

# 硅基光电子集成光控相控阵的研究进展

庄东炜, 韩晓川, 李雨轩, 宋俊峰

吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012

**摘要** 光控相控阵(OPA)不需要机械转动即可实现光束在空间内的扫描,在激光测距以及自由空间光通信等领域具有广阔的应用前景。硅基光电子集成技术可在芯片上实现光电子器件的大规模集成,并与互补金属氧化物半导体(CMOS)集成电路工艺技术完全兼容,以其制作的光控相控阵具有扫描速度快、体积小、成本低、功耗低等特点。目前报道的利用硅基光电子集成技术制作的相控阵,最大的横向扫描范围为 $80^\circ$ ,最大的纵向扫描范围为 $36^\circ$ 。简述了硅基光电子集成相控阵的扫描原理,并对国内外最新的研究成果进行了分析总结,最后指出此种技术实用化过程中亟待解决的关键问题,并提出了一些可以提升性能的方案。

**关键词** 光电子学; 光控相控阵; 集成光电子器件; 光束扫描; 激光雷达

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.050001

## Silicon-Based Optoelectronic Integrated Optical Phased Array

Zhuang Dongwei, Han Xiaochuan, Li Yuxuan, Song Junfeng

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

**Abstract** Optical phased array (OPA) can realize beam scanning in space with no need of mechanical rotating. It has a universal application prospect in many fields, such as laser ranging and free-space optical communications. Silicon-based optoelectronic integration technology can integrate large scale optical devices on the chip and fully compatible with CMOS integrated circuit technology. OPA based on this technology has the characteristics of fast scanning speed, small volume, low cost and low power consumption. At present, the maximum of scan range of OPA fabricated by silicon-based optoelectronic integration technology is  $80^\circ$  in horizontal direction and  $36^\circ$  in vertical direction. We briefly introduce the scanning principle of OPA. The newest research results at home and abroad are summarized and analyzed. Finally, the key issues that need to be solved are discussed and some solutions to improve performance are proposed.

**Key words** optoelectronics; optical phased array; integrated optoelectronic devices; beam scanning; laser lidar

**OCIS codes** 130.0250; 230.3120; 230.2090; 280.5110

## 1 引言

激光和光电子技术的发展,使人们可以把激光这种特殊的电磁波应用于雷达系统。激光光源的波长范围为 $250\text{ nm}\sim 11\text{ }\mu\text{m}$ ,可以探测非常微小的目标,如大气分子与气溶胶<sup>[1]</sup>。激光光源具有发散角小、能量集中、相干性好等优点,所以激光雷达的角分辨率、速度分辨率和距离分辨率非常高<sup>[2]</sup>。传统

的机械式激光雷达技术比较成熟,整体装置由万向节、旋转平面反射镜、三棱镜等器件组成<sup>[3]</sup>,其扫描角度大、损耗小,但是在扫描过程中需要机械转动,响应速度慢且体积庞大<sup>[4]</sup>。光控相控阵(或光学相控阵,OPA)与微波相控阵原理类似<sup>[5]</sup>,主要利用光束间的相位差控制光束方向。其主要的优点是不需要机械转动就可以完成扫描,相比传统的光束扫描装置,极大地减小了尺寸,降低了能耗。

收稿日期: 2017-10-24; 收到修改稿日期: 2017-12-01

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFE0200700)、国家自然科学基金(61627820)

作者简介: 庄东炜(1994—),女,硕士研究生,主要从事激光雷达方面的研究。E-mail: 631462974@qq.com

导师简介: 宋俊峰(1971—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事硅基光电子集成器件与系统方面的研究。

E-mail: songjf@jlu.edu.cn(通信联系人)

传统工作中,常用来实现光控相控阵的材料有铌酸锂<sup>[6-7]</sup>、液晶<sup>[8-9]</sup>、压电陶瓷<sup>[10-11]</sup>。铌酸锂制作的相控阵主要利用普克尔效应和克尔效应,实现电场对光波导相位的调控,光束扫描的速度很快,可达皮秒(ps)量级,但操作电压高,功耗非常大,扫描角度较小。此外,相对较大的相移器间隔、小的孔径填充因子和较大的插入损耗也阻碍了它的发展<sup>[12]</sup>。液晶技术的优点是所需驱动电压较低、功耗小、使用寿命长、扫描角度较大,缺点是热稳定性差,工作波长范围受限制且响应速度较慢,响应速度通常为毫秒(ms)量级。压电陶瓷电光系数大、透射光谱宽、损耗低且价格便宜,利用压电陶瓷实现光控扫描速度较快,一般为纳秒(ns)量级,但是所需的工作电压非常高(约为1 kV)且造价较高<sup>[13]</sup>。

随着硅基光子集成技术的迅猛发展,硅基光子学技术已被广泛研究,在一个芯片上可以集成成千上万个光子器件<sup>[14-15]</sup>。利用硅基光子集成技术制作的器件,工作在光通信波段,可以与光纤网络直接互联。相比传统的工作在可见光波段和近红外

波段的器件,此工作波段处于人眼安全的范畴(1.4~2.0  $\mu\text{m}$ )<sup>[16]</sup>,有利于光控相控阵的产品进入民生领域。同时由于硅基光子技术与集成电路技术完全兼容,可在单片上同时集成光束扫描器件与电控制逻辑电路,有利于实现智能化控制和神经网络集成等。

## 2 光控相控阵的光束扫描原理

光控相控阵技术是一种光束指向控制技术,相位调制光控相控阵的原理示意图如图1所示。激光光源经过光分束器后进入光波导阵列,在波导上通过外加控制的方式改变光波的相位,利用波导间的光波相位差实现光束的扫描,其原理类似于多缝干涉。光波导阵列中的每根波导都相当于一个光发射源,每个光发射源都相当于多缝干涉中的狭缝。光在空间中传播并干涉,最终光的能量在某方向因干涉加强而集中,而在其他方向上因干涉相消而减弱,从而可改变光束的传播方向,实现扫描。

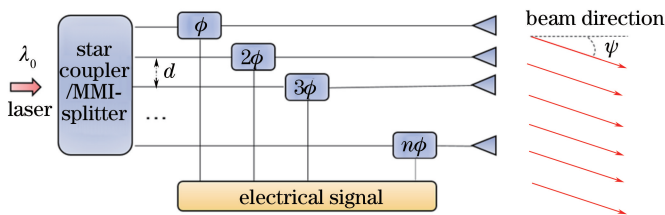


图1 相位调制光控相控阵的原理示意图

Fig. 1 Schematic of phase modulation optical phased array (OPA)

利用热光相位调制可以实现光束的扫描,图1即为利用热光相位调制扫描的例子,使用星形耦合器或多模干涉(MMI)分束器的组合将光束分为 $n$ 束,之后进入相控阵实现光束转向,光束发射角 $\psi$ 的表达式为<sup>[17]</sup>

$$\sin \psi = \frac{\lambda_0 \phi}{2\pi d}, \quad (1)$$

式中: $\phi$ 为等间距波导之间的均匀相位差; $d$ 为发射器间距; $\lambda_0$ 为自由空间波长。当改变相位差 $\phi$ 时,

光束发射角 $\psi$ 也随之改变。利用相位调制实现光束扫描的主要优点是扫描角度较大,缺点是当波导间距 $d$ 较大时,扫描的光束会出现不被期望的旁瓣。对于规则的相控阵,只有当 $d < \lambda_0/2$ 时,旁瓣才可以被有效地抑制<sup>[18]</sup>。

利用光栅耦合器也可以实现光束扫描,此方法主要是通过改变入射激光的波长改变光束的传播方向,常用的利用光栅耦合器实现扫描的示意图如图2所示,光束发散方向 $\theta$ 与波长的关系可表示为<sup>[19]</sup>

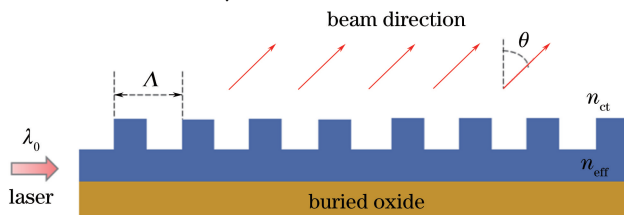


图2 利用光栅耦合器实现扫描的示意图

Fig. 2 Schematic of grating coupler for beam scanning

$$\sin \theta = \frac{\Delta n_{\text{eff}} - \lambda_0}{n_{\text{ct}} \Lambda}, \quad (2)$$

式中： $\Lambda$  为光栅的周期； $n_{\text{eff}}$  为导模有效的折射率； $n_{\text{ct}}$  为背景的有效折射率。利用改变波长实现光束扫描，主要的优点是无需电控，避免了所施加电极之间因距离过近产生的干扰；缺点是扫描角度较小。

### 3 硅基光电子集成光控相控阵的研究进展

#### 3.1 一维扫描光控相控阵

美国加利福尼亚大学的 Trinh 等<sup>[20]</sup> 早在 1997 年就在绝缘体上硅(SOI)晶片上制作了波长多路复用器。用阵列波导结构实现了波长调节光束角度的功能。四通道信号间隔为 1.9 nm, 相邻信道的串扰低于 22 dB, 通道的插入损耗低于 6 dB。事实上, 所有任意波形发生器(AWG)波分复用器件, 本质都是波长调节的光控相控阵器件, 但所扫描的角度仅在芯片平面上。

2011 年, Kwong 等<sup>[21]</sup> 在 220 nm 的 SOI 芯片上, 用非均匀波导密度分布的方法利用纳米薄膜制作了 12 通道的光波导相控。利用热光效应调控波导间的相位差实现光束扫描, 热光调相器的长为 500  $\mu\text{m}$ , 宽为 800 nm。光源为片外激光源, 工作波长为 1550 nm, 扫描范围为 10.2°。当光从硅波导出射到空气中时, 由于硅和空气之间的折射效应, 角度扫描范围被放大到 31.9°, 扫描频率为 100 kHz。这在一定程度上, 克服了周期型光波导相控阵相邻波导之间的耦合效应。

2011 年, van Acoleyen 等<sup>[22]</sup> 在绝缘体硅上制作了一维扫描的集成光控相控阵, 利用星形耦合器进行分光, 相位调节部分共有 16 根波导, 工作波长为 1550 nm, 利用热光效应实现了 23° 的一维扫描。此外, 将波长分别为 1520 nm 和 1580 nm 的光源与相控阵耦合进行实验, 证明了光束可在另一方向实现扫描, 波长每变化 60 nm, 光束偏转 6.7°。

2012 年, Doylend 等<sup>[23]</sup> 在混合硅平台上实现了一维光束扫描, 片上集成激光源的光控相控阵示意图如图 3 所示, 器件的整体尺寸为长度为 16 mm, 宽度为 4 mm, 波导总数为 8, 片上集成了单色激光源。实现了一维空间的扫描, 扫描角度为 12°, 横向波束角为 1.8°, 纵向波束角为 0.6°。激光主瓣功率为 4.1 mW, 背景抑制为 7 dB, 指向精度为 0.3°。采用了硅基混合集成技术, 使激光光源的集成成为可能, 解决了片外激光光源耦合带来的损耗, 同时减小了器件的整体尺寸。

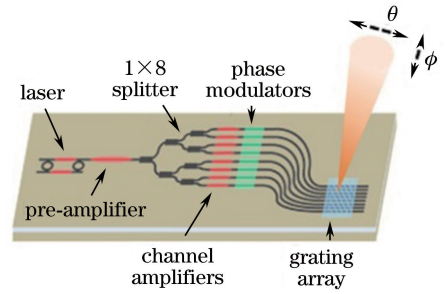


图 3 片上集成激光源的光控相控阵示意图

Fig. 3 Schematic of OPA integrated with on-chip laser

2014 年, Yaccobi 等<sup>[24]</sup> 实现了一维方向上的大角度扫描, 工作波段为 1550 nm, 扫描角度为 51°, 扫描速度为 100 kHz。该光控相控阵发射端波导采用规则等间距排布, 波导总数为 16 根, 波导之间的间隔为 2  $\mu\text{m}$ , 每根波导的长度为 32  $\mu\text{m}$ 。当采用热光效应调节波导相位时, 由于加热的区域比较小, 只有当加热温度达到 500 °C 以上时, 附加波导相位差才可以达到 2 $\pi$ 。以上的实验结果均基于 C 波段, 但此结构同样适用于 1.2~3.5  $\mu\text{m}$  中的任意波段。装置中的光束转向连续且高速, 最高可达 5 $\times 10^6$  (°)·s<sup>-1</sup>。器件基于标准的 300 mm CMOS 工艺制作, 可以大批量生产, 适用于低成本激光雷达系统。

国内对一维扫描的硅材料光控相控阵也有研究。2005 年, Xiao 等<sup>[25]</sup> 提出了利用非周期分布的阵列光波导设计相控阵, 此相控阵是通过改变波长对波束进行控制, 且该结构对旁瓣有一定抑制作用<sup>[26]</sup>。2008 年, 该课题组在 SOI 材料上制作了 16 单元和 32 单元的非周期分布的光波导器件<sup>[27]</sup>, 这种装置由一系列不规则间隔的单模波导组成, 每一个波导都有一个特定的长度, 使一个适当的相位延迟可以被波长所控制。当光波长从 1550.7 nm 到 1551.9 nm 变化时, 可以实现 0°~3° 的连续光束扫描。

#### 3.2 二维扫描光控相控阵

2009 年, van Acoleyen 等<sup>[28]</sup> 在 SOI 晶片上制作了 16 根波导组成的光控相控阵, 在硅芯片上实现了二维光束扫描。当激光源为片外激光源, 波导宽度为 800 nm, 波导之间间距为 2  $\mu\text{m}$ , 工作波长为 1550 nm 时, 通过施加钛电极的方式控制用于横向扫描的波导的相位, 横向扫描范围为 2.3°。当波长在 1500~1600 nm 范围内变化时, 纵向扫描范围为 14.1°。但由于波导之间的设计问题, 相位差较小, 所以横向扫描角度相对较小。

2010年, van Acoleyen 等<sup>[29]</sup>提出了可用于二维空间光束转向的光控相控阵结构。验证了光束在一个方向上的扫描结果,工作的主要波段为1550 nm,光束转向速度为 $0.24 (^{\circ})\cdot\text{nm}^{-1}$ 。通过增加各模块之间延迟部分的长度,可以有效地增加此光束的转向速度。天线损耗小于3 dB,光束二维方向的扫描可以通过添加相位调谐器实现。

2011年, Doyle 等利用 SOI 制作了16通道光栅阵列集成结构,实现了对二维光束的控制<sup>[30]</sup>。两个维度上的扫描彼此独立,通过在波导附近施加可加热的电阻控制波导之间的相位差,电阻约 $65 \Omega$ ,每根波导上430 mV的驱动电压可以实现 $2\pi$ 相移,从而可利用相位调制实现扫描。在激光源波长为1555 nm时测得横向扫描范围为 $20^{\circ}$ 。利用波长变化实现光束扫描,当波长在1525~1625 nm范围变化时,纵向扫描范围为 $14^{\circ}$ ,扫描角度随激光波长的变化率为 $0.14 (^{\circ})\cdot\text{nm}^{-1}$ ,此结果前后偏差不超过 $0.01^{\circ}$ 。波长变化实现纵向扫描的速度比利用热光效应实现的横向扫描速度慢。该芯片产生的波束角为横向 $0.6^{\circ}$ 、纵向 $1.6^{\circ}$ ,远场分辨率小于 $1^{\circ}$ ,背景抑制为10 dB。

2011年, van Acoleyen 等<sup>[31]</sup>采用 SOI 技术制

作了全集成的二维偏转光控器件。Roelkens 等<sup>[32]</sup>提出在制作过程中,可采用多晶硅覆盖技术获得更高耦合效率的方案。激光光束耦合进入器件后,经过星形耦合器,再均匀进入16条均匀分布的波导,各波导间距为 $2 \mu\text{m}$ 。首先通过阵列波导光栅延迟线实现横向扫描,之后经过光栅耦合器实现纵向扫描,光栅耦合器的光栅周期为670 nm。光束在两个方向上的扫描都是通过波长的变化实现的,当波长在1500~1600 nm范围变化时,测得横向扫描角为 $50^{\circ}$ ,纵向扫描角为 $15^{\circ}$ ,扫描角随波长变化率最大为 $10.7 (^{\circ})\cdot\text{nm}^{-1}$ 。

2013年, Sun 等<sup>[33]</sup>将4096 ( $64\times 64$ )个光栅发射天线集成在一块 SOI 芯片上,图4(a)为大规模纳米光控相控阵示意图,插图是单个天线的特写,每个波导天线的尺寸为 $9 \mu\text{m}\times 9 \mu\text{m}$ 。图4(b)为部分结构的电子显微镜图,图4(c)为单个天线的电子显微镜图。封装后整体芯片尺寸为 $576 \mu\text{m}\times 576 \mu\text{m}$ 。对采用此种结构 $8\times 8$ 大小的组合进行测量,波长为1550 nm的激光源耦合到工作的总线波导上,光功率在纳米天线中均匀分布,嵌入式的相位调谐使得不同模块之间的光互相结合后产生一个期望的远场辐射模式,此远场辐射模式可以根据不同要求动态变化。

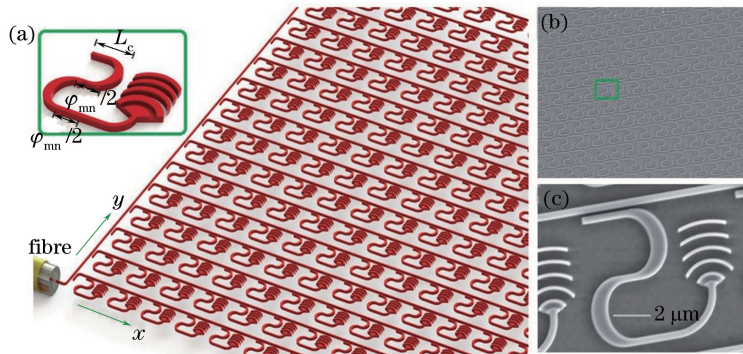


图4 (a)大规模纳米光控相控阵示意图,插图为单个天线的特写;(b)部分结构的电子显微镜(SEM)图;  
(c)单个天线的电子显微镜图

Fig. 4 (a) Schematic of large-scale nanophotonic phased array, the inset is close-up view of one antenna unit;  
(b) scanning electron microscope (SEM) of part of whole structure; (c) close-up SEM of one antenna unit

2014年, Sun 等<sup>[34]</sup>在上述结构的基础上,在 $8\times 8$ 大小的集成波导阵列上制作了加热区。工作波段为1550 nm,天线间的间距为 $9 \mu\text{m}$ 。在水平和垂直两个方向均可以实现 $12^{\circ}$ 的扫描。该方案可被应用于自由光通信、激光成像等领域。

2014年, Kwong 等<sup>[35]</sup>通过增加波导加热区的长度差改进了加热区的设计,此结构基于芯片式,一共包含16根波导,在250 nm的绝缘体硅平台,通

过热光的组合调节波导的相位,当每个波导上施加的功率为20 mV时,可以实现 $\pi$ 相移。波束角为横向 $1.2^{\circ}$ ,纵向 $0.5^{\circ}$ 。扫描角度为横向 $20^{\circ}$ 和纵向 $15^{\circ}$ ,旁瓣小于10 dB。

2014年, Wang 等<sup>[36]</sup>提出基于边缘耦合器和硅集成技术的光控相控阵,通过仿真证明了此结构可以实现大于 $20^{\circ}$ 的光束转向,工作带宽为1530~1585 nm。2015年,该小组在此基础上用边缘耦合

器和一个  $2 \times 2$  的硅集成光控相控阵实现了二维方向上的光束转向<sup>[37]</sup>,在波长 1550.91 nm 下测得转向的范围在横向和纵向上都超过了  $30^\circ$ 。该器件可以在 1500~1600 nm 之间的任意波长工作,拥有超过 100 nm 的工作带宽。由于波导之间的横向间距略大于纵向间距,所以当施加的移相相同时,横向的光束扫描角小于纵向的光束扫描角。

2015 年, Hulme 等<sup>[38]</sup> 设计了硅基混合集成的自由空间光束转向芯片,全集成光束扫描器件整体布局如图 5 所示。这块集成电路上包括激光光源、光电二极管、相位调谐器,光栅耦合器、功率分束器、渐变折射率 (GRIN) 透镜等 9 种光学元件,元件总

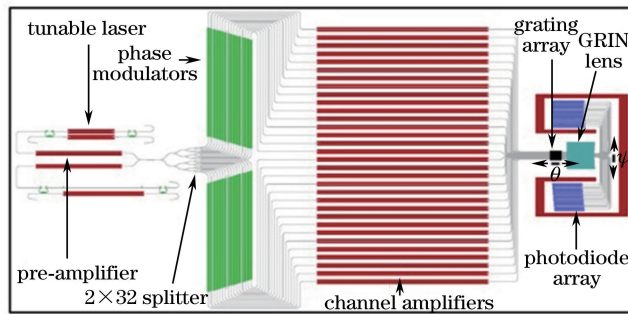


图 5 全集成光束扫描器件整体布局

Fig. 5 Overall arrangement of fully integrated beam scanner

2015 年, Abediasl 等<sup>[39]</sup> 提出了一个单片集成的二维光控相位阵列收发器,商用 CMOS SOI 工艺下,有完整的集成电子控制,每个元素都具有独立的振幅和相位控制,可产生任意辐射方向图。此方案成本低,适用于未来的传感、成像、测距和量子安全等领域。

2015 年, Guan 等<sup>[40]</sup> 报道了用硅平面光波电路 (PLC) 与三维 (3D) 波导的混合集成光控相控阵,混合集成光控相控阵示意图如图 6 所示,与以往实现光束转向所采用的方法不同的是,他们不需要波长可调谐的激光源,而是采用单色片外激光源,从而大

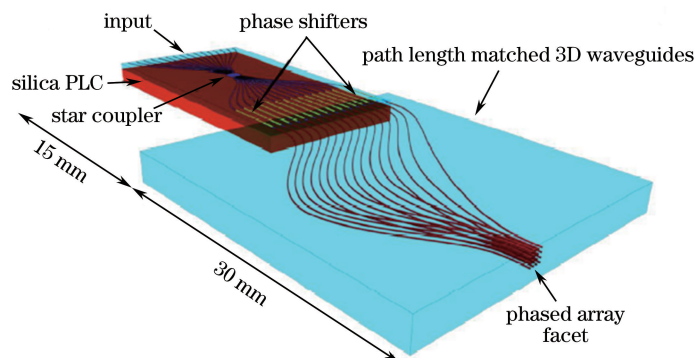


图 6 混合集成光控相控阵示意图

Fig. 6 Schematic of hybrid-integrated OPA

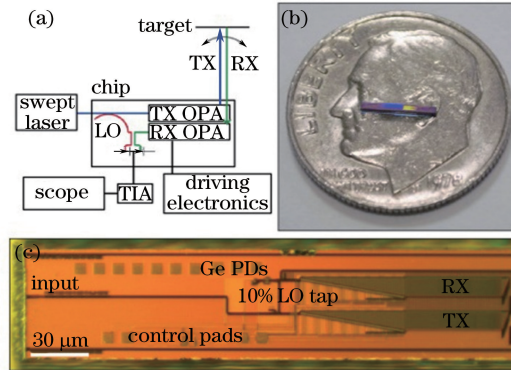
数达到了 164 个。器件的顶硅厚度为 500 nm,掩埋氧化层厚度为  $1 \mu\text{m}$ 。芯片整体尺寸为  $6 \text{ mm} \times 11.5 \text{ mm}$ 。布局中共有两处使用了光放大器,分别是激光源后、分束器前长度为 1.5 mm 的前置光放大器与相位调制波导后、耦合光栅之前长 3 mm 的光放大器。两处放大器的使用,在一定程度上克服了由于片上激光光源功率较小所带来的探测距离较短的问题。在背景抑制为 5.5 dB 的情况下,对远场中 138 个可分辨的点进行测试。波束角为横向  $1^\circ$ ,纵向  $0.6^\circ$ 。实现了横向  $23^\circ$  的扫描。同时集成的激光源为可调谐激光源,波长在 1555~1605 nm 范围变化时实现纵向  $3.6^\circ$  的扫描。

大降低了成本。激光进入中心波导后,星形耦合器均匀地将光分配到 16 根具有热光移相器的波导上,每根波导上都集成了相位调节器,移相器调节选取适当的相位调节值后经过三维立体  $4 \times 4$  的波导结构,生成需要的远场辐射模式,此时设备便可以在两个维度中任意地引导光束。工作波长为 1550 nm 时测得该结构支持  $4.93^\circ$  的横向和纵向转向,整体损耗为 7.1 dB。

2016 年,为了减轻制造引起的相位噪声, Poulton 等<sup>[41]</sup> 设计了一个简单而紧凑的相控阵。该光控相控阵由 50 个波导天线组成,在远场模式下,

激光主瓣功率为 1 mW, 光斑大小为  $0.85^\circ \times 0.18^\circ$ 。通过每个天线结构中的 5.7 k $\Omega$  电阻实现横向上的光束扫描, 当外加电压为 12 V 时, 可以实现  $2\pi$  相移。工作波长为 1550 nm 时, 测量横向扫描范围为  $46^\circ$ , 当波长在 1454~1641 nm 范围变化时, 可以实现纵向扫描, 纵向扫描范围为  $36^\circ$ 。2017 年, 该小组利用此结构构建了激光雷达系统<sup>[42]</sup>, 调频连续波 (FMCW) 全固态激光雷达设计方案如

图 7(a) 所示, 一角硬币上的激光雷达晶片如图 7(b) 所示, 设备的光学显微图如图 7(c) 所示。发射端采用调频连续光, 接收端采用锗材料, 通过产生频率不同的本地拍频和接收到的信号混频实现相干探测。采用三角测量的方法, 对远近不同的三个目标进行了距离测量, 探测距离为 2 m, 测距分辨率为 20 mm, 首次实现了全固态相干模式下的光探测和测距。



LO: local oscillator; TIA: trans-impedance amplifier; RX: receiver; TX: transmitter

图 7 (a) 调频连续波全固态激光雷达设计方案; (b) 一角硬币上的激光雷达晶片; (c) 设备的光学显微图

Fig. 7 (a) Schematic of solid-state FMCW lidar system; (b) lidar chiplet on top of one dime; (c) optical micrograph of device

2016 年, Hutchison 等<sup>[43]</sup>报道了一种光控相控阵, 简化的装置示意图如图 8(a) 所示, 实际制作中使用了 128 根光波导。分束部分采用星形耦合器, 图 8(b) 为该星形耦合器的光学显微镜图, 图 8(c) 为移除包层的发射器的电子显微镜图, 内插图片为另一角度的发射器示意图。用热光效应调节相位, 采用了非均匀的光波导间距分布, 波导

之间的间距由计算机模拟优化得到, 可以使得波导之间的间距在大于二分之一波长的情况下仍然可以有效抑制旁瓣。测量得到横向扫描角度达到  $80^\circ$ 。光束的发散角很小, 平均值只有  $0.14^\circ$ , 最佳的一次结果为  $0.11^\circ$ 。采用片外可调谐激光源, 当激光源的波长在 1260~1360 nm 范围内变化时, 可实现纵向  $17^\circ$  的扫描。在二维扫描的整个范围中, 有约 60000 个可分辨的点。

国内对于二维扫描的光控相控阵的研究起步较晚, 大多处于理论研究阶段。2016 年, 胡薇薇等<sup>[44]</sup>提出了一种光控相控阵, 相对于传统的结构, 此结构提高了响应速度。但利用集成光电子集成技术实现光控相控阵的光束扫描, 乃至研制芯片式激光雷达, 国内尚未见报道。

## 4 集成 OPA 性能参数

目前报道的硅基光电子集成 OPA 性能参数的总结如表 1 和表 2 所示。表 1 和表 2 分别为一维扫描相控阵性能参数和二维扫描相控阵性能参数。表 1 和表 2 中的波束宽度为图 9 所示半功率点所对应的波束角, 表 2 中的水平方向均指利用热光效应实现光束扫描的方向 (横向), 垂直方向指通过改变波长利用光栅耦合器实现光束扫描的方向 (纵向)。

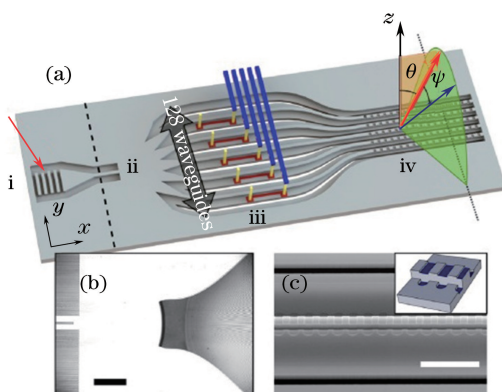


图 8 (a) 简化的装置示意图; (b) 星形耦合器的光学显微镜图; (c) 移除包层的发射器的电子显微镜图, 插图为另一个角度下的发射器示意图

Fig. 8 (a) Schematic of simplified structure of device; (b) optical microscope image of star coupler; (c) tilted SEM image of emitter with removed cladding, the inset is schematic of emitter at a different angle

表1 一维扫描相控阵性能参数

Table 1 Specifications of one-dimensional scanning phased array

Ref.	Laser source	Total number of waveguides	Wavelength / nm	Scanning angle / (°)	Beam width / (°) (steered axis)	Beam width / (°) (non-steered axis)
[21]	Off-chip	12	1550	10.2	—	—
[22]	Off-chip	16	1550	23	1.27	—
[23]	On-chip	8	≈1594	12	1.8	0.6
[24]	Off-chip	16	1550	51	3.3	—

表2 二维扫描相控阵性能参数

Table 2 Specifications of two-dimensional scanning phased array

Ref.	Laser source	Total number of waveguides	Wavelength / nm (horizontal direction)	Beam width / (°) (horizontal direction)	Scanning angle / (°) (horizontal direction)	Wavelength / nm (vertical direction)	Scanning angle / (°) (vertical direction)	Beam width / (°) (vertical direction)
[28]	Off-chip	16	1550	2.7	2.3	1500-1600	14.1	2.4-2.8
[30]	Off-chip	16	1555	0.6	20	1525-1625	14	1.6
[31]	Off-chip	16	1500-1600	3.5-4.0	50	1500-1600	15	3.5-4
[34]	Off-chip	8×8	1550	1.6	12	1550	12	1.6
[35]	On-chip	16	1550	1.2	20	1480-1580	15	0.5
[37]	Off-chip	2×2	1550.91	—	30	1550.91	30	—
[38]	On-chip	32	—	1	23	1555-1605	3.6	0.6
[40]	Off-chip	4×4	1550	—	4.93	1550	4.93	—
[41]	Off-chip	50	1550	0.85	46	1454-1641	36	0.18
[43]	On-chip	128	1300	0.14±0.02	80	1260-1360	17	0.142±0.005

目前硅基光电子集成相控阵技术还需要解决许多问题:

1) 扫描角度。从表1与表2中可以看出,目前OPA的横向扫描角度最大可达 $80^\circ$ ,纵向扫描角度最大为 $36^\circ$ 。在实际应用中,通常采用扩束镜增大两个方向上的扫描角度。此外,为了在增大横向扫描角度的同时,使设备整体更加小型化、智能化,可以通过集成光开关与多个相控阵的方法增大横向扫描角度。设备中各个相控阵的扫描区域不同,通过合理的设计,使光开关控制各相控阵的工作状态,可实现光束的扫描。

2) 旁瓣。对于利用夫琅禾费衍射效应制作的芯片式激光雷达,如果各个入射波导间距相同且大于二分之一波长,则会出现影响扫描质量的旁瓣。图9为极坐标系中典型的天线辐射方向图。最大辐射波束为主瓣,是实际扫描中所需要的波瓣。主瓣旁红色部分的小波束即为旁瓣。

相控阵常用的激光光源波长比微波小几个数量级<sup>[45]</sup>,若要将器件的尺寸缩小到半波长甚至更小,制作难度较大。当器件尺寸较小时,光线进入后会发生衍射,从而影响最终结果。若电极的宽度远小于两个电极之间的距离,会出现显著的边缘效应从

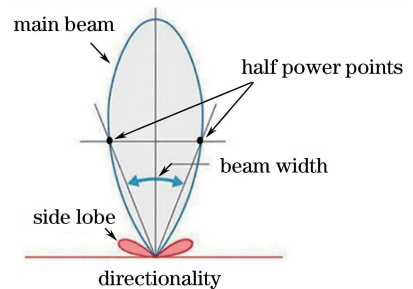


图9 极坐标系中典型的天线辐射方向图

Fig. 9 Typical directional antenna radiation pattern in polar coordinate

而影响移相器内电场的均匀性<sup>[46]</sup>。同时,由于两个电极之间的距离很小,电场作用非常显著,这也会影响器件的质量。对于传统的雷达天线,非等间距波导相控阵可以有效地抑制旁瓣并且有较小的波束角<sup>[47]</sup>。2016年,Intel公司的研究结果证明此种方法同样适用于波导形式的相控阵<sup>[43]</sup>。2017年,Komljenovic等<sup>[48]</sup>对稀疏非等间距的波导相控阵进行研究,对稀疏非周期相控阵列中影响光束扫描质量的波导数量以及波导间距等因素进行了分析,并且比较了包括线性和立方在内的波导放置策略,在保证波束角足够小的情况下设计了非等间距波导放置

方案,有效地抑制了旁瓣。此外,还指出若想通过此种方法设计更大规模的相控阵,可以采用平铺的方式。在光束扫描器件的实际应用制作中,还需要结合具体的应用场景和制作条件选取最适合的方案,具体的设计细节可以参考上述方法进行模拟与优化。

3) 探测距离。激光在传播的过程中,会与大气中的分子和微粒以及探测物体表面发生作用,产生吸收、散射、反射、漫射、折射和衍射等现象<sup>[49]</sup>;同时,受大气湍流效应影响,回波激光信号的相干性会被破坏且强度变弱<sup>[50]</sup>。探测距离与光控相控阵发射激光的光束质量有关,发射激光功率越大,能量越集中,峰值功率越高,探测距离越远。影响发射激光光束质量的因素包括光控相控阵中的波导之间的间距与波导数目。在波导数目相同的情况下,波导之间的间距过大会出现旁瓣从而影响光束质量;在波导之间间距相等的情况下,波导的数目越多,扫描激光光束的能量越集中,相反,波导的数目少,则激光的能量相对分散。在激光总功率一致的情况下,减小激光信号的脉宽,可以有效地增大峰值功率而使探测距离变大,所以脉冲压缩的窄脉冲常被用于激光雷达系统中。

当发射激光功率较小时,为了增大探测距离,提

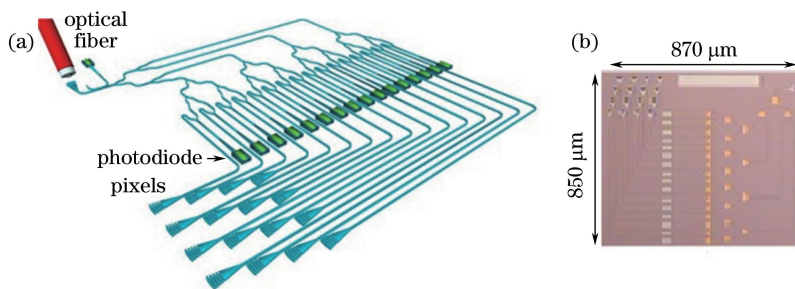


图 10 (a)硅光子相干成像器件示意图;(b)在标准 IME 硅绝缘体工艺上制作的硅光子相干成像器件的显微镜图  
Fig. 10 (a) Schematic of silicon nanophotonic coherent imager (NCI); (b) micro-photograph of NIC implemented by standard IME silicon-on-insulator process

4) 扫描精度。扫描精度与光控相控阵的远场光斑大小有关。传统的单晶硅波导结构紧凑体积小,热光系数大,调节相位较为容易,但是加工误差的容忍度较小,不利于实现相位的精确控制。而以氮化硅为材料的波导体积较大,热光系数小,工作电压高,但损耗小,加工误差容忍度较大,有利于实现相位的精确调控。2017 年,Poulton 等<sup>[53]</sup>利用氮化硅波导制作了可以工作在红外与可见光下的相控阵,波长 1550 nm 时,激光主瓣功率为 400 mW,光斑大小仅为  $0.021^\circ \times 0.21^\circ$ 。在不考虑器件尺寸的情况下,利用氮化硅波导制作光控相控阵有利于提高扫描精度。

高探测灵敏度,且使设备更加小型化,可以采用光子计数的方法,采用光电倍增管(PMT)或盖革模式的雪崩光电二极管(GM-APD)将回波信号转换为计数事件,充分利用回波信号,从而可实现更远距离的激光测距<sup>[51]</sup>。除此之外,激光的相干探测比直接探测精度高,作用距离更远。2015 年,Aflatouni 等<sup>[52]</sup>研究了芯片上相干光图像探测方法,硅光子相干成像器件示意图如图 10(a)所示,外部信号通过光栅耦合器进入芯片上的光波导,与本地激光信号相耦合,被硅光子集成探测器转换为电信号。图 10(b)为在标准 IME 硅绝缘体工艺上制作的硅光子相干成像器件的显微镜图。显然,该方法可以应用于激光雷达的探测中,以增加激光雷达的探测距离。在激光探测过程中,受大气湍流效应影响,激光的相干性被破坏,而相干探测要求本地信号与接收信号相干。因此,要实现片上激光相干探测还需要进一步研究激光信号与本地激光信号的耦合、外差相干结构及光电探测,包括集成光路外差相干效率的测试以及相干光电信号检测信噪比评估,同时需要优化芯片结构设计。

5) 加工工艺。高集成度的芯片式相控阵激光雷达对制作工艺提出了更高的要求。为了使得波导之间可以实现相位干涉,各波导之间需要有固定的相位差。在光刻和刻蚀的过程中,必须保证波导之间的均匀性和一致性。一般来说,曝光波长越短,曝光所得的图形越均匀。波导侧壁的垂直性和光滑程度受刻蚀过程中各种气体组分的影响,在实验过程中,必须合理地平衡各气体组分的比例,才能获得高质量的光波结构。因此,需要综合考虑包括曝光时间、能量、焦距、刻蚀气体组分的比例等因素。此外,若因加工器材等限制,所制作波导的均匀性和一致性无法满足要求,可通过在每根波导上都单独施加



电控单元调节相位偏差,如文献[43]所报道,128根波导上都施加了单独的电控单元,但此方法的缺点是电控部分的集成电路使系统变复杂。

## 5 结 论

随着科学技术的进步,小体积、高性能、低成本的芯片式全固态激光雷达必将得以实现并广泛进入民生领域。硅基光电子集成技术凭借成熟的CMOS工艺,可以实现高精度加工、大规模生产,硅基光电子集成OPA可以实现全固态二维扫描,其将成为芯片式全固态激光雷达的重要组成部分。

## 参 考 文 献

- [1] Song Y H, Shi L L, Wang Y F, *et al.* Retrieve of lidar ratio of aerosols by iteration[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0113001.  
宋跃辉, 时丽丽, 王玉峰, 等. 气溶胶激光雷达比的迭代反演[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0113001.
- [2] Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, *et al.* Application and development direction of lidar [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(5): 4-22.  
赵一鸣, 李艳华, 高雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 4-22.
- [3] Yan Z, Xu J. Research development of beam scanning technology [J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(4): 1-9.  
闫舟, 徐景. 光束扫描技术研究进展[J]. 光电技术应用, 2013, 28(4): 1-9.
- [4] Shi Y B, Si L, Ma Y X. New progress of beam scanning technology [J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2013, 50(8): 080024.  
师宇斌, 司磊, 马阎星. 光束扫描技术研究新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080024.
- [5] McManamon P F, Bos P J, Escuti M J, *et al.* A review of phased array steering for narrow-band electrooptical systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(6): 10664139.
- [6] Tien P K, Riva-Sanseverino S, Ballman A A. Light beam scanning and deflection in epitaxial LiNbO<sub>3</sub> electro-optic waveguides [J]. Applied Physics Letters, 1974, 25(10): 563-565.
- [7] Tsai C S, Li Q, Chang C L. Guided-wave two-dimensional acousto-optic scanner using proton-exchanged lithium niobate waveguide [J]. Fiber & Integrated Optics, 1998, 17(3): 157-166.
- [8] Tanone A, Zhang Z, Uang C M, *et al.* Optical beam steering using a liquid - crystal television panel [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1994, 7(6): 285-289.
- [9] Khan S A, Riza N A. Demonstration of 3-dimensional wide angle laser beam scanner using liquid crystals [J]. Optics Express, 2004, 12(5): 868-882.
- [10] Thomas J A, Fainman Y. Optimal cascade operation of optical phased-array beam deflectors [J]. Applied Optics, 1998, 37(26): 6196-6212.
- [11] Dong Z R, Ye Q, Qu R H, *et al.* Optical phased-array beam deflector based on lead lanthanum zirconate titanate electro-optic ceramic [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(3): 373-377.  
董作人, 叶青, 瞿荣辉, 等. 基于掺镧锆钛酸铅电光材料的光学相控阵光束扫描器[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 373-377.
- [12] Qu R H, Ye Q, Dong Z R, *et al.* Progress of optical array technology based on electro-optic material [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(12): 1861-1867.  
瞿荣辉, 叶青, 董作人, 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 1861-1867.
- [13] Wang Y C. Optical phased arrays laser radar system and performance analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 16-17.  
王耀川. 光学相控阵激光雷达系统及系统性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 16-17.
- [14] Bauters J F, Davenport M L, Heck M J R, *et al.* Silicon on ultra-low-loss waveguide photonic integration platform [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 544-555.
- [15] Subbaraman H, Xu X, Hosseini A, *et al.* Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects [J]. Optics Express, 2015, 23(3): 2487-2511.
- [16] Ding Y M, Du L H. Eye-safe laser technologies and applications [J]. Applied Laser, 1997, 17(1): 37-40.  
丁育明, 杜丽辉. 人眼安全激光器技术及应用[J]. 应用激光, 1997, 17(1): 37-40.
- [17] Burns D M, Bright V M, Gustafson S C, *et al.* Optical beam steering using surface micromachined gratings and optical phased arrays [C]. Optical Scanning Systems: Design and Applications. International Society for Optics and Photonics, 1997, 3131: 99-111.
- [18] Heck M J R. Highly integrated optical phased

- arrays: photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering[J]. *Nanophotonics*, 2017, 6(1): 93-107.
- [19] Mekis A, Gloeckner S, Masini G, *et al.* A grating-coupler-enabled CMOS photonics platform[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(3): 12036153.
- [20] Trinh P D, Yegnanarayanan S, Coppinger F, *et al.* Silicon-on-insulator (SOI) phased-array wavelength multi/demultiplexer with extremely low-polarization sensitivity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(7): 5619675.
- [21] Kwong D, Hosseini A, Zhang Y, *et al.*  $1 \times 12$  unequally spaced waveguide array for actively tuned optical phased array on a silicon nanomembrane[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(5): 051104.
- [22] van Acoleyen K, 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.
- [23] Doylend J K, Heck M J R, Bovington J T, *et al.* Hybrid III/V silicon photonic source with integrated 1D free-space beam steering [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4257-4259.
- [24] Yaacobi A, Sun J, Moresco M, *et al.* Integrated phased array for wide-angle beam steering[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(15): 4575-4578.
- [25] Xiao F, Hu W W, Xu A S. Optical phased-array beam steering controlled by wavelength[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(26): 5429-5433.
- [26] Xiao F, Li G Y, Xu A S. Cascade arrangement of irregular optical phased arrays [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(8): 1945-1949.
- [27] Xiao F, Li G Y, Li Y P, *et al.* Fabrication of irregular optical phased arrays on silicon-on-insulator wafers [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47 (4): 040503.
- [28] van Acoleyen K, Bogaerts W, Jággerská 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.
- [29] van Acoleyen K, Rogier H, Baets R. Two-dimensional optical phased array antenna on silicon-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (13): 13655-13660.
- [30] Doylend J K, Heck M J R, Bovington J T, *et al.* Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21595-21604.
- [31] van Acoleyen K, Bogaerts W, Baets R. Two-dimensional dispersive off-chip beam scanner fabricated on silicon-on-insulator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(17): 1270-1272.
- [32] Roelkens G, van Thourhout D, Baets R. High efficiency silicon-on-insulator grating coupler based on a poly-silicon overlay[J]. *Optics Express*, 2006, 14 (24): 11622-11630.
- [33] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, *et al.* Large-scale nanophotonic phased array [J]. *Nature*, 2013, 493 (7431): 195-199.
- [34] Sun J, shah Hosseini E, Yaacobi A, *et al.* Two-dimensional apodized silicon photonic phased arrays [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 367-370.
- [35] Kwong D, Hosseini A, Covey J, *et al.* On-chip silicon optical phased array for two-dimensional beam steering[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 941-944.
- [36] Wang K, Wang Y, Gao S T, *et al.* Si integrated optical phased array for efficient beam steering in optical wireless communications[C]. *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2014: 14998990.
- [37] Wang K, Wang Y, Gao S T, *et al.*  $2 \times 2$  silicon integrated optical phased array for beam steering applications[C]. *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, 2015: 15677935.
- [38] Hulme J C, Doylend J K, Heck M J R, *et al.* Fully integrated hybrid silicon two dimensional beam scanner [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (5): 5861-5874.
- [39] Abediasl H, Hashemi H. Monolithic optical phased-array transceiver in a standard SOI CMOS process [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6509-6519.
- [40] Guan B B, Qin C, Scott R P, *et al.* Hybrid 3D photonic integrated circuit for optical phased array beam steering [C]. *IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2015: 15380541.
- [41] 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 and Nanophotonics. Optical Society of America*, 2016: IW1B. 2.
- [42] Poulton C V, Yaacobi A, Cole D B, *et al.* Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays [J]. *Optics Letters*, 2017, 42 (20): 4091-4094.
- [43] Hutchison D N, Sun J, Doylend J K, *et al.* High-

- resolution aliasing-free optical beam steering [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 887-890.
- [44] Hu W W, Peng C, Zhao C, *et al.* An optical phased array: 105527772A[P]. 2016-04-27.  
胡薇薇, 彭超, 赵澈, 等. 一种光学相控阵: 105527772A [P]. 2016-04-27.
- [45] Yan A M, Zhi Y N, Sun J F, *et al.* Recent development of optical phased array scanning technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 102801.  
闫爱民, 职亚楠, 孙建锋, 等. 光学相控阵扫描技术研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 102801.
- [46] Ding X H. The study of non-mechanical light-beam scanning method [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013: 20-21.  
丁晓华. 非机械式光束扫描方法的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2013: 20-21.
- [47] King D, Packard R, Thomas R. Unequally-spaced, broad-band antenna arrays [J]. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, 1960, 8(4): 380-384.
- [48] Komljenovic T, Helkey R, Coldren L, *et al.* Sparse aperiodic arrays for optical beam forming and LIDAR [J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2511-2528.
- [49] Luo Y, He Y, Geng L M, *et al.* Long-distance laser ranging lidar based on photon counting technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (5): 0514001.  
罗远, 贺岩, 耿立明, 等. 基于光子计数技术的远程测距激光雷达 [J]. *中国激光*, 2016, 43 (5): 0514001.
- [50] Chen J B, Sun H Y, Zhao Y Z, *et al.* Simulation and experimental research on one-dimensional lidar range profile of airborne target [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 072802.  
陈剑彪, 孙华燕, 赵延仲. 空中目标激光雷达一维距离像仿真及实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 072802.
- [51] Tang M R, Li Z L, Li Y Q, *et al.* Influence of atmospheric turbulence intermittency on return photon number in laser ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0201001.  
唐美荣, 李祝莲, 李语强, 等. 大气湍流间歇性对激光测距回波光子数的影响 [J]. *光学学报*, 2017, 37 (2): 0201001.
- [52] Aflatouni F, Abiri B, Rekh A, *et al.* Nanophotonic coherent imager [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 5117-5125.
- [53] Poulton C V, Byrd M J, Raval M, *et al.* Large-scale silicon nitride nanophotonic phased arrays at infrared and visible wavelengths [J]. *Optics Letters*, 2017, 42 (1): 21-24.