

低损耗超紧凑薄膜铌酸锂端面耦合器设计

熊斌^{1,2,4},蒋品群^{1,2,4*},宋树祥^{1,2,4},尹怡辉³,杨万里³,李跃³

(1.广西师范大学 电子与信息工程学院/集成电路学院,广西 桂林,541004;2.广西高校集成电路与微系统重点实验室(广西师范大学),广西 桂林,541004;3.中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004;
4.广西高校光电信息技术工程研究中心(广西师范大学),广西 桂林,541004)

摘要:针对薄膜铌酸锂(TFLN)波导与单模光纤模场失配导致耦合损耗大的问题,设计了一种低损耗超紧凑型 TFLN 端面耦合器。该耦合器采用三层纳米槽结构,并在 TFLN 外部添加 SiON 包层,以扩大模场直径、提高端面耦合效率;通过优化波导分段长度与刻蚀倾斜角,实现了模场的绝热转换与紧凑集成。利用有限元分析软件进行仿真,结果表明:在 1 524~1 572 nm 波长范围内,输入端与输出端的最大耦合损耗分别为 0.4 dB 和 0.36 dB,器件总长度仅 115 μm ,对准容差达 $\pm 0.7 \mu\text{m}$ 。该耦合器在保持低损耗的同时具有优异的紧凑性和对准宽容度,为光子集成系统提供了一种高效、可靠的端面耦合方案。

关键词:薄膜铌酸锂;端面耦合器;高效耦合;对准容差

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)05-0058-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.05.010

Design of a low-loss ultra-compact thin-film lithium niobate edge coupler

XIONG Bin^{1,2,4}, JIANG Pinqun^{1,2,4*}, SONG Shuxiang^{1,2,4}, YIN Yihui³, YANG Wanli³, LI Yue³

(1. School of Electronic and Information Engineering/School of Integrated Circuits, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Integrated Circuits and Microsystems(Guangxi Normal University), Guilin Guangxi 541004, China; 3. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China; 4. Guangxi Universities Engineering Research Center for Optoelectronic Information Technology(Guangxi Normal University), Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: To address the high coupling loss caused by mode field mismatch between thin-film lithium niobate (TFLN) waveguides and single-mode fibers, a low-loss, ultra-compact TFLN edge coupler is designed. A three-layer nano-slot structure is adopted, and a SiON cladding is added outside the TFLN to enlarge the mode field diameter and improve the edge coupling efficiency. By optimizing the segment lengths of the waveguide and the etching tilt angle, adiabatic mode conversion and compact integration are achieved. Finite element analysis simulations are performed, and the results show that in the wavelength range of 1 524~1 572 nm, the maximum coupling losses at the input and output ports are 0.4 dB and 0.36 dB, respectively. The total device length is only 115 μm , and the alignment tolerance reaches $\pm 0.7 \mu\text{m}$. The coupler exhibits excellent compactness and alignment tolerance while maintaining low loss, offering an efficient and reliable edge-coupling solution for photonic integrated systems.

Key words: thin-film lithium niobate, edge couplers, efficient coupling, alignment tolerance

收稿日期:2025-03-04。

基金项目:广西科技重大专项基金项目(桂科 AA22068056)资助。

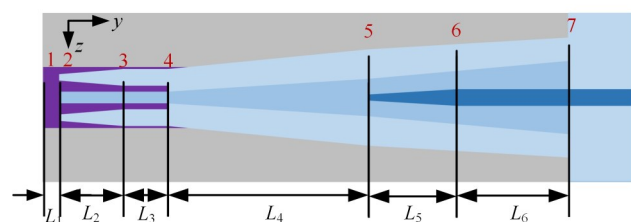
作者简介:熊斌(2000—),男,江西南昌人,硕士研究生,现就读于广西师范大学电子与信息工程学院/集成电路学院新一代电子信息专业(含量子技术)专业。主要研究方向为低损耗薄膜铌酸电光调制器设计。

