

引用格式: DING Hongjie, LIU Peng, LIU Yong, et al. Research on Designing Approaches for Device and Integration of Photonic Integrated Interferometric Detecting System[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0513001

丁红杰,刘鹏,刘勇,等.光子集成干涉探测系统关键器件和集成化设计方法研究[J].光子学报,2021,50(5):0513001

# 光子集成干涉探测系统关键器件和集成化设计方法研究

丁红杰<sup>1</sup>,刘鹏<sup>1</sup>,刘勇<sup>2</sup>,常虹<sup>2</sup>,陈守谦<sup>3</sup>,张旺<sup>1</sup>

(1 吉林大学 机械与航空航天工程学院,长春 130022)

(2 北京航天计量测试技术研究所,北京 100076)

(3 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心,哈尔滨 150001)

**摘要:**基于光波波动效应,采用光束传播法,设计了光程匹配波导、阵列波导光栅、相位调制器以及多模干涉耦合器等光子集成器件。在此基础上,对光子集成器件进行耦合特性分析与计算,设计了完整的光子集成芯片。通过对光子集成干涉系统各组成模块的分析、研究及优化,集成化设计了光子集成干涉探测系统电子样机。结果表明:设计的光子集成器件最小损耗为 0.07 dB,光子集成芯片损耗为 7.46 dB。光子集成干涉探测系统电子样机在等效口径为 110 mm,系统高度口径比为 1:4 时,具有视场角 0.5°,100 km 处空间分辨率 5 m 的技术指标。

**关键词:**光子集成技术;阵列波导光栅;干涉;耦合器;相位调制;光波导;光束传播法

中图分类号:TN491

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215005.0513001

## Research on Designing Approaches for Device and Integration of Photonic Integrated Interferometric Detecting System

DING Hongjie<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, CHANG Hong<sup>2</sup>, CHEN Shouqian<sup>3</sup>, ZHANG Wang<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

(2 Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China)

(3 Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Based on the wave effect of light wave, the optical path matching waveguides, array waveguide gratings, phase modulators and multimode interference couplers are designed by using the beam propagation method. On this basis, the coupling characteristics of the photonic integrated device are analyzed and calculated, and a complete photonic integrated chip is designed. Through the analysis, research and optimization of each module of the photonic integrated interferometry system, an electronic prototype of the photonic integrated interferometry detection system is designed. The results show that the minimum loss of the designed photonic integrated device is 0.07 dB, and the loss of the photonic integrated chip is 7.46 dB. When the equivalent aperture is 110 mm and the system height aperture ratio is 1:4, the electronic prototype of the photonic integrated interference detection system has the technical indexes of 0.5° field of view and 5 m spatial resolution at 100 km.

**Key words:** Photonic integration technology; Arrayed waveguide gratings; Interference; Couplers; Phase modulation; Optical waveguides; Beam propagation method

基金项目:国家自然科学基金(No.61675002)

第一作者:丁红杰(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为光子集成与光波导器件设计。Email:dinghj19@163.com

导师(通讯作者):张旺(1987—),男,副教授,博士,主要研究方向为光学精密仪器及计算成像。Email:wangzhang@jlu.edu.cn

收稿日期:2020-12-01;录用日期:2021-02-23

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

空间遥感技术在天文探索、资源勘探、减灾防灾等领域发挥着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。随着空间遥感技术的迅速发展和精密仪器研发水平的不断提高,人们对光学探测器的分辨率要求也越来越高。为了提高分辨率,常用的手段是增大光学系统的通光孔径。随着光学系统口径的增大,光学仪器的重量将以口径三次方的比例增加,极大增加了系统的重量、能耗以及制造成本<sup>[2]</sup>。

目前提出的最大刚性单体镜成像系统分别为在轨的主镜口径为 2.4 m 的哈勃太空望远镜(Hubble Space Telescope, HST)<sup>[3]</sup>、主镜口径为 3.5 m 的赫歇尔空间天文台(Herschel Space Observatory, HSO)<sup>[4]</sup>以及在研的主镜口径为 4 m 的地球静止轨道空间监视系统(Geostationary Observation Space Surveillance System, GO3S)<sup>[5]</sup>,这些大口径天文仪器已经接近目前加工能力的极限。为了突破大口径单体望远镜的限制,基于干涉探测原理,采用光子集成器件作为信号传递方式的分块式平面成像探测系统(Segmented Planar Imaging Detector for Electro-optical Reconnaissance, SPIDER)引起科研工作者的广泛关注<sup>[6-7]</sup>。

分块式干涉成像探测系统以光学干涉信息为目标传感方法,以光子集成芯片为干涉信息获取的关键技术与器件支撑,通过微透镜阵列获取目标光学信息,在光子集成芯片(Photonic Integrated Circuit, PIC)中实现光程匹配、相位调控、光谱解复以及光波干涉。在此基础上通过对干涉信息的采集、处理和重构,获得高分辨率图像。

目前分块式平面成像探测系统研究正处于初级阶段,相关理论、器件的设计和制备尚不成熟,不足以支撑分块式平面成像探测系统的发展。本文以 SOI 波导为例针对光子集成干涉探测系统中使用的关键光子集成器件和系统集成化设计方法展开研究,力求为光子集成干涉探测系统研制提供技术支持,为新型空间遥感技术的开发提供技术储备。

## 1 光子集成器件设计与分析

PIC 设计过程中,光波导入口与透镜后焦点重合,进而将光信号导入进 PIC。PIC 的工作原理如图 1(以四个微透镜,两条干涉基线为例),光波经四个微透镜耦合进 PIC 芯片中,其中, +1、-1 透镜组成短基线, +2、-2 透镜组成长基线,经过相位调制器调控相位,使其满足干涉条件。再经多模干涉耦合器(Multi-Mode Interferometry, MMI)后,进入阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)解复用为多个窄波段光波,经过平衡探测器输出相干光波信息,再通过数字信号处理系统进行复数域信息计算和目标图像的重构<sup>[8]</sup>。本文首先针对关键光子集成器件结构进行设计分析,然后设计完整的芯片版图。

