光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024022001

光纤陀螺用集成光收发模块耦合移位对耦合损耗和平均波长的影响研究

张江远[1,2]，于海成[2*]，柳建春[2]，冯文帅[2]

（1. 北京航天控制仪器研究所，北京 100039；2. 北京航天时代光电科技有限公司，北京 100094）

摘　要： 集成光收发模块作为集成化光纤陀螺的关键器件之一，能够实现光源、探测器和耦合器等功能，其光路的耦合移位会显著影响光路耦合效率和平均波长，从而影响陀螺的零偏和标度因数等性能。文章对空间光路进行理论建模，使用重叠积分法计算耦合效率；使用 Beamprop 方法进行仿真分析，得到不同耦合位移下的耦合损耗以及平均波长漂移；最后通过对比实验对理论和仿真情况进行了验证。结果表明，耦合损耗受 y 轴方向耦合移位的影响最大，平均波长漂移受 z 轴方向耦合移位的影响最大，并给出了不同耦合损耗下的平均波长漂移，为集成光收发模块的光路耦合及优化工作提供参考。

关键词： 光纤陀螺；集成光收发模块；耦合损耗；平均波长漂移

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2024)04－0585－08

Examining the Influence of Coupling Displacement on Coupling Loss and Mean Wavelength in Integrated Optical Transceiver Modules for Fiber Optic Gyroscopes

ZHANG Jiangyuan[1,2], YU Haicheng[2], LIU Jianchun[2], FENG Wenshuai[2]

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, CHN;
2. Beijing Aerospace Times Optoelectronics Technology Co. Ltd., Beijing 100094, CHN)

Abstract: Integrated fiber-optic gyroscopes have considerable application prospects in miniature weapon systems and commercial domains. The integrated optical transceiver module, which is a key component of the integrated fiber-optic gyroscope, incorporates the functionalities of the light source, detector, and coupler. The coupling shift in the optical path can significantly affect the optical coupling efficiency and average wavelength, which in turn affect the zero bias and scale factor of the fiberoptic gyroscope. In this study, theoretical modeling of the spatial optical path is conducted, and the overlap integral method is used to calculate the coupling efficiency. The BeamProp method is utilized for simulation analysis to determine the coupling loss and average wavelength drift under various coupling displacements. Comparative experiments are conducted to verify the theoretical and simulation results. The findings indicate that the coupling shift in the y-direction has the most significant effect on the coupling loss, whereas the z-direction shift has the most substantial influence on the average wavelength drift. Data for the average wavelength drift at different coupling losses are provided, offering guidance for the coupling and optimization of the optical path of the integrated optical transceiver module.

Key words: fiber optic gyroscopes; integrated optical transceiver modules; coupling loss;

收稿日期：2024－02－20.

基金项目： 国家重点研发计划项目(2023YFF0615701).

* **通信作者：**于海成

mean wavelength shift

0 引言

光纤陀螺是测量角运动引起的 Sagnac 相位差获得输入角速度的全固态惯性仪表[1]，主要应用于导航级、战术级场景。由于微小型战术武器与商业领域等需求牵引和技术推动，光纤陀螺逐步向集成化发展，以满足小型化、低功耗和低成本的应用场景[2]。集成化光纤陀螺通过集成光电子技术和工艺将传统光纤陀螺的分立光学器件（光源、耦合器、光电探测器、光电相位调制器等）逐步集成在同一模块内，甚至同一芯片上[3]，其在微小型武器装备与商用领域具有广阔的应用前景。

自 21 世纪以来，美国 Gener8 公司[4]、英国 Bookham 公司[5]、美国加州大学[6]、美国 KVH 公司[7]等研究机构分别报道了在集成化光纤陀螺的设计和制造方面的研究成果。受到不同半导体材料之间集成工艺的限制，目前有源器件和无源器件难以集成在同一芯片上，因此单片集成尚无实际系统应用，国内各单位的集成方案以混合集成方案为主。2022 年，北京自动化控制设备研究所[8]提出了“三合一”（光源＋耦合器＋探测器）和“四合一”（光源＋耦合器＋探测器＋调制器）集成方案，并基于“三合一”方案实现了 0.1°/h 的陀螺精度。2023 年，西安飞行自动控制研究所[9]实现了基于氮化硅的无源集成技术，实现了 0.2°/h 的陀螺精度。2023 年，北京航空航天大学[2]基于氮化硅无源集成技术实现了 0.03°/h 的陀螺精度。同年，北京航天时代光电科技有限公司基于“三合一”方案实现了 0.025°/h（1σ）的陀螺精度。

