

高折射率厚平面光波导与光纤的水平耦合技术研究

吴鹏飞^{1*}, 韩笑笑¹, 雷思琛¹, 谭振坤², 黄帅¹¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;²西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 光纤与平面光波导高效耦合是光波导器件互联设计中的重要环节,常用的倒锥波导已经解决了光纤与波导芯片之间的模式不匹配问题。然而,高折射率差波导与光纤耦合时通常需要较小的尖端尺寸($<180\text{ nm}$),加工复杂且波导易坍塌。设计了一种宽波段(可见光和近红外波段)光纤-波导水平耦合器,通过引入聚合物 SU-8 锥形结构,提高了三端口分支波导的线宽,实现了 850 nm 波段超过 300 nm 的 1 dB 有效带宽。

关键词 集成光学; 耦合器; 波导; 光通信; 聚合物波导

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0713001

Horizontal Coupling Technology of Thick Planar Optical Waveguide with High Refractive Index and Fiber

Wu Pengfei^{1*}, Han Xiaoxiao¹, Lei Sichen¹, Tan Zhenkun², Huang Shuai¹¹School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;²School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract The efficient coupling of fiber and planar optical waveguide is an important link in the interconnection design of optical waveguide devices. The commonly used inverted tapered waveguides have solved the problem of mode mismatch between fibers and waveguide chips. However, the coupling of high refractive index difference waveguides and fibers usually requires a small tip size ($<180\text{ nm}$), the processing is complicated and the waveguide is easy to collapse. A broad-band (visible and near infrared bands) fiber-waveguide horizontal coupler is designed. By introducing the polymer SU-8 tapered structure, the linewidth of the three-port branch waveguide is improved, and an effective bandwidth of 1 dB over 300 nm in 850 nm wave band is achieved.

Key words integrated optics; couplers; waveguides; optical communications; polymer waveguides

1 引言

在大数据时代,传统的电互连通信方式已经难以满足人们对数据处理的需求,光互连技术的出现使得光通信方式向着更大的容量、更快的速度和更低的损耗发展。为了更好地提升光学集成器件的稳定性并降低器件尺寸,光互连技术的发展也逐渐趋

于更小更高效的集成化^[1]。以 Si、Si₃N₄ 等高折射率材料为核心的光学集成器件^[2-4]面临的需要突破的关键技术之一是实现光纤与光波导芯片之间的有效耦合,其中模场失配是影响其有效耦合的主要因素^[5-6]。为了避免模场失配产生较大的耦合损耗,在芯片中引入耦合器用于连接光纤与光波导芯片。虽然光栅耦合器^[7-11]采用的是垂直耦合方式,具有较

收稿日期: 2021-08-25; 修回日期: 2021-09-20; 录用日期: 2021-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(62001363)、快速扶持项目(61404140520)、陕西省科技成果转化与推广计划项目(2020CGXNG-041)、陕西省教育厅服务地方专项计划项目(20JC027)、陕西省教育厅专项科研项目(20JK0690)、西安市科技创新人才服务企业项目(2020KJRC0085)、西安市科技计划项目(2020KJRC0038)、碑林区 2020 科技计划项目(GX2009)

通信作者: *wupengf@xaut.edu.cn

大的偏差容限,但是其有效带宽较窄,例如:文献[8-9]中 1 dB 带宽分别约为 40 nm、64 nm;文献[10-11]中 3 dB 带宽分别约为 40 nm、54 nm。相比之下,基于水平耦合方式的光纤-波导耦合器可以有效地克服此缺点,实现较大的带宽^[12-13],例如:文献[12]中 1dB 带宽约为 100 nm;文献[13]中 3 dB 带宽接近 300 nm。

硅光子耦合器在硅基光子器件中有较多的应用,硅材料在近红外范围内表现出较低的材料吸收损耗,而在可见光波段内的材料吸收损耗很大。氮化硅是一种在近红外和可见光波长范围内具有高透明度的互补金属氧化物半导体(CMOS)兼容材料,且对温度的敏感程度远小于硅材料光子元件,故基于氮化硅材料的光子器件在光通信波段中有广阔的应用前景。虽然厚氮化硅波导可以减少加工时表面粗糙引起的损耗,但是在采用传统倒锥结构时,需要将尖端线宽做到足够小^[13-17]。850 nm 波段为光通信常用波段,相比 1550 nm 波段,850 nm 波段需要更小的尖端尺寸(约为 100 nm),但此时需要采用电子束刻蚀方法。因此,实现 850 nm 波段光纤与厚氮化硅波导器件的有效耦合是急需解决的问题。