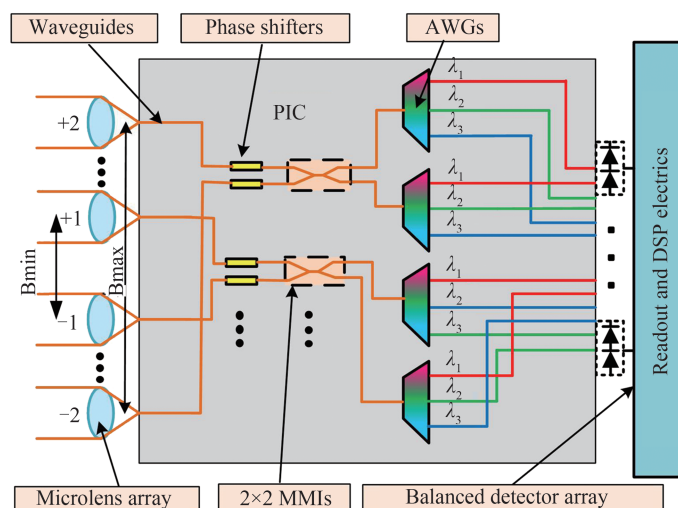


图1 PIC原理图

Fig.1 Schematic diagram of the PIC

光子集成芯片采用折射率为3.476的Si波导作为芯层,折射率为1.444的SiO<sub>2</sub>材料作为上下包层。光波导形式采用掩埋型矩形光波导,波导的宽度为0.5 μm,高度为0.22 μm。采用有限差分光束传播法<sup>[9]</sup>结合有效折射率法<sup>[10]</sup>、有限元法<sup>[11]</sup>以及时域有限差分法<sup>[12]</sup>以更快捷准确地估计传输效率与传播损耗,优化波导结构。

光信号在光波导传输过程中,当相邻波导间距过小时会发生强烈的相位串扰,造成信息的丢失、混杂。这里选择波导最小间距为2 μm,此时串扰可以忽略不计,如图2所示。由于多路波导传输过程中,不可避免地产生弯曲波导。因此选择最小弯曲半径为3 μm,此时的损耗约为0.2 dB/cm,如图3所示。

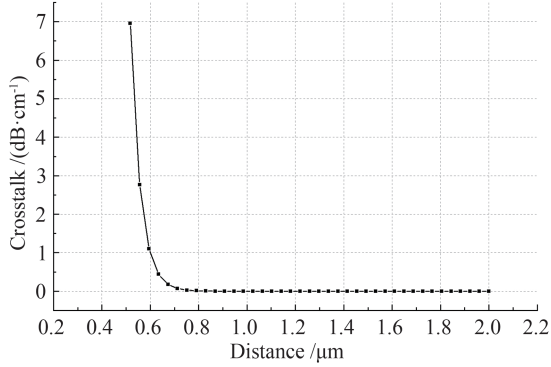


图2 相邻光波导串扰

Fig. 2 Crosstalk between adjacent optical waveguides

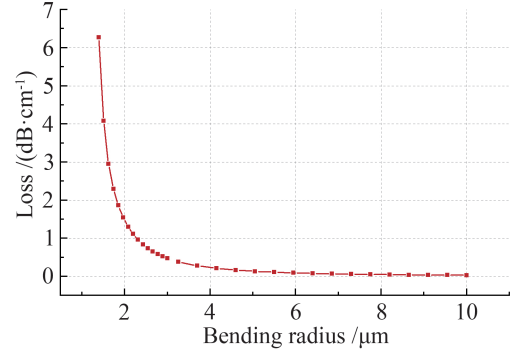


图3 弯曲波导损耗

Fig. 3 Loss of bent waveguide

### 1.1 阵列波导光栅的设计

阵列波导光栅(AWG)作为波分复用/解复用器件被广泛应用于波分复用系统(Wavelength Division Multiplexing, WDM)中。AWG主要由输入/输出波导、输入/输出自由传播区(Free Spectral Range, FSR)以及阵列波导构成。AWG的工作原理基于光栅方程

$$n_s d \sin \theta_i + n_c \Delta L + n_s d \sin \theta_o = m \lambda \quad (1)$$

式中, $n_s$ 和 $n_c$ 分别为平板波导和矩形波导的有效折射率, $d$ 为相邻波导间隔, $m$ 是衍射级数, $\theta_i$ 和 $\theta_o$ 分别为输入/输出平板波导的衍射角<sup>[13]</sup>。

选定1×16路波分复用器,中心波长 $\lambda_0=1.56 \mu\text{m}$ ,光谱区间为1.53~1.59 μm,波长间隔为3.2 nm。采用BPM方法对AWG进行仿真设计,经过多次的选择与校核,最终取得的参数如表1所示。阵列波导光栅设计如图4所示。

表1 1×3AWG设计参数表  
Table 1 Design parameter table of 1×3AWG

Design parameter	Symbol	Value
Center wavelength	$\lambda_0$	1.56 μm
Index of planar waveguide	$n_s$	2.84
Index of rectangular waveguide	$n_c$	2.48
Number of arms	$M$	60
Free spectral region	FSR	51.2 nm
Grating order	$m$	30
Number of input/output waveguides	$N$	1×16
Channel spacing	$d$	3.2 nm

从图4可以看出,AWG中心波段的插入损耗约为-1.9 dB,3 dB带宽为7.65 nm,通道串扰低于-20 dB,该AWG整体长度为394.72 μm,宽度为465.90 μm,设计结果表明光栅的损耗较低,串扰较小。

