

引用格式: LIU Xiao-teng, FENG Ji-jun, WU Xin-yao, *et al.* Silicon Waveguide Based Integrated Optical Phased Array Chips (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11):1149012

刘晓腾,冯吉军,吴昕耀,等.基于硅基波导的集成光学相控阵芯片(特邀)[J].光子学报,2020,49(11):1149012

基于硅基波导的集成光学相控阵芯片(特邀)

刘晓腾¹,冯吉军^{1,4},吴昕耀¹,刘海鹏¹,张福领²,封治华²,曾和平^{3,4}

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海市现代光学系统重点实验室,上海 200093)

(2 中国电子科技集团公司第二十七研究所,郑州 450047)

(3 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室,上海 200241)

(4 华东师范大学重庆研究院,重庆 401120)

摘要:基于芯层厚度为 220 nm 的绝缘体上硅材料平台,利用光束传播法与有限时域差分法设计了大偏转角度的 64 路硅基光学相控阵集成芯片.利用电子束光刻等工艺实现了芯片制备,并进行了性能表征.对关键的分束器以及阵列波导远场干涉的光斑图像进行了仿真,仿真结果显示了高于 49.7% 的分束效率和大于 31° 的偏转范围.利用标准的绝缘衬底上的硅工艺制作芯片,并进行整体封装.采用基于粒子群算法优化的自反馈电压调制系统进行相位调制.测试结果表明,在电压调制下,光斑产生了大于 ±30° 的水平偏转;同时在 1 550~1 610 nm 的波长调制下,垂直范围也有 8.4° 的偏转.研究结果有望在自动驾驶、无人机导航等领域得到广泛应用.

关键词:光学相控阵;集成芯片;硅基波导;相位调制;扫描角度

中图分类号:TN256

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204911.1149012

Silicon Waveguide Based Integrated Optical Phased Array Chips (Invited)

LIU Xiao-teng¹, FENG Ji-jun^{1,4}, WU Xin-yao¹, LIU Hai-peng¹, ZHANG Fu-ling²,
FENG Zhi-hua², ZENG He-ping^{3,4}

(1 Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2 The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

(3 State Key Laboratory of Precision Spectroscopy Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

(4 Chongqing Institute of East China Normal University, Chongqing 401120, China)

Abstract: Based on a silicon-on-insulator material platform with a core thickness of 220 nm, a 64-channel silicon-based optical phased array integrated chip with a large deflection angle was designed using the beam propagation method and the finite time domain difference method. The chip was fabricated using electron beam lithography and other processes, and the performance was characterized. The key beam splitter and the far-field interference image of the arrayed waveguide were simulated. The simulation results show a beam splitting efficiency higher than 49.7% and a deflection range greater than 31°. The chip was fabricated using a standard silicon process on an insulating substrate and packaged as a whole. A self-feedback voltage

基金项目:国家自然科学基金(Nos.11774235, 61705130, 11933005),上海市自然科学基金(No.17ZR1443400),上海市青年科技启明星计划(No.19QA1406100),上海市高校特聘教授(东方学者)岗位计划

第一作者:刘晓腾(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为集成光电子器件. Email: 183740588@st.usst.edu.cn

导师(通讯作者):冯吉军(1984—),男,教授,博士,主要研究方向为集成光电子器件. Email: fjjun@usst.edu.cn

收稿日期:2020-08-31; **录用日期:**2020-10-12

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

modulation system optimized based on particle swarm algorithm was used for phase modulation. The test results show that under voltage modulation, the light spot produces a horizontal deflection greater than $\pm 30^\circ$; at the same time, under the wavelength modulation of 1 550~1 610 nm, the vertical range also has a deflection of 8.4° . It is expected to be widely used in fields such as autonomous driving and unmanned aerial vehicle.

Key words: Optical phased array; Integrated chip; Silicon waveguide; Phase modulation; Scanning angle

OCIS Codes: 130.3120; 130.0250; 130.6750; 130.4110; 130.3130

0 引言

光束扫描指向装置是激光成像与测距系统的核心功能部件,可以采用机械式转镜系统,但在偏转速度和光束发散角(或分辨率)等方面存在瓶颈^[1-2].光学相控阵(Optical Phased Array, OPA)主要通过调节发射阵列中每个发射单元的相位差来改变出射的角度,其原理与多缝干涉类似,不依赖机械转动就可以高效地控制光束偏转,具有功耗低、体积小、扫描速度快等明显优势^[3-5].常见的光学相控阵材料为液晶、铌酸锂、压电陶瓷等^[6-8].液晶分子在电场下改变取向的速度较慢,光束扫描速度仅为千赫兹量级,难以满足高速扫描的应用需求^[9-11].铌酸锂波导相控阵主要利用普克尔效应和克尔效应,利用电场调控波导相位,光束扫描响应时间可达皮秒量级,但移相器间隔大、插入损耗较高、扫描角度较小^[12-13].压电陶瓷电光系数大、透射光谱宽,利用其可实现纳秒量级的快速光控扫描,但是所需的工作电压非常高(约为1 kV)且造价较高^[14].相较于这些方式,基于硅基波导的集成光学相控阵拥有大扫描角度、合适的调制电压以及较快的响应速度,且与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺线相兼容,利于实现光束扫描器件与电控逻辑电路的大规模集成^[15-16],有巨大的应用前景.