本文提出了一种 850 nm 波段基于水平耦合方式的光纤-波导耦合器。为了使单模光纤与 300 nm 厚度的氮化硅波导更有效地耦合,在模斑转换器中引入了 SU-8 材料锥形结构。SU-8 聚合物材料在可见光和红外波段中都具有良好的透光性,且工艺成本和加工复杂度低。在采用 SU-8 锥形结构进一步缩小光纤的光场后,与分支波导进行耦合。所提结构实现了 850 nm 波段超过 300 nm 的 1 dB 光学带宽。对 SU-8 锥形结构进行简单的物理切割可实现与不同模场尺寸的光纤匹配,灵活性较强。

2 水平耦合器的设计和性能分析

2.1 水平耦合器的设计与优化

由于 Si_3N_4 波导与光纤模场尺寸相差较大,故直接耦合模场会产生较大的模场失配损耗。在光纤与波导器件耦合结构的设计中,经常采用分支型^[18-19]、多模干涉(MMI)型^[20-21]和“三叉戟”^[22]型等多端口结构^[23]来提高二者的耦合效率。然而,文献[21]研究了可见光波段光纤-波导耦合器,当端口线宽为 180 nm 时,单端口和多端口耦合损耗均大于 3 dB。选择 850 nm 波长锥形透镜光纤出射的直径为 2.5 μm 的高斯光源与耦合器进行耦合,锥形透镜光纤中输出的光场首先耦合进聚合物材料 SU-8

锥形结构中进行光场压缩,再与 Si_3N_4 分支波导进行耦合。若分支过少会导致与之匹配的 SU-8 波导输出端尺寸较小,进而造成加工困难;若分支过多同样会增加 Si_3N_4 波导的加工复杂度。本文采用三端口分支波导进行耦合,随着分支间隔逐渐减小,光场尺寸在绝热地减小。最后,光场经过 Si_3N_4 锥形波导单模输出。耦合器三维示意图如图 1(a)所示,其中 SiO_2 折射率为 1.453, SU-8 折射率为 1.577, Si_3N_4 折射率为 1.994。

图 1(b)和图 1(c)分别为设计的耦合器的俯视图和侧视图,其中耦合器的整体下包层 SiO_2 厚度 H_{box} 为 3 μm 。输入部分是 SU-8 绝热锥形结构,其上包层为空气。考虑到光刻机分辨率,将三端口分支波导的分支宽度 W_{t1} 均固定为 180 nm。为提高 SU-8 锥形结构与 Si_3N_4 三端口分支波导模场的匹配度,在分支波导下方覆一层厚度为 H_{t2} 的 SiO_2 衬底,上包层 SiO_2 的厚度 H_{clab} 为 2 μm 。如图 1(b)所示, SU-8 结构俯视图为等腰梯形,输入和输出宽度分别为 W_{s1} 和 W_{s2} 。SU-8 结构的输入和输出厚度分别为图 1(c)所示的侧视图中的 H_{s1} 和 H_{s2} 。 Si_3N_4 波导厚度 H_{t1} 为 300 nm, S 形弯曲波导与直波导分支的间距均为 W_d , 经过缓慢过渡,间距 W_d 逐渐减小,最终两种波导会合并成一根波导(宽度为 W_{t2}),其中 $W_{t2}=3W_{t1}=0.54 \mu\text{m}$ 。最终,光场经过绝热拉锥结构单模输出。

光纤与耦合器的整体损耗 F_Z 包括两部分,即

$$F_Z = F_M + F_T, \quad (1)$$

式中: F_M 为光纤与耦合器端口的耦合损耗; F_T 为耦合器的传输损耗。

利用 Lumerical 软件中有限差分本征模式(FDE)求解器对端口耦合损耗进行仿真分析。可以发现,光纤与耦合器端口的耦合损耗 F_M 主要包括模场失配损耗 F_{M1} 和端面反射损耗 F_{M2} , 其中模场失配损耗 F_{M1} 可以通过耦合器端口模式与光纤模式的重叠积分来计算,即

$$F_{M1} = -10 \lg \left(\frac{\left| \iint E_f(x, y) \cdot E_w(x, y) dx dy \right|^2}{\iint |E_f(x, y)|^2 dx dy \cdot \iint |E_w(x, y)|^2 dx dy} \right), \quad (2)$$