***通信作者:**蒋品群(1970—),男,博士,副教授,中国电子学会会员。主要研究方向为模拟集成电路设计和光电子技术。

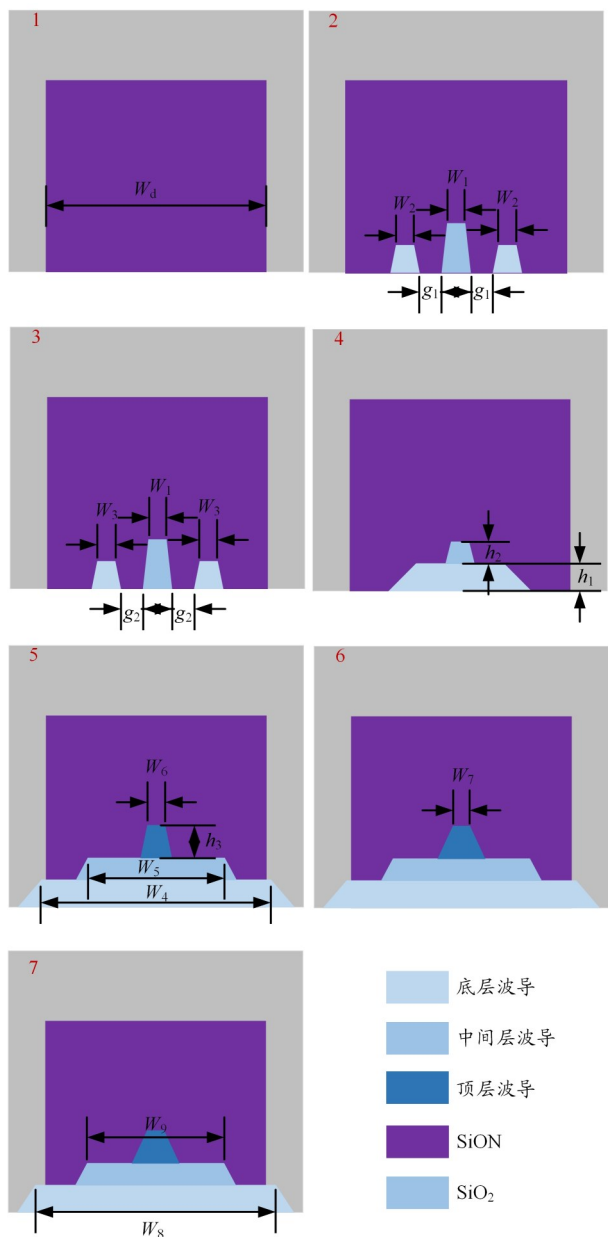


0 引言

近年来,第五代移动通信技术(5G)、人工智能、虚拟现实、量子信息处理、激光雷达等领域对高速信息处理网络的性能需求呈现爆炸式增长,光子芯片凭借传输带宽高、信息处理速度快、时延低和功耗小等优势,在信息处理系统中崭露头角^[1-2]。高性能光子芯片的研发需满足低传输损耗、高速可调谐及大规模集成等关键指标^[3]。在光子芯片的实际应用中,实现芯片内外高效的信息传输至关重要,其核心在于解决光纤



(a) 俯视图



(b) 图2(a)中标记的1~7处截面图

图2 TFLN端面耦合器的俯视图和截面图

式中: η_1 为端面耦合效率,描述了输入端锥形光纤模式与SiON波导模式之间的模式重叠程度,通过对接耦合公式^[14]可以计算该重叠积分。 η_2 为端面耦合器输入端

