

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.06.002

基于 LNOI 的集成化光纤陀螺用功率分束器研究

李豪伟, 雷明, 张天其, 于晓之, 张丽哲, 冯喆

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要:设计了一种基于绝缘体上铌酸锂(LNOI)的片上多模干涉(MMI)波导功率分束器,在 $5\mu\text{m}\times 45\mu\text{m}$ 的小尺上实现了 1×2 的片上分束功能,且满足集成化光纤陀螺的光路应用要求。通过理论公式和有限时域差分法对器件进行了关键参数计算和光场仿真,MMI干涉区长度为 $20\mu\text{m}$,优化输出分支间距并增加宽度为 $1.7\mu\text{m}$ 的锥型波导后,在 100nm 的光谱宽度中,功率分束器的归一化输出光强较为平坦,最低归一化输出光强为 0.965 ,两输出分支的光功率不均匀度仅为 10^{-4} 量级。

关键词:集成化光纤陀螺;功率分束器;LNOI;MMI;有限时域差分

中图分类号:V241 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2022)05-0008-05

Research on LNOI-Based Power Splitter for Integrated Fiber-Optic Gyroscope

LI Hao-wei, LEI Ming, ZHANG Tian-qi, YU Xiao-zhi, ZHANG Li-zhe, FENG Zhe

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: A multimode interference(MMI) power splitter based on lithium niobate on insulator(LNOI) is designed. The 1×2 MMI splitter is demonstrated on a small region of $5\mu\text{m}\times 45\mu\text{m}$. The splitter meets the optical requirements of integrated fiber optic gyroscope. Through theoretical formula and finite difference time domain method, the key parameters of the device are calculated and the light field simulation is carried out. The length of MMI interference area is $20\mu\text{m}$. After optimizing the distance between output branches and adding the tapered waveguide with a width of $1.7\mu\text{m}$, the normalized output intensity of the power splitter is relatively flat in the spectral width of 100nm , with the lowest output intensity of 0.965 , and the optical power unevenness of two output branches is only 10^{-4} orders of magnitude.

Key words: Integrated fiber optic gyroscope; Power splitter; LNOI; MMI; Finite difference time domain

0 引言

光纤陀螺是一种敏感载体角速率的传感器,其基于萨格奈克(Sagnac)光相干原理实现,输入光束经分光器件分为正向和反向传播的两束光波,经过敏感环圈后在合束器件处实现光波干涉,依据相位差解算载体旋转角速率^[1]。集成化光纤陀螺将光

路器件和电路器件进行有效集成,实现器件功能的同时缩减器件体积^[2]。对于光路器件,利用集成光学技术实现芯片级的多器件、多功能集成^[3-6]。绝缘体上铌酸锂(Lithium Niobate On Insulator, LNOI)是一种新兴的集成光学平台,兼顾了绝缘体上硅(Silicon On Insulator, SOI)的高集成度、小体积等优点,同时还具有良好的光电效应^[7-10],满足集成化

收稿日期:2022-09-12;修订日期:2022-10-22

基金项目:“十四五”装备预研项目(50917060401);航天科工集团重大自主创新项目(C041gidx)

作者简介:李豪伟(1989-),男,博士,工程师,主要从集成化光纤陀螺方面的研究。

光纤陀螺的光路应用需求。分束器和合束器是陀螺最小结构(不可或缺)的组成器件,是实现高互易性光路的关键部件。在现有陀螺方案中,两者基于不同原理和材料实现。如何实现分束器和合束器的小体积、低串扰片上集成是实现集成化光纤陀螺面临的技术难题之一。本研究采用同一类型功率分束器实现分束器和合束器的片上集成。常见的片上功率分束器包括 Y 分支波导^[11]、多模干涉(Multimode Interference, MMI)波导^[12]和定向耦合波导^[13]等。Y 分支结构简单,但分支角度受限,尺寸较大,且易产生模式泄露和失配;定向耦合波导可实现多分束比,但端口输出存在相位差,对波长敏感,且工艺容差小;MMI 波导可实现多分束比、工艺容差大、波长带宽大^[14-17]。因此,本研究采用 MMI 作为功率分束器的实现类型。

