光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20251028001

三轴光纤陀螺用低损耗氮化硅光引擎芯片

魏千怀[1,2],郭军强[1,2],屈帅彦[1,3],孟雅婷[1,2],哈倩颖[1,2],陈　靓[1,2],刘海宽[1,2],
郭　芃[1,2],曾勇超[3],冯立辉[1,2,3*]

(1. 北京理工大学 光电学院,北京 100081; 2. 信息光子技术工信部重点实验室,北京 100081;
3. 北京理工大学长三角研究院(嘉兴),浙江 嘉兴 314019)

摘　要: 在光纤陀螺小型化的探索中,集成光引擎芯片较高的插入损耗始终是限制其性能的关键问题。文章提出一种新型三轴光子集成陀螺光引擎芯片架构,引入片上偏振旋转器,实现波导中非工作模式向主模式转换,避免传统结构中因偏振选择引起的固有3 dB损耗。同时,芯片集成端面耦合器与多级分束器,实现与光源、敏感环及探测器阵列的高效耦合。基于Lumerical FDTD的仿真验证表明器件插入损耗小于－5 dB,偏振消光比大于19 dB,整体尺寸小于0.5 mm×0.9 mm。所设计的芯片展示了优异的低损耗性能,为高性能集成光纤陀螺的发展提供了新的解决方案。

关键词: 集成光学陀螺; 集成光引擎芯片; 氮化硅

中图分类号: TN256　**文章编号:** 1001－5868(2026)01－0088－12

Low-Loss Silicon Nitride Photonic Integrated Chip for Three-Axis Fiber-Optic Gyroscope

WEI Qianhuai[1,2], GUO Junqiang[1,2], QU Shuaiyan[1,3], MENG Yating[1,2], HA Qianying[1,2], CHEN Liang[1,2], LIU Haikuan[1,2], GUO Peng[1,2], ZENG Yongchao[3], FENG Lihui[1,2,3]

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, CHN; 2. Key Laboratory of Photonics Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, CHN; 3. Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology, Jiaxing 314019, CHN)

Abstract: The miniaturization of fiber-optic gyroscopes is constrained by the relatively high insertion loss—a key performance-limiting factor—of integrated photonic chips. This paper introduces a novel triaxial photonic-integrated-gyroscope chip architecture incorporating on-chip polarization rotators. This architecture enables non-working-to-primary mode conversion within waveguides, thereby avoiding the inherent 3 dB loss associated with polarization selectivity in conventional designs. The chip integrates facet couplers and multistage beam splitters that facilitate efficient coupling among the light source, fiber coils, and detector arrays. Simulation results obtained using Lumerical FDTD demonstrate that the device exhibits an insertion loss and extinction ratio of less than －5 dB and greater than 19 dB, respectively, with an overall footprint smaller than 0.5 mm × 0.9 mm. The proposed chip exhibits outstanding low-loss performance, offering a promising pathway toward the development of high-performance integrated fiber-optic gyroscopes.

Key words: integrated optical gyroscope; integrated optical chip; silicon nitride

收稿日期:2025－10－28.

基金项目:北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会项目(202520439132A).

* **通信作者:**冯立辉

0　引言

惯性导航技术在航空航天、自动驾驶等领域具有重要应用，其中陀螺仪作为姿态感知与角速度传感的核心部件，在惯性导航系统中发挥着关键作用[1]。传统惯性导航系统通常采用激光陀螺，具有高灵敏度与较好的偏置稳定性，然而其体积与重量较大，限制了在低空经济、无人驾驶等新兴领域中的应用。微机电系统（MEMS）陀螺仪虽然具备体积小、成本低等优点，但其偏置稳定性通常在10°/h量级，难以满足中高精度导航需求[2]。相比之下，基于Sagnac效应的光纤陀螺仪（Fiber Optic Gyroscope，FOG）凭借高灵敏度与优异的长期稳定性，且具有较小的尺寸，已广泛应用于中高精度惯性导航系统中[3-4]。

光纤陀螺按工作原理可分为干涉式（IFOG）与谐振式（RFOG）两类。随着干涉式光纤陀螺已在理论上接近性能极限[5-6]，当前研究重点逐渐转向小型化、低功耗及低成本化方向优化[7]。在实现陀螺小型化的路径中，利用片上光子集成技术替代传统分立光学器件构建光引擎芯片，可有效缩减系统尺寸，降低连接复杂度，并显著提升光路稳定性与抗环境扰动能力，已成为光学陀螺小型化最具前景的解决方案之一。

现有集成光学陀螺的研究多集中于单轴IFOG。在实际应用中，实现物体三维角速度的测量，需同时使用三只互相垂直布置的单轴光纤陀螺，导致系统体积、功耗及装调复杂度显著上升。为此，研究者提出三轴一体化光纤陀螺架构，通过光源共享与集成光引擎实现三轴信号的并行检测[8-10]，该方案如图1所示。来自光源的光束首先经过起偏器滤除非工作偏振态，经过1×3耦合器均匀分为三束；三路光束经过相位调制器后分别进入三轴光纤敏感环，随后由反向的1×2耦合器输出至光电探测器。

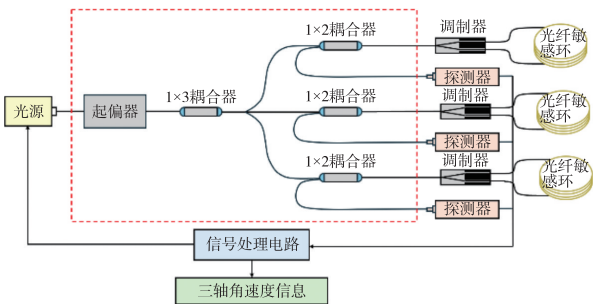


图1　共享光源的三轴一体化光纤陀螺系统图

三轴一体化的光纤陀螺在减小体积、重量、功耗和尺寸方面较三轴分立的光纤陀螺更具优势。文献[11]报道了一种硅基光引擎与二氧化硅集成耦合器（ICC）组合实现的三轴陀螺，其长期零偏稳定性优于0.16°/h。另一项研究通过采用三轴集成耦合器（IOC）结构，将系统连接点从16个减少至9个，使总体尺寸缩减至50×50×30 mm^3，零偏稳定性优于0.5°/h[7]。三轴集成的光引擎芯片在光纤陀螺系统的小型化方面展现出巨大潜力。

然而，与分立光路系统相比，现有集成光引擎仍存在较高插入损耗问题，成为限制其进一步性能提升的关键瓶颈。其中，片上起偏器通常仅允许主偏振模式传播，以抑制偏振串扰，这导致了－3 dB的本征偏振损耗。此外，由于波导-光纤模场不匹配、分束器与弯曲波导的辐射损耗等因素也会进一步恶化系统信噪比。较高的插入损耗不仅影响光引擎芯片本身的能量利用效率，还直接影响光纤陀螺的系统级性能。较高的光路损耗会降低光源到探测端的光功率，导致散粒噪声增大，从而使角度随机游走（ARW）性能劣化。同时，为获得足够的探测光功率，需提高光源输出功率，但这会引起光源发热而带来热漂移，影响偏置稳定性。因此，构建低损耗的光引擎芯片不仅有利于减小功耗，也是提升光纤陀螺系统灵敏度、噪声性能与长期偏置稳定性的关键。