的SiON波导模式到普通TFLN波导模式的模式传输效率。为此,需要考虑不同波导的几何特性和材料属性,以实现最佳的模式匹配和传输效果。 η_3 是各界面处的抗反射率,计算式为

$$\eta_3 = 1 - R \quad (2)$$

式中:反射系数 R 可以通过菲涅耳公式进行计算,计算式为

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (3)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为波导材料和波导外部材料的折射率。二者的折射率差值越大,反射率就越大,光能的损失就越大,从而降低传输耦合效率。为此,可以采用抗反射(AR)涂层,这一措施能有效抑制光在界面处的反射,提升整体光学性能。

除此之外,受到制作工艺的限制,侧壁粗糙造成的散射损耗较大,往往不能忽略,但由于无法对粗糙程度进行仿真分析,因此本文主要研究端面耦合损耗和波导尺寸变化造成的传输损耗。

综合以上因素,端面耦合器的设计可以分为2个主要步骤。首先,最大化端面耦合效率 η_1 ,以确保光纤与SiON波导之间的高效耦合。这一过程涉及优化光纤和波导的电场分布,使其在接触面处达到最佳重叠。然后优化图2中的各项参数,以实现更短的器件长度,同时提高模式传输效率 η_2 。这一优化过程要求深入分析每个波导部分的几何结构和材料特性,以实现高效的模式转换和最小化光损耗。

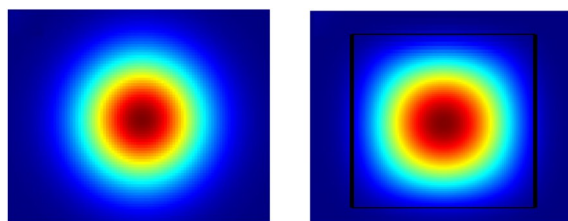
2 仿真与优化

本文采用有限差分特征模态(FDE)和本征模式展开法(EME)^[15],对模式特性、耦合效率 η 、对准容差和光学带宽进行分析和计算。仿真中设定TFLN材料折射率 $n_{\text{eLN}}=2.1380$, $n_{\text{oLN}}=2.2112$ 。由于工艺原因,LN波导的侧壁可能不是完全垂直的,导致波导形状为脊型。为了提高仿真的准确性,将波导的刻蚀倾斜角设置为 70° ,以模拟真实耦合器的脊型波导。本设计适用于模场直径为 $3.2 \mu\text{m}$ 的锥形光纤。

2.1 端面耦合效率

锥形光纤和SiON波导的模场分布如图3所示。图中黑色方框为SiON波导,波导边长 W_d 为 $3.5 \mu\text{m}$ 。可以看出,光被限制在SiON波导中,使端面的模场尺寸与光纤匹配度得到提升,从而有效提高了端面耦合效率。