“三合一”方案是将超辐射发光二极管（SLD）、硅基波导耦合器和正-本征-负（PIN）光电探测器集成在同一模块内，组成了集成光收发模块。区别于常规分立器件间的光纤熔接方式，集成光收发模块通过双透镜耦合的方式，可实现更小的体积和更高的光路耦合效率。在光路耦合过程中，耦合结构内部的应力在一定的温度、力学条件下释放，导致耦合结构的空间错位，产生耦合移位，使空间光路在硅基波导入光端口处的耦合效率降低，从而导致器件输出光的功率下降。同时由于不同波长的光的耦合效率降低的程度不同，导致平均波长发生漂移，进而影响陀螺标度因数等性能指标。本文主要研究集成光收发模块的光路耦合移位对光路耦合效率和平均波长的影响，为集成光收发模块的光路耦合和优化等工作提供参考。

1 理论分析

集成光收发模块的光路结构如图 1 所示。SLD 光源发出的光经过透镜组耦合进入硅基波导，硅基波导通过光纤输出光给陀螺后续光路（Y 波导、光纤环等），干涉信号通过硅基波导引入探测器，由探测器将光信号转化为电信号进行后续处理。

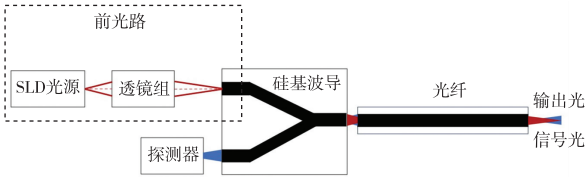


图 1 集成光收发模块光路结构示意图

集成光收发模块的前光路指由 SLD 光源、透镜组和硅基波导入光端口组成的光路，结构如图 2 所示。SLD 光源发出的光束经透镜组 L_1 准直、L_2 会聚，最终在硅基波导入光端口耦合进入后续光路。

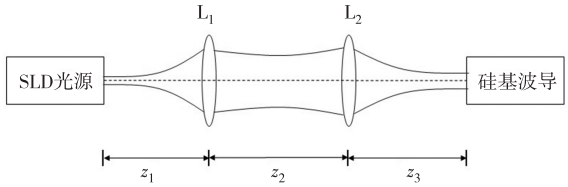


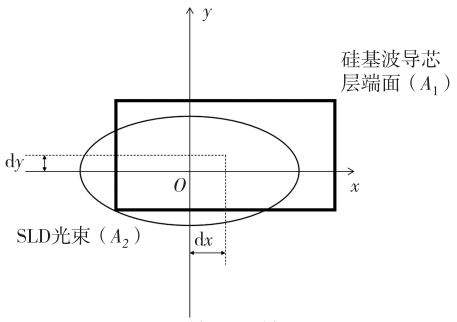
图 2 集成光收发模块前光路示意图

由耦合效率的定义得到光束与硅基波导的耦合效率 η 为[10]：

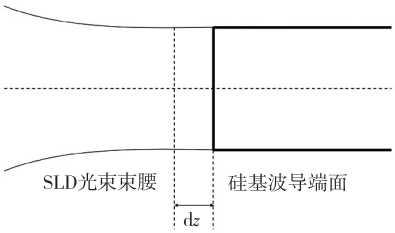
$$\eta=\frac{\left|\iint_{A}\boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}^{*}\,\mathrm{d}A\right|^{2}}{\left|\iint_{A_1}\boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}^{*}\,\mathrm{d}A_1\right|\cdot\left|\iint_{A_2}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}^{*}\,\mathrm{d}A_2\right|} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}$ 为硅波导端面的模场分布，$\boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}^{*}$ 为 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{G}}$ 的复共轭，$\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}$ 为 SLD 光束在耦合面的场分布，$\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}^{*}$ 为 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}$ 的复共轭，A_1 为硅波导模场在耦合面的分布区域，A_2 为 SLD 光束在耦合面的分布区域，A 为两区域的重叠部分。光路耦合的精确对准在温度、应力等环境因素的影响下产生误差，耦合移位如图 3 所示。图 3(a)中 $\mathrm{d}x$，$\mathrm{d}y$ 分别表示 SLD 光束轴线与硅基波导芯层轴线在光斑长轴、短轴方向上的距离，图 3(b)中 $\mathrm{d}z$ 表示 SLD 光束束腰平面与硅基波导端面