针对上述问题，本文基于低损耗氮化硅材料平台，提出一种新型三轴光纤陀螺光引擎芯片架构。该方案通过引入片上偏振旋转器，实现非工作偏振模式向主模式的高效转换，从根本上避免－3 dB的固有偏振损耗。此外，设计了双层锥形端面耦合器、多模干涉分束器（MMI）及绝热合束器等关键结构，以实现高效率、低损耗的光路连接。基于Lumerical FDTD仿真验证，所设计芯片的插入损耗小于－5 dB，偏振消光比大于19 dB，整体尺寸约为0.5 mm×0.9 mm，为构建小型化、低功耗与高性能的集成光纤陀螺提供了新的技术途径。

1　光引擎芯片设计

所设计的光引擎芯片基于低损耗SiN平台，采用双层波导结构，整体架构如图2所示，由端面耦合器、偏振旋转区域和分束区域组成。来自光源的低偏光束经单模光纤传播，首先由端面耦合器输入SiN波导，随后进入偏振旋转结构。偏振旋转结构

保持 TE_0 模式正常传输，并将 TM_0 模式旋转为 TE_0 模式，随后与直通端 TE_0 模式合束。合束后的光由模斑转换器耦合至下层波导，在 1×3 MMI 区域被均匀分为三路，经过反向排布的 1×2 MMI 和端面耦合器将光束输出。经调制器进行相位解调，并在光纤敏感环实现角速度检测后，回波由 1×2 分束器输出至探测器，进一步传递至解调电路处理。

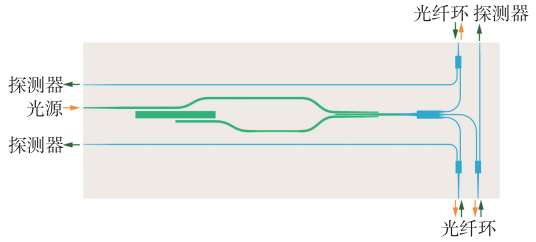


图 2 光芯片引擎架构

所设计的光引擎芯片工作中心波长为 1 550 nm。为实现输入端 TE_0 模式与 TM_0 模式低损耗传输，输入端面耦合器与偏振旋转区域 SiN 厚度选取 500 nm。同时，为实现高偏振消光比光束输出，分束区域选取厚度为 200 nm 的薄波导。在两层波导交界处设计了双层锥形模斑转换器，以实现光束在两层波导间的转换。

1.1 端面耦合器设计

当光纤模场波导模式不匹配时，会产生显著耦合损耗，影响整体信噪比。为提升光纤－波导耦合效率，设计了倒锥形端面耦合器结构，如图 3 所示。

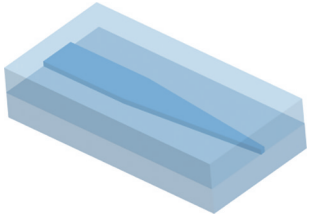


图 3 倒锥形端面耦合器结构

通过增大波导端面的有效模场尺寸，使其与直径约 6 μm 的锥形光纤模式实现高重叠度耦合。通过改变波导的端面尺寸进而改变氮化硅波导的有效折射率，随着折射率的降低，光场不能完全被束缚进而扩散到包层中，从而达到扩大波导模斑的目的。本设计中氮化硅波导输入端的波导宽度为 0.7 μm，厚度为 0.5 μm；输出端的波导宽度为 1.5 μm，厚度为 0.2 μm，输入端要求 TE 与 TM 模式低损耗耦合，而输出端仅需考虑 TE 模式低损耗。由于输入端与输出端波导厚度不一致，分别进行输入与输出端面耦合器的设计。输出端面耦合器仅需考虑 TE 模式耦合损耗，因此先进行输出端面耦合器设计。

1.1.1 输出端面耦合器

对于单层锥形端面耦合器，所带来的损耗分为模场重叠积分与传输损耗。首先考虑模场重叠积分，耦合所用光纤的模场直径为 6 μm，根据公式(1)，利用 MODE 中的 FDE 求解器计算模场重叠积分。

$$\eta=\frac{\left|\iint E_{x,y}(x,y)E_f^*(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right|^2}{\iint\left|E_f(x,y)\right|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y\iint\left|E_{x,y}(x,y)\right|^2\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{1}$$

式中，$E_f(x,y)$ 为单模光纤中的模场分布，$E_{x,y}(x,y)$ 为光波导中的模场分布。η 越大，则二者匹配程度越高，模场失配损耗也越小，其中 $\eta\in[0,1]$[12]。

由进一步的仿真分析可知，模场重叠积分与尖端宽度和上包层厚度有关，故对其进行扫描，得到的结果如图 4 和图 5 所示。最终确定尖端宽度为 0.6 μm，上包层厚度为 3 μm，此时的模场重叠积分为 0.857，即损耗为 0.67 dB。

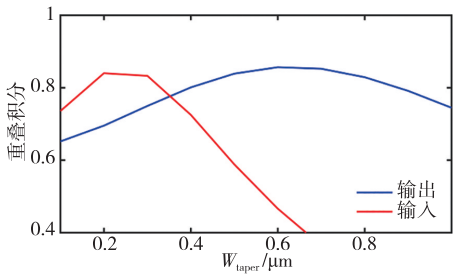


图 4 尖端宽度扫描结果

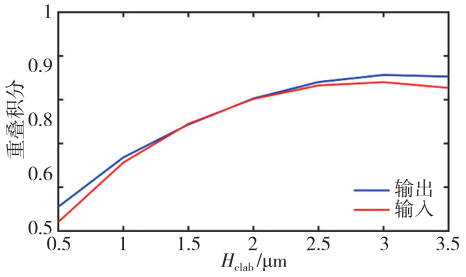


图 5 上包层厚度扫描结果

对于传输损耗，利用 MODE 中的 EME 求解器进行分析，氮化硅波导从最初的 1.5 μm 逐渐减小到 0.6 μm 的过程中，端面耦合器的长度需要满足以下绝热条件[13]：

$$\theta<\frac{\lambda_0}{2W\eta_{\mathrm{eff}}} \tag{2}$$

式中，θ 为锥形结构的局部侧壁角，λ_0 为真空波长，

W 是锥形结构的局部宽度，η_{eff} 为模式的有效折射率。此规则要求波导侧壁的扩展率低于最低阶模式的衍射，从而使最低阶模式限制在锥形波导中而不会转换为高阶模或辐射模。

对端面耦合器的长度进行扫描，结果如图 6 所示。当端面耦合器的长度达到 100 μm 时，其长度扫描处于收敛状态，此时光的通过率接近 100%。随着拉锥区长度的不断增加，其耦合效率保持恒定，最终确定端面耦合器长度为 100 μm。由进一步的分析可知，尖端宽度导致模场失配损耗远大于传输损耗，因此尖端宽度主要由模场重叠积分来确定。综合模场重叠积分与传输效率，此模斑转换器的总损耗为 0.675 dB。

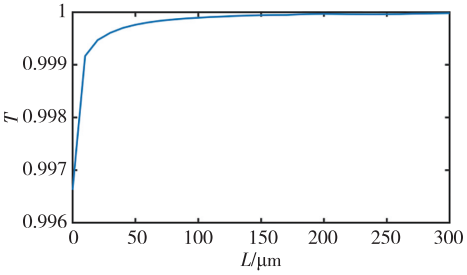


图 6　长度扫描结果

1.1.2　输入端面耦合器

输出端面耦合器需同时减小 TE 和 TM 模式的耦合损耗，其余设计方法与输入端相同。对尖端宽度与上包层厚度进行扫描，得到的结果如图 4 和图 5 所示，最终确定尖端宽度为 0.2 μm，上包层厚度为 3 μm，此时模场重叠积分为 0.84，即损耗为 0.76 dB。对于传输损耗，端面耦合器长度仍需要满足绝热演化的要求，因此，对端面耦合器长度进行扫描，结果如图 7 所示。当模斑转换器的长度达到 400 μm 时，其长度扫描处于收敛状态，此时 TE 和 TM 模式的通过率均接近 100%。随着拉锥区长度的不断增加，其耦合效率保持恒定，最终确定端面耦合器长度为 400 μm。综合模场重叠积分与传输效率，此端面耦合器的总损耗为 0.765 dB。