式中: E_f 和 E_w 分别为光纤与耦合器端面电场分布; F_{M1} 的单位为 dB。若三端口分支 Si_3N_4 波导直接与光纤耦合,理论上当 Si_3N_4 波导端口尺寸足够小时,其对光场的束缚能力减弱,泄露到包层中的光

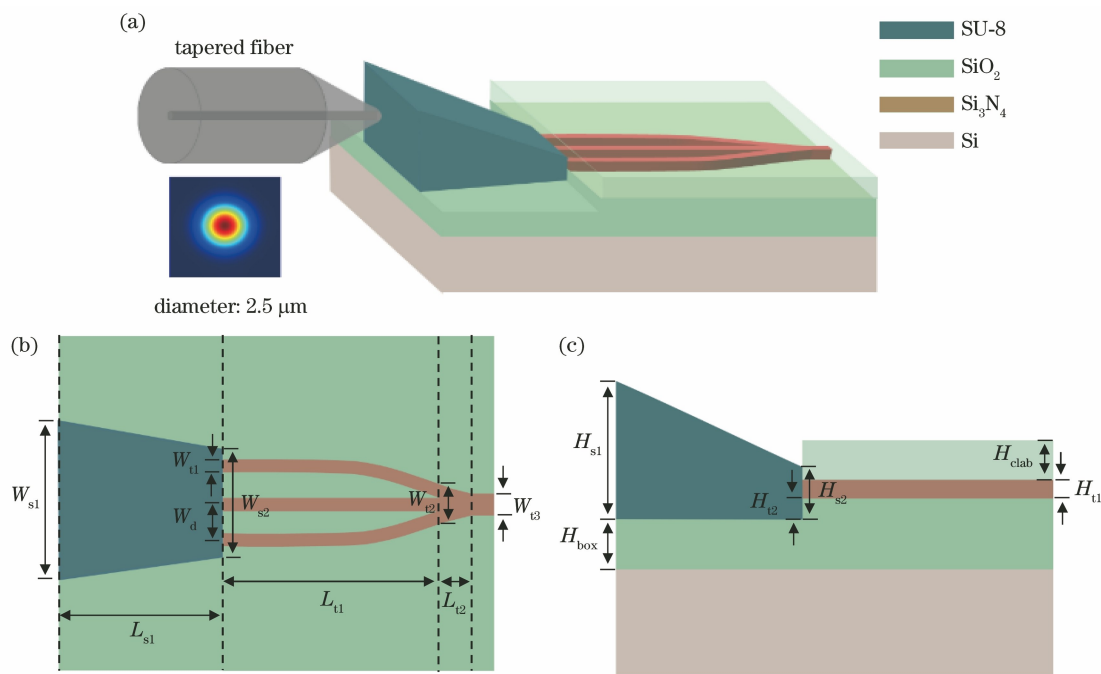


图 1 设计的耦合器的示意图。(a)三维结构；(b)俯视图；(c)侧视图

Fig. 1 Schematic diagram of designed coupler. (a) Three-dimensional structure; (b) top view; (c) side view

场尺寸增大,可以更好地与光纤进行耦合。在不同分支波导宽度 W_{t1} 下,端口模场失配引起耦合损耗 F_{M1} 随波导间隔 W_d 的变化关系如图 2(a)所示。可以发现,当分支波导线宽为 80 nm 时,对于横电 (TE)和横磁(TM)偏振态,端口均可实现小于 1 dB 的插入损耗。当 $W_{t1} = 80 \text{ nm}$, $W_d = 0.7 \mu\text{m}$ 时,三

端口分支端面模场分布图如图 2(b)所示。可以发现,当光场大量泄露到 SiO_2 包层中时,端口耦合效率得到了提高。当波导线宽较窄时,波导易坍塌且加工成本高。当分支波导线宽增大时,波导对光场的束缚能力增强,此时端面模场尺寸减小,进而导致模场失配损耗增加。