加州大学提出了单片集成的128路相干激光雷达,它结合了两个用于光束传输/接收的OPA和一个用于激光雷达探测的前端,得到了 $23^\circ \times 3.6^\circ$ 的扫描范围^[17].美国模拟光子学有限公司的POULTON C V等展示了512单元的集成光学相控阵,其内联移相器的间距低至 $1.65 \mu\text{m}$.这些OPA具有低功率运行(总功率 $<1 \text{ mW}$)、大转向范围($56^\circ \times 15^\circ$)和高速光束控制(10 ns移相器时间常数)等优点^[18].南加州大学WON S等报道了控制电路和光路混合集成在同一个芯片上的大规模OPA^[19],该芯片集成了1 024路波导光栅、1 192个移相器、168个衰减器、136个数模转换器和其他电学或光学元器件,能达到 0.03° 的分辨率以及 $\pm 22.5^\circ$ 的波束扫描.中科院半导体所潘教青团队利用SiN/Si双层光学相控阵结构,实现了大范围的二维扫描范围^[20].浙江大学时尧成教授实现的8通道一维硅光相控阵芯片,采用非均匀宽度的硅波导,可以利用压缩的高阶光栅波瓣实现光束控制^[21].近年来,为了减少栅瓣带来的影响,人工智能算法越来越多地参与光学相控阵的设计.美国加利福尼亚大学圣巴巴拉分校的KOMLJENOVIC T使用粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法来确定最佳间距的随机非均匀间距,研究表明192单元阵列可以在整个可见光空间提供光栅无瓣控制,单元间平均间距大于 3λ ,边模抑制比(Side-mode Suppression Ratio, SMSR)大于 13.5 dB ^[22].上海交通大学的周林杰团队提出了一种多智能体遗传算法来抑制OPA远场衍射图中的峰值旁瓣比(Peak Side Lobe Ratio, PSLR),优化后的128通道稀疏阵列的峰值旁瓣比为 16.21 dB ^[23].

本文详细介绍64路阵元规模的集成相控阵芯片的设计、制作与性能表征.芯片由分束器单元、相位调制单元、阵列波导光栅输出单元组成.相较于其他大规模硅基波导相控阵集成芯片,该芯片可实现较大的偏转角度($\pm 30^\circ$).在此基础上,进一步扩大阵元规模并优化器件性能,实现宽视场、小束散角的相控阵芯片,可满足自动驾驶、安防监控和无人机导航等的实际应用需求.

1 硅基相控阵芯片的设计、仿真与实验表征

1.1 器件设计与优化

本文设计的相控阵芯片采用SOI结构,选取较大折射率差的硅和二氧化硅材料.芯层硅的折射率为3.47,包层二氧化硅折射率为1.46.计算的波导模式有效折射率如图1所示.由图可知,波导折射率分布均匀,模式被有效地束缚在波导内.考虑到相邻波导间距过小会产生很大的耦合串扰,为了保证各个波导之间的相位信息互相之间不会发生干扰,需要选择合适的波导间距.图2仿真结果显示了在波导间距大于 $1.3 \mu\text{m}$

后 1 000 μm 的传输距离,串扰可以忽略不计,综合考虑设计与制作误差,选取 1.5 μm 作为波导间距.

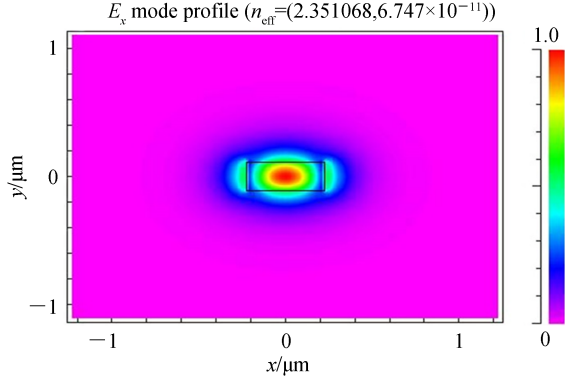


图1 波导横截面模式分布
Fig. 1 Waveguide cross-sectional mode distribution

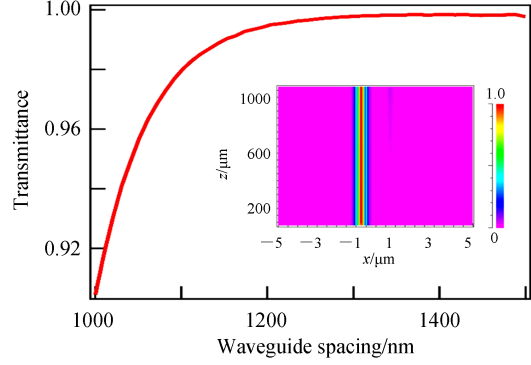


图2 阵列波导耦合串扰与波导长度的关系
Fig. 2 The relationship between array waveguide coupling crosstalk and waveguide length