之间的距离。



（a）x 轴和 y 轴方向



（b）z 轴方向

图 3 耦合移位示意图

在波导耦合过程中，透镜像差和厚度的影响通常较小，因此在不考虑此类影响的情况下，采用矩阵 ABCD 方法[11]对 SLD 光束进行分析，即使用传输矩阵 $\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}A & B\\ C & D\end{bmatrix}$ 描述光路的传输过程。对图 2 光路结构和参数进行分析，得到：

$$A=1-\frac{z_3-z_2\left(\frac{z_3}{f_2}-1\right)}{f_1}-\frac{z_3}{f_2} \tag{2}$$

$$B=z_3-z_1\left(\frac{z_3}{f_2}+\frac{z_3-z_2\left(\frac{z_3}{f_2}-1\right)}{f_1}-1\right)-z_2\left(\frac{z_3}{f_2}-1\right) \tag{3}$$

式中，z_1，z_2，z_3 分别为光源出光面到透镜 L_1 的距离、透镜 L_1 到透镜 L_2 的距离、透镜 L_2 到硅基波导耦合面的距离，f_1，f_2 分别为透镜 L_1，L_2 的焦距。根据高斯光束的性质，经系统传输后，光束的变换关系为[11]：

$$\omega_M^2=A^2\omega_0^2+B^2\theta_0^2 \tag{4}$$

式中，ω_0 和 ω_M 分别为高斯光束经过透镜系统前后的束腰半径，θ_0 为高斯光束经过透镜系统前的远场发散角。在 SLD 芯片中，有源层厚度和条宽存在差异，导致光束在水平和垂直方向上的发散角不同，因此光束在远场呈椭圆状。本文使用的 SLD 光束长短轴之比约为 2∶1。为保证 SLD 光束在耦合面的模场与硅基波导基模的模场匹配，取 f_1 和 f_2 分别为 0.6 和 2.0 mm。对光束在长、短轴方向分别使用公式(2)～(4)可以得到 SLD 光束在耦合面的光场分布，如图 4 所示。

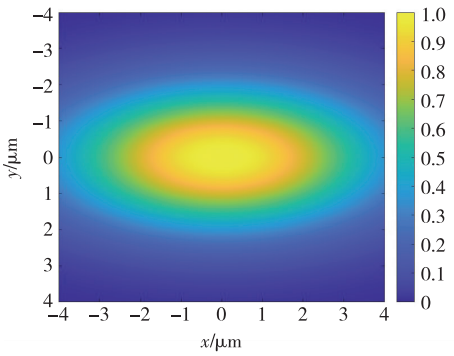


图 4 SLD 光束场分布

得到 SLD 光束在耦合端面上的场分布 U_S 后，根据公式(1)，还需波导端面的模场分布 U_G 才能计算耦合效率。为了计算波导的模场，首先将矩形硅基波导的折射率分布描述为：

$$n(x,y)=\begin{cases}n_1, & |x|<a \text{ 且 } |y|<b\\ n_2, & |x|>a \text{ 或 } |y|>b\end{cases} \tag{5}$$

式中，a，b 分别为硅基波导芯层的宽度和高度，n_1，n_2 分别为波导芯层和包层的折射率。本文使用的波导相关系数为 $a=4$ μm，$b=2$ μm，$n_1\approx1.475$，$n_2\approx1.445$。

决定二维场分布 $\psi(x,y)$ 的波动方程可以表示为[12]：

$$\frac{\partial^2\psi(x,y)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi(x,y)}{\partial y^2}+[k_0^2n^2(x,y)-\beta^2]\cdot\psi(x,y)=0 \tag{6}$$

结合公式(5)和(6)可以得到硅基波导芯层的基模场分布，如图 5 所示。其表达式为：

$$U_G=\psi(x,y)=\cos(0.335\,5x)\cos(0.575\,6y) \tag{7}$$

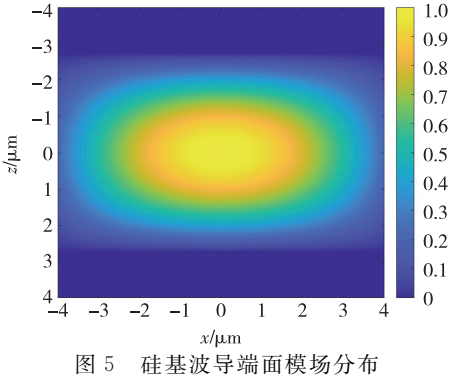


图 5 硅基波导端面模场分布

通过上述分析计算，分别得到 SLD 光束和硅基

波导在耦合端面的场分布后，结合公式(1)可以计算出不同耦合移位条件下，单一波长 λ_i 对应的耦合效率 η_i，据此可计算出光束的平均波长 $\bar{\lambda}$，即：

$$\bar{\lambda}=\frac{\sum_i \lambda_i \cdot P_i \cdot \eta_i}{\sum_i P_i \cdot \eta_i} \tag{8}$$