针对集成化光纤陀螺应用,功率分束器需在满足分光比 1 : 1、工作波长 1310nm、工作带宽 $\geq 35\text{nm}$ 指标要求的基础上,进一步缩减尺寸和降低损耗。

综上,本文提出了一种基于 LNOI 的 1×2 MMI 功率分束器,以满足集成化光纤陀螺光路分束和合束要求。通过计算多模干涉强度确定器件最短长度,设计锥型过渡区改善损耗和分光性能,利用有限时域差分法对器件光场进行建模仿真分析。结果表明:所提出的器件能够满足集成化光纤陀螺对分束和合束的要求,且具备尺寸小、损耗低的技术优势。

1 工作原理及器件结构设计

本文提出的功率分束器基于脊型波导实现,需设计脊型波导的结构参数。将脊型波导截面分为 3 个区域,如图 1 所示。波导芯层厚度为 h ,脊型波导厚度为 h_r ,宽度为 w 。波导芯层折射率为 n_2 ,脊型折射率为 n_3 (没有掺杂的情况下 $n_3 = n_2$),波导下包层折射率为 n_1 ,波导上包层折射率为 n_4 。采用有效折射率法计算波导宽度和长度,以满足单模传输条件。将脊型光波导等效成 ABC 三部分,A、C 部分等效为平板波导,B 部分等效为平行和垂直两个方向的平板波导。A 区的等效折射率为 n_{eff1} ,C 区的等效折射率与 A 区相同,B 区的等效折射率为 n_{eff2} ,具有以下关系

$$n_{\text{eff1}} = \{n_2^2 - [(m+1)\pi/kh'_{\text{eff}}]^2\}^{1/2} \quad (1)$$

$$n_{\text{eff2}} = \{n_2^2 - [(m+1)\pi/kh_{\text{ref}}]^2\}^{1/2} \quad (2)$$

其中, $h_{\text{ref}} = h + \delta$; $h'_{\text{eff}} = h - h_r + \delta$; $\delta = \eta_1/[k(n_2^2 - n_4^2)]^{1/2} + \eta_2/[k(n_1^2 - n_3^2)]^{1/2}$; η 是不同模式系数, k 为波矢。

基于以上公式,输入输出波导宽度 w 为 $0.8\mu\text{m}$,芯层高度 h 为 $0.3\mu\text{m}$,脊型波导厚度 h_r 为 $0.15\mu\text{m}$,光波导可以实现单模传输。

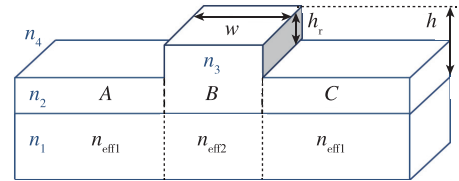


图 1 波导构型图

Fig. 1 Diagram of waveguide configuration

MMI 基于自成像效应实现特定分光比,光束经输入区进入多模干涉区会激发产生包括高阶模在内的多个模式,不同高阶模具有不同的传播系数,发生周期性干涉并在特定位置成像,将输出波导设置在特定的成像面获得特定分束比的光束输出。通过设计不同的多模区域参数可以实现对称和非对称的光波输出。陀螺中需要一分二的光路,即正向传播一路分成两路,反向传播两路合为一。因此,MMI 功率分束器为对称输出模式,结构分为三区:输入区为一路输入波导,多模干涉区为模式混叠区域,输出区为两路输出波导,输入、输出波导设计了梯形过渡区,如图 2 所示。

