

# 基于级联式的硅基光学相控阵激光雷达天线研究\*

封治华<sup>1,2\*\*</sup>, 张福领<sup>2</sup>, 董光焰<sup>2</sup>, 韩文杰<sup>2</sup>, 徐鹏霄<sup>3</sup>, 王东辰<sup>3</sup>

(1. 西安电子科技大学 物理学院, 西安 710071; 2. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047; 3. 中国电子科技集团公司第五十五研究所, 南京 210016)

**摘 要:** 介绍了光学相控阵激光雷达天线技术研究的国内外现状, 阐述了其基本原理和系统组成, 并对级联式的硅基光学相控阵激光雷达天线技术方案进行了分析, 在此基础上开展了高密度低串扰波导阵列技术和层叠光学相控阵技术等关键技术攻关, 获取了激光雷达系统的关键技术参数, 并进一步阐述了需解决的技术问题, 最后对该体制激光雷达的应用进行了展望。

**关键词:** 激光雷达; 光学相控阵; 波导阵列; 级联式

**中图分类号:** TN958.98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2022)04-0267-07

## Research of Cascaded Silicon-based Optical Phased Array Lidar Antenna

FENG Zhihua, ZHANG Fuling, DONG Guangyan, HAN Wenjie, XU Pengxiao, WANG Dongchen

(1. School of Physics, Xidian University, Xi'an 710071, CHN; 2. The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, CHN; 3. The 55th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210016, CHN)

**Abstract:** The current status of optical phased array lidar antenna technology at home and abroad was introduced, its basic principle and system composition expounded, and the technical scheme of cascaded silicon-based optical phased array lidar antenna was analyzed. On this basis, key technologies such as high-density low-crosstalk waveguide array technology and stacked optical phased array technology were tackled, the key technical parameters of the lidar system were obtained, and the technical problems to be solved were furtherly elaborated. At last, the application expectation of lidar was discussed.

**Key words:** lidar; optical phased array; waveguide array; cascade

收稿日期: 2022-04-08

\* 基金项目: 军委科技委国防科技创新特区未来先进电子科学技术领域重大项目(20-163-04-ZD-006-001-01)

作者简介: 封治华(1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为新体制激光雷达、全固态激光技术; (E-mail: feng\_zhihua@163.com)

张福领(1978—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为光电探测技术; (E-mail: lidarzhang666@163.com)

董光焰(1978—), 男, 研究员高级工程师, 主要研究方向为激光雷达技术。(E-mail: opt\_gyd@163.com)

\*\* 通讯作者

## 引 言

无人自主系统、机器人、微型无人平台等各领域特别是军事应用领域对激光雷达系统提出了微小型、低功耗、低成本、多功能一体化等迫切需求。传统激光雷达系统多采用转镜、摆镜、振镜等机械扫描方式,无法满足上述需求,这就要求转变以往传统的激光雷达系统架构设计思想,寻求新的体系方案和技术实现途径,进而研究新体制的芯片化激光雷达。与传统的机械扫描技术相比,光学相控阵技术具有结构简单、体积小、重量轻、高稳定性的特点,同时兼顾扫描速度快、分辨率高、准确度高、电控可编程多光束随机指向等功能优势,再结合硅基光子集成和 CMOS 兼容工艺,可提供创新解决方案,大幅降低激光雷达系统的体积、重量、功耗和成本。

国外在硅基光学相控阵领域发展起步较早。2009年,Karel Van Acoleyen 等人构建了较为简单的一维  $1 \times 16$  扫描光学相控阵<sup>[1]</sup>。2011年,德克萨斯大学报道了基于非均匀间隔阵列的一维光学相控阵器件<sup>[2]</sup>,该器件将 12 个阵元分为三组不同间距的子阵,通过控制各个子阵之间的相位,产生特定的近场相位梯度,从而在  $0^\circ$  至  $10.2^\circ$  范围内可以有效地抑制远场次级大光束,保证能量更多的集中在主极大光束内。2013年,麻省理工学院在 *Nature* 上展示了大规模可编程二维光学相控阵,该器件是真正意义上的大规模集成的高密度器件,具有 4096 个独立控制的阵元。通过控制均匀分布的各个阵元之间相位和强度,能够实现在二维平面内的远场成像<sup>[3]</sup>。该工作为实现集成光学相控阵的实现提供了思路。2015年,California Institute of Technology 在 *Optics Express* 报道了基于电光移相器的二维光学相控阵成像系统,该光学相控阵由  $4 \times 4$  个平面光学天线构成<sup>[4]</sup>。光学移相器采用基于等离子体色散效应的集成波导 P-I-N 节组成,并采用了基于波导光栅的光学天线作为发射阵元,其阵列单元间距较大,光束扫描角度不到  $5^\circ$ ,其实用意义大大降低。2016年,Intel 在 *OPTICA* 上报道了基于星型耦合结构的非均匀间隔二维光学相控阵器件。不同于传统的二叉树型 MMI 分光结构,该星型耦合器结构将入射光耦合到 128 个阵元中。发射阵列采用 128 非均匀间隔波导光栅阵列,可实现从  $-40^\circ$  至  $+40^\circ$  的大角度光束控制,一定程度上抑制了次级光束在远场的产生,其波长调控光束是用均匀间距的波导光栅阵列