分束器是光学集成相控阵系统的重要部分,高性能的光分束器可以保障到达阵列光栅出射部件之前,各子通道具有几乎一致的光束强度与相位.为此对一分二分束器进行了仿真及优化,图3显示了仿真的光场分布以及耦合长度与单通道透过率的关系.在宽度为 4 μm 、耦合长度为 13 μm 时,两端通道的透过率相等,高达 49.7%.图4展示了分束器的波长稳定性,在 C+L 波段,两通道分束均匀高效,透过率波动小且始终大于 48%.

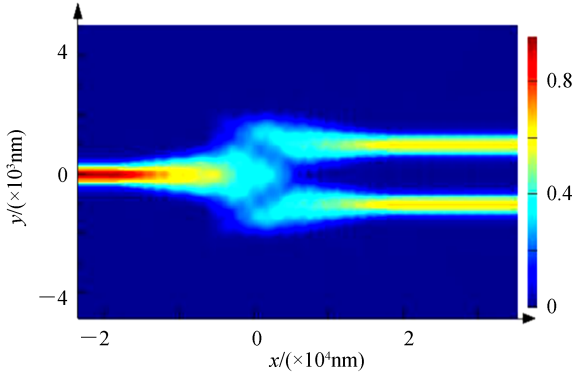


图3 分束器光场分布
Fig. 3 Light field distribution of beam splitter

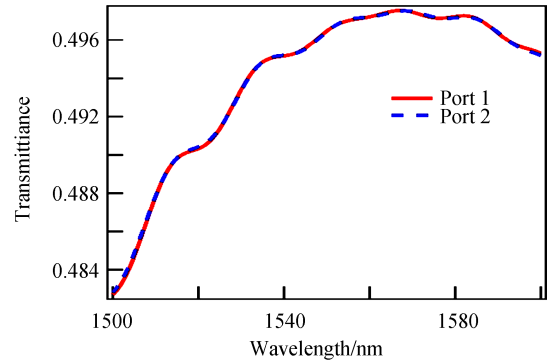


图4 分束器透过率与波长的关系
Fig. 4 The relationship between beam splitter transmittance and wavelength

阵列波导的扫描角度 θ 与波导相位 φ 、波导阵元间距 d 、输入光波长 λ 之间有关系^[24]

$$\sin\theta = \lambda\varphi/2\pi d \quad (1)$$

对电极加入电压产生热光效应,波导的折射率受热光效应影响产生变化,导致相邻波导单元出现相位差.相邻波导产生相同的相位差,达到光束偏转效果.在仿真模拟中,由于无法直接通过改变温度来实现相位的变化,因而通过改变波导的折射率来等效热光调制过程.波导折射率与相位变化、温度之间的关系满足

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{dn}{dT} \Delta T = \frac{2\pi L}{\lambda} \Delta n \quad (2)$$

式中, $\Delta\varphi$ 为相邻波导相位差, L 为调制臂长度, dn/dT 是芯层硅的热光系数, n 为波导有效折射率, T 为加热温度. Δn 为加热后波导芯层的有效折射率变化.利用相位差与波导有效折射率变化的关系,设置各相邻波导之间的相位差为 π ,由式(1)可得光束偏转角为 31.11° ,由式(2)可知,在相位差为 π 时,芯层波导有效折射率变化为 0.038 3,计算出波导芯层材料有效折射率 n 与波导模式有效折射率之间的关系,如图5所示,仿真时

改变波导模式有效折射率即可以反映出温度改变带来的相位变化.