式中，P_i 为不同波长 λ_i 对应的能量。

光束总能量的耦合效率 η_a 表示为：

$$\eta_a=\frac{\sum_i P_i \cdot \eta_i}{\sum_i P_i} \tag{9}$$

根据公式(1)，耦合效率由两个模式的重叠积分决定。由于耦合移位的存在，使得积分的重叠区域不同，从而引起耦合效率 η 的变化。对于 SLD 光束，不同波长 λ_i 的耦合效率 η_i 不同，从而导致平均波长 $\bar{\lambda}$ 在耦合移位过程中变化，进一步影响输出功率以及平均波长。

2 仿真分析

为了更加准确地研究耦合移位导致的耦合效率和平均波长变化，仿真计算选择 BeamPROP 方法[13-14]，根据理论计算的结果，采用矩形直波导模拟硅基波导的耦合端，椭圆高斯光场模拟耦合面上的 SLD 光束。仿真条件为：x 轴方向计算步长为 0.1 μm，y 轴方向为 0.1 μm，z 轴方向为 1 μm，边界条件为透明边界条件(Simple TBC)，数值计算方法为交替隐式迭代法(ADI)。通过计算波导基模场与 SLD 光场的重叠积分得到耦合效率。图 6 为 x 轴方向耦合移位 $dx=4$ μm 时耦合进硅基波导中的光能量分布。

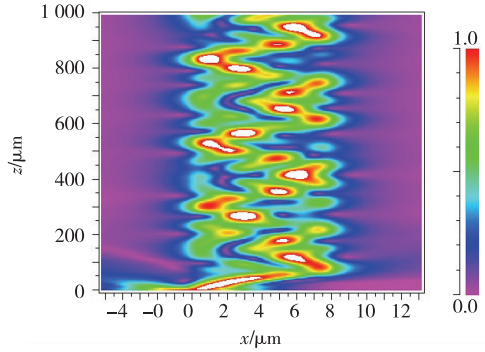


图 6 硅基波导中的光能量分布($dx=4$ μm)

图 7 给出了光束总体耦合效率 η_a 与耦合移位 dx，dy 之间的关系。从图中可看出，耦合移位越大，总体耦合效率越小，即耦合进入硅基波导的光谱总能量越低。同时可看出，在 x 轴和 y 轴方向产生相同的耦合移位($dx=dy$)，dy 对应的总体耦合效率 η_a 更低，这是由于 SLD 光束模场分布和硅基波导基模场分布在 y 轴方向具有更小的模场半径，y 轴方向微小的耦合移位会使光束能量的传输产生较大的损耗。

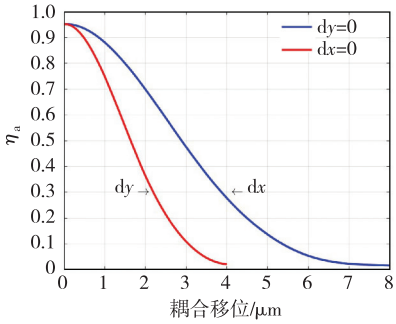


图 7 总体耦合效率与耦合移位的关系($dz=0$ μm)

图 8 给出了光束总体耦合效率 η_a 与耦合移位 dz 之间的关系。可看出，相对于 dx 和 dy，z 轴方向的耦合移位 dz 对总体耦合效率 η_a 的影响较小。根据总体耦合效率 η_a 可以计算出耦合损耗 $\alpha=-10\lg\eta_a$。表 1 给出了不同耦合损耗对应的各方向耦合移位。其中 1 dB 耦合损耗对应的耦合移位被定义为容忍度(Tolerance)[15]，从表中可以看出，z 轴方向的容忍度最大，x 轴方向次之，y 轴方向最小。耦合效率的下降会导致回到探测器的光功率降低，从而使光纤陀螺的性能下降[16]。因此在实际应用中要求耦合损耗不高于 1 dB，即 x，y 和 z 轴方向的耦合移位 dx，dy 和 dz 分别应满足 $dx<1.5$ μm，$dy<0.9$ μm，$dz<12.0$ μm。

