

## Design on SOI Waveguide Coupler for an Intergrated Opto-Electronic Model of Miniature Fiber Optic Gyros \*

FENGLi-shuang\*, YU Huai-yong, WANG Guang-long, LIU Hui-lan, XING Ji-wu  
(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract** :Based on the design demand of miniture of fiber optic gyroscope (FOG) and mass production of FOG, an idea based on model-design of FOG was presented. And a Y-type waveguide coupler on silicon-on-insulator (SOI) wafer used for an Intergrated opto-electronic Model was designed. The structure of the coupler has advantages in simple configuration, wide spectrum, easy to produce and opto-electronic integrate on one chip and so on. The influence of structure parameters of waveguide on the technical prarmeters (division ratio, loss) was analyzed. The designing of the coupler was improved using mode matching theory, and the loss of the coupler was decreased. In the end, the manufacture technics of the waveguide coupler was discussed. With electron beam lithography machine the mask of SOI waveguide coupler was fabricated. The mask fabrication parameters were developed and optimized. Experimental results show that the division ratio of the coupler is 50%:50%. When the length of the waveguide coupler is 25 mm, the width between the two export of waveguide is 300  $\mu\text{m}$ , with less theoretical transmitting loss that can be neglected. It can satisfy the design requirment of FOG.

**Key words** :waveguide coupler; SOI; Intergrated opto-electronic Model; interferometric FOG; mask  
**EEACC** :4140;4130

## 用于光电集成收发模块的 SOI 波导耦合器设计 \*

冯丽爽\*, 于怀勇, 王广龙, 刘惠兰, 邢济武

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

**摘 要** :基于光纤陀螺的小型化和工程化设计要求,提出模块化设计概念。设计了一种 Y 型 SOI 波导耦合器,用于光纤陀螺光收发模块。此结构具有形式简单、谱宽、加工工艺成熟和易于实现光电集成等技术优势。理论上分析了波导结构参数对其特征参数(分光比、损耗)的影响,优化参数设计,通过模场匹配理论减小器件损耗。最后,对波导耦合器加工工艺进行了讨论,采用电子束光刻技术加工出波导掩模版,并对加工工艺参数进行了优化。实验结果表明:所设计的分光比 50%:50%波导耦合器,当波导长为 25 mm 时,输入输出波导的间距可以达到 300  $\mu\text{m}$ ,且理论弯曲损耗可忽略不计,可以有效的抑制光源与耦合器的串音干扰。通过优化工艺参数,设计的 SOI 波导耦合器可以满足设计要求。

**关键词** :波导耦合器; SOI; 光电集成; 收发模块; 掩模版

**中图分类号** :TN491

**文献标识码** :A

**文章编号** :1004-1699(2008)04-0684-04

光纤陀螺是一种基于光学 SAGNAC 效应的先进的载体角速度测量传感器,具有全固态、抗冲击、振动等环境干扰、启动时间快等特点,因此被广泛应用于航空航天领域。根据美国国防部“高级研究计划局”(DRAPA)对远期惯性技术应用的预测,到 2020 年左右光纤陀螺将全部取代传统的机电陀螺,占据军用和民用领域导航系统和姿态的稳定及控制

系统的中高精度领域<sup>[1]</sup>。

然而,光纤陀螺也存在一定的技术缺陷:1)很难进一步小型化:系统由分立元件构成,各自独自封装,因此系统体积大;2)系统环境适应性和可靠性较差:光纤熔接点多、易于出现故障;3)成本高,不利于工程化生产:每个分立元件都要与器件尾纤耦合,工序多且复杂、耦合效率低、系统重复性难以保证。为

了有效的解决以上问题,一个重要的技术途径就是利用光集成回路(PIC)或光电子集成回路(OEIC)技术制造光纤陀螺用集成化芯片缓解这些困难<sup>[2-4]</sup>。

本文论述了光纤陀螺模块化设计的研究思路,详细分析了光电集成收发模块的结构特点和技术要求,明确了波导耦合器的设计方案。介绍了其工作原理,基于光束传播法对所设计的耦合器重要参数指标——耦合系数、有效耦合长度、分光比以及回波损耗等进行了详细计算和分析,并在此基础上完成了可应用于光电集成收发模块及组件的耦合器参数的优化设计。