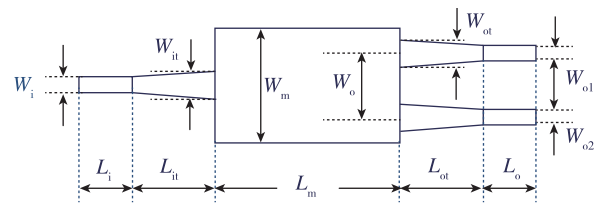


图 2 MMI 波导设计参数图

Fig. 2 Schematic of the proposed MMI waveguide

如图 2 所示,输入波导长度为 L_i 、宽度为 W_i ;输入锥型波导长度为 L_{it} 、宽度为 W_{it} ;多模干涉区长度为 L_m 、宽度为 W_m ;输出锥型波导长度为 L_{ot} 、宽度为 W_{ot} ;输出波导长度均为 L_o 、宽度为 W_{o1} 和 W_{o2} ,两路间距为 W 。为了简化设计,输入、输出波导均采用相同参数,输入、输出锥型波导同样采用相同参数。多模干涉区的宽度定为 $5\mu\text{m}$,由于需要两路匀光输出,多模干涉区长度由式(3)决定

$$L_m = \frac{3ML_\pi}{4N} \quad (3)$$

M 、 N 为输入、输出波导数, L_π 为波导中不同模式之间的拍长

$$L_\pi = \frac{\pi}{\Delta\beta} \quad (4)$$

$\Delta\beta$ 为波导中不同模式之间的传播常数差。

通过以上公式, 计算获得两路均匀光输出的多模干涉区理论长度 L_m 为 $20.3\mu\text{m}$ 。

2 器件参数优化及性能分析

由式(3)计算得到的 MMI 长度为理论值, 实际波导参数还需要建立光场模型进行仿真验证, 以进一步优化器件参数。本文采用三维有限时域差分法(3D Finite Difference Time Domain, 3D FDTD)对波导进行光场建模仿真, 通过在三维空间中对电磁场进行计算和交替抽样模拟实际光场分布; 采用本征模式扩展法(Eigenmode Expansion, EME)对部分光波导参数进行扫描, 通过在频域计算麦克斯韦方程组快速求解波导参数。首先, 利用 EME 对宽度为 $5\mu\text{m}$ 的干涉区域进行长度扫描, 波长设定为 1310nm , 扫描范围为 $[14\mu\text{m}, 25\mu\text{m}]$, MMI 输出端光强如图 3 所示。由图 3 可以看出, 在 $[19.7\mu\text{m}, 20.7\mu\text{m}]$ 范围内, 光强均大于 0.95(归一化值), 极值位置为 $20.2\mu\text{m}$, 考虑到工艺实现, 将 MMI 长度定为 $20.0\mu\text{m}$ 。

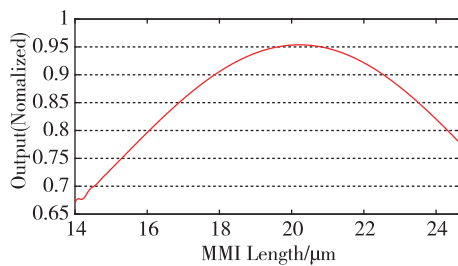


图 3 MMI 长度与输出光功率关系

Fig. 3 Relationship between MMI length and output power

在确定 MMI 长度后, 采用 3D FDTD 对 MMI 输出分支波导间距进行扫描。输出分支波导宽度定为 $0.7\mu\text{m}$, 考虑实际输出和加工工艺, 将分支波导间距的扫描范围定为 $[2.1\mu\text{m}, 4.3\mu\text{m}]$ 。由图 4 的结果可以看出, 当分支波导间距在 $2.6\mu\text{m}$ 处, 输出光强达到极值。