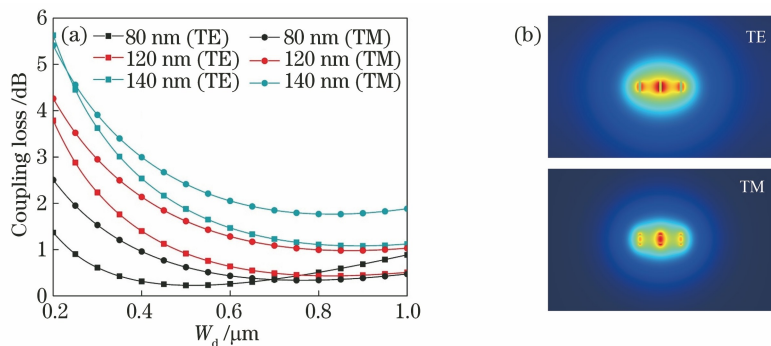


图 2 当 Si_3N_4 波导三端口直接与光纤耦合时,端口模场失配产生的耦合损耗。(a)在不同 W_{t1} 下,端口耦合损耗随 W_d 的变化关系;(b)当 $W_{t1} = 80 \text{ nm}$, $W_d = 0.7 \mu\text{m}$ 时,三端口分支端面的模场分布图

Fig. 2 Coupling loss caused by port mode field mismatch when three ports of Si_3N_4 waveguide are directly coupled to fiber.

(a) Port coupling loss varying with W_d under different W_{t1} ; (b) mode field distribution diagrams of three-port branch port when $W_{t1} = 80 \text{ nm}$, $W_d = 0.7 \mu\text{m}$

为增大分支波导线宽,降低加工成本,在 Si_3N_4 三端口分支波导前引入 SU-8 聚合物锥形结构来进一步缩小光纤的光场,再与分支波导进行耦合。为降低光纤与 SU-8 锥形结构端口之间的模场失配损耗,二者的模场应尽可能地匹配,故需要对耦合器输

入端面尺寸进行优化。将 SU-8 端口尺寸 W_{s1} 和 H_{s1} 设成一致。当 W_{s1} 的范围为 $2.0 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 时,光纤与 SU-8 锥形结构端口耦合损耗 F_{M1} 的变化情况如图 3 所示。可以发现,随着 W_{s1} 的增大,TE 和 TM 偏振的耦合损耗 F_{M1} 先减小,后增大。当将

W_{s1} 固定为 $3.4 \mu\text{m}$ 时, TE 和 TM 模式的耦合损耗 F_{M1} 均为 0.08 dB 。若 TE 和 TM 模式耦合器端口的有效折射率约为 1.568 , 则端面反射损耗 F_{M2} 为 0.22 dB 。因此, 端口总损耗 F_M 为 0.30 dB 。

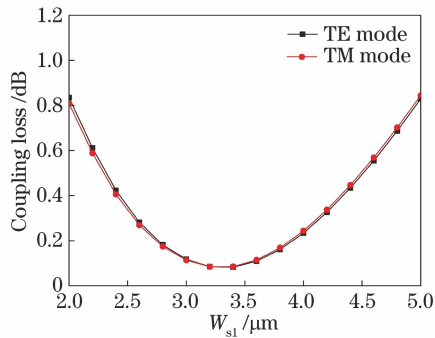


图 3 光纤与 SU-8 锥形结构的端口耦合损耗随 W_{s1} 的变化
Fig. 3 Port coupling loss of fiber and SU-8 tapered structure varying with W_{s1}