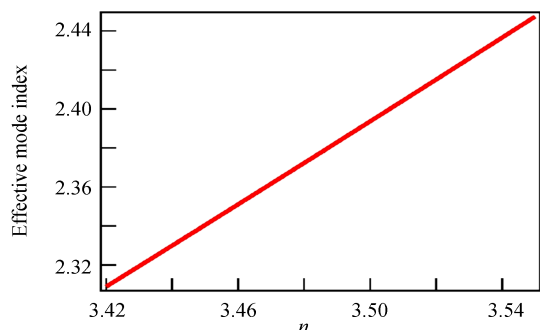


图5 模式有效折射率与波导芯层有效折射率的关系
Fig. 5 The relationship between the mode equivalent refractive index and the effective refractive index of the waveguide core

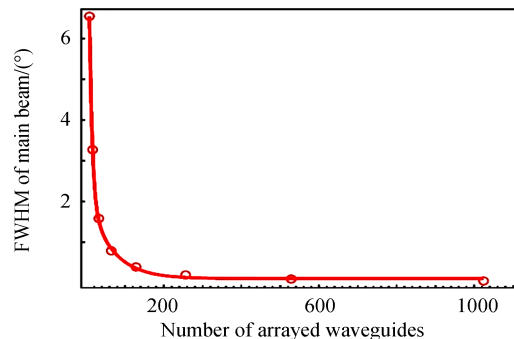


图6 远场光斑发散角FWHM与阵列波导数关系
Fig. 6 The relationship between the FWHM of far-field spot divergence angle and the number of arrayed waveguides

对8-1024路的阵列波导进行了光斑远场仿真.图6反映了远场光斑发散角的半高全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)与阵列波导数目之间的关系.由图可知,随着阵列波导数目增加,光斑远场FWHM呈现快速下降趋势.由曲线趋势推算的1024路阵列波导的FWHM约为 0.049° ,与CHUNG S和ABEDIASL H设计的1024大规模相控阵雷达芯片展示的结果相近^[19].对64路阵列波导的远场参数进行验证.将改变后的等效折射率输入64路波导中,进行光束的远场仿真,如图7所示.由图7可知,波导等效折射率改变会导致光斑向两侧明显地偏转,最大扫描角度为 $\pm 31.58^\circ$.

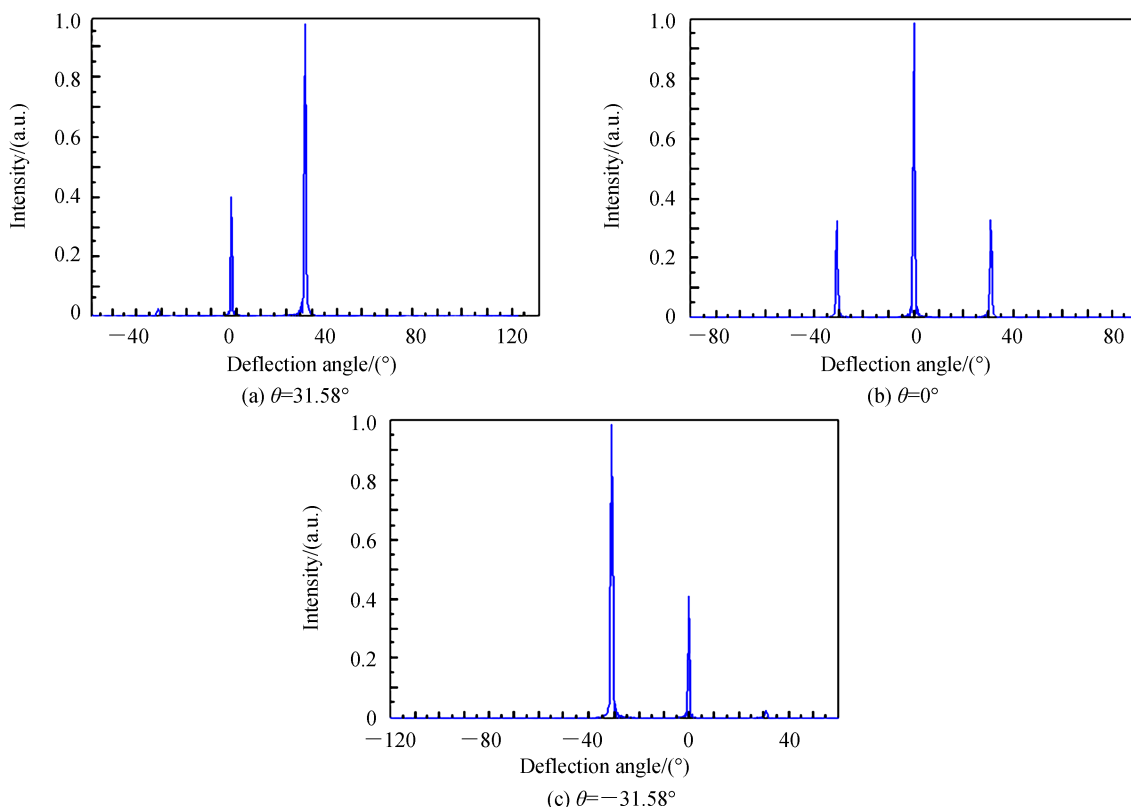


图7 阵列波导远场光斑偏转仿真
Fig. 7 Array waveguide far-field spot deflection simulation

1.2 器件制作及表征

相控阵芯片制备的具体流程如图8所示.采用芯层厚度为220 nm的标准绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI)基片,首先利用等离子增强化学气相沉积法(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition,