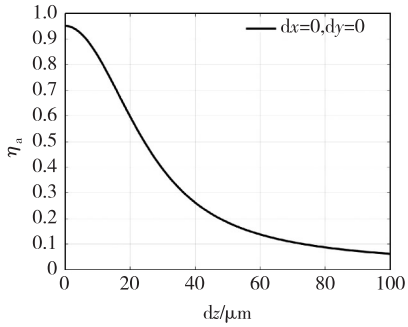


图 8 总体耦合效率与耦合移位的关系($dx=dy=0$ μm)

表 1 不同耦合损耗对应的耦合移位

损耗/dB	dx/μm	dy/μm	dz/μm
1	1.5	0.9	12.0
2	2.3	1.3	18.7
3	2.9	1.6	24.4

图 9 分别给出了耦合损耗为 1 dB(即 $dx=1.5\ \mu m$, $dy=0.9\ \mu m$, $dz=12\ \mu m$)时,耦合效率 η 随波长 λ 变化的图像。可以看出,不同波长对应的耦合效率不同,因此在计算传输光谱的平均波长时,可以观察到平均波长漂移(MWS)的现象。

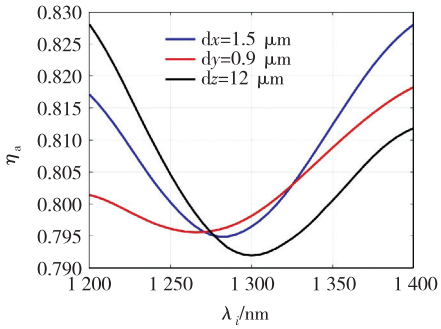


图 9 不同波长的耦合效率

图 10、图 11 和图 12 分别给出传输光谱的 MWS 随 x, y 和 z 轴三个方向耦合移位的变化图像。可以看出,在 x, y 和 z 轴方向,MWS 随着耦合移位变化的趋势是增大的。结合表 2 的数据,可以分析得到,在同样的耦合损耗下,x 轴方向的耦合移位带来的 MWS 大于 y 轴方向的耦合移位带来的 MWS。以耦合损耗 3 dB 为例,此时对应的 $dx=2.9\ \mu m$,相应的 MWS 为 291.23 ppm;此时对应的 $dy=1.6\ \mu m$,相应的 MWS 为 148.19 ppm,仅为 x 轴方向的 50.88%。说明在引起相同耦合损耗的前提下,x 轴方向的耦合移位导致的MWS比 y 轴方向更多。同样在引起 3 dB 耦合损耗的前提下,z 轴方向耦合移位所导致的 MWS 最大,比 x 轴方向的 MWS 大 76.71%。由于平均波长的变化会引起光纤陀螺标度因数的变化[16],在实际应用中应要求 MWS 小于 100 ppm,即 x, y 和 z 轴方向的耦合移位 dx, dy 和 dz 分别应满足 $dx<0.2\ \mu m$, $dy<0.3\ \mu m$, $dz<9.5\ \mu m$。

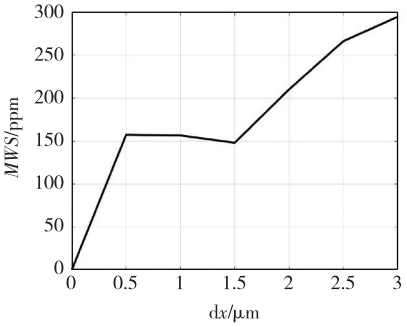


图 10 平均波长随 x 轴方向耦合移位的变化

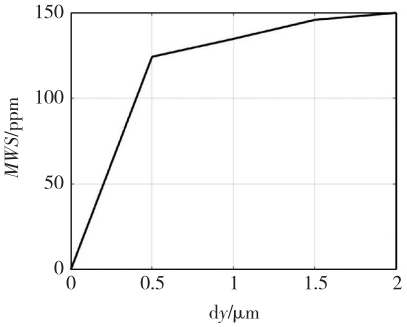


图 11 平均波长随 y 轴方向耦合移位的变化

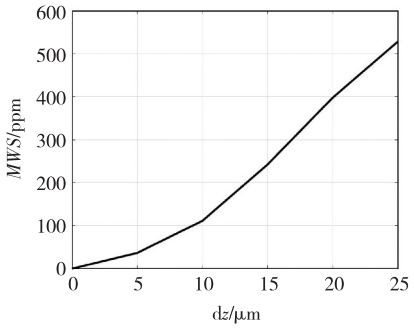


图 12 平均波长随 z 轴方向耦合移位的变化

表 2 不同耦合移位对应的平均波长漂移

耦合移位/μm		MWS/ppm
dx	0.2	100.00
	1.5	148.03
	2.3	247.40
	2.9	291.23
dy	0.3	100.00
	0.9	134.62
	1.3	139.88
	1.6	148.19
dz	9.5	100.00
	12.0	154.98
	18.7	357.98
	24.4	514.62