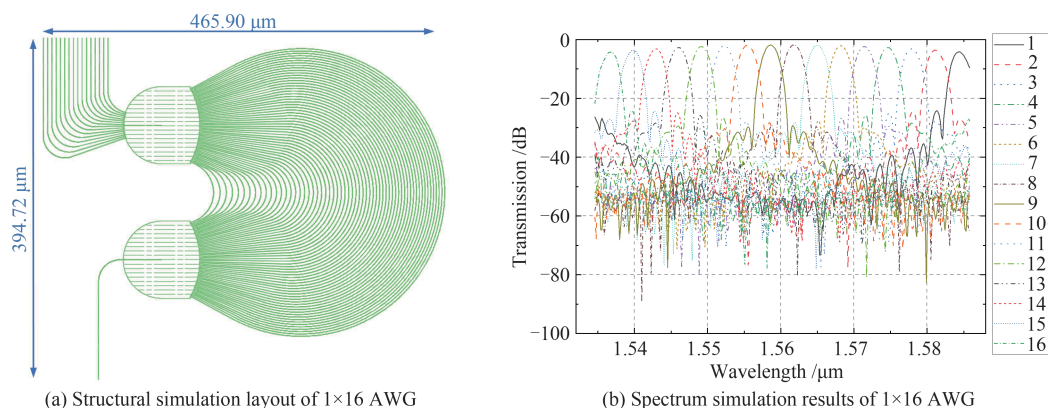


图4 1×16AWG 仿真结果  
Fig.4 1×16 AWG simulation results

### 1.2 相位调制器的设计

一对微透镜形成的干涉基线,针对非零目标视场进行观测,需要通过相位调制器,补偿两入射光波相位差,使其满足干涉条件。

基于热光效应,在芯层波导上方  $1\ \mu\text{m}$  处刻蚀 TiN 加热层。调制臂的长度为  $100\ \mu\text{m}$ ,根据文献[14]得出实现  $\pi$  的相位变化所需的温度变化量  $\Delta T$  为  $41.94\ ^\circ\text{C}$ 。基于此建立加热层三维模型,其中环境温度为恒定常温  $T=293.15\ \text{K}$ ,TiN 加热层的厚度为  $200\ \text{nm}$ ,方块电阻为  $2.75\ \Omega/\text{sq}$ ;AlCu 电极层厚度为  $800\ \text{nm}$ 。在电极上方刻蚀一层  $1\ \mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  钝化层,相位调制器仿真设计温度分布如图 5。根据结果得出达到预定温度所需功率为  $20.32\ \text{mW}$ ,上升/下降响应时间分别为  $16.75\ \mu\text{s}$  与  $14.12\ \mu\text{s}$ ,如图 6 所示。由于金属电极对光波存在吸收损耗,因此对上包层的厚度进行参数扫描,得到的损耗如图 7 所示,此时损耗约为  $0.02\ \text{dB}/\text{cm}$ ,传输稳定且吸收损耗可忽略不计。

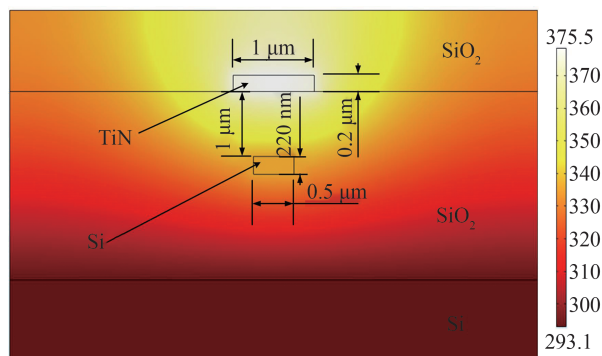


图5 相位调制器仿真模型温度分布  
Fig.5 Temperature distribution of phase modulator simulation model

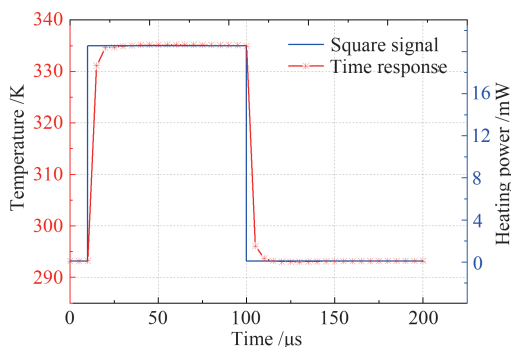


图6 实现  $\pi$  相移的时间响应  
Fig. 6 Time response for  $\pi$  phase shift

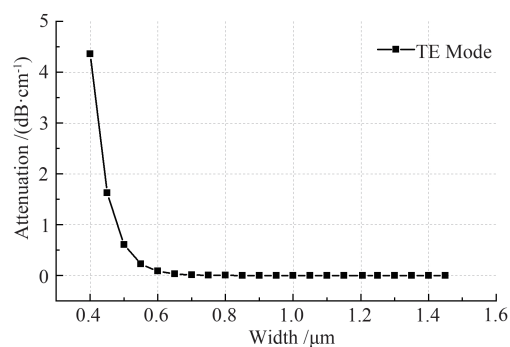


图7 上包层厚度与金属吸收损耗的关系  
Fig. 7 The relationship between the thickness of the upper cladding layer and the metal absorption loss

### 1.3 多模干涉耦合器的设计

光波经调制相位后进入多模干涉耦合器(MMI)。MMI 是组成大规模硅基光电子器件必备的基本结构。其基本工作原理是多模波导间的相长性干涉所形成的自映像效应<sup>[15]</sup>。



在仿真设计中对映像点进行观察分析,并引入宽度渐变的锥形 Taper 波导来减少模场失配,通过优化寻求最佳映像点使分光更均匀,附加损耗更低。最终选取 MMI 耦合区的长度为  $55.4\ \mu\text{m}$ ,宽度为  $6\ \mu\text{m}$ ,仿真结果如图 8 所示。经过多次仿真检验,最后得出 MMI 两条输出波导的插入损耗为  $-3.07\ \text{dB}$  与  $3.08\ \text{dB}$ ,MMI 的附加损耗为  $0.07\ \text{dB}$ ,分光比为  $50.04\%:49.96\%$ ,分光不均匀度小于  $0.006\ \text{dB}$ 。结果表明 MMI 结构紧凑、损耗较低、且分光均匀。