PECVD)沉积 100 nm 厚的二氧化硅作为硅刻蚀的掩膜,随后匀涂光刻胶(Photo Resist, PR),使用电子束光刻(Electron Beam Lithography,EBL)曝光.在显影后进行反应离子刻蚀(Reactive Ion Etching, RIE),刻蚀出波导及光栅结构.再使用缓冲氢氟酸蚀刻液(Buffered HF, BHF)腐蚀掉剩余的二氧化硅掩膜后,进行湿法化学清洗,然后利用PECVD镀二氧化硅包覆层.再通过光刻、金属镀膜、剥离等工序制备宽度为 5 μm、长度为 200 μm 的 Ti/Pt 微加热电极以及 400 nm 厚的金电极.经过切割抛光完成芯片制作.最终经过金线封装后的芯片实物如图 9 所示.

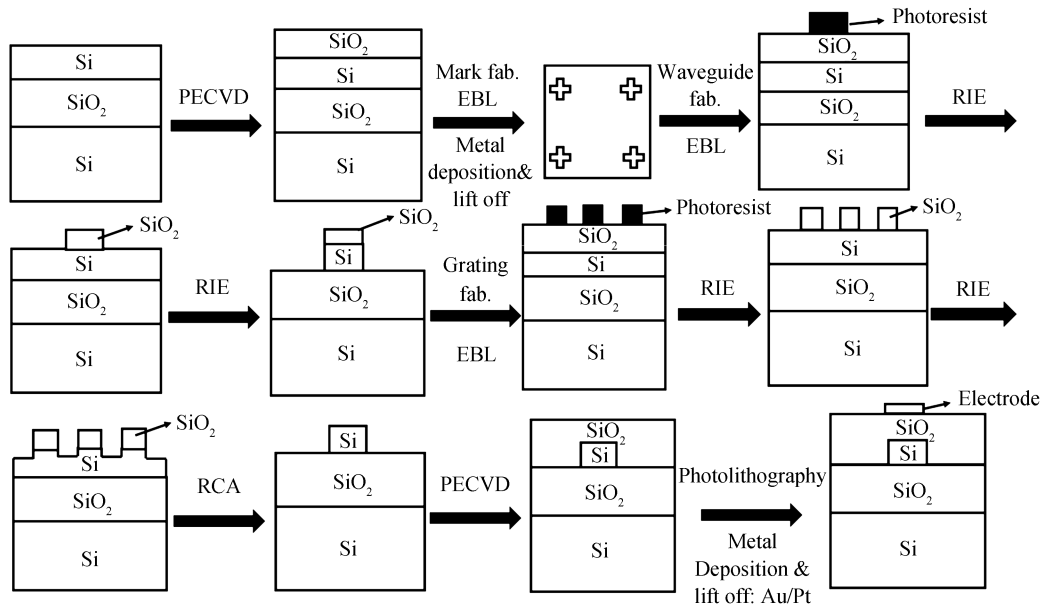


图 8 硅基相控阵芯片制备流程

Fig. 8 Flow chart of silicon-based phased array chip preparation

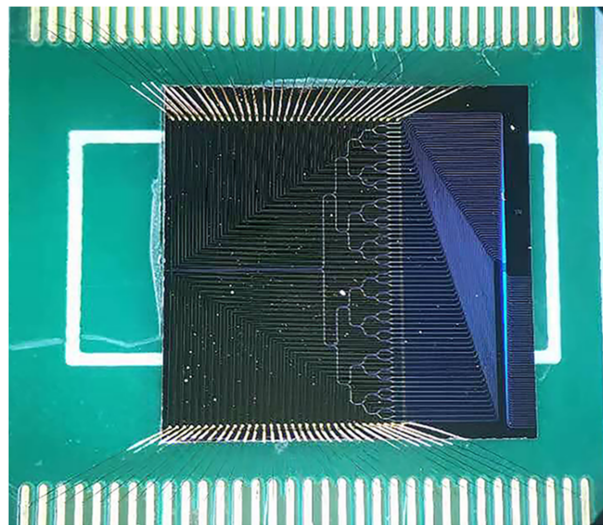


图 9 制备的硅基相控阵芯片及封装效果

Fig. 9 Preparation of silicon-based phased array chip and packaging effect

芯片制作完成后,对其相控光束偏转效果进行了实验表征,具体实验原理如图 10 所示,1 550~1 610 nm 可调谐激光器作为光源,将激光通过光纤耦合进入波导,通过对加热电极施加合适电压,进行热光调制;利用可调谐激光器进行波长调制,实现光斑的二维偏转.光经过阵列光栅从表面出射,利用高灵敏度红外相机接收图像.设计了基于粒子群优化算法的自动电压反馈调节系统,利用算法自动优化施加的电压:首先划定具体的优化区域,通过相机反馈的实时光斑亮度,随机改变施加的电压.算法找出每一代中使得光斑亮度最

大的电压值,作为下一次迭代的初始值.当光斑在划定区域内处于稳定状态,此时的电压值即为当前偏转角度的最优值.

