

文章编号: 1672-8785(2020)05-0001-12

固态激光雷达探测器技术发展

周 健^{1,2} 孙 芸^{1,2} 阮 昊³

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;

2. 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050;

3. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要: 激光雷达可精确采集目标的距离和速度信息, 并可实现目标探测与成像, 因此在智能交通、无人机避障、智慧家庭、卫星测绘与导航等领域具有重要的应用前景。首先介绍了激光探测的基本原理、主流技术方案以及研究必要性; 其次, 针对激光雷达固态化和小型化集成的应用需求, 介绍了国际上光学相控阵激光雷达、机械扫描激光雷达和闪光激光雷达的技术发展动态, 并阐述了我国激光雷达技术、产品和商业发展现状; 最后提出了激光雷达技术面临的挑战以及可能的解决方案, 并对其发展趋势进行了展望。

关键词: 激光雷达; 光学相控阵; 探测器

中图分类号: TN248.1; TN256 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.05.001

Development on Solid-State Lidar Detector Technology

ZHOU Jian^{1,2}, SUN Yun^{1,2}, RUAN Hao³

(1. Shanghai Institute of Micro-system and Information Technology,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

2. Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

3. Shanghai Institute of Optics and Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: Lidar can accurately collect the distance and speed information of the target, and can realize the target detection and imaging, so it has important application prospects in the fields of intelligent transportation, UAV obstacle avoidance, smart home, satellite mapping and navigation. Firstly, the basic principles, mainstream technical solutions and research necessity of laser detection are introduced. Secondly, according to the application requirements of solid-state and miniaturized integration of lidar, the technical development trends of international optical phased array lidar, mechanical scanning lidar and flash lidar are introduced. Meanwhile, the technical, product and commercial development status of lidar in China are expounded. Finally, the challenges and possible solutions of lidar technology are proposed, and its development trend is prospected.

收稿日期: 2020-03-08

基金项目: 中国科学院联合基金项目(6141A01100101)

作者简介: 周健(1970-), 男, 江苏大丰人, 研究员, 博士, 主要从事毫米波探测器研究。

E-mail: zjian@mail.sim.ac.cn

Key words: lidar; optical phased array; detector

0 引言

作为中国 35 项“卡脖子”技术之一，激光雷达(Light Detection and Ranging, LiDAR)已经成为科学界和产业界的研究焦点，并且在智能交通、无人机避障等方面具有广阔的应用前景。主流技术包括微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)激光雷达、闪光(Flash)激光雷达和光学相控阵(Optical Phased Array, OPA)激光雷达。固态相控阵激光雷达已成为未来发展的主要备选技术。开展激光雷达技术研究对于解释微型阵列器件的光学相位控制机理具有重要的学术价值，对于我国尽快抢占技术制高点和形成自主知识产权具有一定的社会意义，对于完善激光雷达产业链和促进产业发展具有重要的经济价值。

1 激光雷达的原理、分类与发展趋势

1.1 激光雷达的定义及原理

在此主要介绍固态激光雷达，它通常是指完全没有移动部件的雷达，OPA 及 Flash 是纯固态激光雷达的代表技术^[1-5]。某些包含微动部件的技术方案不属于严格意义上的纯固态激光雷达。

固态激光雷达的测距原理如下：用激光雷达探测器发射激光束，然后通过测量其反射回来的飞行时间(Time of Flight, ToF)来计算探测器与物体之间的距离，从而探测和分辨目标的远近。

固态激光雷达的成像原理如下：借助多个激光探测器发射激光束，然后通过多个探测器接收激光反射信号，并利用相位和强度信息来提取空间图像信息。该设计实际上源自红外焦平面成像仪，即焦平面上排列着用于感知信号的感光元件阵列，并在监视端实现成像^[6]。

1.2 激光雷达的主流技术方案

目前的主流方案有 MEMS、OPA 和 Flash 激光雷达技术等三种^[7-9]。

1.2.1 MEMS 激光雷达技术

MEMS 激光雷达技术指的是借助于体硅工艺将反射镜结构微型化，以实现垂直方向上的一维扫描和整机水平扫描，进而实现三维成像。该技术采用光纤激光器作为光源，但没有完全避免机械运动，因此不算严格意义上的纯固态激光雷达。