输入波导和输出波导均为直线型, 为了进一步提高 MMI 器件的输出光强, 在输入、输出波导

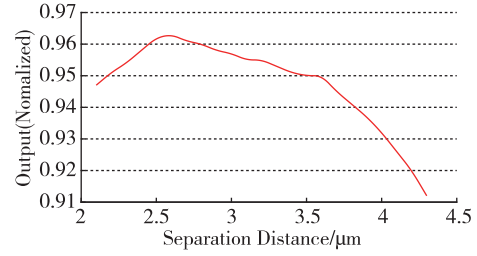


图 4 MMI 输出分支间距与输出光功率关系

Fig. 4 Relationship between MMI branches space-value and output power

MMI 干涉区之间增加锥型波导。首先, 对锥型波导的宽度进行仿真, 由图 5 可以看出, 当锥型波导的宽度为 $1.7\mu\text{m}$ 时, 输出光强达到极值。在确定宽度后, 对锥型波导的长度进行仿真, 由图 6 可以看出, 长度变化对输出光强的影响较小, 长度定为 $10\mu\text{m}$ 。

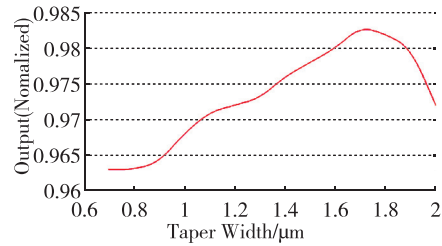


图 5 锥型波导宽度与输出光功率关系

Fig. 5 Relationship between taper width and output power

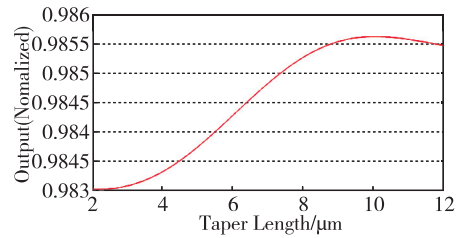


图 6 锥型波导长度与输出光功率关系

Fig. 6 Relationship between taper length and output power

经过以上参数优化的 MMI 波导, 输出光强达到 0.985。为了满足陀螺宽光谱的应用要求, 对功率分束器进行波长扫描, 由图 7 可以看出, 本文设计的 MMI 在 $[1.26\mu\text{m}, 1.36\mu\text{m}]$ 的波长范围内输出光功率不小于 0.965。输出光强的不平衡度(分光比)是 MMI 另一个重要的指标, 对 MMI 两分支输出光强进行仿真, 在 $[1.26\mu\text{m}, 1.36\mu\text{m}]$ 的波长范围内两分支输出光功率的不均匀度如图 8 所示, 本文设计的 MMI 输出光功率的不均匀度仅为 10^{-4} 量级。通过理论计算和仿真优化, MMI 功率分束器的传输光