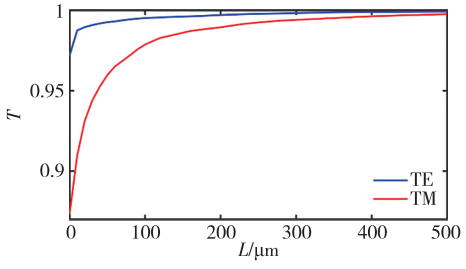


图 7　TE 和 TM 模式下的长度扫描

图 8 为端面耦合器的模场传输图。因此，所提出的光引擎芯片采用单层锥形端面耦合器结构可降低波导与光纤的耦合损耗，提高整个光纤陀螺系统的信噪比。

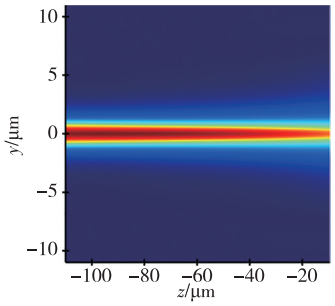


图 8　模斑转换器模场传输图

1.2　偏振旋转区域设计

偏振旋转区域由偏振分束器（PBS）、偏振旋转器（PR）与绝热合束器组成，结构如图 9 所示。波导中的 TM_0 模式由偏振分束器交叉端输出，经过偏振旋转器转换为 TE_0 模式，并与直通端输出的 TE_0 模式在绝热合束器区域实现合束，从而实现非工作模式（TM_0）向主工作模式（TE_0）转化，提升能量利用效率。

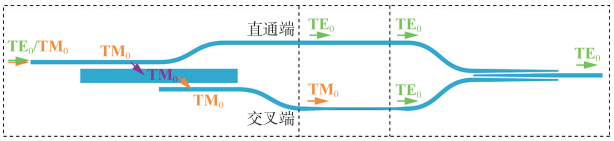


图 9　偏振旋转区域示意图

1.2.1　偏振分束器

相较于绝缘体上硅（SOI）波导，SiN 波导具有较低的折射率对比度，表面形貌不均匀性对波导损耗影响较小，使其具有低损耗的特性，并且在制造加工中拥有更大的工艺容差。然而，由于较低的折射率对比度，SiN 器件较难实现紧凑的片上偏振操控。在现有报道中，SiN 偏振分束器一般基于马赫-曾德尔干涉仪[14]、多模干涉耦合器[15-16]、定向耦合器[17]与非定向耦合器[18-20]等结构实现。在这些结构中，基于非定向耦合器的偏振分束器具有较小的尺寸、较低的插入损耗，可实现较高的偏振消光比与较大的带宽，在各类 SiN 芯片中得以广泛应用。

所设计的偏振分束器基于非定向耦合器，结构如图 10 所示，由两条宽度为 W_1 的窄波导与一条宽度为 W_2 的宽波导组成。窄波导中 TM_0 模式的有效折射率与宽波导中 TM_1 模式的有效折射率相匹配，从而形成一个 TM_0-TM_1 的定向耦合器。在输入端口，

当耦合长度满足相位匹配条件时，窄波导中的 TM_0 模式将全部耦合进入宽波导中。随后，经过一个同样的非对称定向耦合器，宽波导中的 TM_1 模式耦合至下端窄波导，并在交叉端输出 TM_0 模式。输入端的 TE_0 模式不满足有效折射率匹配条件，不会耦合至宽波导，而由直通端直接输出。

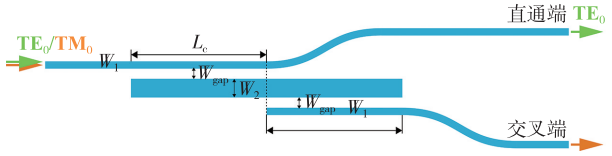


图 10 偏振分束器结构

选取 SiN 波导厚度为 500 nm，对波导宽度进行扫描，以选取有效折射率匹配时的 W_1 与 W_2。扫描结果如图 11 所示，选取窄波导宽度 W_1 为 700 nm，当窄波导中 TM_0 有效折射率与宽波导中 TM_1 有效折射率相同时，波导宽度 W_2 为 1 920 nm。

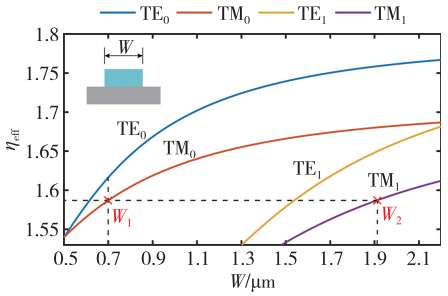


图 11 波导宽度与模式有效折射率的变化关系

为防止模式串扰，波导间距 W_{gap} 不应过小，选取 W_{gap} 为 600 nm。随后对耦合长度 L_c 进行扫描，经过粗扫描，确定最佳耦合长度在 35～45 μm 内。具体扫描结果如图 12 所示，当 L_c=39 μm 时，结构在 1 550 nm 处具有最高的偏振分束效率，即 93.92%。

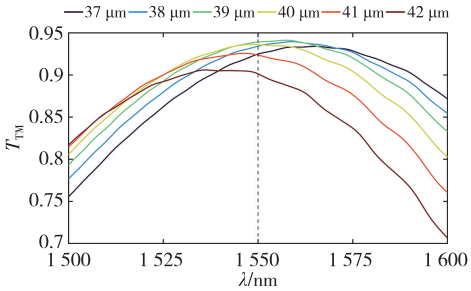
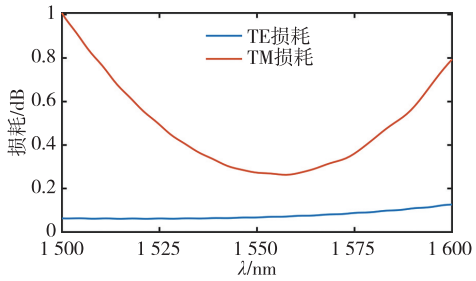
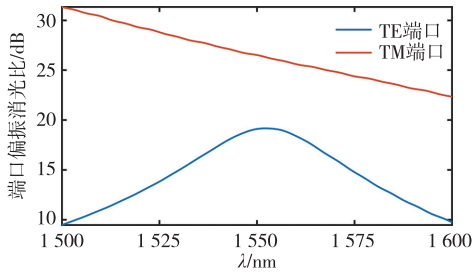


图 12 耦合长度与交叉端口 TM_0 透过率

进一步仿真分析了所设计结构的损耗与偏振消光比，结果如图 13 所示。偏振分束器 TE_0 模式在 1 500～1 600 nm 范围内损耗小于 0.13 dB，最小值在 1 500 nm 处为 0.06 dB；TM_0 模式在 1 500～1 600 nm 范围内损耗小于 1 dB，在目标波长 1 550 nm 处，损耗为 0.27 dB；直通端 TE_0 模式在 1 500～1 600 nm 范围内 PER 大于 22 dB，在目标波长 1 550 nm 处 PER 为 26.4 dB；交叉端 TM_0 模式在目标波长 1 550 nm 处消光比为 19.1 dB。仿真结果表明，所设计的偏振分束器具有较低的损耗与较高的偏振分束消光比。