实现的<sup>[5]</sup>。国内集成光学相控阵研究相对较迟。2017年,北京大学报道了一种利用电光微环的大规模光学相控阵系统,每个阵元包含一个定向耦合器、一个微环移相器和一个光栅天线。由  $32 \times 32$  阵元组成的光学相控阵,主瓣宽度范围为  $0.04^\circ \times 0.04^\circ$ ,视场范围为  $1.78^\circ$ <sup>[6]</sup>。2020年,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,降低了硅基 OPA 高输入功率工作时非线性效应带来的光损耗, SiN-Si 双层材料 OPA 芯片具有低损耗特性,双层耦合损耗小于 0.2 dB,同时,其团队采用了一种整体光栅光学天线,实现了大范围的二维扫描<sup>[7]</sup>。此外,上海交通大学、吉林大学、浙江大学等高校也在硅基光学相控阵领域开始了相关工作<sup>[8-10]</sup>。

光学相控阵天线是一种新的光束控制器件,其基本结构由若干个阵元组成,通过改变每个阵元之间光信号相位延迟来改变光束发射方向。一般意义上光学相控阵主要是指有源光学相控阵,即将远场光束形成和光束偏转控制器件集成在一起从而形成具有光束调控功能的集成系统。由于器件实现平台的不同,光学相控阵的具体结构各异、性能不一。基于未来技术发展方向和趋势,文中论述和研究的方向主要考虑基于硅基光子技术的光学相控阵。对于此类光学相控阵,由于器件本身功能要求,其整体结构可以归纳为以下三个主要组成部分:分光器、移相器、发射单元阵列。

## 1 工作原理及系统组成

### 1.1 光学相控阵基本原理

光学相控阵的原理类似于棱镜使光束发生偏转的工作原理,如图 1(a)所示。由于棱镜的折射率

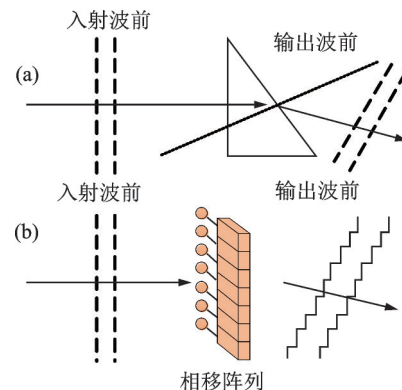


图 1 光学相控阵基本原理图

Fig.1 Operating principle of optical phased array

大于空气的折射率,光在棱镜中的传播速度会变慢,棱镜从薄端到厚端对光的延迟作用逐渐加强,使通过棱镜的光束相位面发生倾斜,从而使通过棱镜的光束发生偏转。光学相控阵一般由N个相控单元组成,如图1(b)所示。通过控制每个相控单元对输入光束的相位延迟量,使输出光束的相位面相对于输入光束的相位面发生倾斜,从而使输出衍射光束在远场发生干涉偏转。

一维光学相控阵移相扫描原理如图2所示,当入射光通过一个具有线性相位方程: $\varphi(x)=\alpha x$ 的一维光学相控阵器件,其中 $\alpha=(2\pi/\lambda)\sin\theta_s$ , $\lambda$ 是入射光的波长, $\theta_s$ 是设定的偏转角,此时光学相控阵的光束将偏转 $\theta_s$ 角度,图的右边是光学相控阵在远场的衍射图样。分别控制每个移相器辐射出光波的相位来调整相位波前,从而控制出射光束的偏转。