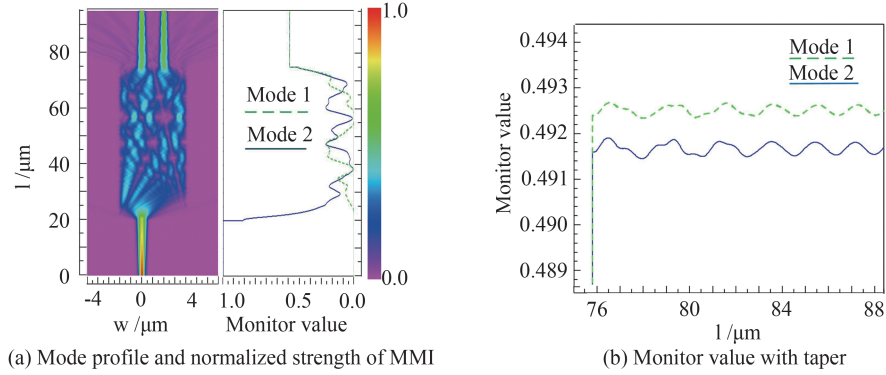


图 8 改进后的 MMI 仿真结果  
Fig.8 Improved MMI simulation results

## 2 芯片版图设计

### 2.1 光子集成芯片版图设计

为实现干涉基线的高效匹配、光信号的高效耦合,选择将 16 个微透镜焦平面处用于对同一视场成像的光波导集成于同一块光子集成芯片。

光子集成芯片前端共有 16 路输入波导,经过可调谐相位调制器后,根据基线排布方式分为两路一组,经过交叉波导后,在每组的中线方向上进入 MMI。经 MMI 耦合干涉之后,将会进入 16 个  $1\times 16$  的 AWG 中,由于 AWG 表面积过大,约为  $68\ \mu\text{m}\times 68\ \mu\text{m}$ ,且输出波导数目较多,选择将 AWG 分为上下两层设计。为避免上下层之间的串扰过大,上下层的间距需要控制在  $0.5\ \mu\text{m}$  以上,如图 9(a)所示。因此在上下层之间增加一段长度为  $25\ \mu\text{m}$ 、厚度为  $0.22\ \mu\text{m}$  的过渡波导,并对其进行仿真,得到强度分布如图 9(b)所示。此时上下两层波导的间距为  $0.82\ \mu\text{m}$ ,层间串扰约为  $0.1\ \text{dB}/\text{cm}$ 。此外,对其适应性仿真,得到对于沿着波导传输方向以及垂直于传输方向的  $100\ \text{nm}$  的对准偏移时,对应的损耗值变化量分别为  $\pm 4\times 10^{-3}\ \text{dB}$  与  $\pm 0.07\ \text{dB}$ ,对于沿着厚度方向上的  $10\ \text{nm}$  的偏移时,对应的损耗约为  $\pm 0.15\ \text{dB}$ ,因此其对于厚度方向上的对准偏移更加敏感。

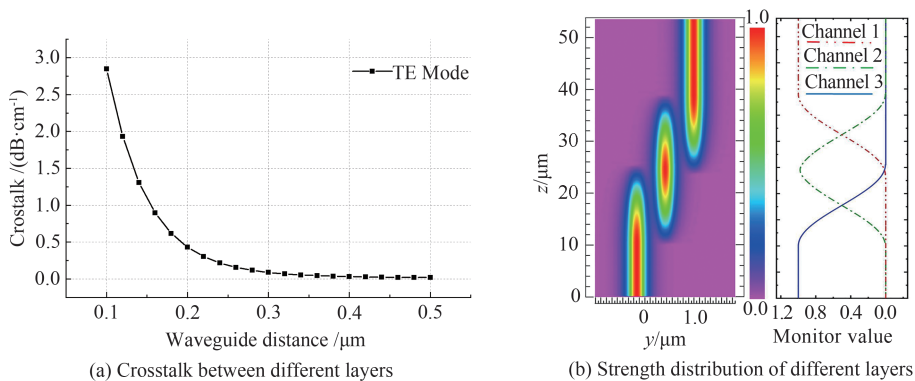


图 9 多层波导结果  
Fig. 9 Results of multi-layer waveguide

将 AWG 错位排布,并将底层的波导通过层间过渡到上层,并会聚至芯片末端,得到光子集成芯片的版图如图 10 所示。入射波导经相位调制后达到干涉要求,经 MMI 耦合干涉后一部分通过层间传递耦合至底层波导,分别进入  $1\times 16$  的 AWG 细分谱段后进入输出波导。