（a）直通端口与交叉端口损耗



（b）直通端口与交叉端口偏振消光比

图 13 直通端口与交叉端口损耗和偏振消光比对比

1.2.2 偏振旋转器

所设计的偏振旋转器基于切角结构，最早用于 SOI 波导器件[21]，具有尺寸小、损耗低的特点。图 14 展示了所设计的偏振旋转器结构。

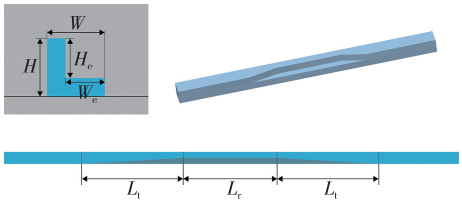


图 14 偏振旋转器结构

切角结构的偏振旋转器基于模式混合原理。在切角区域，由于波导结构的非对称性，波导中的基模不再以 TE_0 与 TM_0 模式传输，而是形成一对正交的混合模式 HP_1 与 HP_2。混合模式可表示为本征 TE_0 与 TM_0 模式的线性叠加[21]：

$$|HP_1\rangle = \cos\theta|TE_0\rangle + \sin\theta|TM_0\rangle$$
$$|HP_2\rangle = -\sin\theta|TE_0\rangle + \cos\theta|TM_0\rangle \quad (3)$$

式中，θ 为旋转角，用于表征混合模相对于本征模式的旋转程度。混合模式的传播常数 β_1 和 β_2 存在较

小的差异，在传播半个拍长 $L_\pi=\pi/(\beta_1-\beta_2)$ 后，HP_1 模式相对 HP_2 旋转 180°。此时与条形波导连接，混合模重新投影至本征 TE_0 与 TM_0 模，从而实现偏振旋转。由投影可以求出切角结构的偏振转化效率理论上限为：

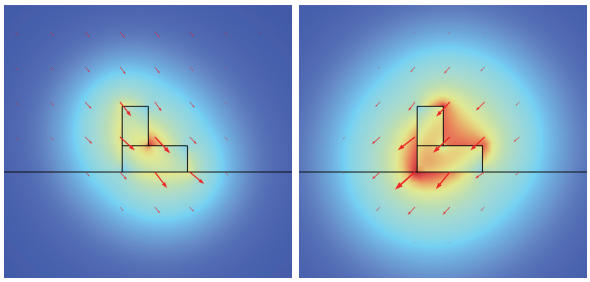
$$\eta_{PR}=\sin^2(2\theta)\sin^2\left(\frac{\pi L}{2L_r}\right) \tag{4}$$

因此，偏振旋转角越接近 45°，偏振旋转效率越高。偏振旋转角亦可用功率表示：

$$\tan\theta=\frac{\iint_\Omega \eta^2(x,y)\cdot H_x^2(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y}{\iint_\Omega \eta^2(x,y)\cdot H_y^2(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y} \tag{5}$$

式中，$\eta(x,y)$ 为区域折射率分布，$H_x(x,y)$ 与 $H_y(x,y)$ 为本征模磁场的水平与垂直分量。

由公式(5)可知，当 TE_0 与 TM_0 分量强度相等时，偏振旋转角为 45°。为实现此条件，最简单的方法是使波导折射率分布 $n(x,y)$ 关于中心对称。在这一条件下，必须要求波导结构也具有对称性，即波导宽度 W 与波导厚度 H、切角宽度 W_e 与切角深度 H_e 相等。由于波导厚度 H 已选定为 500 nm，且底层波导厚度为 200 nm。因此，选取波导宽度 W=500 nm，切角厚度 H_e=300 nm，切角宽度 W_e=300 nm。使用 COMSOL 对切角截面进行模式分析，得到混合模式电场分布如图 15 所示。求解所得 HP_1 与 HP_2 模式的有效折射率分别为 1.492 2 与 1.483 5，经过计算，半拍长 L_π=89.08 μm，偏振旋转角 θ=44.673°。



(a) HP_1 模式电场分布　　(b) HP_2 模式电场分布

图 15　切角截面模式分析

切角结构与条形波导直连的偏振旋转器，在界面处会引起界面散射与反射，从而激发其他模式导致偏振转化效率降低，并引入较大的插入损耗。经过仿真，该结构最大偏振转化效率仅能达到 74%。为了减小界面损耗，在条形波导与切角区域引入锥形过渡波导。锥形波导的横截面尺寸沿传播方向逐渐变化，使光场从条形波导模式过渡到切角区域的混合模式，可有效降低由于模式失配引起的反射。在局部近似下，锥形段的渐变可视为若干微小切角结构的连续叠加，并且由于中心对称性，其整体等效传播特性接近于同等长度的切角波导。经过计算所得半拍长 L_π=89.08 μm，设计锥形区域单端长度 L_t=20 μm，切角部分长度 L_r=40 μm，总旋转长度 L=90 μm，并对 L_r 进行扫描，以获取最佳偏振转化效率。扫描结果如图 16 所示，对于目标波长 1 550 nm，当 L_t=20 μm 时，L_r=42 μm 可实现最大偏振转化效率 97.17%。

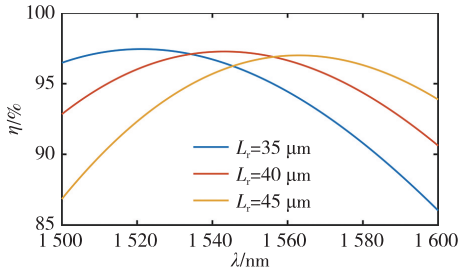


图 16　旋转长度与偏振转化效率的关系

1.2.3　绝热合束器

对于所设计的偏振分束-旋转-合束系统，若采用 Y 分支或 MMI 结构进行合束，则直通端与交叉端两路构成一个等效马赫-曾德尔干涉仪。此类合束器属于相干合束，输出功率对于输入光束的相位差极其敏感。当相位差为 π 时，输出功率为两输入功率之差，严重恶化系统性能。

为使所设计的合束器对相位不敏感，采用绝热合束器。绝热合束器基于超模演化原理，通过在两输入波导与输出波导之间引入渐变锥形结构，使偶模与奇模在传播过程中分别沿各自的本征模轨迹连续演化，实现从双波导到单波导的平滑能量过渡。由于能量传输由模式绝热跟随而非相干干涉决定，该结构对输入光的相位差不敏感，从而在相位差为 π 时仍可保持高输出功率，显著提高了系统的相位容差与稳定性[22]。

所设计绝热合束器如图 17 所示，输入与输出波导宽度均为 W，锥形波导尖端宽度为 W_{tip}，波导间隔为 W_{gap}，耦合长度为 L_t。

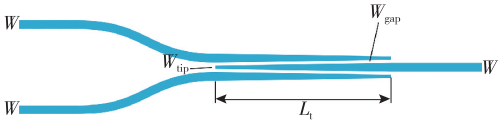


图 17　绝热合束器结构

经过优化后的绝热合束器结构参数：W=1 μm，锥形波导尖端宽度为 W_{tip}=0.2 μm，波导间隔为 W_{gap}=0.2 μm，耦合长度为 L_t=60 μm。设计合束器的耦合效率如图18所示，当输入端无相位差时，在1 500～1 600 nm范围内耦合效率高于99%，损耗低于0.05 dB，具有良好的性能。