当 W_d 从 $3 \mu\text{m}$ 增大到 $4 \mu\text{m}$ 时,仿真得到的端面耦

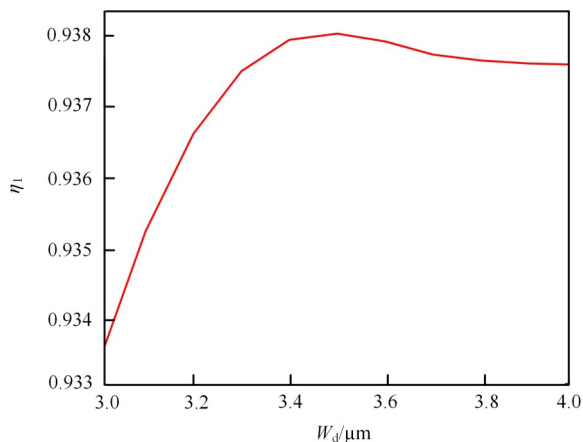


(a) 锥形光纤

(b) SiON波导

图3 锥形光纤和SiON波导TE模的模场分布

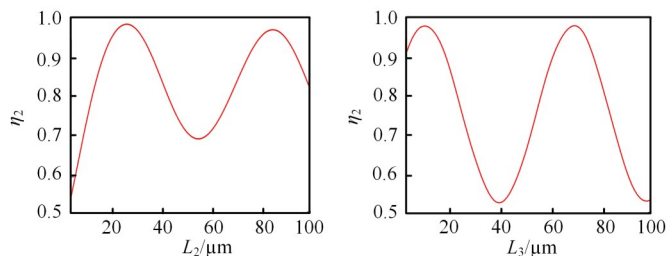
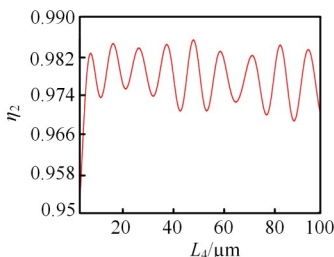
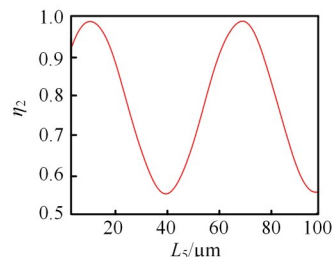
合效率 η_1 的变化情况如图4所示。可以看出,随着 W_d 的增大, η_1 呈现出先上升后下降的趋势。这一现象的根本原因在于波导模场的直径也随之增大,增大到与光纤模场直径相近时, η_1 达到最大值。当 W_d 为 $3.5\mu\text{m}$ 时, η_1 达最大,约为0.938。这一高 η_1 表明,所设计的耦合器在端面对接部分表现出色,有效提升了光的传输能力;优化模场匹配不仅有助于降低 η_1 ,还能提高光通信系统的整体性能。

图4 SiON边长 W_d 对端面耦合效率 η_1 的变化曲线

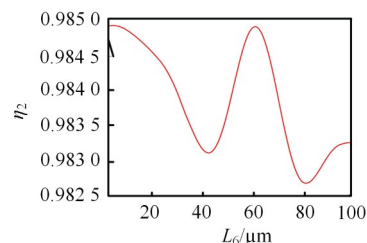
2.2 模式传输效率

模式传输效率 η_2 主要与波导长度有关,因此针对图2(a)中不同部分的长度进行仿真扫描,结果如图5所示。可以看出,当 $L_2=25\mu\text{m}$ 、 $L_3=10\mu\text{m}$ 、 $L_4=47\mu\text{m}$ 、 $L_5=15\mu\text{m}$ 、 $L_6=15\mu\text{m}$ 时,模式传输效率 η_2 达到最大值0.984。在本设计中,由于耦合器第一部分为SiON直波导传输,因此在端面耦合器的末端延伸一段长度为 L_1 的SiON直波导,目的是稳定光波在SiON波导传输,同时也避免了在实际应用中由于过渡抛光导致损坏端面耦合器。因此,本文将 L_1 设置为 $3\mu\text{m}$,得出器件总长度为 $115\mu\text{m}$ 。

观察端面耦合器TE模式下光模场分布的俯视图如图6(a)所示,俯视图中白色箭头处的截面图如图6(b)所示。可以看出,截面1处的模式与锥形光纤的模式相似,这使得光能够有效从光纤耦合到SiON波

(a) η_2 随长度 L_2 的变化曲线(b) η_2 随长度 L_3 的变化曲线(c) η_2 随长度 L_4 的变化曲线(d) η_2 随长度 L_5 的变化曲线

导中,随后形成叠加的双纳米槽波导模式,这主要归因于纳米槽波导的设计:纳米槽由夹在高折射率LN中的窄低折射率槽组成。由于界面处存在显著的折射率差异,导致电场沿 z 轴不连续。因此,随着模