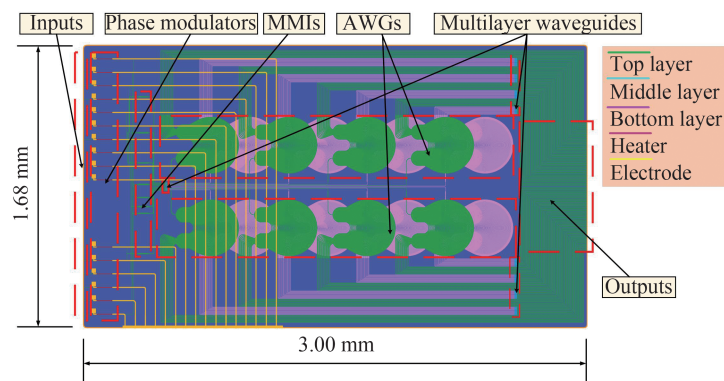


图10 光子集成芯片版图

Fig.10 Layout of photonic integrated chip

芯片整体长度为3 mm,宽度为1.68 mm,输入波导间距为 $80\ \mu\text{m}$ ,弯曲半径统一为 $3\ \mu\text{m}$ 。MMI区域输入端设定相邻波导间距为 $5\ \mu\text{m}$ ,输出端为 $2\ \mu\text{m}$ 。AWG输入端及输出端间距统一为 $3\ \mu\text{m}$ 。单个相位调制器的吸收损耗约为 $2.3 \times 10^{-4}\ \text{dB}$ ,MMI的损耗包括其固有损耗3 dB及额外的制造误差损耗0.08 dB。AWG对于不同波段的插入损耗都在1.9~4.5 dB之间,取平均损耗为3.2 dB,每条波导都会经历的 $70.65\ \mu\text{m}$ 弯曲段的损耗约为 $2.6 \times 10^{-3}\ \text{dB}$ 。最长基线的直波导长度约为4.3 mm,最短基线的直波导长度约为3.9 mm,典型的宽500 nm高220 nm的高限制性SOI光波导的损耗约为 $1\sim 3\ \text{dB}/\text{cm}$ <sup>[16]</sup>,经计算,基线上的平均传输损耗约为1.18 dB。通过以上分析,得到一块光子集成芯片上的总光强损耗约为7.46 dB。

## 2.2 放缩引导芯片版图设计

由于设计的芯片尺寸较小,宽度仅为1.68 mm,而微透镜阵列的最长基线的长度为30.4 mm,因而无法直接将芯片与透镜对准,需要额外的波导引导微透镜聚焦。由于微透镜基线较长,SOI波导的传输损耗较大,无法用于长距离的传输,而 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导的双光子吸收效应较弱,因此选择用 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导作为放缩引导芯片中主要的传输波导,SOI波导仅用于输入端和输出端。 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导的宽度为 $1\ \mu\text{m}$ ,高度为400 nm,高限制性 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导的损耗约为 $0.04\ \text{dB}/\text{cm}$ <sup>[17]</sup>。为增大系统视场和提升成像质量,选择在微透镜焦点处配置 $3 \times 3$ 的波导阵列,此时对于输入端的Si波导来说,水平方向上相邻波导间距为 $2.5\ \mu\text{m}$ ,垂直方向上相邻波导间距为 $2.78\ \mu\text{m}$ ,波导之间的串扰可以忽略不计。入射光经Si波导后,通过增大间距,达到 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导的间距要求,进入 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导。单个微透镜下Si波导的布局结构如图11所示。同时,对TE模式下 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导的弯曲损耗进行仿真,并确定其弯曲半径为 $30\ \mu\text{m}$ ,此时的弯曲波导损耗约为 $7 \times 10^{-3}\ \text{dB}/\text{cm}$ ,如图12所示。

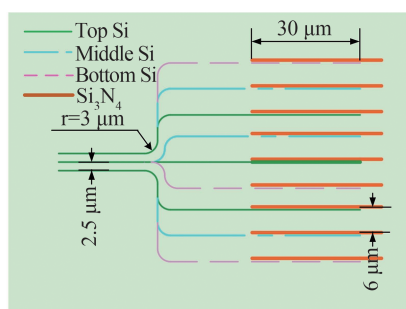
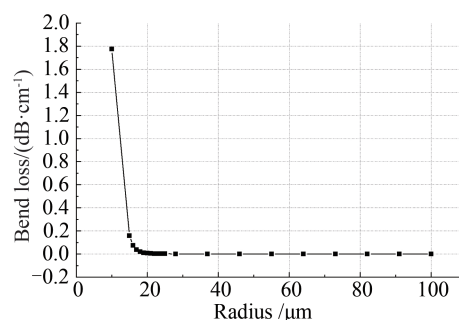


图11 Si波导的结构布局

Fig. 11 Schematic of Si waveguides

图12  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导的弯曲损耗Fig. 12 Bending loss of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  waveguide

三层波导共9路进入SOI芯片时,分为三步:1)上层波导进入SOI芯片;2)中层波导过渡至上层波导进入芯片;3)下层波导过渡至上层进入芯片。由于 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导间距太宽,无法直接将中层与上层耦合,因此在中层与上层之间增加了一段短距离的厚度为400 nm的过渡波导,此时间距由 $2.6\ \mu\text{m}$ 变为 $1.1\ \mu\text{m}$ ,如图13所示。经过模拟,耦合长度为 $153\ \mu\text{m}$ 最佳,两次跃迁后,造成的损耗约为0.4 dB。此外,当长度方向上存在 $30\ \mu\text{m}$ 的偏差时,造成的损耗差值仅为 $\pm 0.013\ \text{dB}$ 。

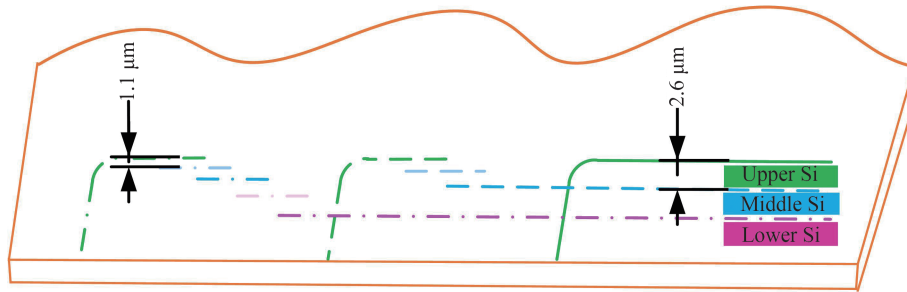


图 13 层间过渡结构示意图

Fig. 13 Structural diagram of the interlayer transition of waveguides

在  $\text{Si}_3\text{N}_4$  波导的路径规划中,采用曼哈顿几何学路径规划的方法,即标准坐标系上两点的绝对轴距总和始终相同的原理,改变弯曲的位置,合理调整波导的间距,改变延伸的长度,使波导的光程差得到补偿。图 14 是设计的过渡引导芯片与光子集成芯片配合的整体布局。