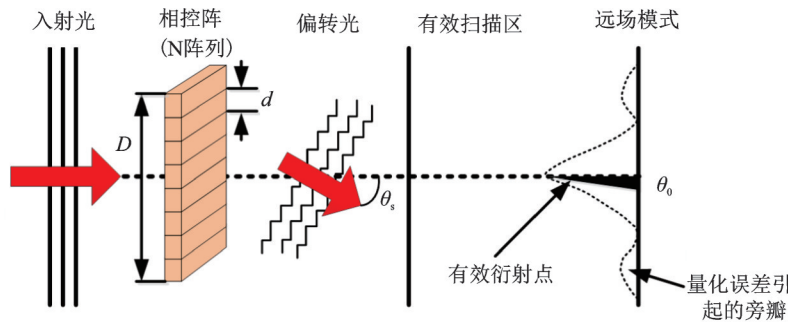


图2 一维光学相控阵移相扫描原理图

Fig.2 Operating principle of one-dimensional optical phased array phase-shift scanning

通常来说,可以将光学相控阵列看作是透射光栅,理论基础是夫琅禾费多缝衍射,如图2所示。其光束扫描原理为:通过调节从各个相控单元输出的光波之间的相位关系,使其在某一设定方向上彼此同相,产生相互加强的干涉,干涉的结果是在该方向上产生一束高强度光束,而在其他方向上从各相控单元输出的光波都不满足彼此同相的条件,干涉的结果彼此相抵消,辐射强度接近于零,从而实现光束偏转扫描。

国际上成熟的二维光学相控阵方案大多采用平面波导光栅阵列,采用波长-相位调谐方法实现二维光束扫描。而本方案提出的级联型光学相控阵架构,前后两级不同的光学相控阵结构均能够通过相位控制光束偏转角度实现二维扫描。因此不需要对波长进行调谐,极大的降低了系统成本,提高了响应速度。该架构示意图如图3所示。二维硅基光学相控阵系统包含A型一维平面波导相控阵和B型一维层叠平板相控阵,分别负责水平扫描与垂直扫描。

1.2 系统组成

本系统采用级联相控的方式解决现有的硅基光学相控阵的二维扫描问题,其中无需对准的多层光学相控阵技术是本文设计中的另外一个关键性技术,也是本方案中的一个技术难点。目前

整个光学相控阵系统由A型硅基光学相控阵、B型硅基光学相控阵、光学耦合单元以及电控扫描系统组成,其中两个主要工作单元的工作原理一致,都是通过移相器对阵列相位分布进行调节来调整光束偏转方向,但是其区别在于在第一级A型一

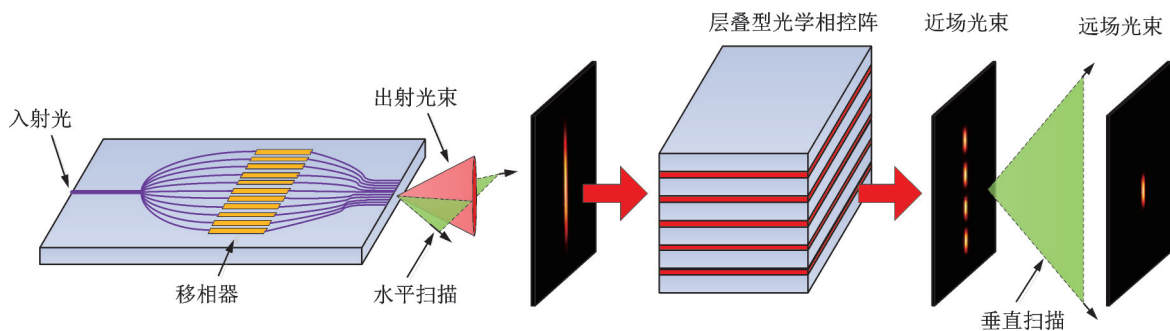


图3 基于级联式的硅基光学相控阵激光雷达天线结构示意图

Fig.3 Operating principle of a silicon-based optical phased array lidar antenna based on cascade