1.2.2 OPA 激光雷达技术

OPA 方案由数个发光单元组成阵列，其中各光源的发光时间可控。通过各单元的电压调节光学特性，从而调制单元波束。经电控元件协同控制，实现主波束方向的控制，进而完成扫描。该技术的难点在于扫描速度和数据记录速度的控制。

1.2.3 Flash 激光雷达技术

Flash 激光雷达在短时间内同时发射出多束覆盖待测目标及区域的光束，然后通过高灵敏度接收器接收信号来对周围环境进行成像。

1.2.4 固态激光雷达与机械扫描雷达的比较

光学相控阵通常采用电控相位控制波束指向，又称为电扫描技术。固态激光雷达基于新型低成本硅芯片，可进行远距离的高精度测量，具有更经济、更紧凑以及抗振动等特点。而机械扫描雷达则是通过采用机械传动的方式驱动激光发射端在水平方向旋转来实现周视探测的。由于有机械磨损，该雷达的使用寿命会受到影响。图 1 所示为光学相控阵雷达和机械扫描雷达的具体实例。

基于 OPA 技术的固态激光雷达有以下几种优势^[10-12]：(1)结构简单，体积小。由于没有旋动元件，可实现微型化，且鲁棒性好、成本低。(2)扫描精度高。由于采用电信号控制，扫描精度可高达千分之一度。(3)可控性好。光束指向完全由电信号控制，因此可选择特定区域进行高密度扫描，同时对其他区域进行稀疏扫描。这样能够节省运算资源，进而实现实时感知。(4)扫描速度快。OPA 激光雷达的扫

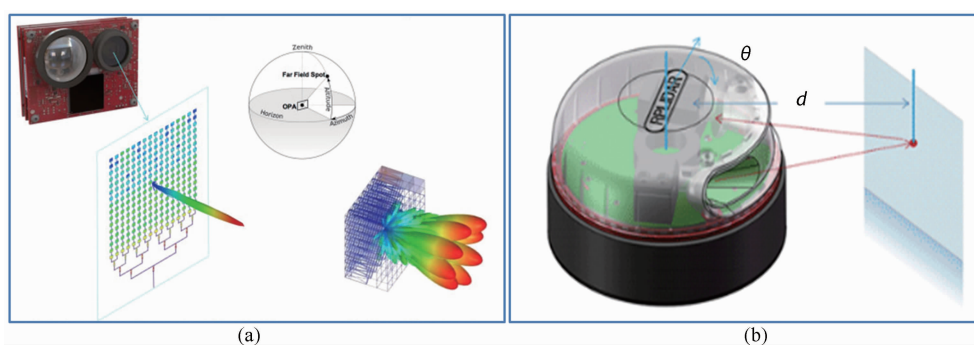


图 1 (a) Quonergy 公司的光学相控阵雷达; (b) 上海思岚科技公司的 RPLIDAR A3 机械扫描雷达

测速度取决于所用材料的电子学特性, 一般都可达到 MHz 量级。

1.3 激光雷达技术、产品和产业的发展趋势

1.3.1 激光雷达技术的发展趋势

就激光雷达技术链而言, 激光雷达包括 ToF 芯片和数模转换芯片组、高带宽近红外光源(发光二极管或者激光器)、用于光束整形的光学器件、透镜(需经过优化,且适合近红外光透)以及用于与 ToF 芯片进行数据传递并与主处理器通信的处理器。其中, ToF 芯片和数模转换芯片组是核心部分。未来激光雷达技术将向固态化、小型化的方向发展, 但目前机械式激光雷达仍是主流。