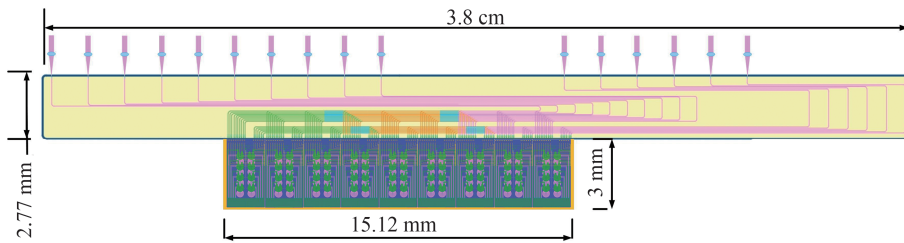


图 14 光子集成芯片整体布局

Fig. 14 Overall layout of photonic integrated chip

在整个过渡引导芯片中, $\text{Si}$ 波导段直波导的长度为  $290 \mu\text{m}$ ,弯曲长度约为  $18.85 \mu\text{m}$ ,造成的损耗约为  $0.06 \text{ dB}$ , $\text{Si}_3\text{N}_4$ 波导段直波导的长度在  $2.32\sim 3.67 \text{ cm}$  之间,弯曲长度约为  $2.12 \text{ mm}$ ,造成的损耗约为  $0.14 \text{ dB}$ 。经过两次边缘耦合及一次层间过渡的损耗约为  $0.58 \text{ dB}$ ,十字交叉波导形成的损耗约为  $0.45 \text{ dB}$ 。因此,过渡引导芯片造成的损耗约为  $1.23 \text{ dB}$ 。而如果不采用  $\text{Si}_3\text{N}_4$  波导,仅仅是  $\text{Si}$ 波导的直线段所造成的损耗都将高达  $6.05 \text{ dB}$ ,因此,采取低损耗光波导用于长距离传输是有必要的。

### 3 光子集成干涉探测系统设计

针对光子器件进行仿真设计和损耗分析后,对光子集成芯片进行了总体集成化设计和分析。

#### 3.1 干涉探测系统基线设计

微透镜阵列捕获来自目标的光信号,其中每两个微透镜进行配对,其空间位置信息构成一条干涉基线。通过采集不同基线方向上特定的频率信息,再对频域信息进行处理可以实现对目标图像的复原。非冗余基线数量越多,目标空间频谱信息越丰富,则重构后的目标图像分辨率越高。设计的干涉探测系统采用车轮型微透镜阵列分布,每条干涉臂沿车轮半径方向,单个干涉臂有 8 条基线,由 16 个微透镜组成,最长基线为  $30.4 \text{ mm}$ ,最短基线为  $1.6 \text{ mm}$ ,如图 15 所示。配对过程中应避免重合基线的产生并尽量使基线长度分布均匀,以采集到较完善的目标信息。

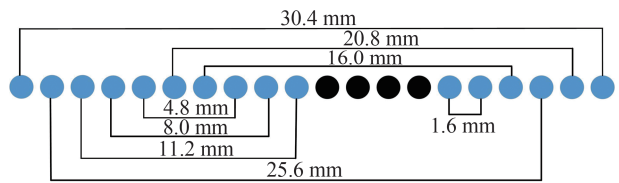


图 15 不同透镜对上的干涉基线示意

Fig. 15 interference baselines on different Lens Pairs

由于光波导横截面较小,通过单一光波导耦合微透镜像方光束无法实现大视场成像,因此在微透镜焦平面处采用了  $3\times 3$  的二维波导阵列,每条光波导传输不同目标视场的光信号,最后将 9 个子视场信号拼接融合后,形成大视场目标图像,如图 16 所示。

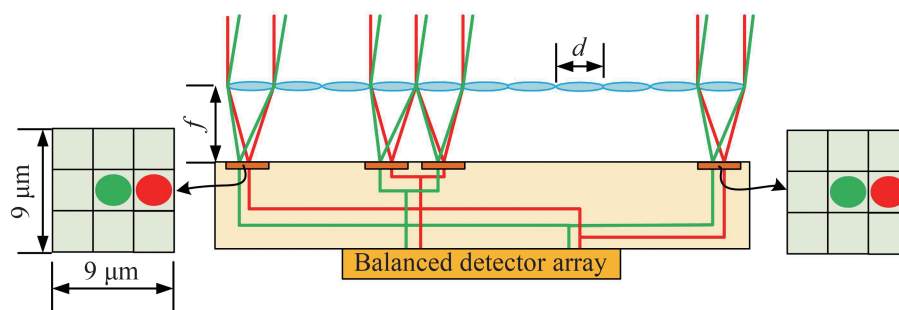


图16 焦平面多路波导原理

Fig. 16 Schematic of focal plane and multi-waveguides

9个子视场接收的干涉信号进入光子集成芯片阵列的不同区域进行信号传输和处理,平衡探测器输出的I(同相)、Q(正交)信号经由数字信号处理和图像重构算法,可以复原9个子视场的目标图像。再基于图像拼接和融合算法,可以获得包含9个子视场信息的全视场图像。

光子集成干涉探测系统性能指标如表2所示,微透镜的直径 $d$ 为1 mm,焦距 $f$ 为1 mm,视场角为 $0.5^\circ$ 。此时的光学系统 $F/\#$ 数为1,对于中心处的光波导而言,入射光波可以看做平面波且波导中心与焦点重合,当波导模场半径达到 $1.12\ \mu\text{m}$ 时,耦合效率可以达到最大值81%,此外,对于波导阵列而言,当入射角度达到视场角大小时,耦合效率是沿光轴入射光线耦合效率的10%;当夹角达到视场角的一半时,耦合效率约为中心耦合效率的50%<sup>[18]</sup>。由于不同波导的耦合效率不同导致光强不一致,因此可以通过后续的放大操作消除这一影响。由于采用了 $3\times 3$ 的二维波导阵列,经计算得像面大小为 $9\ \mu\text{m}$ ,故此选择焦平面上波导区域总边长为 $9\ \mu\text{m}$ 。系统能够实现视场 $0.5^\circ$ ,角分辨率 $0.05\ \text{mrad}$ ,100 km处空间分辨率为5 m。相较而言,哈勃太空望远镜的角分辨率为 $0.08''$ ,在100 km处的空间分辨率约为0.04 m。因此,该系统相较于传统深空探测航天器的分辨率来说相差了两个数量级,但随着微透镜阵列的扩展和波导阵列的增加,该系统的分辨率精度仍有较大的提升空间。