维硅基光学相控阵集成了包括光耦合器、分光器、波导超晶格阵列等关键器件,将光的片外输入、光

学移相、远场发射等功能集于一体,是整个架构的重要核心器件。系统的原理框图如图 4 所示。

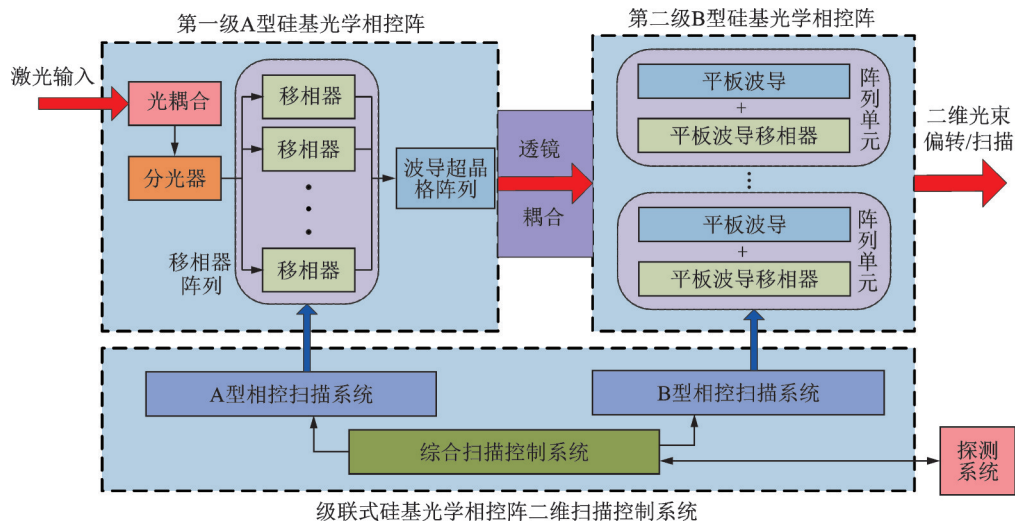


图 4 基于级联式的硅基光学相控阵激光雷达天线技术原理

Fig.4 The technical principle of the silicon-based optical phased array lidar antenna based on cascade

第一级 A 型相控阵可通过层内置的电光或者热光移相器有效控制对应波导中光相位,能够在端面构成特定的近场相位梯度,经过层内横向多个阵元之间辐射光之间干涉和衍射,能够准确、快速地调控出射光束在水平方向的偏转角度。并且结合波导超晶格技术,灵活地调节波导宽度并满足超晶格波导阵列传播常数不等式,达到半波长间距的阵列尺寸要求,可以大幅提高光学相控阵的扫描范围,有效抑制栅瓣。

第二级 B 型光学相控阵由多层  $\text{SiO}_2\text{-Si-SiO}_2$  平板波导堆叠而成,B 型硅基光学相控阵不包含分光器结构,其主要实现的功能是移相器,其内置电光或热光移相器可完成对光束俯仰角的偏转控制。B 型相控阵前后表面平行,因此不会影响光束在水平方向的偏转角度,由前一级光学相控阵的输出光束作为输入光,当输入光进入多层堆叠结构中,会自然的分为多个光传输通道并继续传输。通过 A 型、B 型硅基光学相控阵在各自一维方向上产生特定的相位分布,从而控制光束在方位、俯仰方向上偏转相应角度,实现光束的二维空间扫描。

堆叠型光学相控阵需要多层硅光子结构的集成,不能通过外延生长等传统的实现。本系统中采用一种新的制造方法——微转印( $\mu\text{TP}$ )技术。该技术使用软的弹性体印模,逐层提起由供体基底制造的单层器件,然后在所谓的“印刷”步骤中他们将放置到目标基底上。微转印的重复使用可以在层叠的几何结构中产生三维结构的功能性器件。

在层叠后需要采用微纳加工等技术对器件进行后期处理。

二维综合扫描控制系统由 A 型相控扫描系统、B 型相控扫描系统和二维综合扫描控制系统构成,A 型和 B 型相控扫描系统主要由数模转换模块、电压驱动模块和系统电源模块等部分组成。二维综合扫描控制系统功能主要包括两个方面:一方面是实现 A 型和 B 型相控扫描系统的协同控制,实现光控阵二维空间的扫描;另一方面实现与天线系统外的整机系统进行信息交互。

## 2 高密度低串扰波导阵列设计与测试分析

半波长间距的相控阵可实现无栅瓣大角度扫描,是新一代相控阵激光雷达的关键技术。本系统采用半波长间距的波导超晶格实现高密度低串扰波导阵列,从而实现此目标。传统基于液晶与微电机(MEMS)反射镜的光学相控阵通常只能达到  $10\ \mu\text{m}$  左右的间距。而单个硅基光子波导尺寸较小,因而基于硅基光子波导元件的光学相控阵具有实现半波长间距的可能。