1.3.2 激光雷达产品的价格竞争趋势

从 2020 国际消费电子展开始, 价格下降以及实现车规级已成为未来趋势。全球的激光雷达市场将会进入惨烈的价格战。参展厂商包括博世、华为、大疆、Velodyne 以及禾赛、速腾等初创公司。除了惨烈的价格战之外, 激光雷达也必然走向车规级。这会促进自动驾驶汽车(包括 L3 和 L4 级)的量产, 同时加快相关行业的整合。就自动驾驶领域而言, 激光雷达的量产价格范围为 100~1000 美元。激光雷达的各个单元和系统可成为产品进入市场, 但需要符合车规要求。其中部分产品可根据不同车厂的实际需求进行定制。

1.3.3 激光雷达产业的发展趋势

激光雷达模块包括 ToF 芯片、高带宽近红外光源、光学器件、透镜、处理器和激光雷达。其中各部分都可作为产品而形成销售利

润。由于具有高的角度分辨率和距离分辨率, 且与毫米波雷达形成优势互补, 激光雷达可为无人驾驶提供重要组件及技术支持。该产业将会向无人驾驶和无人机避障等方向发展^[13-15]。

1.4 激光雷达技术的研究现状与意义

目前的激光雷达系统往往体积庞大且缺乏鲁棒性。由于通常需要花费数千至上万美元, 它已成为自动驾驶汽车最昂贵的部件之一。激光雷达系统成本高的原因主要在于激光雷达芯片和光路系统集成的技术壁垒, 而芯片的技术难度在雷达系统中又是最高的。因此, 开展激光雷达芯片和微型化光路系统的设计与制造研究, 对于掌握具有自主知识产权的激光雷达核心技术具有重要的学术和工程研究价值。

作为中国 35 项“卡脖子”技术之一, 激光雷达直接关系到我国汽车产业的未来发展。固态激光雷达芯片技术是激光雷达的关键核心技术, 美国、日本、韩国、捷克和中国等国先后就这一科技制高点开展了前瞻研究。该领域的研发竞争主要集中在近 5 年内。中国由于在技术积累、市场和原材料成本等方面的优势, 与国际同行的差距正在不断缩小。开展激光雷达技术研究, 对于摆脱我国汽车产业对国外雷达技术的依赖、形成具有自主知识产权的智能雷达芯片和激光雷达系统并最终获得国际智能汽车行业话语权, 具有重要的战略和社会研究价值。

目前正处于重要的战略机遇期, 国外激光雷达在技术上虽暂时领先, 但成本并没有优势。在国内, 依托中国科学院等国立科研机构

的技术基础,开展激光雷达的工程化与产业化研究,有望突破关键技术和降低雷达成本,对推动雷达系统产业化和促进无人驾驶汽车市场发展具有重要的战略意义和经济价值。

2 激光雷达技术的国内外研究发展

2.1 国外研究进展

2.1.1 硅基 MEMS 二维光学相控阵技术

2019 年 8 月,美国加州大学伯克利分校的 MEMS 专家团队首次实现了二维光学相控阵(见图 2)^[16]。该芯片融合新型光栅与 S-MEMS 技术,OPA 的光学调制在自由空间完成,可实现无插损的光学耦合;其光栅结构突破了常规硅光集成的波长限制,可覆盖可见光到近红外光谱范围。

该团队的创新点是构建一种光发射器阵列,并通过微单元的横向位置变化来改变阵列的相位。它产生的光波的排列,可向任何方向发射激光束。响应时间为 $5.7 \mu\text{s}$,响应速度几乎是传统的基于液晶的光学相控阵的 1000 倍;封装后的尺寸为 $3.1 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$,大阵列的像素数为 25600。LiDAR 向各个方向发射激光束,并通过测量它们返回所需要的时间来确定附近物体的距离,可用于对周围环境进行成像的汽车高级驾驶辅助系统(Advanced Driving Assistance System, ADAS)。