(e) η_2 随长度 L_6 的变化曲线图5 模式传输效率 η_2 随各部分长度 L 的变化曲线

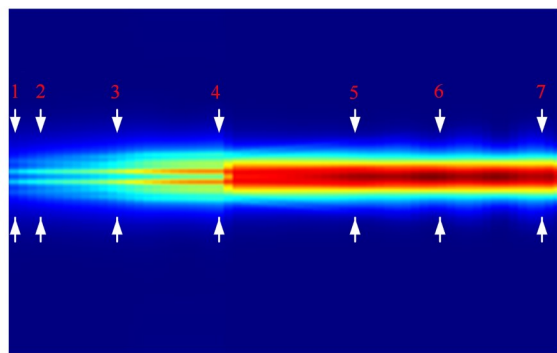
场尺寸的逐渐缩小,狭缝内的光场传输得以增强。槽带模式耦合发生在耦合器第三部分和第四部分的接口处,光模式在不同结构之间顺利过渡。在第四部分~第六部分,光模式逐渐转移至脊型波导部分,最终演变成标准的TFLN波导的TE模式。在波长为 1550nm 时,通过计算得出TE模式下最大模式传输效率 η_2 为0.984,进而计算出总耦合效率 η 为0.923,即可通过式(4)算出总耦合损耗 α 为0.35 dB。

$$\alpha = -10 \lg \eta \quad (4)$$

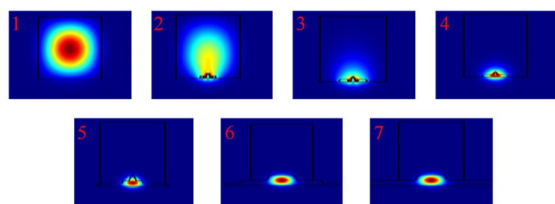
根据仿真结果,本文设计的端面耦合器的结构最优模场匹配参数如表1所示。

2.3 LN波导的刻蚀倾斜角分析

由于端面耦合效率仅与SiON包层波导的尺寸有关,因此LN波导的刻蚀倾斜角仅对模式传输效率造成影响,本文采用EME求解器进行仿真分析,探讨了波导刻蚀倾斜角 θ 对模式传输效率 η_2 的影响,仿真结果如图7所示。可以看出,刻蚀倾斜角 θ 对 η_2 有较大影



(a) TE 模式下的光模场分布图

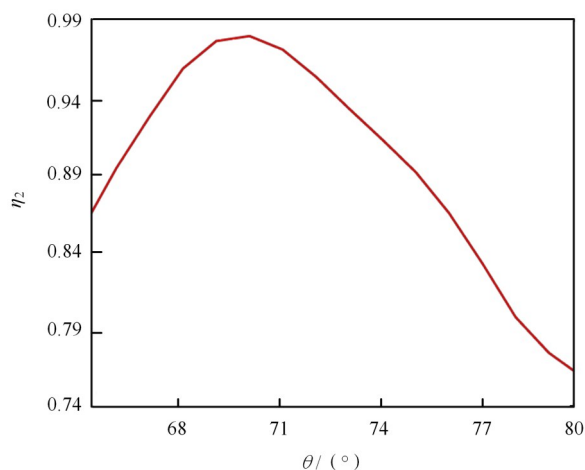


(b) 图 6(a) 中白色箭头处的截面图

图 6 TE 模式下的光模场分布的俯视图和截面图

表 1 TFLN 端面耦合器结构参数

参数	值	参数	值	参数	值
W_1/nm	60	W_2/nm	120	W_3/nm	420
$W_4/\mu\text{m}$	3.8	$W_5/\mu\text{m}$	1	W_6/nm	180
$W_7/\mu\text{m}$	1.5	$W_8/\mu\text{m}$	9	$W_9/\mu\text{m}$	8
$W_9/\mu\text{m}$	3.5	h_1/nm	160	h_2/nm	140
h_3/nm	300	g_1/nm	150	g_2/nm	160
$L_1/\mu\text{m}$	3	$L_2/\mu\text{m}$	25	$L_3/\mu\text{m}$	10
$L_4/\mu\text{m}$	47	$L_5/\mu\text{m}$	15	$L_6/\mu\text{m}$	15