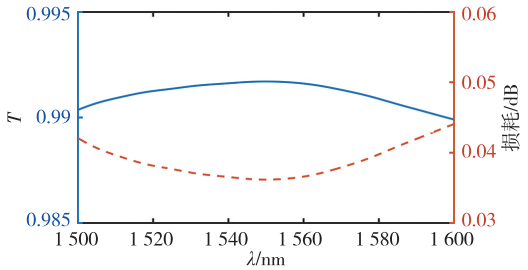


图18 绝热合束器耦合效率

为了讨论所设计绝热合束器的相位敏感特性，设置输入端两端口相位差为 $\Delta\varphi$，对其进行扫描，在1 550 nm处的扫描结果如图19所示。结果表明，当两端口输入相位相差π时，耦合效率仍有88.9%。此外，在相位差为±π/3的范围内，耦合效率大于95%，表明所设计的结构具有较好的相位稳定性。

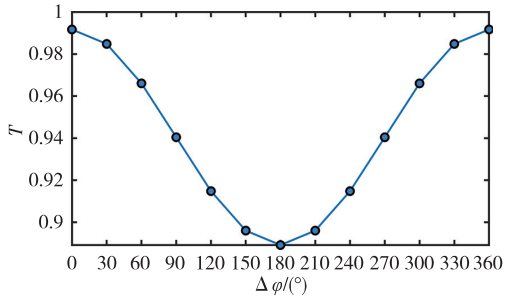


图19 绝热合束器相位稳定性分析

1.3 分束区域设计

1.3.1 MMI分束器设计

MMI分束器是集成光子学中的关键无源器件之一，具有结构紧凑、工艺容差大、波长不敏感、损耗低的优点，其工作原理是自映像效应，结构如图20。当单模光从输入波导进入一个宽的多模波导区域时，会激发出多个高阶模式。这些模式以不同的相速度传播，在特定的距离上，它们的相位会重新对齐，形成输入光场的单个或多个复制图像。

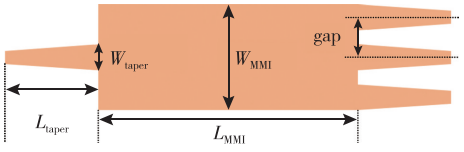


图20 MMI结构

多模干涉器的拍长定义为基模和一阶模式在传播中产生2π相位差所需的距离：

$$L_\pi = \frac{2\pi}{\beta_0 - \beta_1} \tag{6}$$

在近轴近似下，传播常数 β_m 可以近似为：

$$\beta_m = k_0\eta_{eff} - \frac{(m+1)^2\pi\lambda}{4\eta_{eff}W_e^2} \tag{7}$$

从而推导出拍长的近似计算公式：

$$L_\pi \approx \frac{4\eta_{eff}W_e^2}{3\lambda} \tag{8}$$

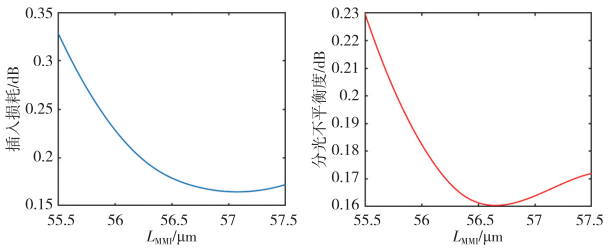
式中，k_0 是光在自由空间中的波数，η_{eff} 是基模的有效折射率，λ 是自由空间中的工作波长，W_e 是MMI分束器的有效宽度。由于古斯-汉森相移效应，即光束在芯层-包层界面发生全内反射时所经历的横向位移，光的模式宽度（W_e）会略大于物理宽度（W_{MMI}）。MMI分束器有效宽度的计算公式为：

$$W_e = W_{MMI} + \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)\left(\frac{\eta_{clad}}{\eta_{eff}}\right)^{2\sigma}\frac{1}{\sqrt{\eta_{eff}^2 - \eta_{clad}^2}} \tag{9}$$

式中，η_{clad} 为MMI波导的包层折射率，TE模式对应的 σ=0，TM模式对应的 σ=1。MMI分束器的长度由以下公式给出：

$$L_{MMI} = \frac{3pL_\pi}{4N} \tag{10}$$

式中，p 为正整数，代表自映像的序数，N 表示MMI分束器输出端口的数量。本例中 N=3，p=1。通过EME方法对所设计的MMI分束器结构进行仿真设计。为了获得更好的性能和容差，选取MMI分束器的宽度为12 μm，对MMI分束器的长度进行初步扫描，结果如图21所示。

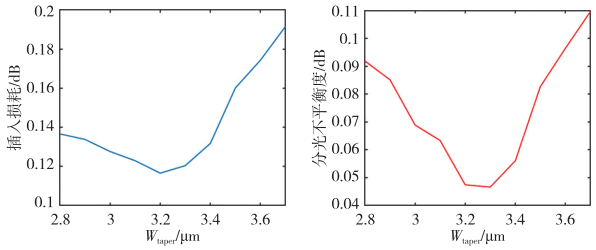


（a）插入损耗 （b）分光不平衡度

图21 多模区长度仿真结果

根据仿真结果，在 L_{MMI}=56 μm 和 L_{MMI}=57.5 μm 之间存在最优损耗，此时不平衡度低于0.17 dB，接近最小值。由于不同输出端口存在相位差异，输出波导之间的耦合会引入串扰，进而影响MMI分束器的分光均匀性。为了减少这一影响，针对锥形波导的宽

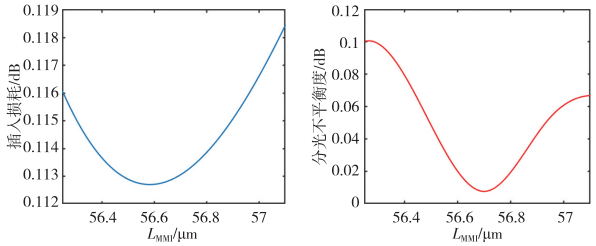
边进行了优化，如图 22 所示，选择的扫描范围为 2.8～3.7 μm。当中间锥形波导宽边的宽度 W_{taper}=3.2 μm 时，分光不平衡度为 0.045 dB，损耗为 0.09 dB，基本实现了光的均匀输出。容差大于 0.2 μm，保证了整个芯片的输出稳定性。



（a）插入损耗　　（b）分光不平衡度

图 22　多模区宽度仿真结果

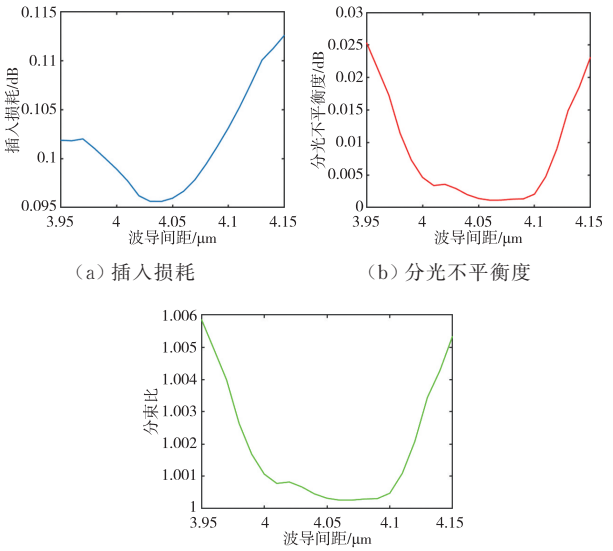
针对 L_{MMI} 进行精细仿真，扫描区间为 56.25～57.1 μm，结果如图 23 所示。可以看出，在此范围内具有较低的损耗和低于 0.1 dB 的分光不平衡度，最终选择 L_{MMI}=56.76 μm，此时 MMI 分束器插入损耗为 0.113 dB，分光不平衡度为 0.012 dB。