表2 微透镜干涉基线设计指标

Table 2 Microlens interference baseline design index

Design parameter	Symbol	Value
Longest baseline	$B_{\max}$	30.4 mm
Wavelength	$\lambda$	1.53~1.59 $\mu\text{m}$
Diameter of microlens	$d$	1 mm
Number of microlenses	$K$	16
Field of view	$\theta$	$0.5^\circ$
Focal length	$f$	1 mm

### 3.2 干涉探测系统电子样机设计

设计的光子集成干涉探测系统电子样机如图17所示。图17(a)中,系统由压圈、窗口、校准内壁、微透镜阵列、车轮型阵列盘、校准外壁、光子集成芯片阵列和背板组成。系统工作方式为:来自目标光线经过窗口、遮光管阵列进入微透镜阵列,这里窗口主要用于过滤杂光及对内部元器件的防护,遮光管阵列主要起到阻挡外界杂散光辐射的作用。微透镜阵列将入射光束会聚于透镜后焦点处,透镜后焦点与光波导入口重合,从而光波导将会聚光耦合进入光子集成电路。光子集成电路对入射光进行分光干涉,然后进入平衡探测器,再经过模数转化、数据采集卡对输出数据进行处理后,获得干涉信息,从而对目标图像进行复原。图17(b)中,光子集成干涉探测系统设计后,高度为28 mm,口径为 $\Phi 110\ \text{mm}$ ,高度与口径比约为1:4,体积参数明显优于传统光电探测系统,可实现相机的超薄设计。样机中采用辐射状车轮型微透镜阵列,共有41条沿半径方向的基线,每条基线上有序排列的16个微透镜连接至一块光子集成芯片,并将整个样机包含的光子集成芯片集成于41块PIC板上,以尽量采集到可观的目标频率信息。

电子样机的仿真设计参数如表3所示,拟定观测距离为100 km,观测目标的红外波长范围为 $1.53\sim 1.59\ \mu\text{m}$ ,电子样机的设计口径为110 mm,直径为1 mm的微透镜沿径向按照基线配对方式有序排列,41块



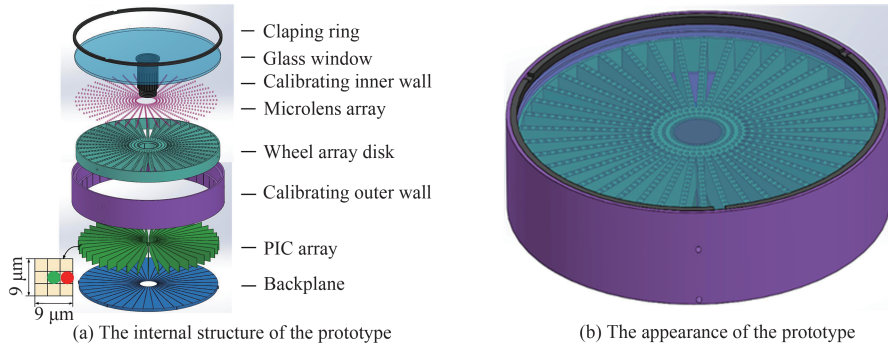


图 17 电子样机三维仿真示意图

Fig.17 Schematic diagram of three-dimensional simulation of electronic prototype

PIC 芯片径向排列形成一个二维的干涉阵列,在  $0.5^\circ$  的视场角下可以达到  $0.05 \text{ mrad}$  的分辨率。谱段数由 AWG 决定。谱段数越多,波导阵列越大,则视场角越大,可以采集到的频率信息越丰富,但加工难度及制造成本也会越高。

表 3 电子样机设计参数

Table 3 Design parameters of the simulation electronic prototype

Design parameter	Symbol	Value
PIC cards	$N_c$	41
Prototype caliber	$\Phi$	110 mm
Wavelength	$\lambda$	$1.53 \sim 1.59 \mu\text{m}$
Field of view	$\theta$	$0.5^\circ$
Observation distance	$Z$	100 km
Spatial resolution	$\delta_0$	5 m
Angular resolution	$\delta_1$	$0.05 \text{ mrad}$
Diameter of microlens	$d$	1 mm
Spectral number	$N_q$	$16(\Delta\lambda=3.2 \text{ nm})$

### 3.3 干涉探测系统电子样机性能分析

经计算,干涉探测系统电子样机的系统损耗约为  $8.69 \text{ dB}$ 。与传统光电探测器相比主要存在以下几点区别:

1)分辨率:传统光学系统分辨率受口径限制,而光子集成干涉探测系统分辨率取决于两个微透镜间距。对于空间平台,采用多传感器分布式排列方式,有效利用平台内部空间,能够极大提高光子集成干涉探测系统分辨率。

2)视场:传统的光电探测器的视场主要取决于探测器焦平面尺寸以及系统焦距,光学系统可以实现较大视场成像。光子集成干涉探测系统视场受限于微透镜焦平面处光波导阵列规模,按照目前光子集成器件制造工艺,系统视场相对较小,但仍有较大的发展空间。

3)光学元件:传统的光电探测器采用大口径透镜或反射镜,加工、装调、测试都较为困难,而电子样机采用的数百个毫米级微透镜组成微透镜阵列,加工简便,互换性好,可重复利用率高。