### 1 光纤陀螺模块化设计原理

光纤陀螺系统可以分解成独立的四个器件模块(图 1)-光电集成收发模块、多功能集成光学调制器模块、SAGNAC 效应敏感模块、数字信号处理电路模块。其中,多功能集成光学调制器技术已经通过集成光学技术得到解决,采用大规模集成电路(ASIC)实现了检测电路的模块化,并应用于工程化产品中。众多研究公司(美国 Litton, Honeywell, Northrop, Sandia 国家实验室等)主要注意力集中在利用集成光学工艺研究 SAGNAC 效应敏感模块,并取得一些进展<sup>[5,6]</sup>,而对光电集成收发模块的研究工作开展的较少<sup>[7]</sup>。

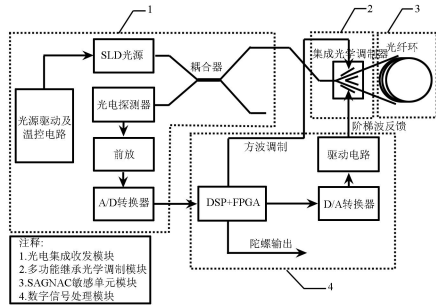


图 1 干涉式光纤陀螺的模块化结构示意图

光电集成收发模块(Integrated opto- electronic model- IOEM)的技术特点是采用了波导耦合器,把光源和探测器的芯片及检测电路的模拟部分都组装在耦合器的硅基片上。优点是提高了光功率耦合效率和系统抗干扰能力,降低了封装成本,简化了光纤陀螺的生产工序<sup>[8]</sup>,同时利于今后光纤陀螺的小型化单片集成研究。其中,波导耦合器是构成光收发模块的核心器件,分别与光源、探测器、多功能集成光学调制器相连。波导耦合器具有体积小、易集成、稳定性好、适合批量生产等优点,是实现光收发模块光电混合集成技术的关键。

### 2 波导耦合器技术方案的选择

波导耦合器方案包括定向耦合器、Y 分支波导

耦合器和多模干涉耦合器三种(表 1)。其中多模干涉耦合器结构紧凑,制作工艺简单,工艺参数容差性好,损耗低,偏振不敏感,便于集成制造,但更适用于  $1 \times N(N \geq 4)$  多路分光结构;传统的定向耦合器或 Y 分支波导耦合器结构简单,具有好的重复性,但对制作容差要求严格。定向耦合器的特性易受波长影响,而 Y 分支耦合器波导结构的工作波长相当宽。考虑到光收发模块所需波导耦合器的形式为  $1 \times 2$  即可,因此选用 Y 分支耦合器。

表 1 波导耦合器的优缺点

|    | 定向耦合器   | Y 分支分光器 | 多模干涉分光器        |
|----|---------|---------|----------------|
| 原理 | 模态耦合效应  | 模态分离效应  | 多模干涉效应         |
| 优点 | 元件长度短   | 元件频宽极大  | 频宽大、制作容差高、易于设计 |
| 缺点 | 容差差、频宽小 | 元件长度长   | 多输出路分光器元件长度长   |

### 3 波导耦合器设计

#### 3.1 材料选择

可以制作该波段光电集成光收发模块,而且目前研究比较成熟的波导材料主要有硅基 SOI 波导和硅基聚合物波导两大类<sup>[9-11]</sup>。聚合物由于具有良好的电光效应,可以把光收发模块和多功能集成光学模块,甚至 SAGNAC 效应敏感单元模块集成为单一芯片,因此是目前国外学者的研究热点。但制作聚合物波导的材料如聚酰亚胺和聚丙烯酸甲脂等,其环境稳定性令人怀疑,尤其热稳定性较差,老化速度比较快,不适应光纤陀螺对器件的基本要求。因此,本设计采用硅基 SOI 波导材料,主要基于以下几点:(1)材料具有很低的吸收系数和高折射率差,适于制作小尺寸、结构紧凑的光波导器件;(2)具有优异的光学性能和电学性能,且加工工艺与 CMOS 工艺完全兼容,可以实现低成本 SOI 基集成光电子回路,利于实现无源和有源光电子器件的一体化集成。