3 实验验证

为验证理论和仿真分析的结果,本文搭建了耦合对准实验,测量了耦合移位(dx, dy 和 dz)分别对硅基波导输出功率和平均波长的影响,实验系统结构如图 13 所示,实验现场如图 14 所示。实验中使用的光源为 SLD 光源,中心波长为 1 310 nm,谱宽为 40 nm。输入光依次通过透镜组、硅基波导、输出光纤到达功率计和光谱仪。

在实验中,固定 SLD 管芯和硅基波导,通过调节透镜组找到输出功率最大的位置,并将其作为参考点($dx=dy=dz=0$),以 0.5 μm 的间隔在 x, y 轴方向,5 μm 的间隔在 z 轴方向调整透镜 L_2 的位

置，以产生 SLD 光斑与硅基波导入光端面之间的耦合移位。使用光功率计和光谱仪记录不同空间耦合移位下的耦合效率和 MWS。由此得到耦合移位与耦合效率 η_a 和 MWS 的关系。通过上述方法得到实验数据后，计算实验结果和仿真结果之间的 Pearson 相关系数 p，用于验证实验结果和仿真结果的一致性，计算方法如下：

$$p=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{A_i-\mu_A}{\sigma_A}\right)\left(\frac{B_i-\mu_B}{\sigma_B}\right) \tag{10}$$

式中，A，B 分别为实验结果和仿真结果，N 为数组长度，μ_A 和 σ_A 分别为 A 的均值和标准差，μ_B 和 σ_B 分别为 B 的均值和标准差。

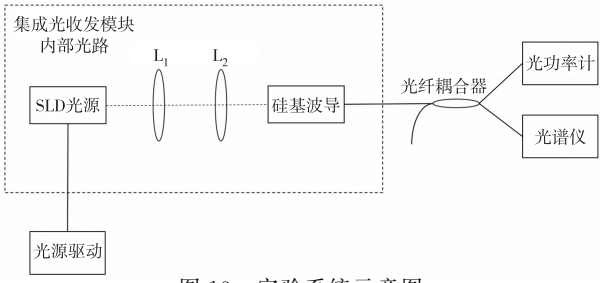


图 13 实验系统示意图

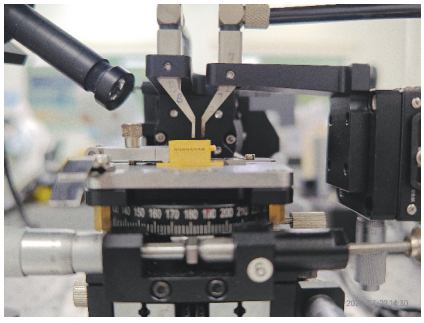


图 14 实验现场图

图 15、图 16 和图 17 分别是 x，y 和 z 轴方向耦合效率 η_a 与耦合移位关系的实验结果及其仿真结果对比。对三组实验结果分别计算其与对应仿真结果的相关系数 p 得到 0.996 4，0.975 0，0.997 1，由此可以得出结论：实验结果与仿真结果的总体趋势是一致的。但从图上看，在 $\eta_a<0.7$ 的范围内存在