利用 Lumerical 软件的有限差分时域法 (FDTD) 求解器对耦合器结构进行分析, 分析各参数对耦合器的传输损耗 F_T 的影响。图 4(a) 为分支波导在不同分支间隔 W_d 下, SU-8 锥形结构输出端面宽度 W_{s2} 在 $1.6 \sim 3.4 \mu\text{m}$ 范围内耦合器传输损耗的变化情况。可以发现: 当 W_{s2} 小于 $2.4 \mu\text{m}$ 时, 分支间隔 W_d 越小, 损耗越低; 当 W_{s2} 大于 $2.4 \mu\text{m}$ 时, 分支间隔 W_d 越大, 损耗越低。考虑 TE 和 TM 偏振态的整体传输损耗, 最终将三端口分支波导的分支间隔 W_d 固定为 $0.57 \mu\text{m}$, SU-8 锥形结构输出端面宽度 W_{s2} 固定为 $2.1 \mu\text{m}$ 。当 $W_{c1} = 180 \text{ nm}$, $W_d = 0.57 \mu\text{m}$ 时, 三端口分支端口模场分布图如图 4(b) 所示。可以发现, 相比图 2(b), 由于耦合器端口波导尺寸增大, 故其对光场束缚能力增强, 进而模斑尺寸减小。图 4(c) 为在 SU-8 结构的输出端厚度 H_{s2} 下, 三端口分支波导下方 SiO_2 衬底厚度 H_{t2} 在 $0 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 范围内耦合器传输损耗的变化情况。可以发现, 随着 SiO_2 衬底厚度 H_{t2} 的增大, 传输损耗先减小, 后增大。考虑到整体的传输损耗和加工的容差性, 将三端口分支波导下方 SiO_2 衬底厚度 H_{t2} 固定为 $0.15 \mu\text{m}$, SU-8 锥形结构的输出端厚度 H_{s2} 固定为 $0.8 \mu\text{m}$ 。图 4(d) 为传输损耗随不同分支长度 L_{c1} 的变化曲线。可以发现, 随着分支长度的增加, 传输损耗先降低, 后趋于平缓, 这是因为当分支长度 L_{c1} 过短时, 波导截面折射率变化较快, 这会导致绝热传输条件被破坏, 进而造成能量损耗。三端口分支波导通过缓慢过渡最终合并, 将 W_{t2} 固定为 $0.54 \mu\text{m}$ 。为保证耦合器单模输出, 扫描了有

效折射率随 Si_3N_4 波导宽度的变化曲线, 如图 4(e) 所示。可以发现, 当波导宽度小于 $0.5 \mu\text{m}$ 时满足单模传输条件, 将三端口分支波导输出宽度 W_{t3} 固定为 $0.45 \mu\text{m}$ 。对输出锥长 L_{t2} 进行扫描, 结果如图 4(f) 所示, 最终将 L_{t2} 固定为 $2 \mu\text{m}$ 。最后, 对 SU-8 波导的拉锥长度 L_{s1} 进行扫描, 传输损耗随拉锥长度 L_{s1} 的变化曲线如图 4(g) 所示。可以发现, 传输损耗随着拉锥长度的增加而减小, 最终将 L_{s1} 固定为 $160 \mu\text{m}$ 。此时, TE 和 TM 偏振态的传输损耗 F_T 分别为 0.25 dB 和 0.34 dB , 故在 850 nm 波长光纤-波导耦合器中, TE 和 TM 模式整体的耦合损耗 F_Z 分别为 0.55 dB 和 0.64 dB 。

2.2 耦合性能分析

在器件与光纤的对准过程中易存在对准偏差, 当器件对对准偏差的容限较大时, 可以降低器件与光纤封装时的对准难度。锥形结构制备工序: 1) 利用等离子体增强化学气相沉积法 (PECVD) 在 SiO_2 下包层上再沉积一层分支波导的 SiO_2 下包层; 2) 采用低压化学气相沉积法 (LPCVD) 沉积一层氮化硅薄膜, 清洗烘干后在氮化硅波导上方旋涂一层光刻胶; 3) 曝光显影后将掩模版上的图形转移到光刻胶上; 4) 利用刻蚀技术将图形转移到氮化硅芯片上; 5) 利用 PECVD 方法在氮化硅波导部分沉积 SiO_2 上包层; 6) 在输入端旋涂一层 SU-8 薄膜, 经过曝光显影和刻蚀技术后形成锥形结构。

对器件整体耦合性能进行分析。耦合器横向和纵向对准容差如图 5(a) 和图 5(b) 所示。可以发现, 在 850 nm 波长下, 透镜光纤与耦合器 1 dB 横向和纵向对准容差约为 700 nm 和 730 nm 。同时, 计算了不同模场直径下的高斯光源对耦合性能的影响, 如图 5(c) 所示。可以看出, 当光源模场直径的范围为 $2.0 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 时, TE 和 TM 模式均可实现小于 1 dB 的耦合损耗。最后, 计算了波长对耦合性能的影响, 如图 5(d) 所示。可以发现, TE 与 TM 模式在 850 nm 通信波段表现出超过 300 nm 的 1 dB 工作带宽。

3 结 论

提出了一种端面耦合方式的光纤-波导耦合器。通过引入聚合物 SU-8 材料, 增加了三端口分支波导的线宽, 降低了加工成本且提高了耦合器的使用寿命, 最终实现了 850 nm 波段超过 300 nm 的 1 dB 有效带宽。对光纤与端面耦合模斑转换器在 850 nm 波长下的对准容差进行了分析, 结果表明,