图 7 波导刻蚀倾斜角 θ 对传输模式效率 η_2 的影响

响,这是由于 θ 的变化改变了原有结构的光传输状态,因此,需要改变波导的长度才能调整 η_2 ;当 $\theta=70^\circ$ 时, η_2 达最大值0.984,且在 θ 为 $67^\circ\sim 74^\circ$ 时, η_2 均大于0.9,表明该结构有较好的制造容差。

2.4 容差分析

本文采用FDE结合EME的方法,模拟了光纤的最佳位置和对准容差。沿 x 轴和 z 轴移动光纤中心,得到光纤位置变化对耦合效率的影响,具体如图8所示。可以看出,当光纤中心设置为 $x=1.7\mu\text{m}$ 、 $z=0$ 时,耦合效率 η 达到最大值。通过式(4)可计算出1dB的额外损耗对应的耦合效率 $\eta\approx 0.733$ 。在 x 轴方向上,对准容差范围大约为 $1\sim 2.4\mu\text{m}$,而在 z 轴方向上,对准容差的范围为 $-0.7\sim 0.7\mu\text{m}$ 。这表明当光纤和端面耦合器之间沿着 x 、 z 轴发生 $0.7\mu\text{m}$ 的偏移时,会导致1dB的额外损耗;耦合器的对准容差为 $\pm 0.7\mu\text{m}$,这一较大的对准容差不仅能降低光纤的封装成本,还能显著提高TFLN端面耦合器在实际应用中的可靠性。在光通信系统中,设备的对准精度往往对整体性能有重要影响,因此较大的对准容差能够有效减轻对安装精度的要求,从而促进耦合器的普及和应用。

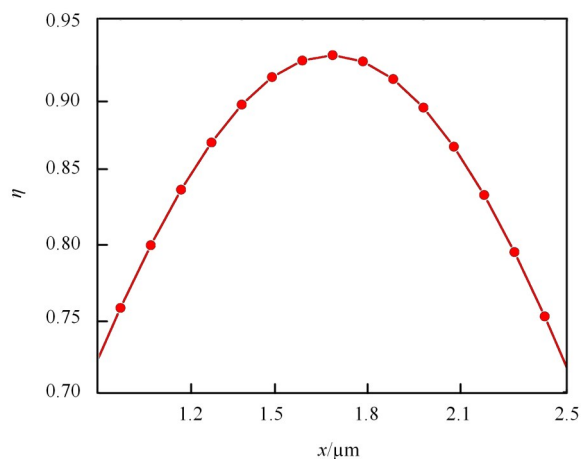
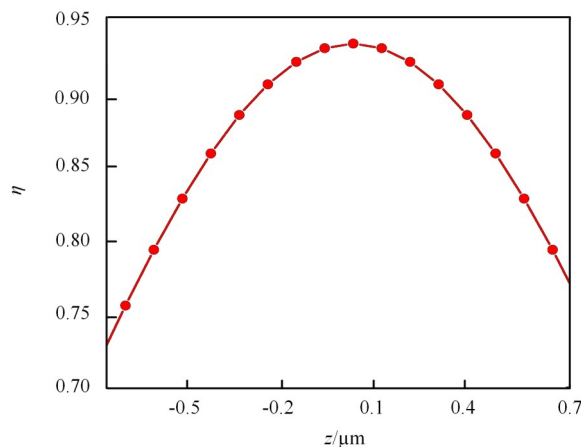
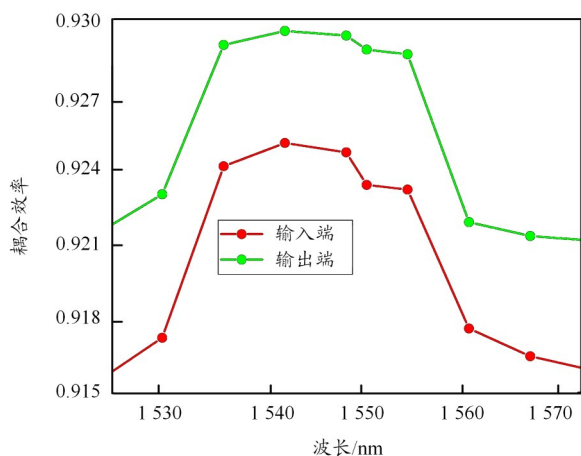
(a) 光纤中心沿 x 轴变化(b) 光纤中心沿 z 轴变化