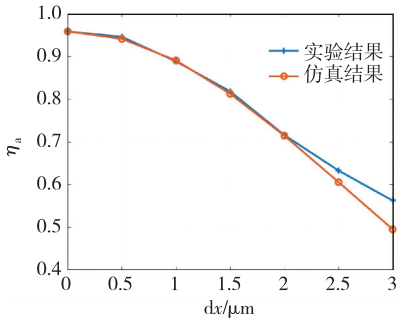


图 15 总体耦合效率与 x 轴方向耦合移位的关系

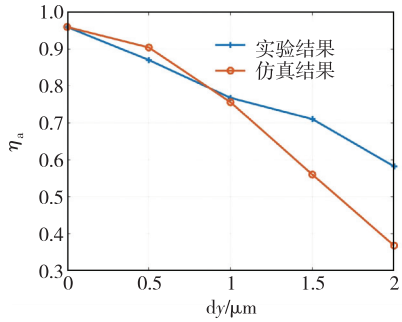


图 16 总体耦合效率与 y 轴方向耦合移位的关系

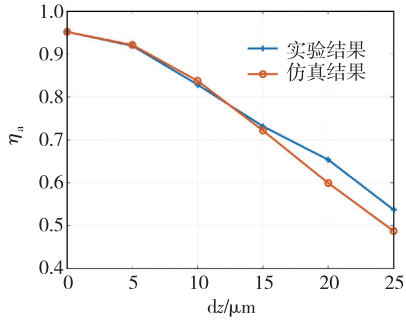


图 17 总体耦合效率与 z 轴方向耦合移位的关系

明显的数值差异，这是因为实际空间光路轴线与理想情况之间存在夹角，导致实际位移偏小，从而使实验测得的耦合效率偏大。

图 18、图 19 和图 20 分别是 x，y 和 z 轴方向平均波长漂移与耦合移位关系的实验结果及其仿真结果对比。计算三组实验结果与对应仿真结果的相关系数 p 得到 0.950 4，0.965 9，0.987 6，由此可以得出结论：实验结果与仿真结果的总体趋势是一致的。

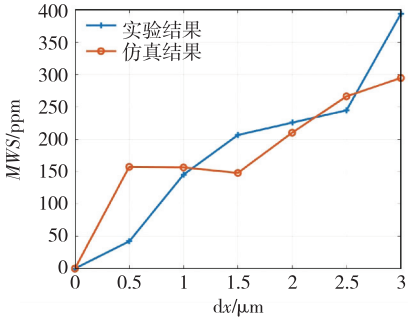


图 18 平均波长漂移与 x 轴方向耦合移位的关系

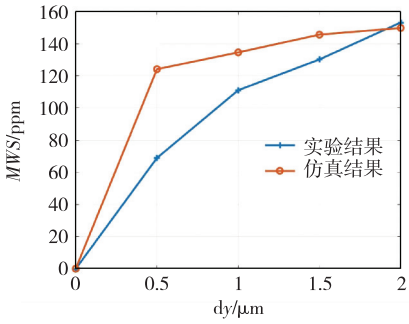


图 19 平均波长漂移与 y 轴方向耦合移位的关系

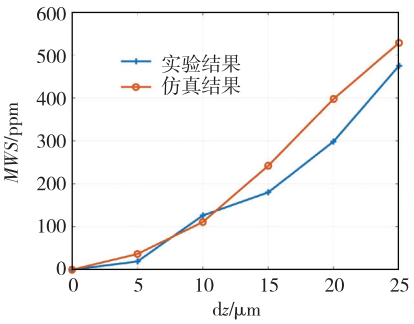


图 20 平均波长漂移与 z 轴方向耦合移位的关系

综上所述，该实验有效验证了理论和仿真分析的正确性。在器件的光路耦合工作中，为保证耦合损耗不大于 1 dB，x，y 和 z 轴方向的耦合移位 dx，dy 和 dz 分别应满足 $dx<1.5\ \mu m$，$dy<0.9\ \mu m$，$dz<12.0\ \mu m$。

4 结论

本文基于光纤陀螺用集成光收发模块的光路结构，使用传输矩阵方法分析了 SLD 光束经过透镜组后的场分布，使用马卡梯里近似方法分析了矩形硅基波导的基模场分布，基于重叠积分的方法分析了硅基波导端面处的耦合效率，并使用 BeamPROP 方法进行耦合移位的仿真分析，最后通过实验验证了理论和仿真分析的正确性。得到结论如下：

(1)集成光收发模块前光路 x，y，z 轴方向的耦合移位 dx，dy，dz 对光束总体耦合效率，即耦合损耗的影响不同，y 轴方向上的耦合移位 dy 对耦合损耗的影响最大，z 轴方向的耦合移位 dz 的影响最小，并给出了在不同耦合损耗要求下对应的耦合移位大小；

(2)集成光收发模块前光路 x，y，z 轴方向的耦合移位 dx，dy，dz 对传输光谱的平均波长影响不同。在相同耦合损耗下，z 轴方向的耦合移位 dz 对平均波长的影响最大，y 轴方向的耦合移位 dy 的影响最小，并给出了在不同耦合移位下对应的平均波长漂移量。

本文的研究工作可为光纤陀螺的的光路损耗与波长漂移提供抑制方法，并为集成光收发模块的耦合工作提供参考。

参考文献：

[1] 王 巍，于海成，冯文帅，等. 高精度光纤陀螺仪技术[M]. 北京：国防工业出版社，2021.
Wang Wei, Yu Haicheng, Feng Wenshuai, et al. High-Precision Fiber Optic Gyroscope Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021.