4)系统尺寸:由于芯片尺寸较小,易于实现系统的超薄设计,而传统的光电探测器受限于庞大的口径和焦距,无法有效缩减尺寸。电子样机的高度与口径之比约为  $1:4$ ,且理论上口径仍可继续扩展而不会增加厚度,体积约为传统光学系统的  $1/10$ ,重量约为传统系统的  $1/50$ ,明显优于传统的光电探测器。5)成像质量:传统光学系统成像主要受自身像差的影响,通过对单色像差和色差的校正能够实现较好的成像质量。光子集成干涉探测系统通过采集目标稀疏空间频谱信息进行图像重构,导致部分目标信息的丢失。后续需要通过增加采样密度,开发图像重构算法来提高成像质量。

此外,该电子样机还存在以下几个技术难点:1)由于现今国内光波导制造水平及光刻制造工艺的限制,多层波导的加工存在一定困难,然而随着技术的发展,大型三维集成光子芯片将会迎来蓬勃的发展时期;2)如何高效解决微透镜与光波导阵列的耦合同时又避免波导的串扰也是仍需改进之处;3)相较于传统的大口径主镜,大型的微透镜阵列存在占空比,造成部分信息的丢失,因而需要优化微透镜分布与重构算法开发。

## 4 结论

本文基于光波波动效应,采用光束传播法,以SOI波导为例,设计了光程匹配波导、阵列波导光栅、光学相位调制器、多模干涉耦合器等光子集成器件,并对器件的性能进行了分析。通过对设计后的光子集成器件进行集成化设计,以及对过渡引导芯片进行线路分析,设计出了适用于新型光子集成干涉探测系统的光子集成芯片。设计结果表明,阵列波导光栅的插入损耗为-1.9 dB,多模干涉耦合器的附加损耗为0.07 dB,光子集成芯片的损耗约为7.46 dB,过渡引导芯片的损耗约为1.23 dB,具有尺寸小、损耗低、耦合特性强的特点。集成化设计了等效口径为110 mm系统高度为28 mm的光子集成干涉探测电子样机,口径于高度之比约为4:1,系统能够达到角分辨率为0.05 mrad,视场角为0.5°的成像性能。光子集成干涉探测系统能够保证在与传统光学系统具有相同分辨率前提下,极大地降低遥感载荷的体积、重量、功耗和研究周期。

### 参考文献

- [1] LIU Tao. An overview of development of foreign large aperture reflection imaging technology on geostationary orbit [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(5):1-9.  
刘韬. 国外静止轨道大口径反射成像技术发展综述[J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(5):1-9.
- [2] ZHANG Xuejun, FAN Yanchao, BAO He, et al. Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11):2613-2626.  
张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(11):2613-2626.
- [3] ALLEN L, ANGEL J R P, MONGUS J D, et al. The hubble space telescope optical systems failure report[R]. National Aeronautics and Space Administration, 1990:1-116.
- [4] BOUGOIN M, LAVENAC J. From herschel to gaia: 3-meter class SiC space optics[J]. *SPIE*, 2011, 8126(1):50-58.
- [5] MCCABE M F, RODELL M, ALSDORF D E, et al. The future of earth observation in hydrology[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(7): 3879-3914.
- [6] YU Gongmin, JIN Libin, ZHOU Feng, et al. A review on development of segmented planar imaging detector for electro-optical reconnaissance system[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(5):1-9.  
余恭敏, 晋利兵, 周峰, 等. 分块式平面光电侦察成像系统发展概述[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(5):1-9.
- [7] KENDRICK R L K, DUNCAN A, OGDEN C, et al. Segmented planar imaging detector for EO reconnaissance [C]. *Computational Optical Sensing & Imaging*, 2013.
- [8] SCOTT R P, SU T, OGDEN C, et al. Demonstration of a photonic integrated circuit for multi-baseline interferometric imaging[C]. *IEEE Photonics Conference (IPC)*, 2014: 1-2.
- [9] LI Anying, YANG Yapei. Review of the new development of beam propagation method for analysis of optical waveguide [J]. *Laser Technology*, 2000, 24(4):236-240.  
李安英, 杨亚培. 光波导光束传输法数值分析新进展[J]. *激光技术*, 2000, 24(4):236-240.
- [10] SARVAGVA D, ALFONSO R, MICHAEL V, et al. Experimental extraction of effective refractive index and thermo-optic coefficients of silicon-on-insulator waveguides using interferometers[J]. *Lightwave Technology*, 2015, 33(21): 4471-4477.
- [11] SUSUMU Y, MASANORI K, YASUHIDE T. Combination of beam propagation method and finite element method for optical beam propagation analysis[J]. *Lightwave Technology*, 1997, 17(11): 2398-2404.
- [12] ZHOU L, YANG F, LONG R, et al. A hybrid method of higher-order FDTD and subgridding technique [J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2016, 15:1261-1264.
- [13] SUN Taifu, XU Ning. Design on simulation of OADM based on AWG [J]. *Computer Technology and Development*, 2013, 23(6):223-226.  
孙太富, 徐宁. 基于阵列波导光栅光分插复用器的仿真设计[J]. *计算机技术与发展*, 2013, 23(6):223-226.
- [14] YAN Yuewu, AN Junming, ZHANG Jiashun, et al. Chip of phase control arrays based on silica on silicon [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 0423001.  
颜跃武, 安俊明, 张家顺, 等. 硅基二氧化硅波导阵列相位控制芯片[J]. *光子学报*, 2019, 48(4):7-14.
- [15] EUTHOLD J L, JOYNER C W. Multimode interference couplers with tunable power splitting ratios [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(5): 700-707.
- [16] LIM A E J, SONG Junfeng, FANG Qing, et al. Review of silicon photonics foundry efforts[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4):405-416.
- [17] LUKE K, DUTT A, POITRAS C B, et al. Overcoming Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> film stress limitations for High Quality factor ring resonators[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19):22829-22833.
- [18] GUYON O. Wide field interferometric imaging with single-mode fibers[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2002, 387(1): 366-378.