这项技术主要基于 MEMS 工艺完成,通过控制 MEMS 单元的微小机械运动来实现相位控制。由于有机械运动,存在机械损耗,导

致芯片使用寿命受到制约。

2.1.2 Velodyne 机械扫描技术

2020 年 1 月,美国 Velodyne 公司在 2020 国际消费电子展上推出了一款仅售 100 美元的 Velabit 激光雷达(见图 3)。该公司计划在 2020 年中期开始出售这款产品,其价格远低于 Velodyne 产品线中 10 万美元的型号以及 Lumina 公司计划于 2022 年上市的 LiDAR 设备(1000 美元)。Velabit 激光雷达体积小,与扑克牌大小相当。该雷达属于市场主流产品,但由于利用机械转动实现雷达扫描,其稳定性和使用寿命受到影响。



图 3 Velabit 激光雷达

2.1.3 Sense Photonics 公司的模块化 FLASH 激光雷达扫描技术

美国 Sense Photonics 公司因变革性固态 FLASH 架构而闻名,并于近期推出了首款用于 ADAS 和自动驾驶的模块化 FLASH 激光雷达——Osprey^[17]。它的垂直视野为 75° ,视野非常宽且密集,能够以高分辨率在从道路边沿至地平线的范围内探测目标。该组件(见图 4)

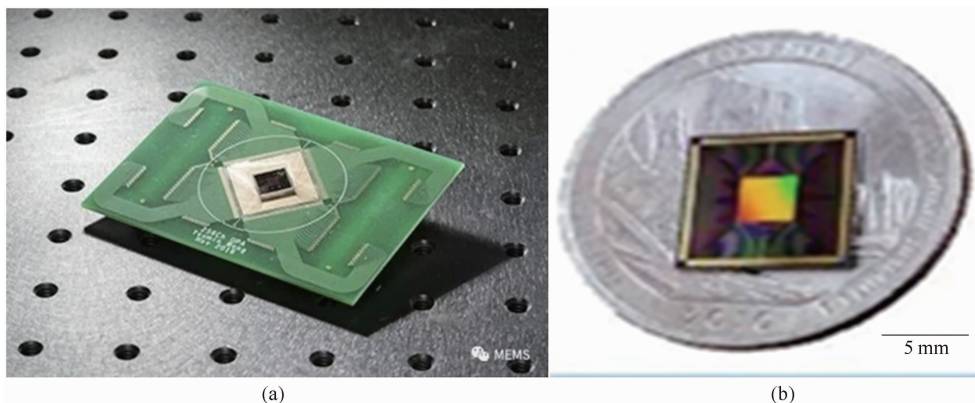


图 2 硅基 MEMS 可编程二维光学相控阵芯片:(a)安装在 PCB 板上的芯片;(b)封装后的芯片



图 4 模块化 FLASH 激光雷达

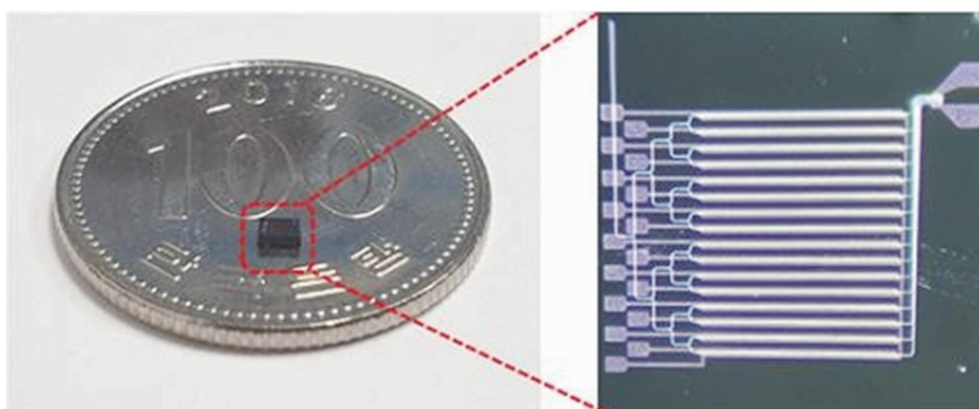


图 5 硅基 OPA 芯片

的售价为 3200 美元。激光雷达模块易于集成,并结合了车用级近场传感器与 Sense Illuminator 芯片。后者是一个专有的 VCSEL 激光阵列芯片,由数千个独立的激光元件组成。