（a）插入损耗　　（b）分光不平衡度

图 23　多模区长度仿真结果

针对输出波导的间距进行优化，结果如图 24 所示。除了避免输出波导间的串扰，在实际的光刻和刻蚀工艺中，波导的宽度和边缘位置总会存在微小的偏差。过于紧凑的波导间距对这些工艺偏差会极其敏感，微小的加工错误就可能导致波导边缘接触或串扰急剧恶化。因此，通过选择一个相对宽裕且性能稳定的间距，可以显著提高设计的鲁棒性，确保芯片在面临正常工艺波动时依然能保持高性能，从而提升流片的成功率和良品率。为此，针对输出波导的间距进行了一系列参数扫描仿真，扫描范围为 3.95～4.15 μm，步长为 0.01 μm。可以看出，MMI 耦合器在 4.02～4.11 μm 范围内具有较好的分光性能和较低的损耗，综合考量后选取 4.05 μm 作为输出波导的间距。



（a）插入损耗　　（b）分光不平衡度

（c）分束比

图 24　波导间距仿真结果

对锥形波导的长度进行优化，扫描范围为 6～8 μm，结果如图 25 所示。综合考虑分光情况后选择长度为 7 μm，此时 MMI 分束器最终的损耗为 0.096 dB，分光不平衡度为 0.001 4 dB，分光比为 1.000 32，实现了紧凑结构下高效的分束效果。

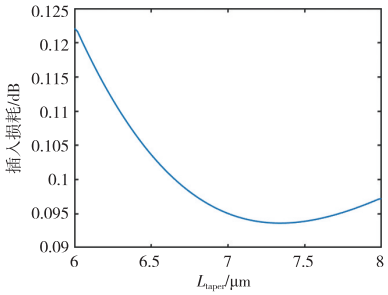


图 25　锥形波导长度仿真结果

基于上述仿真，完成了 MMI 分束器的设计，电场传输图如图 26 所示。

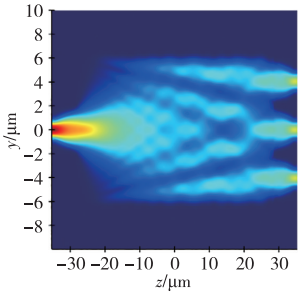


图 26　MMI 仿真电场俯视图

1.3.2　光引擎输出端设计

在光引擎输出端，选用了 1×2 MMI 分束器，相比于 Y 分支，该设计具有体积小的优点，并结合 90°

弯曲波导，有助于实现更加紧凑的芯片布局。90°弯曲波导是避免波导交叉，优化光路布局和小型化的关键结构。当光波在弯曲路径中传播时，其模式场会向弯曲外侧偏移。若弯曲半径过小，部分倏逝场会偏离波导芯层，以辐射的形式泄露到包层中，形成显著的弯曲损耗。因此，为了实现小体积和低损耗的平衡，对波导的弯曲半径进行了仿真优化。综合考虑光路布局和实际制造情况后，选取波导弯曲半径为50 μm，此时弯曲损耗为0.008 3 dB，考虑模式失配后总损耗约为0.678 dB。芯片的整体布局如图27所示。

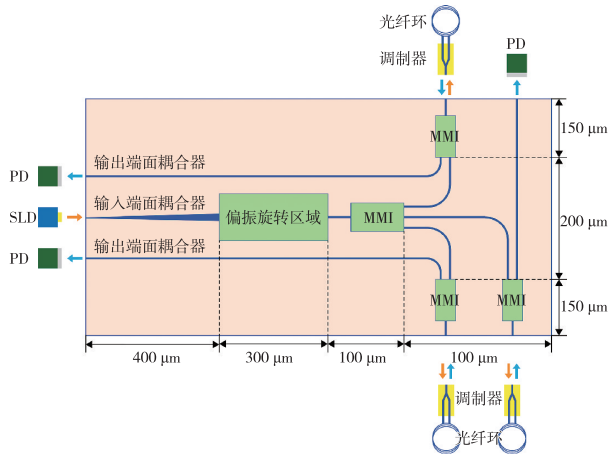


图27 光引擎输出端布局

2 工艺设计与误差分析

2.1 工艺设计

氮化硅光引擎芯片的加工工艺采用了单次沉积与分层刻蚀的策略，以控制工艺复杂度。具体工艺流程如下：

首先，通过热氧化工艺在硅衬底上生成一层二氧化硅，作为埋氧层（BOX层）。随后，采用低压化学气相沉积（LPCVD）技术，在700℃～800℃的温度范围内沉积500 nm厚的氮化硅薄膜，以获得致密、高应力、低光学损耗且厚度均匀的薄膜。在沉积完成后，进行退火处理，以进一步提高薄膜的应力。接下来，在薄膜表面旋涂光刻胶，并通过深紫外光刻（DUV）工艺或电子束光刻（EBL）工艺将结构转移到光刻胶上。随后，采用反应离子刻蚀（RIE）工艺，结合氟基气体并采用间歇性刻蚀方式，实现高精度的图形转移，形成上层氮化硅波导结构。刻蚀完成后，使用氧等离子体去除残留的光刻胶。在此基础上，重复涂胶、光刻、刻蚀及去胶步骤，完成第二层氮化硅波导的图形化制备。最后，采用以正硅酸乙酯（TEOS）为反应源的LPCVD技术，在700℃～800℃下沉积约2 μm厚的二氧化硅上包层。相较于PECVD工艺，TEOS-LPCVD所沉积的二氧化硅层更为致密，且在氮化硅表面具有更快的沉积速率，从而有效将光场限制在波导结构内部。设计的工艺流程图如图28所示。

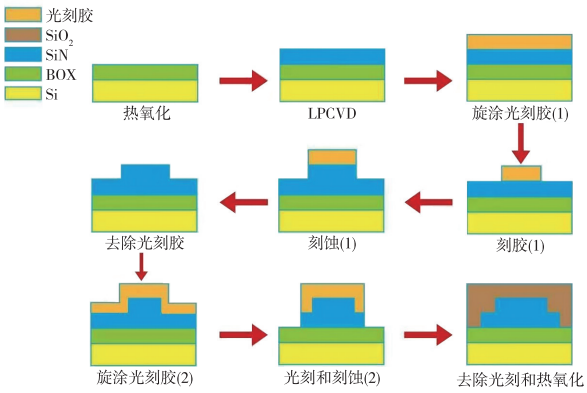


图28 光引擎芯片工艺流程图

2.2 工艺误差分析

氮化硅光引擎芯片的实际性能受到光刻、刻蚀及薄膜沉积等工艺误差的综合影响。采用DUV步进光刻或电子束光刻（EBL）配合RIE刻蚀实现双层SiN波导结构制备，其典型工艺误差可分为光刻精度误差、刻蚀深度误差与层间对准误差。对于光刻精度误差，若使用DUV步进光刻，在200 nm线宽下的CD控制精度通常优于±20 nm；若使用EBL，在小面积内线宽控制精度可达到±10 nm。考虑到大面积流片的一致性及后续刻蚀带来的尺寸偏移，在误差分析中对波导宽度等横向尺寸施加±20 nm的扰动，用于表征光刻与刻蚀联合引起的线宽偏差。对于刻蚀深度，LPCVD沉积的SiN薄膜晶圆片内厚度偏差通常可控制在±2%左右，对于500 nm的膜厚偏差值为±10 nm；RIE刻蚀的误差在工艺优化后可控制在±10 nm以内，因此在仿真中对SiN有效厚度施加±20 nm扰动，用以表征沉积与刻蚀工艺联合引起的厚度偏差。对于层间对准误差，双层SiN波导结构需经历两次光刻及刻蚀，对准误差主要表现在上下层波导的横向偏移。对于典型DUV步进对准系统，叠加精度可控制在±30 nm以内。基于此，本文在误差分析中对双层结构的上下层波导相对位置施加±30 nm的横向偏移扰动。