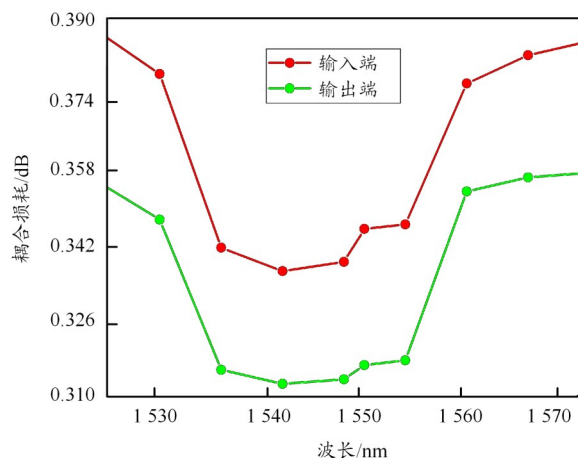
图 8 光纤位置变化对耦合效率的影响

2.5 光学带宽

端面耦合器在实际应用中通常成对出现, 因此除了输入端性能外, 输出端性能同样重要。本文对输出端面耦合器的耦合效率和耦合损耗进行了仿真, 结果如图9所示。可以看出, 在波长范围为1 524~1 572 nm时, 输出端的耦合效率均大于91%, 确保了光信号的高效传输, 从而提升了整体系统的性能。此外, 耦合损耗也表现出良好的特性, 所有测得的耦合损耗均小于0.39 dB, 其中输出端的耦合损耗低于0.36 dB, 输入端与输出端总耦合损耗小于0.75 dB。以上结果表明, 所设计的端面耦合器在信号传输过程中能够有效地减少光损耗, 为实际应用提供了可靠支持。高效的输出端性能不仅提升了光通信的整体效率, 还为TFLN端面耦合器在高密度应用中的可靠性奠定了基础。通过优化耦合器设计, 能够实现更高的光传输效率,



(a) 耦合效率



(b) 耦合损耗

图9 输入、输出端的耦合效率和耦合损耗

确保在各种环境下的稳定性和性能一致性。

2.6 端面耦合器性能比较

近年来端面耦合器的最新研究成果如表2所示, 表中各文献提出的端面耦合器均具有相似的结构和工作原理。可以看出, 与其他文献提出的端面耦合器相比, 本文提出的端面耦合器表现出优异的性能, 其耦合损耗为0.35 dB, 对准容差为 $\pm 0.7 \mu\text{m}$, 低耦合损耗特性和较高的对准容差使其在实际应用中更具优势。另外, 在现代光通信系统中, 器件的紧凑性是至关重要的, 较大的器件尺寸不利于整体系统的集成, 本文设计的端面耦合器长度仅为115 μm , 显示了更好的紧凑性和集成潜力。

表2 各文献提出的端面耦合器的性能对比

来源文献	MFD/ μm	长度/ μm	耦合损耗/dB	对准容差/ μm
文献[9]	3.2	350	0.5	—
文献[10]	3.2	200	0.54	>1
文献[11]	6	750	1.18	± 3
文献[12]	2.5	130	0.47	± 0.6
文献[13]	3.2	100	1.5	—
本文	3.2	115	0.35	± 0.7