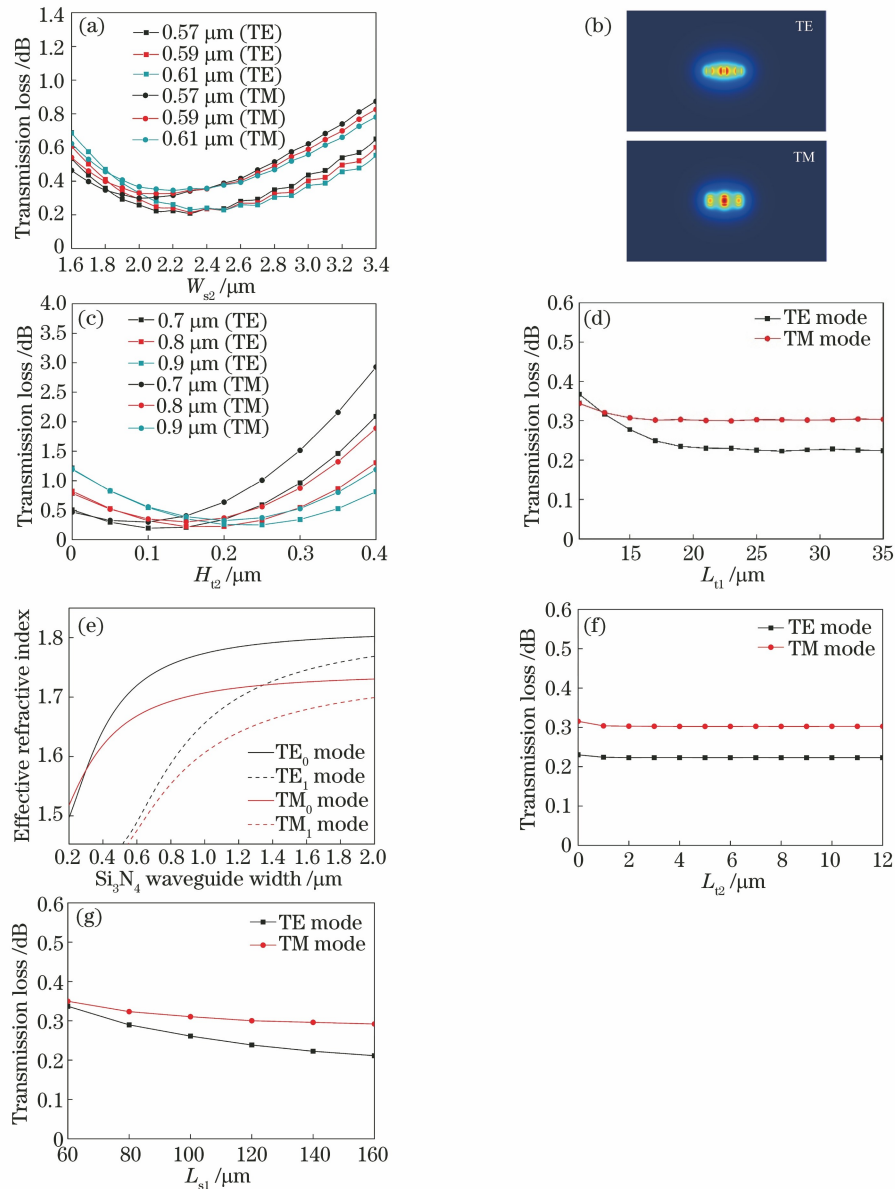


图 4 耦合器传输损耗的影响因素。(a)在不同 W_d 下, SU-8 结构的输出端宽度 W_{s2} 对耦合器传输损耗的影响; (b)当 $W_{t1} = 180 \text{ nm}$, $W_d = 0.57 \text{ }\mu\text{m}$ 时, 三端口分支端口模场分布图; (c)在 SU-8 结构的不同输出厚度 H_{s2} 下, 三端口分支波导下方 SiO_2 衬底厚度 H_{t2} 对耦合器传输损耗的影响; (d)分支长度 L_{t1} 对耦合器传输损耗的影响; (e)不同 Si_3N_4 波导宽度下的不同模式的有效折射率; (f)输出锥长 L_{t2} 对耦合器传输损耗的影响; (g) SU-8 结构的 L_{s1} 对耦合器传输损耗的影响