在上述工艺精度基础上，对所设计光引擎芯片中的关键结构分别施加参数扰动以进行性能评估。

2.2.1　端面耦合器误差分析

所设计端面耦合器采用单层锥形结构，对其厚度与尖端宽度施加±20 nm 扰动，分析工艺误差对插入损耗带来的影响。图 29 显示了端面耦合器插入损耗随其宽度和厚度变化的关系曲线。由图可知，由厚度偏移引入的损耗小于 0.1 dB，可忽略不计；宽度偏移对输出端损耗影响小于 0.1 dB，对输入端损耗影响小于 0.15 dB。这些结果表明，所设计的端面耦合器具有较好的工艺容差。

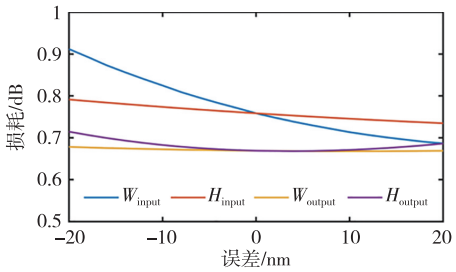


图 29　端面耦合器误差分析

2.2.2　偏振旋转区域误差分析

所设计的偏振旋转区域由三部分组成，以下将分别分析偏振分束器、偏振旋转器及绝热合束器的工艺容差。

偏振分束器采用非对称定向耦合器结构，图 30 展示了在±20 nm 的宽度与厚度误差下，偏振分束效率的变化。宽度误差引起的变化小于 2%，厚度误差引起的变化小于 4%。基于模式耦合原理的器件一般对加工误差较为敏感，然而由于选取了较大的波导间隔（0.6 μm），倏逝场交叠较小，整体结构仍具有较好的工艺容差。

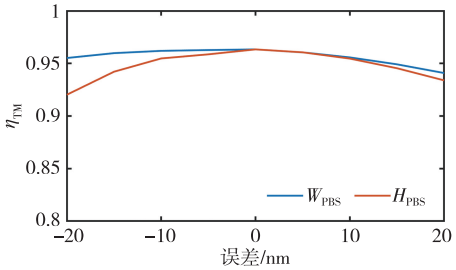


图 30　偏振分束器误差分析

偏振旋转器采用切角结构，图 31 展示了在±20 nm 的宽度与厚度误差下，偏振转化效率的变化。由图可知，偏振旋转器对工艺误差较为敏感，当宽度与厚度变化－20 nm 时，偏振旋转效率由 97.17% 降为 83.78% 与 76.13%。由于偏振旋转器的尺寸较小，微小的误差即导致混合模式的对称性被破坏，偏振旋转角大幅偏离 45°，从而导致偏振旋转效率下降。此外，相较于正向误差，负向误差对于偏振转化效率的影响更为明显。因此，在实际加工过程中，应适当增加线宽，以避免负向误差对偏振旋转器的影响。

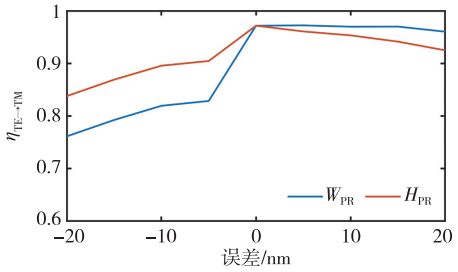


图 31　偏振旋转器误差分析

绝热合束器采用三锥型结构，图 32 展示了在±20 nm 的宽度与厚度误差下传输效率的变化。由图可知，在±20 nm 的误差下，器件传输效率几乎无变化。由于绝热型器件基于模式绝热演化，而对器件微小结构变化不敏感，因此可以实现极宽的带宽与极高的工艺容差。

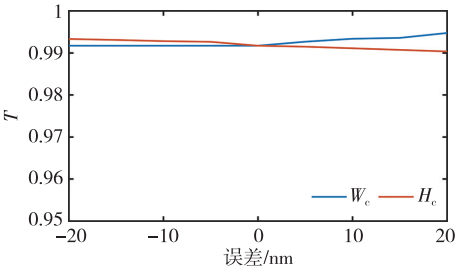


图 32　绝热合束器误差分析

2.2.3　分束区域误差分析

所设计的端面耦合器采用单层锥形结构，对其厚度与尖端宽度施加±20 nm 扰动，分析工艺误差对插入损耗带来的影响。图 33 显示了 1×3 MMI 的插入损耗随其宽度和厚度变化的关系曲线。可以看出，MMI 多模区宽度误差引起插入损耗变化较小，厚度误差对插入损耗变化有一定影响，但最大变化小于 0.03 dB，所设计的 MMI 分束器具有较好的工艺容差。

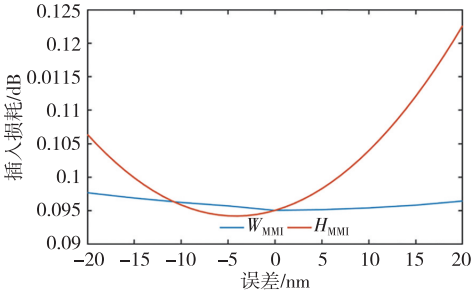


图 33　1×3 MMI 误差分析

2.3 工艺可行性分析

结合前述工艺流程与误差分析，所设计的双层SiN光引擎芯片在现有光子集成平台上具有良好的可制造性。LPCVD SiN的膜厚均匀性通常优于±2%，RIE刻蚀深度控制在±10 nm范围内，DUV光刻的线宽误差约为±20 nm。仿真结果显示，在该级别的加工扰动下，端面耦合器、偏振分束器与MMI分束器等关键结构的性能参数变化均较小，器件具有较宽的工艺容差。

此外，偏振旋转器的切角结构对宽度和厚度误差较为敏感，负向偏差将显著降低偏振旋转效率。在实际工艺中，需控制光刻精细度，并可适当增大设计线宽以提升制程裕量。

整体而言，芯片结构设计考虑常规工艺能力，大部分器件在工艺误差范围内仍能保持较高性能，具备较高的流片可行性，为后续实验验证奠定基础。

3 光引擎芯片性能分析

3.1 芯片性能分析

所设计的光引擎芯片，输入端面耦合器长度为400 μm，输出端面耦合器长度为100 μm，单端损耗小于0.8 dB；偏振旋转区域尺寸为300×100 μm^2，偏振转化效率高于97%，插入损耗小于1.3 dB，偏振消光比高于19 dB；分束区域尺寸为200×500 μm^2，插入损耗小于1.5 dB，分光不平衡度小于0.002 dB。芯片整体尺寸为0.5×0.8 mm^2，插入损耗为4.5 dB，偏振消光比大于19 dB。表1列举了已报道的无源光引擎芯片性能参数，与已报道的光引擎芯片相比，所设计的氮化硅光引擎芯片具有小尺寸、低损耗的优势，并且具有较高的偏振消光比。

表1 无源光引擎芯片性能对比

材料平台	尺寸/mm^2	插入损耗/dB	偏振消光比/dB	来源
SiN	2×2	8.2	28	[23]
Ge:SiO$_2$	20×50	6.5	—	[11]
SOI	1×5	12.5	18.5	[24]
SiN	0.5×0.8	4.5	19	本文

3.2 系统性能分析

从系统角度来看，光引擎芯片总插入损耗对应光电探测端信号功率的指数衰减，对散粒噪声主导的测量灵敏度具有直接影响。对于干涉式陀螺，由散粒噪声限制的最小角速度灵敏度$\Omega_{\min}$为[25]：

$$\Omega_{\min}=\frac{\lambda c}{4\pi RL}\left(\frac{1+J_0}{J_1}\right)\left(\frac{e}{\langle I\rangle}+\frac{\lambda^2}{2c\Delta\lambda}\right)^{1/2}\sqrt{B} \quad (10)$$