通过对现有的波导集成中的耦合理论进行分析,结合超晶格材料特性提出了基于波导超晶格思想,利用不同波导结构参数间波导的模式不匹配度,来设计波导阵列系统,以提出高密度波导集成



设计理论,同时进行了一系列数值仿真和测试,为这个问题的解决提供了一种较为可行的解决方案。波导超晶格的结构示意图如图5所示,一组精心设计的宽度不同的波导构成一个波导超元胞,波导超

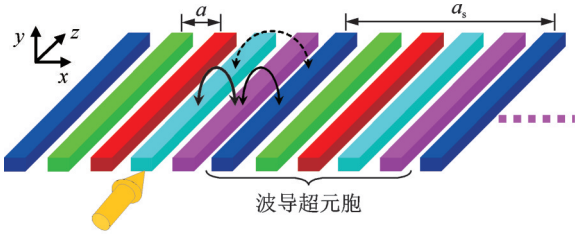


图5 波导超晶格结构示意图

Fig.5 Schematic of waveguide superlattice structure

$$|\psi\rangle \equiv \begin{pmatrix} \mathbf{E}_t(x, y, z) \\ \mathbf{H}_t(x, y, z) \end{pmatrix} e^{-i\omega t},$$

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} \omega\epsilon - \omega^{-1}\nabla_t \times \mu^{-1}\nabla_t \times & 0 \\ 0 & \omega\mu - \omega^{-1}\nabla_t \times \epsilon^{-1}\nabla_t \times \end{pmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{pmatrix} 0 & -\hat{z} \times \\ \hat{z} \times & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

上式中 $\epsilon(\mathbf{x})$ 为介电函数, $\mu$ 为真空磁导率, $\omega$ 是光的圆频率,对一个波导阵列,张量势 $\hat{A}$ 可以表示为:

$$\hat{A} = \hat{A}_0 + \Delta\hat{A}_1 + \Delta\hat{A}_2 + \Delta\hat{A}_3 + \dots \quad (3)$$

其中 $\hat{A}_0$ 是一个仅含包层材料(如 $\text{SiO}_2$ )的均匀介质的张量势。第 $n$ 个波导的张量势为:

$$\hat{A}_n = \hat{A}_0 + \Delta\hat{A}_n \quad (4)$$

对于仅具有第 $n$ 个波导的孤立结构,它的模式方程由式(5)给出:

$$|\psi_n\rangle = \exp(i\beta_n z) |n\rangle \quad (5)$$

这里的 $|n\rangle$ 满足 $(\hat{A}_n + i\frac{\partial}{\partial z}\hat{B})|n\rangle = \beta_n \hat{B}|n\rangle$ 。

第 $n$ 个波导的横截面以 $(x_{n0}, y_{n0})$ 为中心,宽度为 $w_n$ 。它的模式正交性由式(6)给出:

$$\langle m^* | \hat{B} | n \rangle = \delta_{mn} \eta_n |\eta_n| = 4P \quad (6)$$

这里 $P$ 指的是模式的光功率。这里的模式场间的内积可由交叠积分如下计算:

$$\langle \phi | \hat{B} | \phi' \rangle = \hat{z} \cdot [\mathbf{E}'^* \times \mathbf{H}'_t + \mathbf{E}'_t \times \mathbf{H}'^*] dxdy \quad (7)$$

注意对于一个波导模式, $\langle m^* | = \langle m |$ 。波导阵列的模式可以表示为:

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle = \sum_n c_n \exp(i\beta_n z) |n\rangle \quad (8)$$

由这种模式的形式可以获得系数 $c_n$ 所满足的一组方程如下式所示:

$$0 \approx \sum_n c_n \exp(i\beta_n z) \langle m | (\hat{A} - \hat{A}_n) | n \rangle + \sum_n i \frac{\partial c_n}{\partial z} \exp(i\beta_n z) \langle m | \hat{B} | n \rangle \quad (9)$$

元胞周期性延展形成超晶格。

为解决高密度波导阵列中的耦合与串扰问题,提出了一种适用于高折射率差的波导模式耦合理论。此理论基于光子晶体波导研究中相关理论,不以小折射率差为前提,故可以较好地处理硅基高密度波导的关键问题。假定波导轴沿 $z$ 方向,在任意波导截面内,全矢量的波导模式方程如式(1),其中, $\hat{A}$ 为波导全矢量的张量势, $|\psi\rangle$ 为模式方程, $\hat{B}$ 为方向矩阵, $\mathbf{E}_t, \mathbf{H}_t$ 为向量场<sup>[11]</sup>。

$$\hat{A}|\psi\rangle = -i\frac{\partial}{\partial z}\hat{B}|\psi\rangle \quad (1)$$