[2] 焦洪臣，王凌宇，孙道鑫，等. 干涉式集成光学陀螺关键技术及应用前景分析[J]. 中国惯性技术学报，2023，31(8)：743-749.
Jiao Hongchen, Wang Lingyu, Sun Daoxin, et al. Key technologies and application prospect analysis of interferometric of integrated optical gyro[J]. J. of Chinese Inertial Technol., 2023, 31(8): 743-749.

[3] 尚克军，雷 明，李豪伟，等. 集成化光纤陀螺设计、制造及未来发展[J]. 中国惯性技术学报，2021，29(4)：502-509.
Shang Kejun, Lei Ming, Li Haowei, et al. Design, manufacturing and future development of the integrated fiber optic gyroscope[J]. J. of Chinese Inertial Technol., 2021, 29(4): 502-509.

[4] Bischel W K, Kouchnir M A, Bitter M, et al. Hybrid integration of fiber optic gyroscopes operating in harsh environment[J]. Proc. of SPIE, 2011: 81640Q.

[5] Rickman A. The commercialization of silicon photonics[J]. Nat. Photonics, 2014, 8(8): 579-582.

[6] Tran M A, Komljenovic T, Hulme J C, et al. Integrated optical driver for interferometric optical gyroscopes[J]. Opt. Express, 2017, 25(4): 3826-3840.

[7] Wang L, Halstead D R, Monte T D, et al. Low-cost, high-end tactical-grade fiber optic gyroscope based on photonic integrated circuit[C]// IEEE Inter. Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2019: 1-2.

[8] 雷 明，李豪伟，于晓之，等. 集成化光纤陀螺发展现状及趋势[J]. 半导体光电，2022，43(4)：666-671.
Lei Ming, Li Haowei, Yu Xiaozhi, et al. Development status and trend of integrated fiber optic gyroscope[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(4): 666-671.

[9] 毛玉政，何 建，谢良平，等. 硅基光子集成芯片光纤陀螺[J]. 中国惯性技术学报，2023，31(2)：202-206，212.
Mao Yuzheng, He Jian, Xie Liangping, et al. Silicon photonics integrated chip based optical fiber gyroscope[J]. J. of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(2): 202-206, 212.

[10] 王珂珂，丹丽智，沈志强，等. 铌酸锂薄膜器件脊形波导和光纤耦合特性研究[J]. 光学与光电技术，2022，20(5)：70-76.
Wang Keke, Dan Lizhi, Shen Zhiqiang, et al. Coupling characteristics between ridge waveguide and optical fiber of lithium niobate thin film device[J]. Optics & Optoelectronics Technology, 2022, 20(5): 70-76.

[11] 王 诚，宋东璠，冯晓强，等. 基于 matlab 和 zemax 模拟双透镜耦合系统[J]. 激光杂志，2010，31(2)：17-18.
Wang Cheng, Song Dongfan, Feng Xiaoqiang, et al. Simulation of double lens-coupling system using zemax and matlab[J]. Laser J., 2010, 31(2): 17-18.

[12] Yao J, Li K, Li B, et al. Study of wavelength temperature stability of multifunctional integrated optical chips applied on

fiber optic gyroscopes[J]. J. Lightwave Technol., 2018, 36(23): 5528-5535.

[13] 陈敬业. 面向片上复用的硅基光子器件研究[D]. 杭州：浙江大学，2021.
Chen Jingye. Silicon photonic devices for on-chip multiplexing [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[14] 刘 畅. 集成光波导的设计与分析[D]. 西安：西安电子科技大学，2013.
Liu Chang. Design and analysis of integrated optical waveguide [D]. Xi'an: Xidian University, 2013.

[15] 淳 静. 光纤有源器件激光焊接封装的关键技术研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2007.
Chun Jing. Study on the key techniques of fiber active devices packaging with laser welding [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.

[16] 侯军辉，王 巍，杨清生. 光纤陀螺 SLD 光源的驱动控制研究[J]. 中国惯性技术学报，2002，10(3)：50-54.
Hou Junhui, Wang Wei, Yang Qingsheng. Research on driving control of SLD used in FOG [J]. J. of Chinese Inertial Technol., 2002, 10(3): 50-54.

作者简介：

张江远(1999—)，男，硕士研究生，主要研究方向为集成化光纤陀螺；

于海成(1975—)，男，研究员，硕士生导师，主要研究方向为光纤陀螺及其工程化技术。