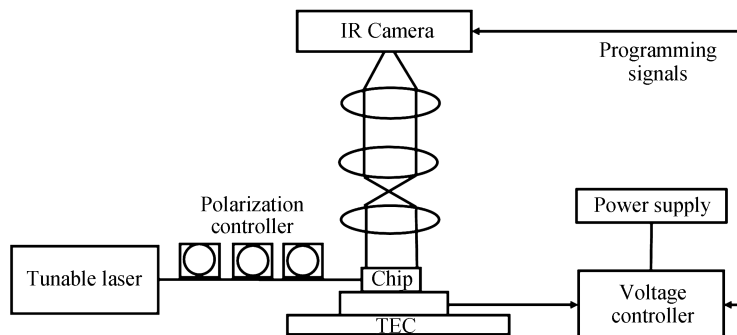


图10 测试系统构建示意图

Fig.10 Schematic diagram of measurement system

在没有启动粒子群算法优化加载电压时,红外相机捕捉到的远场光斑图像如图11(a)所示,在主瓣附近分布着明显的不规则的旁瓣.图11(b)是经过粒子群算法迭代优化后光斑图像.由图可知,在算法优化后,两

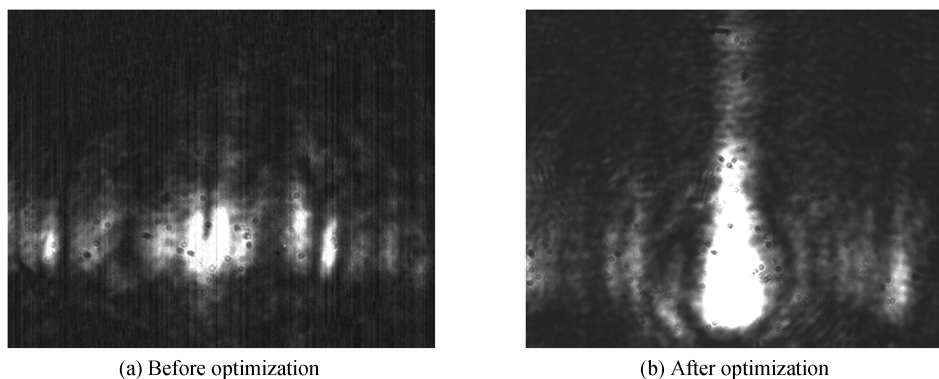


图11 粒子群算法优化前后的远场光斑

Fig. 11 The far-field spot before and after optimization by particle swarm optimization

侧分散的光斑经过电压调制汇聚于主瓣,主瓣形状较为规则,旁瓣现象有所改善.随后在中心光斑两侧划定区域,观察光斑偏转情况.如图12所示,光斑在水平方向产生了明显的移动,光束偏转效果明显.垂直方向上,通过波长调谐(1 550~1 610 nm),同样观察到光斑出现明显偏移,如图13所示.后续进行光斑偏转角度计算:红外相机的像素尺寸为 320×256 ,单个像素尺寸为 $20 \mu\text{m}$,利用光斑中心坐标的移动差值以及测量的远场距离,根据公式 $\theta = \arctan \frac{H}{D}$ (H 为光斑偏转距离, D 为远场距离)可以计算出远场偏转角度 θ .最终得到水平方向上大于 $\pm 30^\circ$ 的偏转范围.垂直方向在1 550~1 610 nm范围内也得到 8.4° 的偏转范围,与理论仿真结果相符.

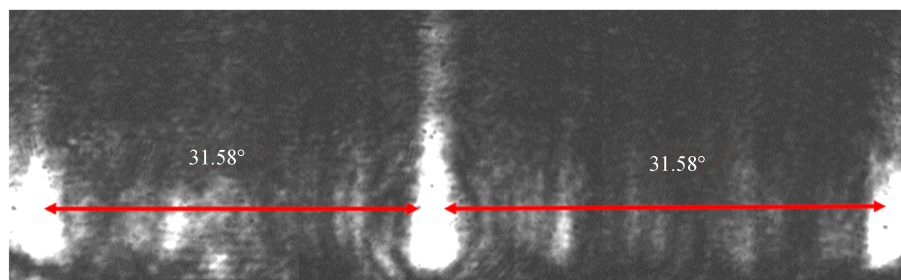


图12 施加不同移相电压的光斑偏转效果

Fig. 12 The effect of spot deflection with different phase-shifting voltages applied

