 2024[EB/OL]. [2024-05-26]. <https://www.lumerical.com>.
- [25] XU H N, SHI Y C. Ultra-compact polarization-independent directional couplers utilizing a subwavelength structure[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5202-5205.
- [26] DAI D X, WANG Z, PETERS J, et al. Compact polarization beam splitter using an asymmetrical Mach-Zehnder interferometer based on silicon-on-insulator waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(8): 673-675.