其中:

$$\mathbf{E}_t \equiv \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_t \equiv \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

$$\hat{B} = \begin{pmatrix} 0 & -\hat{z} \times \\ \hat{z} \times & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

研究将忽略后向导模,其传播常数为负,与前向导模的传播常数( $\beta > 0$ )有很大差异。由于前向和后向模式之间 $\beta$ 的差异较大,两者之间的串扰通常比正向模式之间的前向串扰项小一个数量级以上。该矩阵 $\langle m | (\hat{A} - \hat{A}_n) | n \rangle$ 可被认为是扰动,因此可以定义一个扰动矩阵 $\Delta A$ ,其元素是:

$$[\Delta A]_{mn} = \langle m | (\hat{A} - \hat{A}_n) | n \rangle \quad (10)$$

系数 $c_n$ 可以从式(11)中求解:

$$[B][e^{i\beta_n z}(-i\partial c_n/\partial z)] \approx [\Delta A][e^{i\beta_n z}c_n] \quad (11)$$

在第 $m$ 个波导的最后场振幅(包络函数)由式(12)给出:

$$u_m(z) = \langle m | B | \psi(z) \rangle \approx \sum_n \langle m | B | n \rangle c_n \exp(i\beta_n z) \quad (12)$$

每个波导中相应的光功率可以相应地计算。方程式(11)~(12)可以用来设计亚波长间距、低串扰的波导阵列。

对于波导超晶格,正式求解耦合波方程时,引入以下含相位信息的模式耦合系数在某些情况下更为方便:

$$\tilde{c}_n = e^{i\Delta\beta_n z} c_n \quad (13)$$

耦合系数 $\tilde{c}_n$ 满足一个更简单的方程

$$-i(\partial/\partial z)[\tilde{c}_n] \approx [K][\tilde{c}_n] \quad (14)$$

其中

$$[K] = [B]^{-1}[\Delta A] + [\Delta\beta_n \delta_{mn}] \quad (15)$$

这里的 $[K]$ 矩阵将在随后的讨论中提供更多的便利。由于波导超晶格的设计自由度很大(各种波

导宽度组合形成超元胞的可能性众多),而通用仿真技术如FDTD仿真一个结构的时间太长。尤其是考虑毛糙侧壁产生的随机散射串扰时,仿真需要极细的空间网格并对大量的随机构型一一仿真,计算量与内存需要量极其庞大。为此需要从理论上找到波导超晶格中低串扰的关键特征,以期迅速发现低串扰的波导超晶格。

依据此理论初步设计了单个超元胞包含5个波导的超晶格,波导间距 $\leq 1 \mu\text{m}$ (由于仿真计算量限制,考虑了两个超元胞。先前的理论与实验表明,两个超元胞的耦合串扰特性足以表征超晶格的串扰特性),其在 $1.5\sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段的各通道传输、串扰特性 $T(i,j)$ 如图6所示。其中 $i$ 为入射波导序号, $j$ 为出射波导序号。 $T(i,i)$ 为第 $i$ 个波导的直通透射率, $T(i,j)$ 为第 $i$ 个波导至第 $j$ 个波导的最大串扰(统计平均值)。计算过程中考虑了粗糙侧壁产生的散射的影响,对随机构型做了统计平均。图6中所有串扰皆低于 $-20 \text{ dB}$ 。根据一维光学相控阵偏转角 $\theta_s = \arcsin[\lambda\Delta\phi/2\pi d]^{[12]}$ ,可得扫描范围 $TFOV = \pm \arcsin[\lambda\Delta\phi/2\pi d]$ ,其中, $\Delta\phi$ 为相邻阵元之间的相位差, $\lambda$ 为波长, $d$ 为阵列单元间距 $1.2 \mu\text{m}$ ,则此结构的扫描范围可以达到 $80^\circ$ 以上,满足本系统的目标需求。预期未来再优化设计,配合对工艺参数的评估,进一步提升性能。