Fig. 4 Factors affecting transmission loss of coupler. (a) Effect of output width W_{s2} of SU-8 structure on transmission loss of coupler under different W_d ; (b) mode field distribution diagrams of three-port branch port when $W_{t1} = 180 \text{ nm}$, $W_d = 0.57 \text{ }\mu\text{m}$; (c) effect of thickness H_{t2} of SiO_2 substrate under three-port branch waveguide on transmission loss of coupler under different output thicknesses H_{s2} of SU-8 structure; (d) effect of branch length L_{t1} on transmission loss of coupler; (e) effective refractive indexes of different modes under different Si_3N_4 waveguide widths; (f) effect of output taper length L_{t2} on transmission loss of coupler; (g) effect of L_{s1} of SU-8 structure on transmission loss of coupler

1 dB 横向和纵向对准容限分别约为 700 nm 和 730 nm。同时,分析了在不同模场半径的光源下耦合器的损耗情况。可以发现,所设计的耦合器在 1 dB 高斯光源模场直径范围为 2.0~3.3 μm 内的损耗小

于 1 dB。此外,对 SU-8 进行不同尺寸下的物理切割,可实现与不同模场直径下光纤的有效耦合,为 850 nm 波段光纤与厚 Si_3N_4 平面光波导芯片提供了有效的耦合方案。

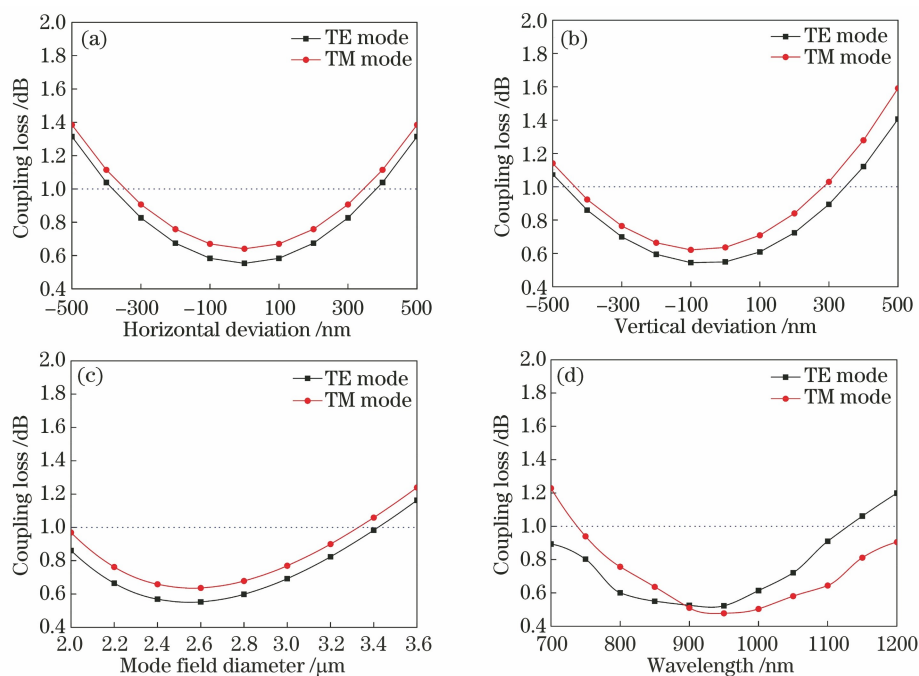


图 5 整体耦合性能分析。(a)耦合器横向对准容差;(b)耦合器纵向对准容差;
(c)模场直径对耦合损耗的影响;(d)波长对耦合损耗的影响

Fig. 5 Overall coupling performance analysis. (a) Horizontal alignment tolerance of coupler; (b) vertical alignment tolerance of coupler; (c) effect of mode field diameter on coupling loss; (d) effect of wavelength on coupling loss