式中，R与L为光纤环半径与环长，J_0=0.34与J_1=0.58为贝塞尔系数，$\langle I\rangle$为探测器平均电流，B为探测器带宽。由公式可知，对于宽谱干涉式陀螺，灵敏度为R_{PD}的探测器最小可探测角速度$\Omega_{\min}\propto\sqrt{1/R_{PD}}$。另外，由散粒噪声导致的角度随机游走与光功率关系为$ARW\propto 1/\sqrt{P}$。所设计的芯片将传统器件链路约−8 dB至−10 dB的损耗降低至约−5 dB，预计$\Omega_{\min}$与ARW可降低约20%～40%。同时，光功率裕量提升使系统无需提高光源功率，从而减少热效应引起的偏置漂移，有利于提高长期稳定性。因此，所设计的低损耗芯片不仅体现为器件性能优化，也将为光纤陀螺的系统噪声性能和偏置稳定性带来实际提升。

4 结论

针对光纤陀螺小型化过程中集成光引擎芯片插入损耗较大，提出一种基于低损耗氮化硅平台的新型三轴光子集成陀螺光引擎芯片架构。通过在芯片中引入片上偏振旋转结构，实现波导中非工作偏振模式向主工作模式的高效转换，避免了传统起偏器方案中固有的−3 dB偏振损耗。同时，结合双层锥形端面耦合器、MMI分束器以及绝热合束器的优化设计，实现了光场在不同功能区之间的低损耗传输与高效率耦合。

仿真结果表明，所设计的端面耦合器输入端长度为100 μm，输出端长度为400 μm。在实现光纤与波导模斑匹配的同时，耦合损耗控制在1 dB以内，具有优良的端面耦合效率。偏振旋转区域长度为300 μm，能够实现高于90%的偏振转化效率与19 dB的偏振消光比，总插入损耗低于1 dB。1×3 MMI分束器在56.76 μm的长度下实现了分光比误差小于0.02 dB、插入损耗低于0.1 dB的优异性能。芯片整体尺寸约为0.5 mm×0.9 mm，插入损耗低于−5 dB，具有紧凑的结构尺寸与低损耗的特性。

此外，设计了双层SiN波导制程方案，采用LPCVD－RIE－TEOS-LPCVD多步工艺，能够保证波导边界的高精度控制与低表面粗糙度，从而进一步降低光学传播损耗。

研究结果主要基于仿真，后续工作需通过流片和实验进一步验证。在器件制备方面，需重点控制双层SiN波导的膜厚、刻蚀深度及对准精度，以保证偏振旋转器与MMI的实际性能。器件级表征将重点测试端面耦合损耗、偏振消光比与分束均匀性，以

评估加工误差带来的偏差。在系统层面，将构建三轴光引擎原型，测试插入损耗、偏置稳定性与角度随机游走，关注光纤封装与三通道一致性等挑战。

综合而言，所提出的氮化硅三轴光引擎芯片在偏振损耗抑制、光纤-波导耦合效率及整体插入损耗等方面均表现出显著优势，为集成化、低功耗、高稳定度的光纤陀螺系统提供了一种可行且高性能的解决方案。未来将进一步探索低损耗波导环方案，并与集成光学调制器与光源、探测器等有源结构的混合集成，实现全片集成三轴光纤陀螺。

参考文献：

[1] Dell'Olio F, Natale T, Wang Y C, et al. Miniaturization of interferometric optical gyroscopes: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(24): 29948-29968.

[2] Guo Z, Cheng F, Li B, et al. Research development of silicon MEMS gyroscopes: a review[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(10): 2053-2066.

[3] Zhao S, Liu Q, Liu Y, et al. Navigation-grade resonant fiber-optic gyroscope using ultra-simple white-light multibeam interferometry[J]. Photonics Research, 2022, 10(2): 542.

[4] Pavlath G A. Recent improvements in fiber optic gyros at Northrop Grumman Corporation[J]. Proc. of SPIE, 2020, 11405: 1140506.

[5] Sagnac G. On the proof of the reality of the luminiferous aether by the experiment with a rotating interferometer[J]. Comptes Rendus Chimie, 1913, 157: 1410-1413.

[6] Arianfard H, Juodkazis S, Moss D J, et al. Sagnac interference in integrated photonics [J]. Applied Physics Reviews, 2023, 10: 011309.

[7] Shang K, Lei M, Li H, et al. Tactical-grade three-axis interferometric fiber-optic gyroscope with a silica integrated optical chip[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(7): 10957-10963.

[8] Jin J, He J, Song N, et al. A compact four-axis interferometric fiber optic gyroscope based on multiplexing for space application[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(23): 6655-6663.

[9] Jin J, Xu H, Ma D, et al. A novel interferometric fiber optic gyroscope with random walk fault diagnosis for space application [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(7): 958-963.

[10] Ma K, Song N, Jin J, et al. Configuration optimization in miniature interferometric fiber-optic gyroscopes for space application[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(13): 7107-7117.

[11] Guo Z, Jin J, Wang X, et al. Three-axis interferometric fiber optic gyroscope with silica integrated coupler chip[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(9): 9323-9332.

[12] 李　昊. 低损耗模斑转换器设计[D]. 杭州：浙江大学，2022.
Li Hao. Design of low loss mode spot converter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

[13] Zhang J, Shi X, Zhang Z, et al. Polarization-insensitive ultra-short waveguide taper[J]. Optics Letters, 2021, 46(19): 5027-5030.

[14] Feng J, Akimoto R. Silicon nitride polarizing beam splitter with potential application for intersubband-transition-based all-optical gate device[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(4S): 04DG08.

[15] Xuan Y, Liu Y, Varghese L T, et al. High-Q silicon nitride microresonators exhibiting low-power frequency comb initiation[J]. Optica, 2016, 3(11): 1171.

[16] Zhan J, Brock J, Veilleux S, et al. Silicon nitride polarization beam splitter based on polarization-independent MMIs and apodized Bragg gratings[J]. Optics Express, 2021, 29(10): 14476-14485.

[17] Feng J, Akimoto R. A three-dimensional silicon nitride polarizing beam splitter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(7): 706-709.

[18] 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.

[19] Guerber S, Alonso-Ramos C, Benedikovic D, et al. Broadband polarization beam splitter on a silicon nitride platform for O-band operation [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(19): 1679-1682.

[20] Zheng X, Zhao C, Ma Y, 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.

[21] Deng H, Yevick D O, Brooks C, et al. Design rules for slanted-angle polarization rotators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(1): 432.

[22] Wang Y, Gao S, Wang K, et al. Ultra-broadband and low-loss 3 dB optical power splitter based on adiabatic tapered silicon waveguides[J]. Optics Letters, 2016, 41(9): 2053-2056.

[23] Sun D, Jiao H, Li H, et al. Interferometric fiber optic gyro based on high-performance passive Si_3N_4 chip[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(10): 4740-4747.

[24] Sun D, Li H, Wang L, et al. Silicon-based multi-channel integrated detection chip for a three-axis interferometric fiber optic gyro [J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(8): 3837-3845.

[25] Burns W K, Moeller R P, Dandridge A. Excess noise in fiber gyroscope sources[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1990, 2(8): 606-608.

作者简介：

魏千怀(2001—)，男，硕士研究生，主要研究方向：光子集成；

冯立辉(1976—)，男，博士，教授，研究方向：光子集成、惯性传感、定位导航、人工智能。