#### 3.2 波导截面设计

波导截面采用脊形波导结构。设计的关键在于使波导具有单模特性,从而使得波导端面能和单模光纤芯径较好地匹配,大大减小了由于尺寸失配引起的功率损耗<sup>[12]</sup>。考虑与相邻波导器件的耦合对接问题,一般尾纤采用 1310 nm 波长的传感用保偏光纤,因此选择的波导芯层截面模场直径一般是  $6 \mu\text{m}$  左右,以保证波导与尾纤的高效率耦合。波导截面如图 2 所示。脊形结构参数为:总高  $H = 6 \mu\text{m}$ ,波导宽  $w = 5.5 \mu\text{m}$ ,脊高  $2.8 \mu\text{m}$ 。图中芯层材料为 Si,折射率为 3.45;包层材料为  $\text{SiO}_2$ ,折射率为

1.5. 经有效折射率法等效后,校验结果表明,该波导结构不满足单模传输,为准单模结构,即除了可以传输基模外,还可以传输一阶模。这样的结构虽然带来了一阶模的干扰,但芯层与包层折射率足够大,有利于增强波导对光的约束,实现耦合器的小型化,因此,该结构满足设计要求。在 R-soft 软件中,完成波导输出模场的仿真计算,如图 3 所示。此时,波导与尾纤的耦合效率为最佳值 91.66 %。

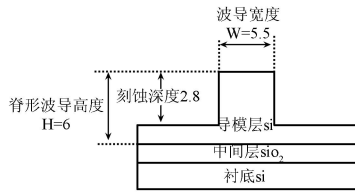


图 2 波导截面结构图

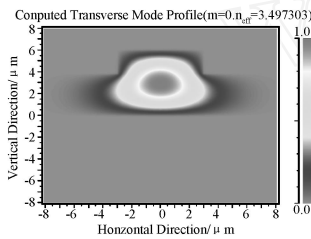


图 3 波导输出模场分布示意图

### 3.3 弯曲波导设计

弯曲波导方案种类较多,一般有双圆弧形,上升正弦型,上升余弦型以及任意优化结构弯曲波导。弯曲波导与直线波导连接处要满足曲线一阶导数、二阶导数连续,这样连接处光辐射损耗为最低。仿真结果表明,余弦型弯曲波导的弯曲损耗最接近优化值,为各类弯曲波导最低值,如图 4 所示<sup>[13,14]</sup>。另外,这一类型弯曲波导有成熟的加工工艺,制作方便。因此本设计中将采用余弦弯曲波导实现波导耦合器必要的波导结构。波导曲线函数为:

$$f(l) = [1 - \cos(\sqrt{l/2})]h/2 \quad (1)$$

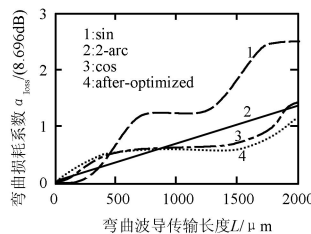


图 4 弯曲波导损耗示意图

为了满足传输光功率低损耗的要求,一般 S 型弯曲波导需要满足经验公式  $l^2/h > 1000 \text{ mm}$ ,其中  $l$  为弯曲波导纵向长度, $h$  为弯曲波导给出的偏移量。 $h$  越小,相应的输出损耗就小,但会引起器件长度增加,不利于器件的小型化。在实际的光集成中,为了更好地与光纤耦合,输出直波导再接弯曲波导

后的间距应大于单模光纤的直径。标准单模光纤的直径为  $250 \mu\text{m}$ ,故选取输出波导之间的距离为  $300 \mu\text{m}$ ,算得  $l > 11.8 \text{ mm}$ 。

波导输出间距保持  $300 \mu\text{m}$  不变,改变弯曲波导纵向长度,用 WINPLOT 软件得出其与输出光功率的变化曲线,如图 5 所示。当弯曲波导长度为  $23\ 000 \mu\text{m}$ 、波导总长度在  $25\ 000 \mu\text{m}$  附近时,插入损耗随波导长度的变化已经趋于平缓。因此取  $l = 23 \text{ mm}$ 。