2.1.4 硅基三维 OPA 雷达技术

2.1.4.1 韩国三维 OPA 激光雷达研究进展

2019 年 2 月,韩国科学技术研究院(KAIST)发布了一款硅基 OPA 芯片(见图 5)。该芯片通过向二维图像提供距离信息来将其识别为三维图像,现已成为三维图像传感器的核心部件^[18]。Hyo-Hoon Park 等人通过集成可调谐散热器,开发出了一种低功耗的超小型 OPA 芯片。此芯片基于单色光源控制宽二维波束扫描,实现了三维图像传感器的小型化。该产品还可实现无线发射器并传输图像数据,其定位是一种使高质量图像数据在电子设备之间进行自由通信的产品。

这种三维图像传感器虽然可实现三维图像的获取,但其相位控制是基于机械运动实现的,因此不属于纯固态激光雷达。

2.1.4.2 日本索尼公司开发硅基激光雷达

2020 年 1 月,日本索尼公司开始针对自动驾驶汽车应用开发一款硅基激光雷达视觉传感器(见图 6),以期抢占汽车电子市场的先机。激光雷达是赋能自动驾驶汽车安全性和功能性的关键组件。作为全球领先的图像传感器供应商,索尼公司在激光雷达视觉传感器的全球竞争中具有明显优势。他们拟研发的固态激光雷达将基于新的低成本硅芯片,可进行更远距离的高精度测量,并将具有更经济、更紧凑以及抗振动等优点。2021 年 3 月,该公司将投资 65 亿美元来开展图像传感器业务,并在日本新建一座新工厂,但其芯片业务的投资规模尚未公开^[19]。

2.1.4.3 德国英飞凌公司的三维图像传感器 REAL3™ 单芯片

德国英飞凌公司的新型三维图像传感器 REAL3™ 单芯片解决方案的尺寸仅为 4.4 mm × 5.1 mm。它是英飞凌公司成功研发的第五代飞行时间深度传感器。该芯片体积小,可被



图 6 日本索尼公司的硅基激光雷达视觉传感器

整合到只有几个像素的微型设备中，而且还能以低功耗提供最高分辨率的数据。英飞凌公司未公布这项三维图像技术的具体细节，但业界预测其使用了激光 OPA 技术^[20]。

2.1.4.4 日本横滨国立大学的慢光速激光探测器

日本横滨国立大学的 Toshihiko B 等人^[21]利用慢速光实现了一种激光雷达传感器(见图 7)。慢速光是指速度通常高于其他变量的一种意想不到的移动。现有的激光雷达传感器系统由激光源、光电探测器以及可将光引导到适当位置的光束控制装置组成。其中，光束引导装置大多使用某种机械组件(如旋转镜)。设备体积大而笨重，总速度受限，且成像不稳定，尤其在移动设备应用中受到限制。OPA 相控阵可在没有机械部件的情况下引导光束。但是所需的光学天线数量庞大，而且校准每个天线所需的时间和精度均需达到高要求，导致操作复杂。他们使用一种特殊的波导“光子晶体”，并将其瞄准经过硅蚀刻的介质。当激光受迫与光子晶体相互作用时，光被减慢并发射到自由空间。然后研究人员使用了棱镜透镜，并将光束指向所需的方向。

这种激光雷达传感器系统的特点是非机械转向。由此产生的装置体积小，没有移动的机械结构，因此制造成本更低且更具弹性。该工作作为固态激光雷达在自动驾驶汽车等方面的移动应用奠定了基础。