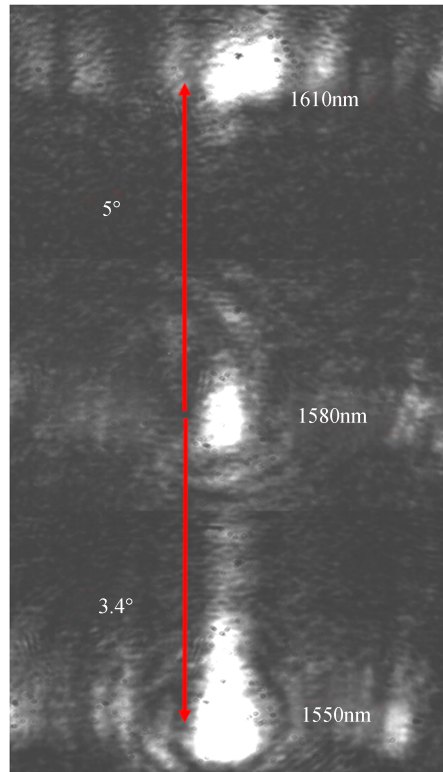


图13 1550~1610 nm 波长调谐光斑偏转效果

Fig. 13 The effect of spot deflection under 1550~1610 nm wavelength tuning

2 实验分析与讨论

实验结果显示了与仿真结果相符的光斑偏转效果,但是进一步提升红外相机对比度后观察到视场内的旁瓣,与此同时,优化后光斑发散角较大.可能受制于过大的波导间距以及较小的发射孔径.实验中存在耦合平台的轻微震动以及耦合过程的温度变化等情况,导致光斑图像不稳定,影响控制电路的优化效果.由于耦合与传输的损耗大,光斑功率较小,只能通过高灵敏度红外相机探测.

为了达到旁瓣抑制,均匀波导间距的相控阵列需要满足间距小于半波长($d < \lambda/2$)^[22].利用非等间距波导以及非等间距阵元的设计,可以提供更合理的阵列布局,减少波导之间的耦合串扰影响,提升无旁瓣扫描范围,相关的仿真验证实验正在进行.此外,光斑发散角与出光孔径(阵元数目 \times 间距)成反比^[25].通过扩大输出阵列的总体尺寸,增大发射孔径,可以减小发散角.硅光波导的耦合与传输损耗也有继续优化的空间:耦合损耗存在于光纤与波导之间,后续可将激光器直接与芯片集成;传输损耗主要包括波导壁粗糙导致的散射损耗,可以利用退火工艺以及等离子体辅助加热等方法^[26],平滑波导侧壁.在降低环境温度影响的方面,实验中加入的半导体制冷片(Thermo Electric Cooler, TEC)可以稳定温度,一定程度上减少温度变化导致的光斑不稳定.后续将芯片与驱动电路、散热模块进行整体集成,可进一步提高器件的整体性能.

3 结论

本文系统地介绍了64路阵元集成硅光波导相控阵芯片的设计、制备及实验表征.仿真结果显示了在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波导间距的情况下,远场光斑可实现 31.58° 的偏转.进一步进行了芯片制备,并利用基于粒子群优化算法的自动电压反馈调节系统进行了性能测试.实验结果表明,相控阵芯片可以实现水平方向大于 30° 的偏转角度,达到了仿真预期.实验中出现的栅瓣较大、光斑的发散角不理想的问题,后期可采用非周期分布波导以及非均匀宽度波导的设计,提高相控阵芯片的出射光斑质量.进一步可扩展阵元数目,形成更大出光孔径、更小发散角的相控阵阵列,与驱动电路等控制系统大规模集成后有望实际应用于雷达测距和三维快速成像等领域.