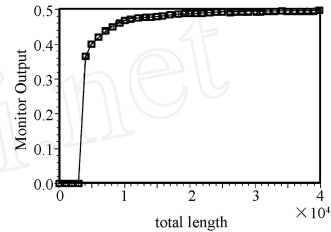


图 5 Y 分支波导一分支输出功率与波导总长度的关系曲线图

### 3.4 耦合器仿真分析

利用 Rsoft 公司的 BeamProp 软件对波导耦合器进行仿真模拟计算,结果如图 6 所示。仿真条件为:计算步长  $x$  向  $0.1 \mu\text{m}$ , $z$  向  $2 \mu\text{m}$ ,边界条件为全透明边界条件,数值积分方法为 Crank-Nicholson 法。由仿真图可知:波导耦合器分光比为 50%:50%,其功率归一化值分别为:  $P_{in} = 1$ ,  $P_{out} = 0.4953$ 。由此可计算出所设计器件的插入损耗为  $0.041 \text{ dB}$ ,满足设计要求。

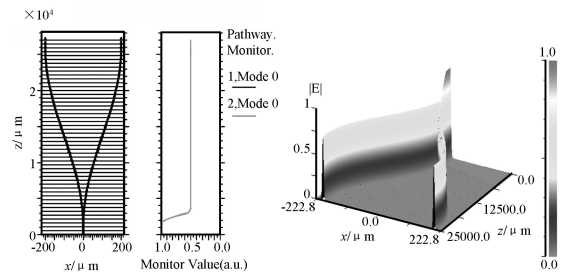


图 6 Y 分支波导耦合器光传输与分光的仿真示意图

## 4 波导耦合器制作

耦合器的制作工艺流程如图 7 所示。掩模版采用 SG2506 铬版,铬厚  $145 \text{ nm}$ ,尺寸  $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ,用 EBL 工艺制作完成。第一步要用丙酮清洗样品,超声中清洗  $15 \text{ min}$ ,然后吹干,热烘  $128 \text{ } 5 \text{ min}$ ;第二步甩胶,在样品表面均匀滴上 PMMA950 胶,进行甩胶。匀胶时间  $9 \text{ s}$ ;转速  $500 \text{ r/min}$ ;甩胶时间  $45 \text{ s}$ ;转速  $2\ 000 \text{ r/min}$ ;热烘,  $180 \text{ } 90 \text{ s}$ 。第三步进行电子束刻蚀。参数设定为 Dose:  $80 \text{ uAS/cm}^2$ ; EHT,  $10 \text{ KV}$ ; System Vacuum,  $2 \times 10^{-5} \text{ mBar}$ ; Writefield Size,  $1 \text{ mm}$ ; Beam Size,  $20 \text{ nm}$ ; Area Step Size,  $0.0312 \text{ uAS/cm}^2$ 。装入样品,抽真空,根据图形大

小在样品上选定适当的曝光区域,打开电子束施加电压,选择要曝光的图形进行曝光;第四步将刻蚀后的掩模版用溶液配制为:IPA(异丙醇):MIBK(甲基甲醇)=3:1 显影 2 min+30 s;然后用 IPA 定影;最后 BE 刻蚀铬掩模版,Ar 流量:5.4 sccm,离子能量:450 eV,离子束流:75 mA,中和电流:100 mA,真空: $1 \times 10^{-3}$  Pa,刻蚀速率:5~10 nm/s。