场如图 9 所示。

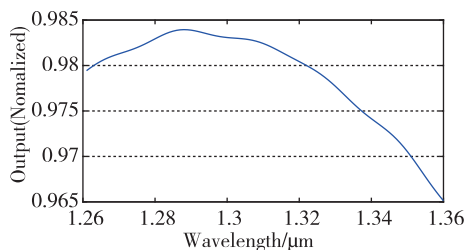


图 7 不同波长下的输出光功率

Fig. 7 Simulated output results with respect to wavelength

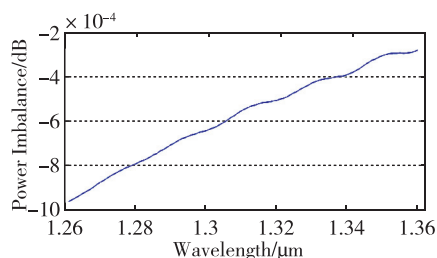


图 8 不同波长下的分支输出不均匀度

Fig. 8 Simulated results of power imbalance as a function of wavelength

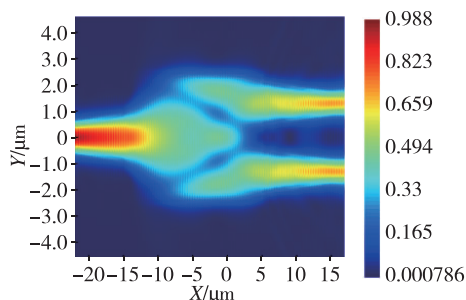


图 9 MMI 功率分束器光场图

Fig. 9 Optical energy flux density of the proposed MMI

3 结论

本文设计了一种基于 LNOI 的片上 1×2 功率分束器,通过理论计算和数值仿真对 MMI 功率分束器的关键参数进行优化。在 1310nm 波段,功率分束器的归一化输出光强可达 0.985,在 1310nm \pm 50nm 内,均有 0.96 以上的透过率,满足光纤陀螺宽光谱应用要求。两个输出分支的功率不均匀度达到 10^{-4} 量级,保证了光纤陀螺的光路互易性。该功率分束器通过压缩干涉区宽度和调整波导构型等措施,有望进一步减小器件尺寸。此外,在器件

参数设计时,充分考虑了后续的工艺实现性,降低了对加工最小线宽的要求,利于后续波导的加工实现。

参考文献

- [1] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. Artech House, 2014.
- [2] Shang K, Lei M, Li H. Ultra-small interferometric fiber optic gyroscope with an integrated optical chip[J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(4):040601.
- [3] Tran M A, Komljenovic T, Hulme J C, et al. Integrated optical driver for interferometric optical gyroscopes[J]. Optics Express, 2017, 25(4):3826.
- [4] Minh T, Duanni H, Tin K, et al. Ultra-low-loss silicon waveguides for heterogeneously integrated silicon/III-V photonics[J]. Applied Sciences, 2018, 8(7):1139.
- [5] Wang L, Halstead D R, Monte T D, et al. Low-cost, high-end tactical-grade fiber optic gyroscope based on photonic integrated circuit[J]. IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2019, 978:208-209.
- [6] Gundavarapu S, Belt M, Huffman T, et al. Interferometric optical gyroscope based on an integrated ultra low loss Si_3N_4 waveguide coil[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(4):2844-2846.
- [7] Krasnokutskaya I, Tambasco J, Peruzzo A. Tunable large free spectral range microring resonators in lithium niobate on insulator[J]. Science Reports, 2019, 9(1):11086.
- [8] Mercante A J, Eng D L K, Konkol M, et al. Thin LiNbO_3 on insulator electro-optic modulator [J]. Optics Letters, 2016, 41(5):867.
- [9] Wang M, Li J, Chen K. Thin-film lithium niobate electro-optic modulator on a D-shaped fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(15):21464-21473.
- [10] Yang F, Sun P, Chen R. A controllable coupling structure for silicon microring resonators based on adiabatic elimination[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(1):013601.
- [11] Krasnokutskaya I, Tambasco J L J, Peruzzo A. Nanostructuring of LNOI for efficient edge coupling[J]. Optics Express, 2019, 27(12):16578-16585.
- [12] Wang J, Ji W, Yin R, et al. Integrated polarization multiplexing IQ modulator based on lithium niobate thin film and all waveguide structure[J]. Optik, 2018, 152:127-135.
- [13] Yao R, Li H, Zhang B, et al. Compact and low-insertion-loss $1 \times N$ power splitter in silicon photonics

- [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(19):6253-6258.
- [14] Li H, et al. Compact and low-loss 1×3 polarization-insensitive optical power splitter using cascaded tapered silicon waveguides[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(19):5596-5599.
- [15] 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, 39:100780.
- [16] Liu R, Lu L, Zhang P, et al. Integrated dual-mode 3-dB power splitter based on multimode interference coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(14):883-886.
- [17] Chen G, Jun D N, Lin H, et al. Design and fabrication of high-performance multimode interferometer in lithium niobate thin film[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10):15689-15698.

(编辑:孟彬)