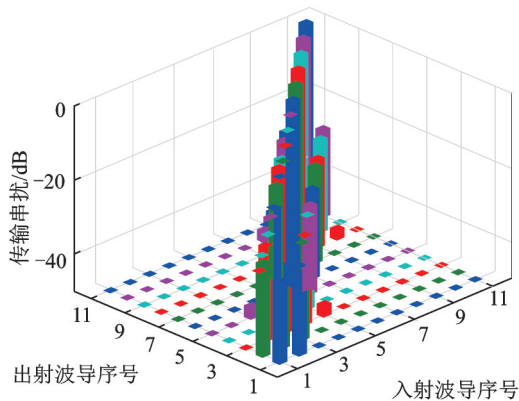


图6 亚波长间距波导超晶格串扰仿真结果

Fig.6 Simulation results of subwavelength spacing waveguide superlattice crosstalk

根据波导超晶格设计方法,从图7的测试结果可以看出,当中心波长为 $1550 \text{ nm}$ 时,串扰统计分布大部分集中在 $-20 \text{ dB}$ 到 $-40 \text{ dB}$ 区间范围内,从而可以保证高密度集成的波导阵列不会受到临近通道干扰导致近场相位失配。

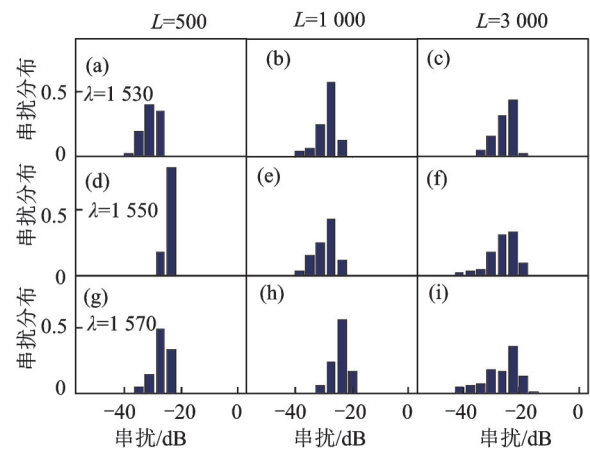


图7 波导超晶格结构串扰统计分布

Fig.7 Statistical distribution of crosstalk in waveguide superlattice structures

### 3 层叠光学相控阵制作与测试分析

级联式二维光学相控阵的一个主要实现途径是采用多层结构,然而常规多层硅基光学相控阵设计要求不同层结构间高精度对准,工艺实现难度大。文章采用的堆叠型光学相控阵虽然是多层结构,但由于采用了平板波导设计,平面内无特别需要对准的结构,因此无需考虑层间高精度对准问题,解决了多层光学相控阵器件的一个难题。

级联二维扫描相控阵需要多层硅光子结构的集成,所需的多层结构不能通过外延生长等传统的技术实现。本项目采用一种新的制造方法,采用微转印技术制备多层材料薄膜,能够极大的降低堆叠型光学相控阵制作风险,提高制成率。相对的,基于微转印技术和薄膜堆叠技术制作的多层光学相控阵的技术难度随着阵元数量增大会明显提高。该技术使用软的弹性体印模,逐层提起由供体基底制造的单层器件,然后在所谓的“印刷”步骤中将它们放置到目标基底上。薄膜转移堆叠过程的重复使用可以在层叠的几何结构中产生三维结构。

无论需要转移和堆叠的薄膜是怎样的材质,薄膜转移堆叠技术有一些共性的技术难点。第一,在堆叠的过程中,要保证薄膜之间不能有颗粒或污染物,否则堆叠的薄膜就不平整,薄膜与接受基底或者薄膜与薄膜之间的附着力降低,有可能造成薄膜的脱落;第二,有些应用需要把薄膜在堆叠过程中和已有的微结构进行对准,精确对准也是薄膜堆叠的一个难点。本项目所需成品的特点是薄膜面积较大而不需要高精度的对准,这一特点决定了有效