3 结束语

本文设计了一种锥形光纤低损耗超紧凑TFLN端面耦合器, 在TFLN波导周围引入SiON包层, 提高了端面耦合效率, 引入微纳结构设计, 进一步缩小器件尺寸, 分析了刻蚀倾斜角度对耦合器传输耦合效率的影响, 确定了最佳刻蚀倾斜角度。在波长范围为1 524~1 572 nm时, 端面耦合器长度仅115 μm , 同时保持输入端耦合器和输出端耦合器总损耗小于0.75 dB。这一性能显著优于传统双层倒锥型端面耦合器, 后者往往需在尺寸和效率之间权衡。因此, 本文所设计的端面耦合器不仅具有更小的尺寸, 还展现出更高的耦合效率。耦合器的紧凑设计使其在晶圆上占用更少的空间, 从而为集成更多功能提供了可能。这种空间节省的潜力, 为未来的光通信系统提供了更为灵活的设计选项。

参考文献:

- [1] Lin Jintian, Bo Fang, Cheng Ya, et al. Advances in on-chip photonic devices based on lithium niobate on insulator[J]. Photonics Research, 2020, 8(12): 1910–1936.
- [2] Komljenovic T, Huang Duanni, Pintus P, et al. Photonic integrated circuits using heterogeneous integration on silicon[J]. Proceedings of the

熊斌,蒋品群,宋树祥,等:低损耗超紧凑薄膜铌酸锂端面耦合器设计

IEEE, 2018, 106(12):2246–2257.

[3] 程亚. 薄膜铌酸锂光电器件与超大规模光子集成(特邀)[J]. 中国激光, 2024, 51(1):394–410.

[4] Yao Ni, Zhou Junxia, Gao Renhong, et al. Efficient light coupling between an ultra-low loss lithium niobate waveguide and an adiabatically tapered single mode optical fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(8):12416–12423.

[5] 李庚霖,贾曰辰,陈峰. 绝缘体上铌酸锂薄膜片上光子学器件的研究进展[J]. 物理学报, 2020, 69(15):234–249.

[6] 唐汇诗,陈智利,唐黎,等. 铌酸锂微纳米结构的制备与分析[J]. 中国激光, 2023, 50(1):226–235.

[7] He Lingyan, Zhang Mian, Shams-Ansari A, et al. Low-loss fiber-to-chip interface for lithium niobate photonic integrated circuits[J]. Optics Letters, 2019, 44(9):2314–2317.

[8] Liu Xiaoyue, Gao Shengqian, Zhang Chi, et al. Ultra-broadband and low-loss edge coupler for highly efficient second harmonic generation in thin-film lithium niobate[J]. Advanced Photonics Nexus, 2022, 1(1):016001.

[9] Ying Pan, Tan Heyun, Zhang Junwei, et al. Low-loss edge-coupling thin-film lithium niobate modulator with an efficient phase shifter [J]. Op-

tics letters, 2021, 46(6):1478–1481.

[10] Hu Changran, Pan An, Li Tingan, et al. High-efficient coupler for thin film lithium niobate waveguide devices[J]. Optics Express, 2021, 29(4):5397–5406.

[11] Liang Xuerui, Fu Li, Yu Qianchen, et al. Efficient and broadband trident spot-size convertor for thin-film lithium niobate integrated device[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 35(1):35–38.

[12] Yan Yanqin, Xiao Meixue, Lei Shi, et al. Design of ultra-compact thin-film lithium niobate edge coupler based on micro-nano structure[J]. Journal of Optics, 2024, 26(6):065803.

[13] Wang Mengke, Hao Yao, Deng Jiayao, et al. Realization of a low loss thin-film lithium niobate edge coupler based on a staircase structure[J]. Optics Express, 2024, 32(26):46712–46725.

[14] 马春生,刘式墉. 光波导模式理论[M]. 长春:吉林大学出版社, 2006.

[15] Zhu Zhaoming, Brown T. Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers[J]. Optics Express, 2002, 10(17):853–864.