参 考 文 献

- [1] Barwicz T, Watts M R, Popović M A, et al. Polarization-transparent microphotonic devices in the strong confinement limit [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(1): 57-60.
- [2] Yamada H, Chu T, Ishida S, et al. Si photonic wire waveguide devices [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(6): 1371-1379.
- [3] Zhao R, Sun C L, Xu X, et al. Ultra-compact vertical optical coupler based on subwavelength grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (14): 1405002.
赵然, 孙崇磊, 徐晓, 等. 基于亚波长光栅的高集成度垂直光耦合器 [J]. *光学学报*, 2020, 40(14): 1405002.
- [4] Xiang T, Chen H M, Hu Y C. Silicon-based integrated device for electro-optic modulation assembly with mode-division multiplexing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(11): 1106001.
项彤, 陈鹤鸣, 胡宇宸. 硅基电光调制与模分复用集成器件 [J]. *中国激光*, 2021, 48(11): 1106001.
- [5] Hu J, Lin H, Wang W J, et al. Research progress of silicon photonic mode size converters [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3): 030003.
胡娟, 林欢, 汪维军, 等. 硅光子模斑转换器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 030003.
- [6] Marchetti R, Lacava C, Carroll L, et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips [Invited] [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 201-239.
- [7] Tian M, Qu M N, Wu L Y, et al. Progress on asymmetrical grating couplers for vertical coupling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0500004.
田苗, 瞿敏妮, 乌李瑛, 等. 用于垂直耦合的非对称光栅耦合器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0500004.
- [8] Zaoui W S, Kunze A, Vogel W, et al. Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1277-1286.
- [9] Luo Y N, Nong Z C, Gao S Q, et al. Low-loss two-dimensional silicon photonic grating coupler with a backside metal mirror [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 474-477.
- [10] Benedikovic D, Cheben P, Schmid J H, et al. High-efficiency single etch step apodized surface grating coupler using subwavelength structure [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): L93-L97.
- [11] Li C, Zhang H J, Yu M B, et al. CMOS-compatible high efficiency double-etched apodized waveguide grating coupler [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7):

- 7868-7874.
- [12] Snyder B, Lepage G, Balakrishnan S, et al. Ultra-broadband, polarization-insensitive SMF-28 fiber edge couplers for silicon photonics [C] // IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), November 20-22, 2017. Kyoto. New York: IEEE Press, 2017: 55-58.
- [13] Bakir B B, de Gyves A V, Orobchouk R, et al. Low-loss (<1 dB) and polarization-insensitive edge fiber couplers fabricated on 200-mm silicon-on-insulator wafers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(11): 739-741.
- [14] Fang Q, Liow T Y, Song J F, et al. Suspended optical fiber-to-waveguide mode size converter for Silicon photonics[J]. Optics Express, 2010, 18(8): 7763-7769.
- [15] Fang Q, Song J F, Tao S H, et al. Low loss (~ 6.45 dB/cm) sub-micron polycrystalline silicon waveguide integrated with efficient SiON waveguide coupler[J]. Optics Express, 2008, 16(9): 6425-6432.
- [16] Ren G H, Chen S W, Cheng Y P, et al. Study on inverse taper based mode transformer for low loss coupling between silicon wire waveguide and lensed fiber[J]. Optics Communications, 2011, 284(19): 4782-4788.
- [17] Khilo A, Popović M A, Araghchini M, et al. Efficient planar fiber-to-chip coupler based on two-stage adiabatic evolution[J]. Optics Express, 2010, 18(15): 15790-15806.
- [18] Tao S H, Song J F, Fang Q, et al. Improving coupling efficiency of fiber-waveguide coupling with a double-tip coupler [J]. Optics Express, 2008, 16(25): 20803-20808.
- [19] Tu X, Fu H Y, Geng D Y. Y-branch edge coupler between cleaved single mode fiber and nano-scale waveguide on silicon-on-insulator platform [C] // Asia Communications and Photonics Conference, November 11-14, 2014, Shanghai. Washington, D.C.: OSA, 2014: ATH3A.10.
- [20] Wang J, Xuan Y, Lee C, et al. Low-loss and misalignment-tolerant fiber-to-chip edge coupler based on double-tip inverse tapers [C] // Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: M2I.6.
- [21] Ong J R, Ang T Y L, Alagappan G, et al. Silicon nitride double-tip fiber-to-waveguide edge couplers at visible wavelengths [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 17391997.
- [22] Hatori N, Shimizu T, Okano M, et al. A hybrid integrated light source on a silicon platform using a trident spot-size converter [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(7): 1329-1336.
- [23] Yao Z J, Wan Y H, Zhang Y, et al. Broadband high-efficiency triple-tip spot size converter for edge coupling with improved polarization insensitivity [J]. Optics Communications, 2020, 475: 126301.