规避堆叠过程的颗粒或污染物带来的不平整是本研究项目的关键点,其堆叠过程和结果如图8所示。

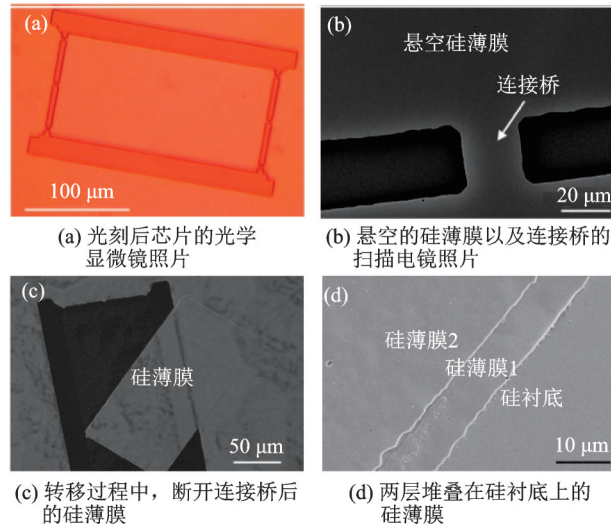


图8 层叠过程图像

Fig.8 Images of the stacking process

为保证堆叠型光学相控阵的工作,一个关键条件是单层波导结构必须与其他层波导无串扰。考虑到常见SOI晶圆的顶层硅的厚度定制价格较高,文中采用所有波导层均为统一厚度220 nm。为消除串扰,将层间距暂定为4 μm,可以实现15°扫描角度,如图9所示。后续可通过定制不同厚度的多层波导来实现较小的层间距,扩大扫描角度。

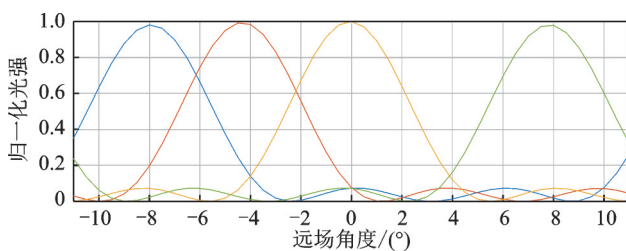


图9 四通道堆叠型光学相控阵光束偏转情况

Fig.9 Deflection results of four-channel stacked optical phased array beams

并且,A型光学相控阵控制水平方向光束偏转,B型光学相控阵控制垂直方向偏转,两者相互独立。根据光学相控阵原理,可以得出级联型光学相控阵角度控制可以达到 $\geq 80 \times 15^\circ$ 的角度偏转范围。

## 4 结论

目前,国内外都加大了对片上激光雷达天线系

统的研究,部分研究机构已进入了关键技术和核心模块攻关阶段,但也存在着一些需要进一步解决的技术问题,如:栅瓣抑制技术优化问题,即如何在保证波束角足够小的情况下设计非等间距波导放置方案,有效的抑制旁瓣;提高出射功率问题,即如何优化芯片结构设计,进一步降低相关耦合、传输损耗;以及如何优化加工工艺,增加阵列规模,实现更大规模相控阵列硅基波导芯片的制备,从而提高扫描精度等问题。总之,片上激光雷达具有的光学相控阵非机械可编程扫描控制,体积小、重量轻、功耗低、精度高、响应快并可采用硅基光子集成和CMOS兼容工艺研制,成本低的特点,使得其应用前景广阔,既可在无人系统中应用,也可在智能网联车、智能穿戴、反恐、侦察、导航等环境感知领域应用,特别适用于对空间、体积要求苛刻的场合。

文章通过对基于级联式的硅基光学相控阵激光雷达天线技术的研究,研制了一套基于A型一维平面波导相控阵和B型一维层叠平板相控阵的光学相控阵天线,并进行了仿真和试验验证。结果表明A型一维平面波导相控阵在耦合强度最高的近邻波导之间的光学串扰集中在-20 dB到-40 dB区间范围,扫描角度大于80°,B型一维层叠平板相控阵可以实现15°扫描角度,从而实现级联型光学相控阵不小于 $80 \times 15^\circ$ 的二维扫描角度,为片上激光雷达的最终芯片化实现提供了重要的技术支撑。

## 参 考 文 献

- [1] Acoleyen K V, Bogaerts W, Jagerska J, 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.
- [2] Acoleyen K V, Komorowska K, Bogaerts W, et al. One-dimensional off-chip beam steering and shaping using optical phased arrays on silicon-on-insulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(23):3500-3505.
- [3] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493(7431):195-199.
- [4] Guan B, Qin C, Scott R P, et al. Hybrid 3D photonic integrated circuit for optical phased array beam steering[C]. CLEO, San Jose, California, United States, 2015:1-2.
- [5] Hutchison D N, Sun J, Doyle J K, et al. High-resolution aliasing-free optical beam steering[J]. Optica, 2016, 3(8):887-890.
- [6] Zhao C, Peng C, Hu W. Blueprint for large-scale silicon optical phased array using electro-optical micro-ring pixels[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):17727-17739.
- [7] Wang Pengfei, Luo Guangzhen, Xu Yang, et al. Design and fabrication of SiN-Si dual-layer optical phased array chip[J]. Photonics Research, 2020, 8(6):912-919. (下转第279页)