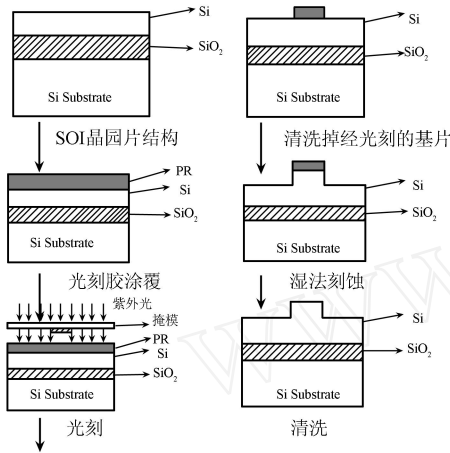


图 7 波导耦合器制作流程图

研制出的掩模版如图 8 所示。Y 分支处较难加工,波导质量较差,可以通过优化 Y 分支处的结构形式进行改进,例如将三角形分支结构改为圆弧形来降低加工难度。

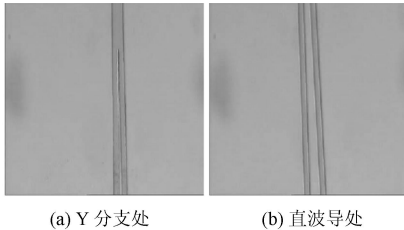


图 8 波导耦合器经电子束曝光、显影、定影后的掩模版

### 5 结论

作为目前技术最为先进的角速度传感器之一,光纤陀螺的发展趋势是高精度和小型化。光电集成收发模块和波导耦合器是光纤陀螺小型化的关键器件。本文提出了一种基于 SOI 的 Y 型波导耦合器,分析了其结构特点和技术要求,完成了方案设计,并

对耦合器的重要参数指标,如插入损耗、分光比、波导长度等进行了仿真计算和设计优化,并在此基础上用电子束光刻技术完成掩模版的制作。该成果具有结构紧凑、损耗低、容差性好等一系列优点,可为研制高集成度、高稳定性、低成本的光纤陀螺用光电集成器件奠定理论基础。

### 参考文献:

- [1] Neil Barbour, George Schmidt. Inertial sensor technology trends[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(4): 332-339.
- [2] 章燕申. 高精度导航系统[M]. 北京,中国宇航出版社,2005.
- [3] 周克足. 光纤陀螺用硅基光收发一体模块技术研究[D]. 北京航空航天大学硕士学位论文,2004DT-15.
- [4] 韦文生. nc-Si:H 薄膜光电特性及 FOG 光电子器件的研究[D]. 北京航空航天大学博士学位论文,2004, 4.
- [5] 林恒,刘惠兰,杨德伟等. 微光机电(MOMES)陀螺的技术及发展[J]. 中国惯性技术学报,2005, 13(12): 85-88.
- [6] Norgia M, Donati S. Hybrid Opto-Mechanical Gyroscope with Injection-Interferometer Readout [J]. Electronics Letters, 2001, 37(12): 756-758.
- [7] 章燕申,伍晓明,田伟等. 循环干涉型光纤陀螺及其光源[J]. 中国惯性技术学报, 10(1), 2002, 2.
- [8] Reynolds C, Tsang J. Miniature Fiber Optic Gyro Using an Integrated Opto Electronic Model [C]// Proc. of the 52-th Annual Meeting, ION, Cambridge, MA, USA, 1996.
- [9] Mottier P, Pouteau P. Solid State Optical Gyrometer Integrated on Silicon [J] // Electronics Letters, 1997, 33(23): 1975-1976.
- [10] Tomoaki Uno, Tohru Nishikawa, Masahiro Mitsuda. Hybridly Integrated Optical Transceiver Module for Access Networks [C] // Electronic Components and Technology Conference, 1998.
- [11] W. M. Diffey, M. G. Temmen, P. R. Ashley. Fabrication of Low Loss, Optical Quality Polymer Waveguide Facets in Multilayer Polymer Devices Using an Inductively Coupled Plasma [C] // Proceedings of the 11th Meeting of the Symposium on Polymers for Microelectronics, Winterthur [C] // 2004: 1324-1333.
- [12] 魏红振,余金中. SOI 及 GeSi/Si 脊形光波导的模式与波导几何结构. 光学学报[J]. 2001, 5(21): 230-232.
- [13] 陈媛媛,余金中, SOI 波导弯曲损耗改善方法的研究. 红外与毫米波学报[J]. 2005, 2(24): 67-70.
- [14] 冯丽爽,许光磊,李菲. 一种小型化硅基波导耦合器的设计与分析[J]. 光学技术, 2007, 33(2): 202-205.



冯丽爽(1968-),女,博士,研究员。研究方向为光纤传感技术、集成光学器件和微光机电(MOEMS)技术,主持国家计划、国家预研、基金等多项纵向课题和横向课题的研究工作,在微小型传感器技术和偏振测试技术方面做出突出贡献。曾获国家项目先进个人和先进集体表彰。现为中国微米纳米学会高级会员、中国计量测试学会理事、中国宇航学会光电专业委员会委员, fenglishuang@buaa.edu.cn.