参考文献

- [1] XIAO Feng, KONG Ling-jiang, CHEN Jian. Beam-steering efficiency optimization method based on a rapid-search algorithm for liquid crystal optical phased array[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(16):4585-4590.
- [2] NICLASS C, ITO K, SOGA M, *et al.* Design and characterization of a 256x64-pixel single-photon imager in CMOS for a MEMS-based laser scanning time-of-flight sensor[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(11):11863-11881.
- [3] AN Jun-ming, ZHANG Jian-shun, WANG Yue, *et al.* Study on wavelength division multiplexer for silicon photonics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(11):110006.
安俊明, 张家顺, 王玥, 等. 硅光子中波分复用技术研究[J]. *激光与光电子学进展* 2014, **51**(11):110006.
- [4] CHAO Tien-hsin, ZHOU Han-ying, REYES G F, *et al.* High-speed high-density holographic memory using electro-optic beam steering devices[C]. *Photorefractive Fiber and Crystal Devices: Materials, Optical Properties, and Applications VIII*, 2002, **4803**:70-73.
- [5] POULTON C V, YACCOBI A, SU Z, *et al.* Optical phased array with small spot size, high steering range and grouped cascaded phase shifters[C]. *Integrated Photonics Research, Silicon & Nanophotonics*, 2016.
- [6] WU Liang, WANG Xiang-ru, HE Xiao-xian, *et al.* Arbitrary multiple beam forming by two cascaded liquid crystal optical phased arrays[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(13):17066-17077.
- [7] JEZ D R, CEARNS K J, JESSOP P E. Optical waveguide components for beam forming in phased-array antennas[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2015, **15**(1):46-49.
- [8] JIANG Xue-jiao, LIU Meng-wei, SHI Fang-fang, *et al.* A microscale linear phased-array ultrasonic transducer based on PZT ceramics[J]. *Sensors*, 2019, **19**(5):1244.
- [9] WANG Xiang-ru, WU Liang, HE Xiao-xian, *et al.* Theoretical analysis on power stability and switch time of the non-mechanical beam steering using liquid crystal optical phased array[J]. *Liquid Crystals*, 2018:1-10.
- [10] WINKER B, MAHAJAN M, HUNWARDSSEN M. Liquid crystal beam directors for airborne free-space optical communications[C]. *Aerospace Conference*, 2004, **3**:631-634.
- [11] YANG Deng-cai, YANG Zuo-yun, WANG Da-yong. Laser-phased-array beam steering controlled by lithium niobate waveguides[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(6):061605.
- [12] ZHANG Zhang, XU Jia-lin, YANG Li-li, *et al.* Design and comparison of PMN-PT single crystals and PZT ceramics based medical phased array ultrasonic transducer[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2018, **283**:273-281.
- [13] LIU Zhi-bo, LI Yang, SU Yun, *et al.* Modulation coefficient measurement and verification of optical phase modulator based on piezoelectric ceramics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(7):76-81.
刘志波, 李阳, 苏耘, 等. 基于压电陶瓷的光相位调制器的调制系数测量及验证[J]. *光学学报*, 2013, **33**(7):76-81.
- [14] YOO B W, MEGENS M, CHAN T, *et al.* Optical phased array using high contrast gratings for two dimensional beamforming and beamsteering[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(10):12238-12248.
- [15] SUN Jie, TIMURDOGAN E, YAACOB A, *et al.* Large-scalenonophotonic phased array [J]. *Nature*, 2013, **493**(7431):195-19.
- [16] DOSTART N, ZHANG B, KHILO A, *et al.* Serpentine optical phased arrays for scalable integrated photonic LIDAR beam steering[J]. *Optica*, 2020, **7**(6):726-733.
- [17] BHARGAVA P, KIM T, POULTON C V, *et al.* Fully integrated coherent LiDAR in 3D-integrated silicon photonics/65nm CMOS[C]. *2019 Symposium on VLSI Circuits*, 2019, **1**:C262-C263.
- [18] POULTON C V, BYRD M J. Optical phased arrays for integrated beam steering [C]. *2018 IEEE 15th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*, 2018:1-2.
- [19] CHUNG S W, ABEDIASL H, HASHEMI H. A monolithically integrated large-scale optical phased array in silicon-on-insulator CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2018, (99):1-22.
- [20] WANG Peng-fei, LUO Guang-zhen, XU Yang, *et al.* Design and fabrication of SiN-Si dual-layer optical phased array chip[J]. *Photonics Research*, 2020, **8**(6):912-919.
- [21] CHEN Jing-yi, SUN Yan-ling, WEI Shi-jie, *et al.* Optical phased array based on silicon waveguides with non-uniform widths[C]. *The 23rd Opto-Electronics and Communications Conference (Jeju, Korea) 5D2-3*, 2018:1-2.
- [22] KOMLJENOVIC T, HELKEY R, COLDREN L, *et al.* Sparse aperiodic arrays for optical beam forming and LIDAR [J]. *Optics Express*, 2017, **25**(3):2511.
- [23] LIU Chu-xin, XU Wei-han, ZHOU Lin-jie, *et al.* Multi-agent genetic algorithm for sparse optical phased array optimization[C]. *Asia Communications and Photonics Conference (ACPC)*, 2019:1-3.
- [24] YAN Yue-wu, AN Jun-ming, ZHANG Jia-shun, *et al.* Silicon-based silicon dioxide waveguide array phase control chip [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):0423001.
- [25] BARWICZ T, HAUS H A. Three-dimensional analysis of scattering losses due to sidewall roughness in microphotonic waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(9):2719-2732.
- [26] ACOLEYEN K W, BOGAERTS W, JÁGERSKÁJANA, *et al.* Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(9):1477-1479.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos.11774235, 61705130, 11933005), Natural Science Foundation of Shanghai (No.17ZR1443400), Shanghai Rising-Star Program (No.19QA1406100), Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning.