

# 硅基片上激光雷达技术综述

阳琴<sup>1</sup>, 陈孝林<sup>1\*</sup>, 曾诚<sup>1</sup>, 徐诗月<sup>1</sup>, 杨峰<sup>1,2</sup>, 高剑波<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西南技术物理研究所, 四川 成都 610041;

<sup>2</sup>四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

**摘要** 硅基光电子技术的发展可以将激光雷达系统发射模块和接收模块中分立的有源和无源器件集成在芯片上, 使激光雷达体积更小、稳定性更强、成本更低, 推动激光雷达在自动驾驶等领域的应用。首先, 分析激光雷达的基本概念及测量原理。随后, 根据扫描方式的不同, 将硅基片上激光雷达分为面阵闪光、光学相控阵、透镜辅助光束转向和慢光光栅等 4 类, 并分别对其技术特点和研究进展进行阐述。最后, 对目前硅基片上激光雷达的发展趋势进行了总结和展望。

**关键词** 激光雷达; 硅基光电子; 面阵闪光; 光学相控阵; 透镜辅助光束转向

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222426

## Overview of LiDAR Technology on Silicon Substrate

Yang Qin<sup>1</sup>, Chen Xiaolin<sup>1\*</sup>, Zeng Cheng<sup>1</sup>, Xu Shiyue<sup>1</sup>, Yang Feng<sup>1,2</sup>, Gao Jianbo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Southwest Institute of Technology and Physics, Chengdu 610041, Sichuan, China;

<sup>2</sup>College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China

**Abstract** The development of silicon-based optoelectronics technology can integrate discrete active and passive components in the transmitting module and receiving module of the LiDAR system on the chip, making the LiDAR smaller in size, more stable and lower in cost, and accelerating the application of LiDAR in autonomous driving and other fields. In this paper, the basic concept and principle of LiDAR is first analyzed. Then, according to the different scanning modes, the LiDAR on silicon substrate is divided into four categories: array flash, optical phased array, lens-assisted beam steering, and slow light grating. The technical characteristics and recent progress of these four categories are described respectively. Finally, the development trend of LiDAR on silicon substrate is summarized and prospected.

**Key words** LiDAR; silicon-based optoelectronics; array flash; optical phased array; lens-assisted beam steering

## 1 引 言

自 20 世纪 60 年代激光问世后不久, 激光就开始被用于测距领域<sup>[1-2]</sup>。研究者在微波雷达的基础上开发了激光雷达, 利用发射的激光光束探测目标并从反射光中获得目标的位置、速度等特征信息。与传统的微波雷达相比, 激光雷达具有更高的分辨率、更大的测量距离和更强的抗干扰能力, 它的体积和质量较小, 可靠性高, 成本也相对较低<sup>[3]</sup>。在过去的几十年里, 激光雷达在气象观测、遥感测绘、三维成像和工业检测等诸多领域获得了广泛的应用<sup>[4-11]</sup>。

近年来, 随着消费者对汽车的安全性和功能多样性的重视, 汽车智能化的发展越来越快, 激光雷达开始成为自动驾驶汽车 (AV) 和高级驾驶辅助系统

(ADAS) 传感器系统的重要组成部分。通过以点云的形式收集周围的环境信息, 它可以补充和交叉检验摄像头、毫米波雷达、超声波等传感器提供的信息, 辅助车辆态势感知, 保证安全冗余<sup>[12-13]</sup>。据统计, 仅在 2022 年上半年, 国内乘用车新车的激光雷达安装量就达到了 2.47 万台, 有预计称, 用于汽车和工业应用的激光雷达市场规模将在 2026 年增长至 57 亿美元, 而用于 ADAS 的激光雷达将在其中占据 41% 的份额。面对车载激光雷达, 汽车行业在价格、体积、抗冲击振动和工作温度范围等方面的性能提出了繁多且严格的期待<sup>[14-15]</sup>。

然而, 目前市场上现有的大多数激光雷达系统的光束扫描模块主要基于机械结构, 如电机驱动的旋转台<sup>[16]</sup>、反射镜和棱镜<sup>[17]</sup>等, 这种方案使得雷达系统复

收稿日期: 2022-08-31; 修回日期: 2022-10-17; 录用日期: 2022-11-08; 网络首发日期: 2022-11-21

通信作者: \*chen-xl13@qq.com

杂、体积大、功耗大、成本高,还限制了扫描速率、降低了可靠性,其复杂的组装和校准过程也增加了时间和人工成本。因此,这种传统的机械式结构难以匹配量产车的搭载需求,研究人员开始积极开发以微机电系统(MEMS)为代表的半固态扫描方案或以面阵闪光(flash)和光学相控阵(OPA)为代表的全固态扫描方案,追求更加紧凑、稳定、耐用、快速和廉价的激光雷达系统<sup>[18-20]</sup>。从行业趋势看,半固态激光雷达由于较高的集成度和较低的成本是短期乃至中期内的主流方案,但随着固态激光雷达技术的逐渐成熟,其在体积和稳定性等方面的优势将使其具备强大的竞争力。

实现全固态激光雷达系统的一条可行的途径是利用集成硅基光电子学<sup>[21-24]</sup>。基于成熟互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺的硅基光电子技术此前已经在通信领域获得了广泛的商业应用,其高折射率对比度允许大量的波导元件和集成电路组件同时紧凑地在一个微小的芯片内集成<sup>[25]</sup>。应用硅基光电子技术可以很大程度减小光学信号处理模块的尺寸并降低功耗,提升系统的性能、集成度和可靠性,实现低成本芯片级激光雷达。

本文对硅基片上激光雷达的发展概况进行了综述。首先,介绍了几个激光雷达的基本概念。其次,介绍了常见激光雷达的测距原理。然后,介绍了常见硅基片上激光雷达系统的扫描方案。最后,对硅基片上激光雷达当前面临的挑战和发展方向进行了讨论。

## 2 激光雷达基本概念

### 2.1 激光波长

综合考虑大气窗口、人眼安全以及可选用的激光器和光电探测器,激光雷达使用的波长通常为 0.8~1.55  $\mu\text{m}$ ,对应使用的激光器和探测器类型如表 1 所示。由于车载激光雷达工作时可能面临的环境温度具有很大的变化范围,因此当系统中采用滤光片抑制背景光干扰时,激光器的输出波长在温度影响下发生变化时应始终保持在滤光片的通带内,这也是在选择光源时需要考虑的问题。

表 1 激光雷达波长对应的激光器和探测器类型

Table 1 Laser and detector types corresponding to LiDAR wavelength

Wavelength / $\mu\text{m}$	Laser type	Detector type
0.8-0.95	Semiconductor lasers	Si detectors
1.06	Fiber lasers	Si detectors
1.55	Semiconductor lasers and Fiber lasers	Ge detectors or InGaAs/InP Detectors

当前激光雷达的主流波长是 905 nm 和 1550 nm。脉冲激光雷达采用 905 nm 激光器,主要优点是可以采用较为便宜的硅基探测器,并且 905 nm 相比 1550 nm

亲水性较弱,光损失更小。但由于硅材料的透明窗口,它不能用在硅光子系统上。因为 905 nm 激光可以穿透人眼玻璃体到达敏感的视网膜,为避免视网膜损伤,它的峰值功率受到限制<sup>[26]</sup>。1550 nm 适用于长距离连续波激光雷达系统,由于光在人眼的前半部分被吸收,不会危害视网膜,激光出射功率可以更大。这一波长通常用于通信设备,具有丰富的技术储备,并且可以以低成本获得连续波激光光源。

### 2.2 探测距离

探测距离指激光雷达能发现目标的最大距离,主要受到激光信号发射功率的制约。对于脉冲激光雷达<sup>[27]</sup>,探测距离还与信号的重复周期  $T$  有关,因为只有当回波信号在时间  $T$  内返回接收系统时才可以解算出正确的目标距离信息,而超出这一时间段返回的回波信号则因为与后续回波无法区分而导致距离模糊。对于调频连续波(FMCW)激光雷达,探测距离也受到激光线宽  $\Delta\nu$  的影响。 $\Delta\nu$  越窄,激光信号的相干长度  $L_c$  就越长,而对于相干长度以外的目标,其回波信噪比会大大降低而难以被系统识别。此参数一般由激光雷达对于 10% 低反射率目标物的最远探测距离得到,实际应用中由于环境和目标表面情况的变化,数值并不是绝对的。

### 2.3 视场角

视场角(FOV)指激光雷达可以探测到的区域范围,单位通常以 $^\circ$ 表示。对于车载环境应用,激光雷达视场角必须包括水平视场角(HFOV)和垂直视场角(VFOV),视场角越大说明激光雷达对空间的角度覆盖范围越广,对周围环境的感知范围越大。

### 2.4 测量精度和测量分辨率

测量精度是精确度与准确度的结合。精确度指激光雷达在同一条件下多次测量得到的距离值的一致程度,而准确度指激光雷达测得的距离分布的均值与真实距离的接近程度,二者分别受测量过程中的随机误差和系统误差影响,如图 1 所示。其中,距离测量的准确度主要受光信号产生和测量系统影响,角度测量的准确度则主要受发射端激光转向扫描的准确性影响。

测量分辨率具体包括距离分辨率和角分辨率。距离分辨率指激光雷达单次测量中目标能被区分的最小距离。对于脉冲激光雷达,脉冲宽度越窄则距离分辨率越高;对于 FMCW 激光雷达,距离分辨率与调制带宽成反比,并受调频线性度影响。角分辨率指激光雷达单次测量中目标能被区分的最小角度,增加发射孔径是提高角分辨率的有效手段。

## 3 硅基片上激光雷达的测距原理

### 3.1 脉冲飞行时间法

脉冲飞行时间法(TOF)<sup>[28]</sup>采用直接探测方式,通过测量激光信号从发出经目标反射到被探测系统采集的时间实现目标距离的测量。脉冲激光雷达的测距原

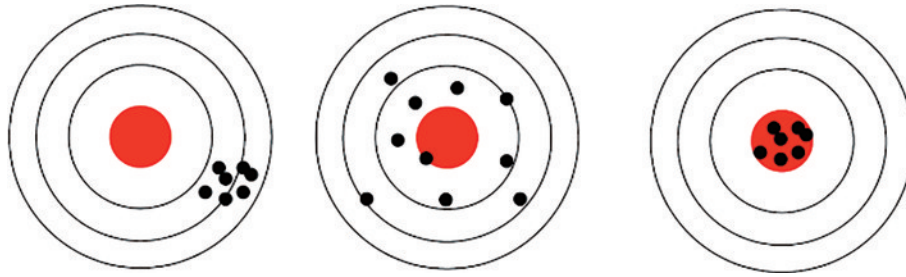


图1 激光雷达精确度、准确度  
Fig. 1 Precision, accuracy of a LiDAR

理和系统设计都比较简单,如图2所示:在定时器的触发下,激光器周期性地产生短促高频强脉冲,经目标反射后,回波信号输入接收机,经数据处理后获得返回时刻 $T_r$ ,再根据信号出射时刻 $T_e$ 与光速 $c$ ,即可获得目标与雷达系统的距离 $R$ :

$$R = \frac{T_r - T_e}{2} \times c. \quad (1)$$

根据测量原理可知,脉冲激光雷达的距离分辨率 $\Delta R$ 与时间计数分辨率 $\Delta t$ 成正比,由于激光脉冲信号在传播过程中会发生畸变和展宽,需要高精度的时刻鉴别单元以确保返回时刻的准确性,因此对电子电路设计提出了很高的要求<sup>[29]</sup>。当探测距离增大时,脉冲激光雷达的精度相对变高,因而更适用于远距离应用场景。

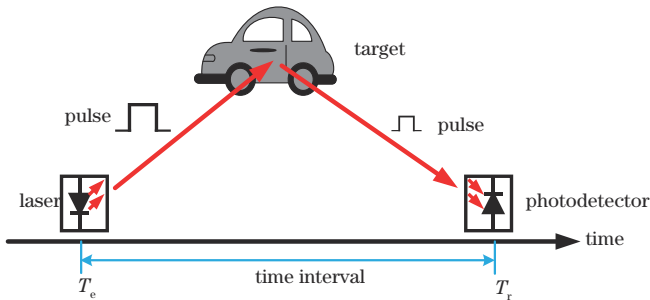


图2 脉冲式激光雷达工作原理  
Fig. 2 Schematic of pulsed TOF LiDAR

脉冲激光雷达存在模糊距离,因为回波信号相对于发射信号是否偏移一个或多个周期存在着不确定性。此外,由于发射机到接收机的链路上光脉冲能量存在散射损耗,因此信噪比也是限制脉冲激光雷达探测范围的主要因素。为了提高作用距离,需要增加脉冲发射功率,对于自动驾驶应用,需要考虑人眼安全功率极限<sup>[30]</sup>。一种方法是使用脉冲串来降低单个脉冲所需的高功率,通过积分并平均接收的功率来提高信噪比和精度。尽管存在这些限制,脉冲激光雷达简单的探测原理和实现方式使其具有强大的竞争力。

### 3.2 调幅连续波测距法

调幅连续波(AMCW)测距法也称间接飞行时间法。在调幅连续波激光雷达中,激光出射之前进行了幅度调制,调制周期大于往返飞行时间,对回波信号和出射信号进行比较,根据相位延迟量 $\Delta\varphi$ 可计算出时

间间隔为

$$T_r - T_e = \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}, \quad (2)$$

式中 $f$ 为调制频率。所以目标到雷达系统的距离 $R$ 为

$$R = \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta\varphi}{2\pi f}. \quad (3)$$

对于调幅连续波测量方法,距离分辨率由测距信号频率和相位分辨率共同决定,距离分辨率随着调幅信号频率增加而增加。与脉冲激光雷达一样,调幅连续波激光雷达的回波信号相位经过 $2\pi$ 相移后开始重复,为避免多解问题,测距范围会相应减小。一种解决方法是选取一个调制频率高的调制光波作为基本测尺,再引入一个或多个调制频率较低的调制光波作为辅助测尺,综合每个测尺的测量结果以获得精确的测量值。

### 3.3 随机调制连续波测距法

随机调制连续波(RMCW)测距法<sup>[31-33]</sup>将伪随机比特序列(PRBS)调制到出射激光的幅度或相位上,通过使用匹配滤波器等方式计算接收到的返回激光信号与PRBS的原始模板之间的相关性来获得接收光的飞行时间,如图3所示。由于PRBS只与自身相关,因此

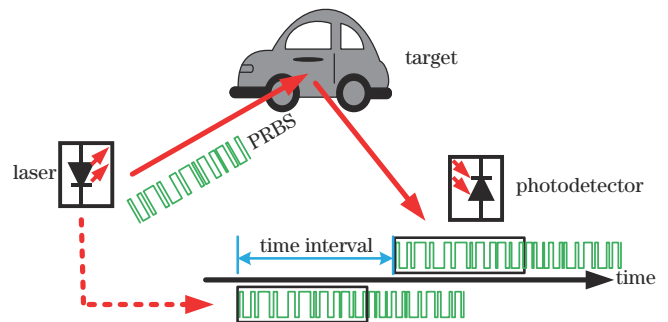


图3 RMCW激光雷达系统示意图  
Fig. 3 Schematic of RMCW LiDAR

RMCW激光雷达对阳光、灯光和其他激光雷达的光等不敏感。然而,此技术对相对速度、激光相位噪声和散斑具有敏感性,这是较大的技术挑战。在激光雷达应用领域,澳大利亚初创激光雷达公司Baraja是RMCW技术的典型代表,该公司采用RMCW技术结合独特的棱镜色散光谱扫描技术研制出型号为Spectrum HD的车载级雷达。

### 3.4 调频连续波激光测距法

FMCW 激光雷达<sup>[29]</sup>采用频率随时间周期性变化的调制信号进行探测,返回的光信号与本振光信号相干,根据混频产生的中频信号的频率可以测量目标物的距离,它的信号调制形式有三角波、锯齿波、正弦波等。其中,正弦波调制信号检测物体时需要调节信号频偏,因此大多应用于只有一个探测目标的情况,对于自动驾驶应用中对多个目标的探测需求,一般采用三角波或者锯齿波。三角波可以同时得到物体的距离和速度信息<sup>[34-35]</sup>,锯齿波则主要用来测量物体的距离。假设拍频频率差为  $f$ ,锯齿波探测得到的距离表达式为

$$R = f \cdot \frac{cT}{2B}, \quad (4)$$

式中: $B$ 为调频带宽; $T$ 为调频周期。

对于三角波探测,当目标运动时,信号发生多普勒频移,反射信号和本振信号之间的频率差在线性调频的上升段和下降段具有不同的拍频频率,如图 4 所示,假设分别为  $f_{if}^+$  和  $f_{if}^-$ ,则目标的距离和速度分别为

$$R = \frac{cT}{4B} \cdot \frac{f_{if}^+ + f_{if}^-}{2}, \quad (5)$$

$$v = \frac{\lambda}{4} (f_{if}^+ - f_{if}^-). \quad (6)$$

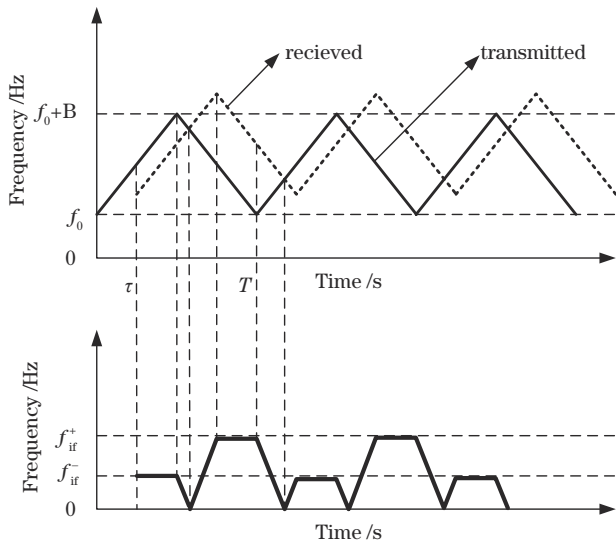


图 4 FMCW 激光雷达测量原理  
Fig. 4 Principle of FMCW LiDAR

与脉冲测距法相比,FMCW 测距具有许多优势。第一,它采用相干探测,不受阳光、城市人造光及附近的其他激光雷达系统的干扰,提高了信噪比<sup>[36]</sup>。第二,它可以通过检测信号的多普勒频移来直接获取目标的运动速度。第三,它的探测精度取决于线性调频带宽和信噪比,可以通过相对低频的接收器电子设备实现,相比之下脉冲测距精度受到接收器带宽的限制。第四,它的检测灵敏度高,不需要很高的激光功率,因此也不会产生非线性效应,加上它不需要用到

雪崩光电二极管(APD)和高速检测电路,所以适应激光雷达的硅基集成化发展<sup>[37]</sup>。它的主要技术难点在于线性调频光信号的获取,解决方法有采用干涉仪<sup>[38]</sup>、光频梳<sup>[39]</sup>、微谐振器<sup>[40]</sup>等校准扫频激光器,或者在外部级联光调制器<sup>[41]</sup>等。

## 4 硅基片上激光雷达的扫描实现方式

### 4.1 面阵闪光激光雷达

flash 脉冲激光雷达的工作模式类似于照相机,它基于 TOF 原理,系统发射具有高重复频率的脉冲光束,脉冲光束完全照亮整个视场。由于空间中存在目标物,探测器阵列中每个单元获取的光子具有不同的飞行时间,据此可以获得距离信息,实现三维成像。

荷兰代尔夫特理工大学<sup>[42]</sup>演示了一种 flash 激光雷达。图 5 给出了该雷达系统使用的单光子雪崩二极管 (SPAD) 芯片,它采用  $0.18 \mu\text{m}$  CMOS 工艺制造,尺寸为  $21.6 \text{ mm} \times 10.2 \text{ mm}$ ,具有  $252 \text{ pixel} \times 144 \text{ pixel}$  和 1728 个 12 位时间数字转换器(TDC),其上约 70% 的面积为部分直方图读出电路(PHR),作用是将原始数据处理为直方图数据输出,压缩输出的数据量。该系统可在 30 frame/s 的帧率下实现 0.7 m 距离处的成像,对 50 m 处 60% 反射率的目标的测量误差不高于 1.4 mm。

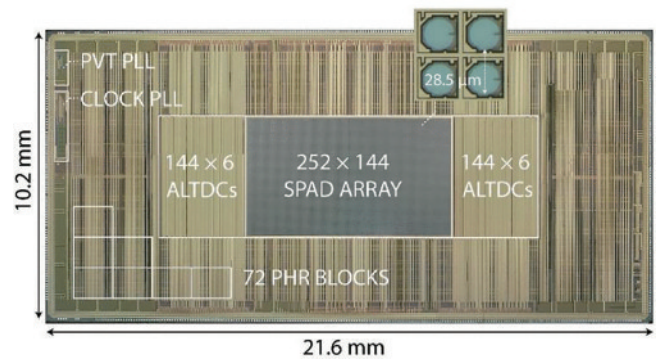


图 5 芯片显微照片和像素布局<sup>[42]</sup>  
Fig. 5 Micrograph of the chip and macro pixel layout<sup>[42]</sup>

芬兰奥卢大学<sup>[43]</sup>提出的 flash 激光雷达系统采用了基于块的分段照明策略,如图 6 所示。发射器由位于焦平面上的 16 个共阳极的可单独寻址的激光二极管元件组成,当其中任意一个激光二极管元件被驱动时,视场内的相应部分被照亮。接收器芯片尺寸为  $6.6 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm}$ ,由  $32 \times 128$  个 SPAD 元件和 1 个 257 通道的 TDC 阵列构成。相比于大多数设计中采用的泛光照明策略,基于块的分割照明提高了检测的信噪比,减少了接收器中所需的 TDC 数量,使系统复杂程度降低。该系统能够以 2.6 mW 的平均照明功率,在 15 m 内以约 30 frame/s 的帧率进行成像,FOV 为  $40^\circ \times 10^\circ$ 。

西安电子科技大学<sup>[44]</sup>采用  $0.18 \mu\text{m}$  HV CMOS 工艺制造了  $2.9 \text{ mm} \times 2.9 \text{ mm}$  的 flash 脉冲激光雷达芯

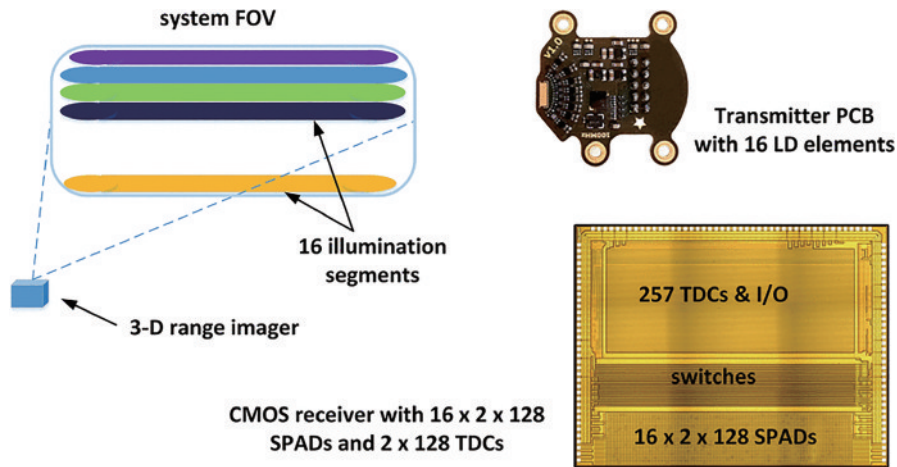


图 6 基于块的照明:概念、发射器 PCB 和 CMOS 接收器芯片<sup>[43]</sup>

Fig. 6 Block-based illumination: concept, transmitter PCB, and CMOS receiver IC<sup>[43]</sup>

片。该芯片包括  $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$  和 1024 个 TDC, 每个 pixel 中包含 4 个 SPAD、4 个无源淬灭电路(PQC)、4 个脉冲压缩单稳态电路和噪声滤波电路, 如图 7 所

示。该团队利用基于此芯片的激光雷达系统成功演示了 4.5 m 处的室内 3D 成像, 在超过 20 m 的室外测距实验中, 相对测量误差不超过 0.35%, 如图 8 所示。

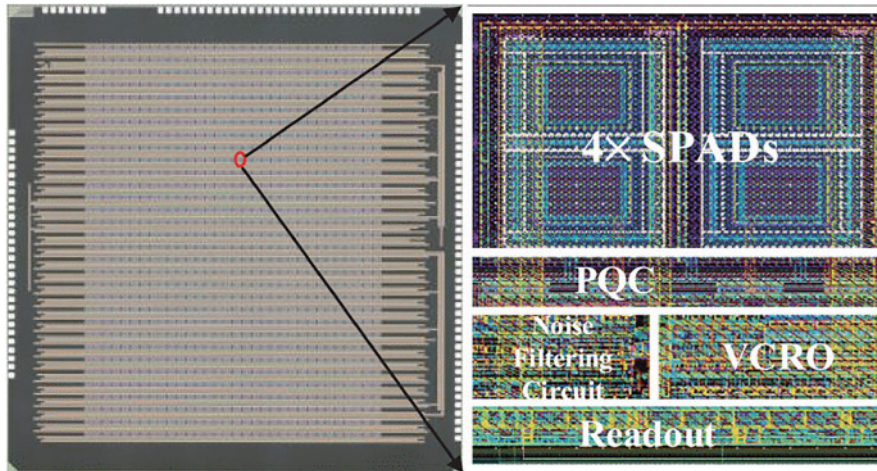


图 7 芯片显微照片和像素布局<sup>[44]</sup>

Fig. 7 Micrograph of the chip and macro pixel layout<sup>[44]</sup>

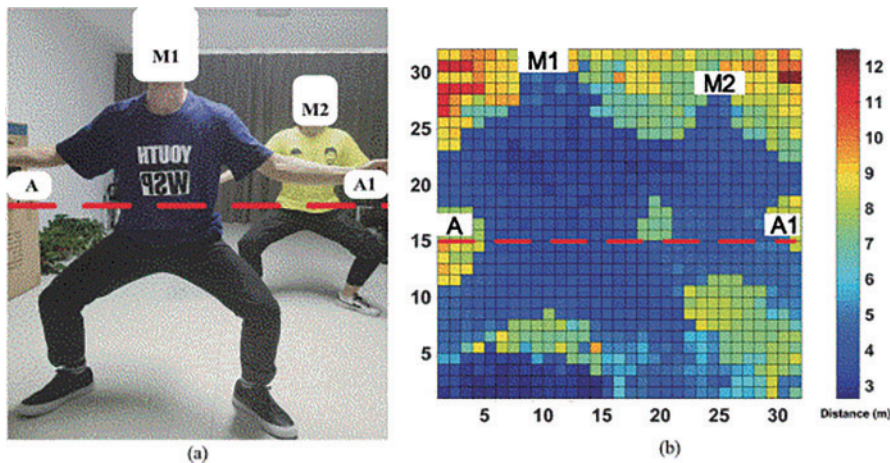


图 8 3D 图像获取。(a)测量场景的照片;(b)flash 成像<sup>[44]</sup>

Fig. 8 3D image acquisition. (a) Photograph of the measured scene; (b) flash image<sup>[44]</sup>

flash 激光雷达的系统中没有运动部件,具有抗振动、体积小、价格低等优点。其点云是由单次激光脉冲生成的,而非逐点构建,因此可以解决时间同步问题<sup>[45]</sup>。其缺点是需要较高的激光峰值功率以同时照亮大的空间区域,信噪比低,检测距离和视场有限,性能还会受到目标物反射率的影响。由于雷达的距离分辨率和角分辨率直接受限于探测器阵列的规模和性能,而大规模阵列意味着大数据处理量,因此成像分辨率和成像速度之间需要进行平衡<sup>[46]</sup>。此外,从目标表面反射的回波信号往往很弱,探测器往往需要采用昂贵的 SPAD<sup>[47]</sup>。

#### 4.2 光学相控阵激光雷达

OPA<sup>[48]</sup>中主要包括分光器、移相器和天线等 3 个部分。其中,移相器为光信号引入相位延迟,主要通过热光效应或电光效应实现,天线通常采用光栅耦合器、边缘耦合器或端射耦合器的形式。OPA 通过控制光通过微波导的相位,从而控制波前的形状和方向,实现

光束偏转。

2017 年麻省理工学院电子研究实验室<sup>[49]</sup>首次在硅光子芯片上展示了采用三角波调制的 FMCW 激光雷达,如图 9 所示。光源来自片外紧凑型 DFB 激光二极管,通过调制注入电流来实现频率调制。光子电路使用 193 nm 浸没式光刻技术在 220 nm 厚的绝缘体上硅(SOI)晶片上制造,该晶片具有 2  $\mu\text{m}$  的掩埋氧化物。芯片上有 OPA 用于发射和接收,其采用分组级联移相器架构进行简单控制,用于片上光束准直,信号的检测则由片上 Ge 平衡光电探测器承担。该系统成功实现了距离和速度的同时测量,并且对于 2 m 范围内的目标物,系统的绝对误差小于 10 mm。

美国 Analog Photonics 公司<sup>[50]</sup>展示了相干二维固态激光雷达原型系统,其中使用了两个大型 OPA。实验中系统对房间内 25 m 内的墙壁和沙发等漫反射目标进行了检测,并演示了如何通过多普勒频移对目标速度进行提取。该系统在室外测试中展现了对 185 m

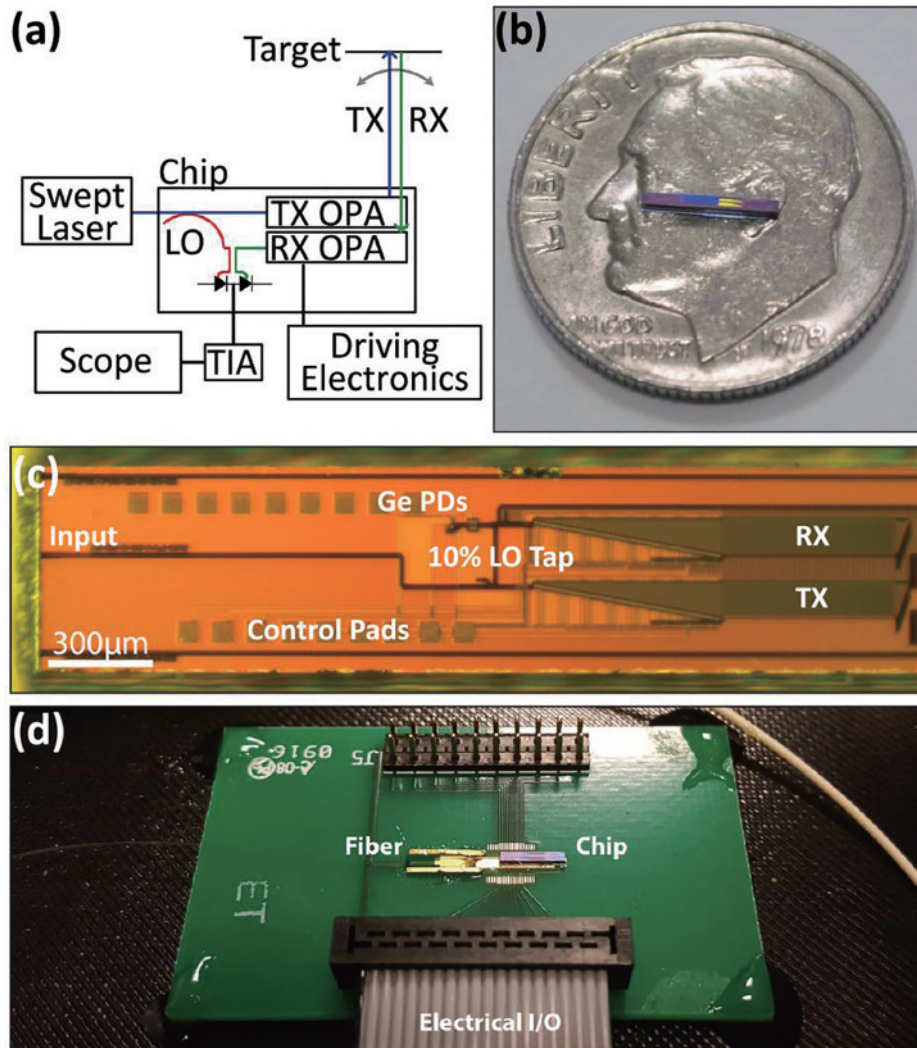


图 9 固态激光雷达系统<sup>[49]</sup>。(a)示意图;(b)放在硬币上的包含激光雷达系统的小芯片;(c)装置的光学显微照片;(d)采用环氧树脂纤维封装在板上的芯片

Fig. 9 Solid-state LiDAR system<sup>[49]</sup>. (a) Diagram; (b) chiplet containing LiDAR system on top of a dime; (c) optical micrograph of the device; (d) packaged system with epoxied fiber

内的检测能力。此外,他们还首次展示了使用 OPA 实现的实时 3D 相干激光雷达系统,获取的图像如图 10 所示,其中,清晰地展示了 7 m 外站立的人的手臂和腿部等特征。

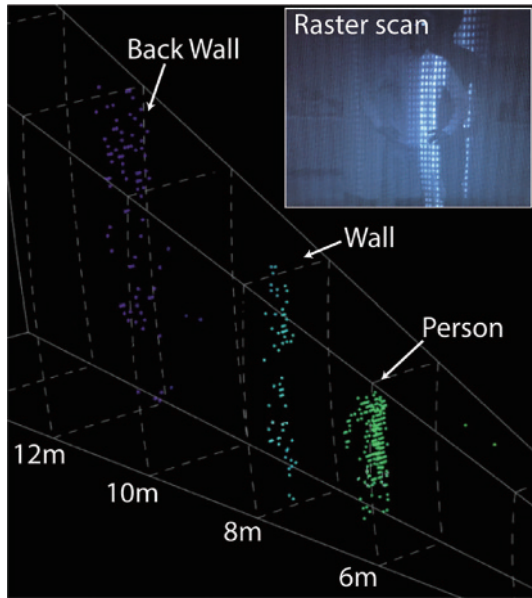


图 10 来自基于光栅扫描的 OPA 的 3D LiDAR 系统的实时数据,插图显示被光栅扫描的场景<sup>[50]</sup>

Fig. 10 Real-time data from a 3D LiDAR system consisting raster scanning OPAs, and inset shows scene being raster scanned<sup>[50]</sup>

三星电子<sup>[51]</sup>于 2020 年展示了带有集成半导体光放大器(SOA)的 32 通道硅光子 OPA。片外激光器产生的脉冲进入输入耦合器,通过改变移相器的驱动电压和片外激光器的波长使 OPA 水平和垂直扫描,回波脉冲由 InGaAs APD 阵列接收,深度图像每帧包含  $40 \times 21$  个点,每个点都有来自 80 个脉冲的平均数据,成像距离可达 20 m,距离测量范围则达到了 40 m。该公司还首次展示了不使用外部光源或放大器的芯片级激光雷达解决方案<sup>[52]</sup>,如图 11 所示。他们采用 III-V-on-Si 工艺将可调谐激光二极管、SOA 和 32 通道的 OPA 集成在同 1 个  $7.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  的单芯片上,脉冲激光波长为  $1.3 \mu\text{m}$ ,反射光脉冲由  $16 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$  的 III-V APD 阵列检测,可以在  $20 \text{ frame/s}$  的扫描速度下实现 10 m 内的深度成像,误差小于 10 cm,FOV 为  $15^\circ \times 3.5^\circ$ ,分辨率为  $120 \times 20$ 。

2021 年,三星电子<sup>[53]</sup>通过 III-V-on-Si 工艺将可调谐激光二极管、SOA 和 32 通道的 OPA 集成在  $8.7 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  单芯片上,如图 12 所示。对于每个转向角度,OPA 芯片以 1 MHz 的重复率传输 17 次持续时间为 30 ns 的脉冲,反射脉冲由 APD 接收。在 20 m 内,系统对一个反射率为 60% 的平板进行了测距,通过氙灯模拟太阳光发现,照度从 350 lx 提升至  $10^4 \text{ lx}$  时系统信噪比仅下降 0.3 dB,证明了系统对 O 波段波长

的抗干扰性能。

吉林大学<sup>[54]</sup>在多层 SiN-SOI 平台上制造了分别具有鱼骨结构和链式结构的两个 128 通道 OPA,其图像如图 13 所示。鱼骨式 OPA 的 FOV 为  $100^\circ \times 19.4^\circ$ ,发散角为  $0.021^\circ \times 0.029^\circ$ ,链式 OPA 的 FOV 为  $140^\circ \times 19.23^\circ$ ,发散角为  $0.021^\circ \times 0.1^\circ$ 。两个 OPA 均采用非均匀天线间距设计,可实现 4 mm 宽的孔径,降低发散度。该团队基于鱼骨式 OPA 构建了采用三角波测距的 FMCW 激光雷达系统,以一块 90% 反射率的平板作为目标进行测距实验,实现了 100 m 距离的测量,距离分辨率为 5.09 cm,测量绝对误差为 3.38 cm。

OPA 结构紧凑,制造成本低,对于机械冲击和振动不敏感,因为没有运动部件而完全没有惯性,且任意时刻的扫描方向只由当前调用的相位查找表决定,与前一时刻的扫描方向无关,在高速扫描下可以实现具有高方向增益的随机指向。由于阵列中的所有光学天线需要进行精确的幅度和相位控制,扩大 OPA 的制造规模比较困难。目前大多数能做到宽视野的大规模 OPA 只是一维阵列,另一个方向的扫描通常通过调谐激光器的波长实现。此外 OPA 还面临着较高的光损耗、阵列串扰、热稳定性等挑战,它较低的片上光功率也会限制远距离探测<sup>[55]</sup>。

从广义上来说,液晶超表面(LCM)技术<sup>[56]</sup>也属于特殊的 OPA,该技术使用液晶来调整超表面以创建可以快速更改的反射光栅改变衍射角,由于技术尚在发展中,所以信息量有限。

#### 4.3 透镜辅助光束转向激光雷达

透镜辅助光束转向(LABS)技术具有类似相机的光学系统,包括片上开关/天线阵列和片上(或片外)透镜,阵列位置与透镜的焦平面重合,所以也可称为基于焦平面阵列(FPA)的光束转向技术。阵列中采用的开关通常为 Mach-Zehnder(MZ)干涉仪开关、MEMS 开关和环形谐振器开关。通过打开特定的开关,入射光被引导到相应的天线进行准直,经透镜出射发生规定的角度偏转,进入自由空间。在这一技术中,每次只有一个发射器发射一束光,通过将光束切换到不同的发射器来控制光束的发射角度,光束的扫描是离散的<sup>[57]</sup>。

2020 年上海交通大学<sup>[58]</sup>演示了基于 LABS 的固态脉冲激光雷达。该激光雷达采用 TOF 测距原理,光束转向部分包括 1 个集成的具有 16 个通道的开关芯片、1 个光纤阵列和 1 个透镜。光纤阵列将开关芯片的一维输出转换为二维,经过透镜准直后光束具有  $0.014^\circ$  的发散角,转向步长为  $0.35^\circ$ ,FOV 为  $1.05^\circ \times 1.05^\circ$ ,如图 14 所示。演示实验中验证了 19.5 m 的测距距离,测距误差小于 3 cm。

该团队此后还在单个片上二维收发器阵列芯片上同时实现了光束发射、转向和接收<sup>[59-60]</sup>,如图 15(a)所示。图 15(b)、(c)展示了收发器单元的具体结构,单

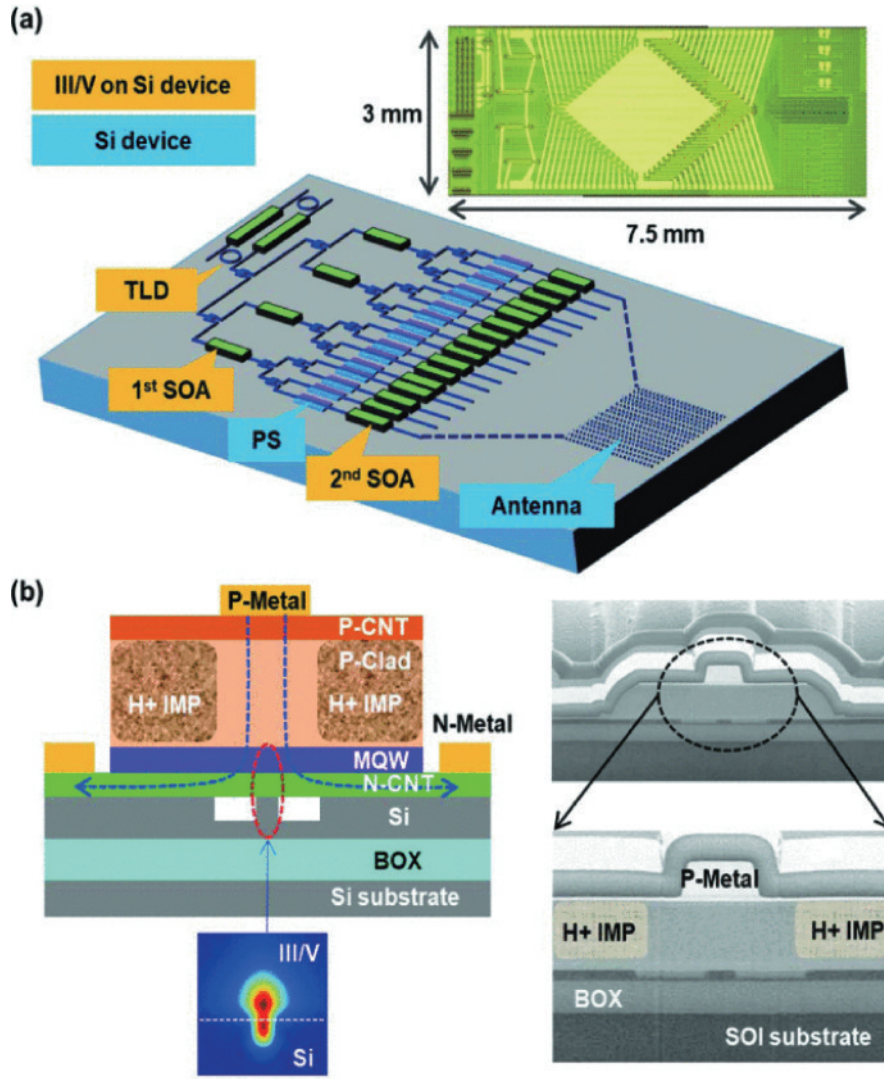


图 11 芯片图像<sup>[52]</sup>。(a)图解和显微图像；(b)III/V on Si器件的图解和垂直SEM图像

Fig. 11 Image of the chip<sup>[52]</sup>. (a) Illustration and microscope image; (b) illustration and vertical SEM image of III/V on Si device

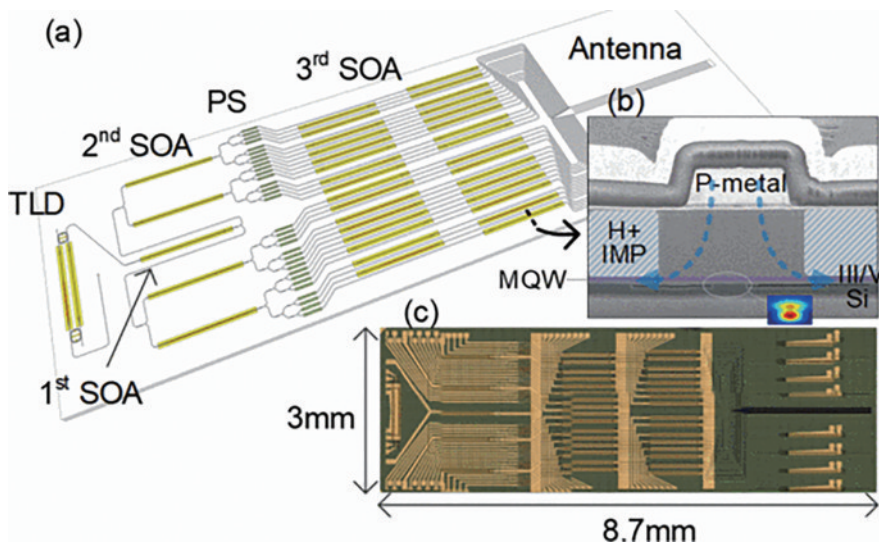


图 12 固态光束扫描芯片的结构<sup>[53]</sup>。(a)插图；(b)可调谐激光二极管和半导体光放大器上 III/V 的图解和垂直扫描电子显微镜 (SEM) 图像；(c) 芯片显微镜图像

Fig. 12 Structure of solid-state beam scanner chip<sup>[53]</sup>. (a) Illustration; (b) SEM image of SOA and TLD cross-section; (c) chip microscope image



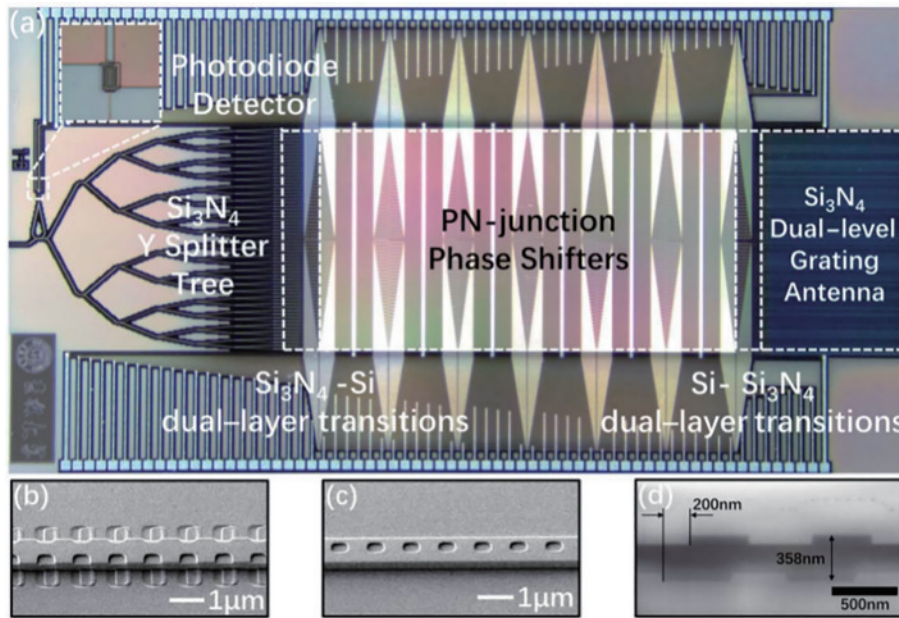


图 13 OPA 图像<sup>[54]</sup>。(a)光学显微图像;(b)鱼骨波导光栅的 SEM 图像;(c)链式波导光栅的 SEM 图像;(d)去除了包层的双层错位波导光栅的透射电子显微镜(TEM)图像

Fig. 13 Image of OPA<sup>[54]</sup>. (a) Optical microscope image; (b) SEM image of a fishbone waveguide grating; (c) SEM image of a chain waveguide grating; (d) TEM image of dual-level misaligned waveguide grating with the cladding removed

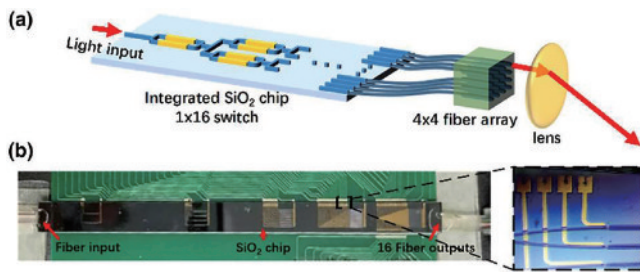


图 14 LABS 技术<sup>[58]</sup>。(a)示意图;(b)1×16 通道芯片照片

Fig. 14 LABS device<sup>[58]</sup>. (a) Diagram; (b) photo of the 1×16 switch chip

元中间是一个光栅发射器,周围是 U 型 Ge 光电探测器,所以经一个单元出射的光直接被同一个单元接收。该芯片共有 4 个收发器单元,具有 87 MHz 的带宽和 0.3 A/W 的响应度,检测灵敏度为 -20 dBm。配合 1 个 1550 nm 脉冲激光器和 1 个片外透镜组成激光雷达系统,实现了 5.2 m 内的目标检测,其扫描角度为 2.86°,单次扫描时间为 5.3 μs。此外,该团队还基于该芯片在 1 m 内进行了 FMCW 测距验证实验,测量误差小于 0.01 m<sup>[61]</sup>。

美国加州大学伯克利分校<sup>[62]</sup>开发出一种新型高分辨率芯片激光雷达,它采用基于 MEMS 工艺的 128 pixel×128 pixel 的焦平面开关阵列(FPSA),并将其集成在尺寸为 10 mm×11 mm 的硅光子芯片上,如图 16 所示,阵列中每个像素仅由光学天线和开关组成,FOV 可以达到 70°×70°,扫描角度的切换时间在微秒量级,输出光束的发散角为 0.05°,分辨率为 0.6°。他们基于此芯片构建了 FMCW 3D 成像激光雷达,演示了

对 10 m 处反射目标的 3D 成像,距离分辨率为 1.7 cm,FOV 为 16°×16°。

2021 年来自美国的 Pointcloud Inc. 和英国南安普敦大学光电研究中心的研究团队<sup>[63]</sup>展示了基于 FPA 的全固态集成光子激光雷达,图 17(a)展示了此系统的示意图。系统中具有两个 FPA,如图 17(b)所示:第一个用作发射器,它顺序照亮场景;第二个用作接收器,检测来自场景的散射光,与照明区域相对应的所有接收器像素同时并行读出。接收器阵列一共由 32 pixel×16 pixel 组成,多路复用的读出电路集成到了阵列中,最大限度地减少了外部电器连接,同时保持信号的完整性。光的片上转向由发射器和接收器芯片上的热光开关树提供,由于仅照亮对应于正在读出的像素的场景部分,不会浪费照明光。发射器和接收器芯片使用硅光子学工艺制造,将光子器件与 90 nm SOI 电子器件单片集成,图 17(c)对芯片的光学显微图像进行了展示。激光雷达系统的光源来自 IQ 调制器调制的外部激光器,发射孔径处的功率为 4 mW,线性调频带宽为 4 GHz。对于 85% 反射率的目标,该系统在 17 m 处实现了 1.8 mm 的测量精度,对于具有 30% 反射率的目标,在 75 m 的距离上实现了 3.1 mm 的精度。此外,它对 17 m 处目标的检测概率为 97%,对 75 m 处目标的检测概率为 42%,并且对慢速运动物体的速度测量精度为 1.0 mm/s。

LABS 技术可以实现快速随机扫描,它最突出的优点在于只需要对二进制开关进行控制,控制简单,制造成本低。此外,它的天线布置灵活,允许更大的像素密度,还可以实现二维转向。由于开关和光束角度的

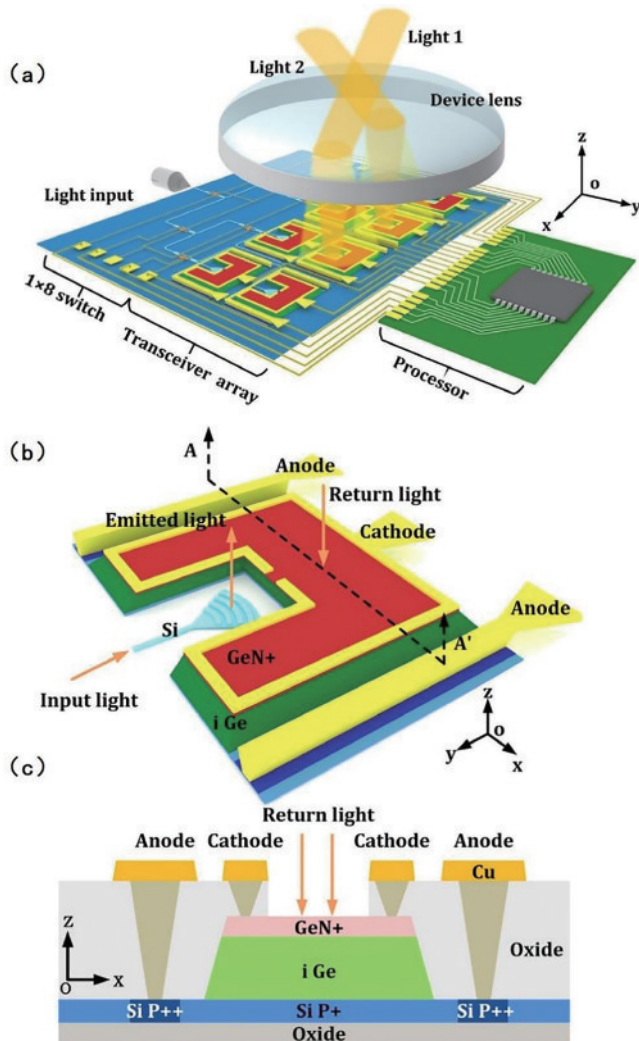


图 15 带有收发器阵列的 LABS 激光雷达<sup>[59]</sup>。(a) 系统示意图；(b) 集成收发器的三维图示；(c) AA' 平面中 Ge 探测器的横截面图

Fig. 15 LABS LiDAR with transceiver array<sup>[59]</sup>. (a) Schematic diagram ; (b) three-dimensional illustration of an integrated transceiver; (c) cross-sectional diagram of the vertical Ge PD in AA' plane

对应关系,为了获得高分辨率图像,开关的数量也要尽

可能地增加,同时也需考虑透镜像差带来的光束畸变问题。当光束转向步长角太大时,位于两束光之间的小目标会被遗漏,使系统存在盲区。

#### 4.4 慢光光栅激光雷达

慢光光栅(SLG)以自由空间光束的形式发射导模,通过改变波长或波导折射率进行控制。2022年日本横滨国立大学<sup>[64]</sup>将SLG与Ge光电二极管相结合,在芯片上构建了基于零差探测的FMCW激光雷达系统,系统外观如图18所示。该芯片尺寸为9.1 mm×5.5 mm,采用CMOS工艺在直径为200 mm的SOI平台上制造。芯片上包括有模斑转换器、Ge平衡光电探测器、热光MZ开关、SLG、热光加热器和零差检测电路等。其中,SLG结构具有约60%的向上发射效率和约100 dB/m的辐射系数。台式可调谐激光源经IQ调制器进行单边带调制,产生的锯齿波调制光经过掺铒光纤放大器和带通滤波器放大后输入芯片。对于3~5 m距离处覆盖有反光膜的目标物,出射的光束在5.1°×2.8°范围内扫描,获得了154×32的点云图像。在之后的研究中,该团队使用协方差矩阵自适应进化策略算法对SLG结构中孔的位置和直径以及衍射光栅的位置和角度进行了优化,将向上发射率提高到了80%以上,并将光束发散度降低到0.08°以下<sup>[65]</sup>。

由于慢光效应,SLG的光束角相比通常的波导光栅对波长和折射率更加敏感。与OPA和FPA相比,SLG减轻了光学天线的大规模集成和相位校准的负担,同时通过固定激光波长的热光效应可以实现大范围和高分辨率的光束扫描。不足的是,由于该技术利用了热光效应,结构边缘的温度不均匀性会干扰光束角度,加热的效率也会制约扫描速率,且整个系统可能需要引入额外的温控系统以控制外界温度的干扰。此外,该技术对刻蚀均匀性的要求也较高。由于研究尚处于起步阶段,该技术的光学损耗和噪声较大,检测距离有限,其实用性还需进一步的研究来证明。

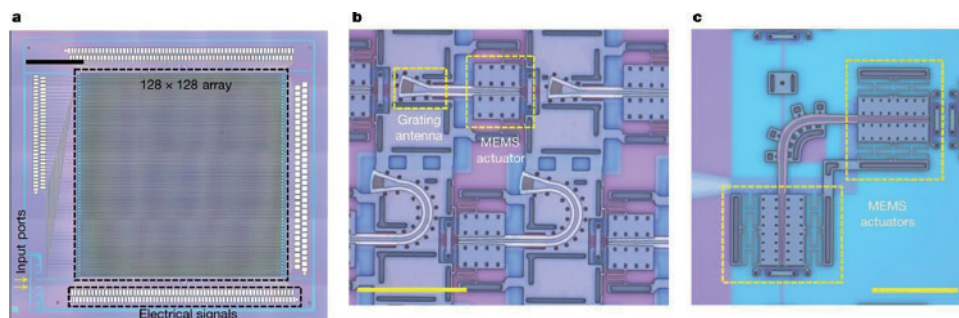


图 16 FPSA 器件的显微图像<sup>[62]</sup>。(a) 128 pixel×128 pixel FPSA 芯片显微图像；(b) 带有列选择开关的光栅天线显微图像；(c) 带有行选择开关的光栅天线显微图像

Fig. 16 Microscopic images of the fabricated FPSA device<sup>[62]</sup>. (a) Microscopic image of 128 pixel×128 pixel FPSA chip; (b) micro image of grating antenna with column selection switch; (c) micro image of grating antenna with row selection switch

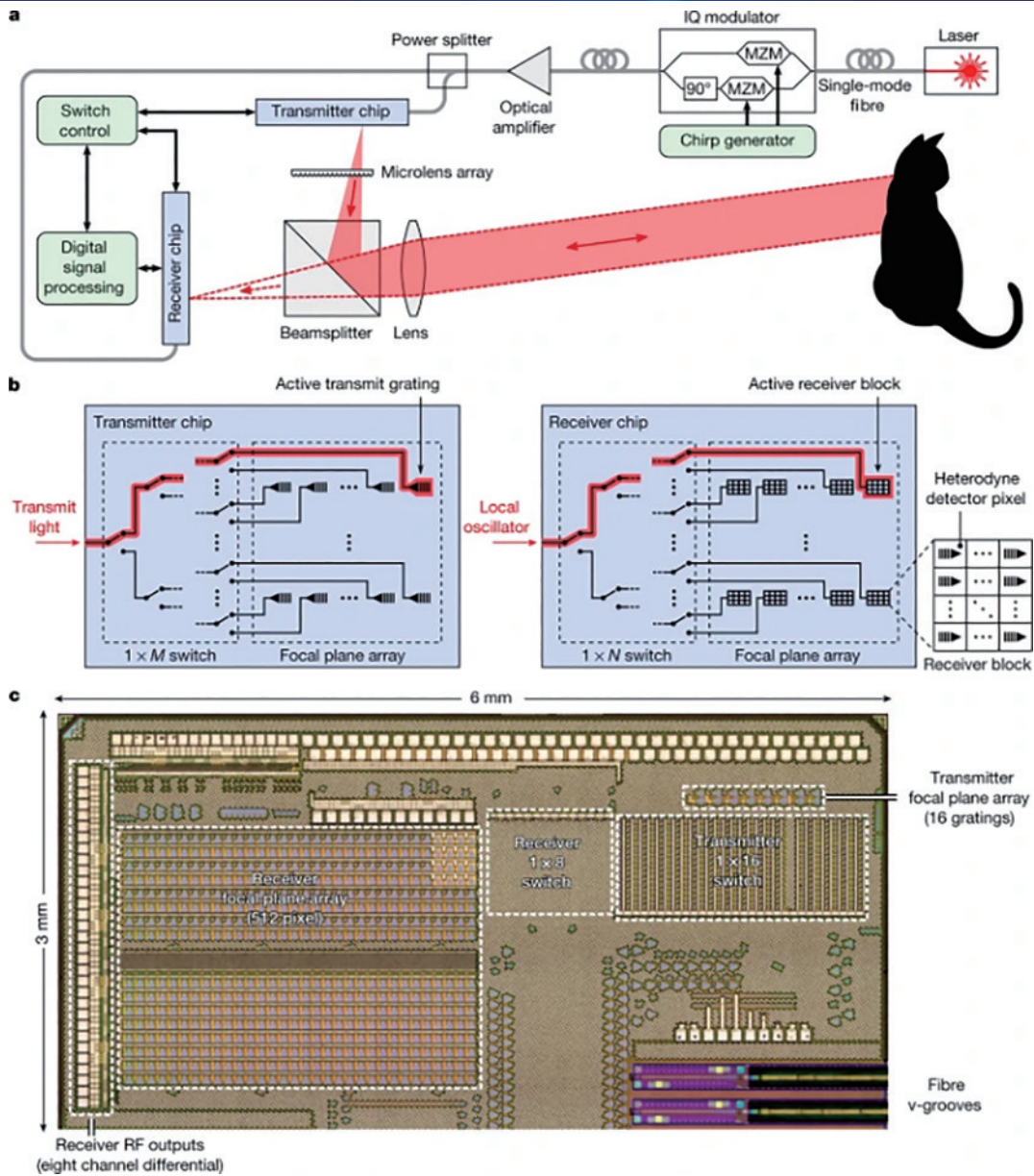


图 17 固态三维成像激光雷达<sup>[63]</sup>。(a) 系统示意图；(b) 发射器和接收器芯片结构示意图；(c) 芯片的光学显微照片

Fig. 17 Solid-state 3D imaging LiDAR<sup>[63]</sup>. (a) Schematic diagram; (b) structure diagram of transmitter and receiver chip; (c) optical micrograph of the demonstrator chip

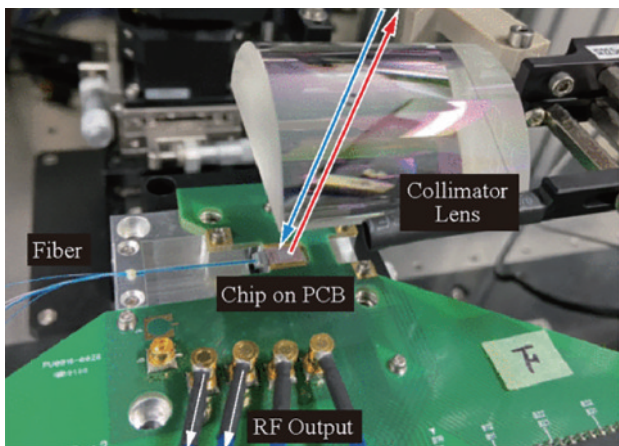


图 18 FMCW 激光雷达芯片<sup>[64]</sup>

Fig. 18 FMCW LiDAR chip<sup>[64]</sup>

#### 4.5 其他激光雷达

当激光雷达只有固定角度的测距需求时,系统因为无需光束转向机构而可以大大简化。例如法国泰雷兹集团展示的基于硅光子平台的 FMCW 激光雷达<sup>[66]</sup>, 如图 19 所示。除了 DFB 激光模块和输出环行器外, 系统完全在 9 mm<sup>2</sup> 芯片上实现。系统具有 8 个发射通道和 8 个接收通道, 这些通道使用级联的 MZ 开关网络和一个波形校准通道依次寻址, 激光经过每个发射端的准直器后覆盖所需的角度的, 避免了光束扫描过程。该激光雷达实现了对 60 m 处移动目标的检测, 并允许仅用 5 mW 的光功率对 8 m 处的目标进行扫描, 但该方案只能实现不同角度的测距, 无法对目标物成像。

与 LABS 技术类似, 这种结构可以实现快速随机扫描, 并且结构灵活, 制造成本低, 同时也存在盲区问

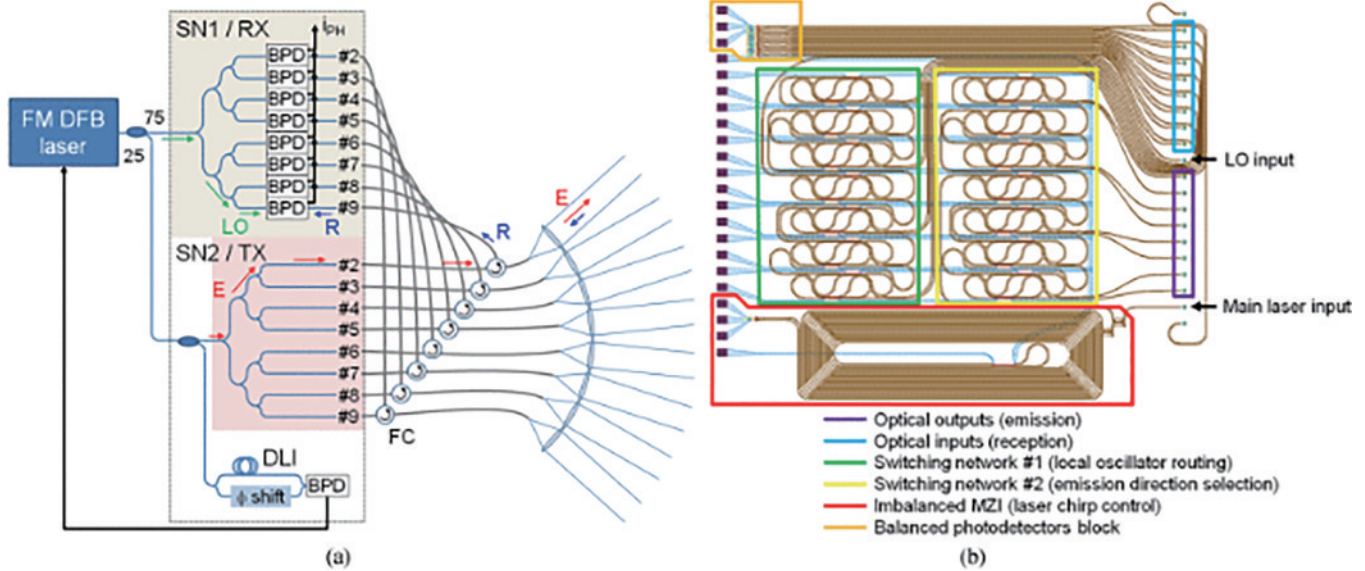


图 19 基于硅光子平台的 FMCW 激光雷达<sup>[66]</sup>。(a) 系统架构; (b) 芯片的掩模版图

Fig. 19 FMCW LiDAR based on silicon photonic platform<sup>[66]</sup>. (a) Architecture of the system; (b) mask layout of the chip

题。此外,该结构对输出端环形器和准直器的需求使得系统连线复杂,没有完全发挥出硅基系统的优势。

## 5 总结与展望

凭借着精度高、抗干扰能力强等优点,激光雷达成为了车辆感知系统的重要配置,在无人驾驶领域具有广阔的应用前景。面对车载激光雷达极具潜力的商用市场,传统扫描型激光雷达在成本和可靠性等方面难以突破现有的瓶颈,而固态激光雷达却有着强大的发展潜力,MobileEYE、AEVA 和速腾聚创等国内外厂商纷纷投入产品研发或布局相关产业。

历经多年发展,硅基光电子技术无论在材料、设备或是加工制造、封装测试等各个方面都积累了大量成熟的技术,是激光雷达理想的集成平台。本综述立足于硅基片上激光雷达固态扫描方案,重点介绍了 flash、OPA、LABS 和 SLG 这 4 种技术近 5 年的研究进展,并对它们的技术特点进行了总结。就未来的市场应用而言,flash 激光雷达结构简单,发展较成熟,目前已有 LeddarTech Pixell 等产品出现,但因为探测距离及精度有限,主要用于低速和精度要求较低的应用场景,还难以作为汽车的主雷达使用。OPA 体积紧凑,扫描速度快,具有低成本量产的可行性,也很适合与 FPA 或衍射光栅结合而实现二维光束转向,是当前的研究主流。虽然目前的产业链仍不成熟,实际产品制造存在较大的技术难点,短期内难以实现量产,但 Quanergy 的 S 系列产品也已经在推进产品化进程。相比之下,LABS 技术和 SLG 技术发展较晚,缺少技术积累与实用性证明,目前还停留在研究阶段,距离商品化还有很长的路要走。

对于整个激光雷达系统来说,目前除扫描系统以外,激光源、调制模块、放大器及光电探测器等其余一

些组件也已经有了芯片化成果,但分立的芯片器件之间仍需要通过光纤或空间耦合,功耗、体积和稳定性等问题依然存在。但随着研究者们对异构集成平台的开发,可以预见,未来的硅基芯片上将可以集成激光雷达系统所需的各个有源和无源器件,使激光雷达完全实现芯片化,从而提高系统工作的稳定性,简化制造和安装流程,大大降低其体积和生产成本,最终提升激光雷达在无人驾驶等领域的竞争力。

## 参 考 文 献

- [1] 刘基余. 60 年距离测量的演变[J]. 海洋测绘, 2010, 30(2): 74-78.  
Liu J Y. The distance measurement evolution in 60 years [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2010, 30(2): 74-78.
- [2] Molebny V, McManamon P F, Steinvall O, et al. Laser radar: historical prospective: from the East to the West [J]. Optical Engineering, 2016, 56(3): 031220.
- [3] 戴永江. 激光雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.  
Dai Y J. Laser radar technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [4] Eitel J U H, Höfle B, Vierling L A, et al. Beyond 3-D: the new spectrum of lidar applications for earth and ecological sciences[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 186: 372-392.
- [5] Liu Z L, Barlow J F, Chan P W, et al. A review of progress and applications of pulsed Doppler wind LiDARs [J]. Remote Sensing, 2019, 11(21): 2522.
- [6] Royo S, Ballesta-Garcia M. An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles[J]. Applied Sciences, 2019, 9(19): 4093.
- [7] Yu A W, Troupaki E, Li S X, et al. Orbiting and *in-situ* lidars for earth and planetary applications[C]//IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote

- Sensing Symposium, September 26-October 2, 2020, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2020: 3479-3482.
- [8] 狄慧鸽, 华灯鑫. 底层大气探测激光雷达国内研究现状与进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 20210032.
- Di H G, Hua D X. Research status and progress of Lidar for atmosphere in China(Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3): 20210032.
- [9] Roriz R, Cabral J, Gomes T. Automotive LiDAR technology: a survey[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 6282-6297.
- [10] 李凯鹏, 贺岩, 侯春鹤, 等. 双波长海洋激光雷达探测近岸到大洋水体的叶绿素剖面[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2010002.
- Li K P, He Y, Hou C H, et al. Detection of chlorophyll profiles from coastal to oceanic water by dual-wavelength ocean lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2010002.
- [11] 龚威, 史硕, 陈博文, 等. 机载高光谱激光雷达成像技术发展与应用[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1200002.
- Gong W, Shi S, Chen B W, et al. Development and application of airborne hyperspectral LiDAR imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1200002.
- [12] Hecht J. Lidar for self-driving cars[J]. Optics and Photonics News, 2018, 29(1): 26-33.
- [13] Kukkala V K, Tunnell J, Pasricha S, et al. Advanced driver-assistance systems: a path toward autonomous vehicles[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2018, 7(5): 18-25.
- [14] Warren M E. Automotive LIDAR technology[C]//2019 Symposium on VLSI Circuits, June 9-14, 2019, Kyoto, Japan. New York: IEEE Press, 2019: C254-C255.
- [15] Li Y, Ibanez-Guzman J. Lidar for Autonomous Driving: the principles, challenges, and trends for automotive lidar and perception systems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2020, 37(4): 50-61.
- [16] Tulldahl H M, Larsson H. Lidar on small UAV for 3D mapping[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9250: 925009.
- [17] Pogačnik L, Munih M. Towards a multi-perspective time of flight laser ranging device based on mirrors and prisms[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 7121.
- [18] 陈敬业, 时尧成. 固态激光雷达研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 190218.
- Chen J Y, Shi Y C. Research progress in solid-state LiDAR[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 190218.
- [19] Raj T, Hashim F H, Huddin A B, et al. A survey on LiDAR scanning mechanisms[J]. Electronics, 2020, 9(5): 741.
- [20] Wang D K, Watkins C, Xie H K. MEMS mirrors for LiDAR: a review[J]. Micromachines, 2020, 11(5): 456.
- [21] Sun X C, Zhang L X, Zhang Q H, et al. Si photonics for practical LiDAR solutions[J]. Applied Sciences, 2019, 9(20): 4225.
- [22] Siew S Y, Li B, Gao F, et al. Review of silicon photonics technology and platform development[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(13): 4374-4389.
- [23] Margalit N, Xiang C, Bowers S M, et al. Perspective on the future of silicon photonics and electronics[J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(22): 220501.
- [24] 王鹏飞, 罗光振, 潘教青. 硅基集成激光雷达技术[J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(2): 43-50.
- Wang P F, Luo G Z, Pan J Q. Silicon-based integrated LiDAR technology[J]. ZTE Technology Journal, 2020, 26(2): 43-50.
- [25] Hsu C Y, Yiu G Z, Chang Y C. Free-space applications of silicon photonics: a review[J]. Micromachines, 2022, 13(7): 990.
- [26] Delori F C, Webb R H, Sliney D H, et al. Maximum permissible exposures for ocular safety (ANSI 2000), with emphasis on ophthalmic devices[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(5): 1250-1265.
- [27] Amann M C, Bosch T M, Lescure M, et al. Laser ranging: a critical review of unusual techniques for distance measurement[J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 10-19.
- [28] Lum D J. Ultrafast time-of-flight 3D LiDAR[J]. Nature Photonics, 2020, 14(1): 2-4.
- [29] Behroozpour B, Sandborn P A M, Quack N, et al. Electronic-photonic integrated circuit for 3D microimaging[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(1): 161-172.
- [30] Philippov V, Codemard C, Jeong Y, et al. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications[J]. Optics Letters, 2004, 29(22): 2590-2592.
- [31] Xu Z Y, Yu F X, Qiu B W, et al. Coherent random-modulated continuous-wave LiDAR based on phase-coded subcarrier modulation[J]. Photonics, 2021, 8(11): 475.
- [32] Sambridge C S, Spollard J T, Sutton A J, et al. Detection statistics for coherent RMCW LiDAR[J]. Optics Express, 2021, 29(16): 25945-25959.
- [33] Spollard J T, Roberts L E, Sambridge C S, et al. Mitigation of phase noise and Doppler-induced frequency offsets in coherent random amplitude modulated continuous-wave LiDAR[J]. Optics Express, 2021, 29(6): 9060-9083.
- [34] 徐忠扬, 张洪祥, 陈凯, 等. 调频连续波激光雷达技术进展[J]. 真空电子技术, 2019(4): 18-26, 40.
- Xu Z Y, Zhang H X, Chen K, et al. Progress of frequency-modulated continuous-wave lidars[J]. Vacuum Electronics, 2019(4): 18-26, 40.
- [35] 卢焰宇, 葛春风, 王肇颖, 等. 频率调制连续波激光雷达技术基础与研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 190038.
- Lu Z Y, Ge C F, Wang Z Y, et al. Basics and developments of frequency modulation continuous wave LiDAR[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 190038.
- [36] Agishev R, Gross B, Moshary F, et al. Range-resolved pulsed and CWFM lidars: potential capabilities comparison[J]. Applied Physics B, 2006, 85(1): 149-162.
- [37] Massaro R D, Anderson J E, Nelson J D, et al. A comparative study between frequency-modulated continuous wave LADAR and linear LiDAR[J]. The

- International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, XL-1: 233-239.
- [38] Zhang T, Qu X H, Zhang F M. Nonlinear error correction for FMCW lidar by the amplitude modulation method[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11519-11528.
- [39] Baumann E, Giorgetta F R, Coddington I, et al. Comb-calibrated frequency-modulated continuous-wave lidar for absolute distance measurements[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2026-2028.
- [40] Zheng J H, Jia L H, Zhai Y R, et al. High-precision silicon-integrated frequency-modulated continuous wave LiDAR calibrated using a microresonator[J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(8): 2783-2791.
- [41] Gao S, Hui R. Frequency-modulated continuous-wave lidar using I/Q modulator for simplified heterodyne detection[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(11): 2022-2024.
- [42] Zhang C, Lindner S, Antolović I M, et al. A 30-frames/s,  $252 \times 144$  SPAD flash LiDAR with 1728 dual-clock 48.8-ps TDCs, and pixel-wise integrated histogramming[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(4): 1137-1151.
- [43] Kostamovaara J, Jahromi S, Hallman L, et al. Solid-state pulsed time-of-flight 3-D range imaging using CMOS SPAD focal plane array receiver and block-based illumination techniques[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(2): 6817911.
- [44] Hu J, Liu B Z, Ma R, et al. A  $32 \times 32$ -pixel flash LiDAR sensor with noise filtering for high-background noise applications[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2022, 69(2): 645-656.
- [45] Rablau C I. Lidar: a new self-driving vehicle for introducing optics to broader engineering and non-engineering audiences[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11143: 111430C.
- [46] Hao Q, Tao Y, Cao J, et al. Development of pulsed-laser three-dimensional imaging flash lidar using APD arrays[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2021, 63(10): 2492-2509.
- [47] Zhao F Q, Jiang H, Liu Z W. Recent development of automotive LiDAR technology, industry and trends[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11179: 111794A.
- [48] McManamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, et al. Optical phased array technology[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 268-298.
- [49] 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.
- [50] Poulton C V, Byrd M J, Russo P, et al. Long-range LiDAR and free-space data communication with high-performance optical phased arrays[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5): 7700108.
- [51] Byun H, Lee J S, Jang B, et al. A gain-enhanced silicon-photonic optical phased array with integrated O-band amplifiers for 40-m ranging and 3D scan[C]//CLEO: Science and Innovations 2020, May 10-15, 2020, Washington, DC, USA. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2020: STh3O.7.
- [52] Lee J S, Shin D, Jang B, et al. Single-chip beam scanner with integrated light source for real-time light detection and ranging[C]//2020 IEEE International Electron Devices Meeting, December 12-18, 2020, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [53] Byun H, Cho Y, Hwang I, et al. Single-chip beam scanner LiDAR module for 20-m imaging[C]//2021 IEEE International Electron Devices Meeting, December 11-16, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [54] Li Y Z, Chen B S, Na Q X, et al. Wide-steering-angle high-resolution optical phased array[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(12): 2511-2518.
- [55] Hsu C P, Li B D, Solano-Rivas B, et al. A review and perspective on optical phased array for automotive LiDAR [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(1): 8300416.
- [56] Kim Y, Won K, An J, et al. Large-area liquid crystal beam deflector with wide steering angle[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(24): 7462-7468.
- [57] Spector S J. Review of lens-assisted beam steering methods[J]. *Journal of Optical Microsystems*, 2022, 2(1): 011003.
- [58] Cao X Y, Qiu G F, Wu K, et al. Lidar system based on lens assisted integrated beam steering[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5816-5819.
- [59] Li C, Wu K, Cao X Y, et al. Monolithic transceiver for lens-assisted beam-steering Lidar[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(22): 5587-5590.
- [60] Li C, Wu K, Cao X Y, et al. Monolithic coherent LABS lidar based on an integrated transceiver array[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(11): 2907-2910.
- [61] 张广进, 吴侃, 李超, 等. 透镜辅助的集成收发调频连续波激光雷达[J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0623001.
- Zhang G J, Wu K, Li C, et al. Lens-assisted frequency modulated continuous wave lidar based on integrated transceiver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0623001.
- [62] Zhang X S, Kwon K, Henriksson J, et al. A large-scale microelectromechanical-systems-based silicon photonics LiDAR[J]. *Nature*, 2022, 603(7900): 253-258.
- [63] Rogers C, Piggott A Y, Thomson D J, et al. A universal 3D imaging sensor on a silicon photonics platform[J]. *Nature*, 2021, 590(7845): 256-261.
- [64] Baba T, Tamanuki T, Ito H, et al. Silicon photonics FMCW LiDAR chip with a slow-light grating beam scanner[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 8300208.
- [65] Saneyuki S, Shiratori R, Baba T. Unidirectional emission in engineered slow light beam scanner[C]//2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), July 3-6, 2022, Toyama, Japan. New York: IEEE Press, 2022.
- [66] Martin A, Dodane D, Leviandier L, et al. Photonic integrated circuit-based FMCW coherent LiDAR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(19): 4640-4645.