2.1.4.5 美国激光雷达技术研究进展

美国 Innovusion 公司研发出了首款兼顾图

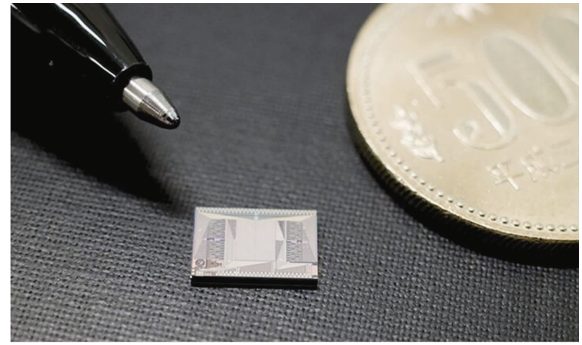


图 7 慢光速激光探测器芯片

像级分辨率与高信噪比的远距离探测激光雷达——Innovusion Cheetah。该公司可提供满足自动驾驶量产需求的软硬件解决方案。这种混合固态激光雷达可以实现 300 线分辨率。另外，美国 TriLumina 公司研发出了固态 VCSEL 照明模组；作为机械扫描雷达的典型厂商代表，美国 Velodyne 公司近年来也在开发固态激光雷达。

图 8 所示为 Velodyne 公司开发的最新产品——Velabit。它是目前业界最小的激光雷达，但尚未投入量产。稍大点的 Velarray 产品(3 cm×5 cm)较为成熟，于 2020 年投入大规模量产。其探测距离可达 200 m，水平视角为 120°，垂直视角为 35°。Veladome 产品体积最小，探测距离为 30 m，视场达到 180°×180°，可覆盖整个半球，适用于盲点监控^[22-23]。



图 8 Velodyne 公司开发的最新产品

2.1.5 激光雷达芯片

2019 年 12 月，美国 Aeva 公司发布了下一代调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)激光雷达系统——Aeries。他们将激光雷达传感器的所有关键元件都集成于一颗微型光子芯片^[24]。该芯片系统的尺寸

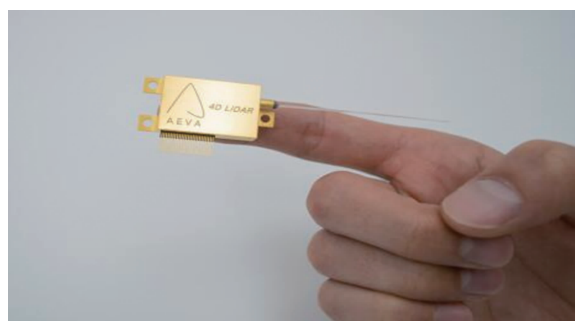


图 9 Aeva 公司的 4DLidar 微型光子芯片

和能耗均小于常规雷达芯片, 且探测范围广, 可探测远距离的低反射率物体, 并能测量每个点的瞬时速度。这项技术打破了最大探测距离与点密度之间的依赖关系。Aeries 雷达将多个光束集成在一颗芯片上, 其中每个光束都能每秒测量超过 200 万个 300 m 以外的点。它具有 120° 视野, 这在自动驾驶汽车行业尚数首次。该激光雷达不受其他传感器或阳光的干扰, 且其功耗远低于其他同性能产品, 进而提高了自动驾驶的安全性和可扩展性。此外, 不同于其他 FMCW 方式, Aeries 激光雷达每秒可为每束光提供数百万个点, 从而产生超高保真度数据。该激光雷达芯片系统的价格为 500 美元, 远低于目前数万美元的市场价格, 因此获得了大众和奥迪公司的青睐。

另外, 加拿大 Leddar Tech 公司拥有核心激光雷达芯片技术, 其 Leddar Core LCA2 芯片是业界首款车规级三维固态 LiDAR 芯片, 且已实现量产。

2.1.6 无通讯无 GPS 的无人机蜂群定位算法策略

捷克技术大学利用基于激光雷达的同时定位与成像 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) 技术, 结合专用的相对定位传感器, 在绝对位置无法获取的情况下, 执行了去中心化、无线通信的蜂群飞行^[25]。其中, 蜂群和避障控制是基于改进的类似 Boids 的算法来实现的, 而整个蜂群则是通过主机进行控制。

2.2 国内全固态激光雷达研发进展

2.2.1 深圳力策科技有限公司

2019 年, 深圳力策科技有限公司已完成了三次 OPA 芯片流片, 并研制出了全球首款双轴独立控制、大视角、高速扫描的 OPA 芯片^[26]。该芯片的目标单价为 100 元, 扫描速度大于 3 MHz, 插入损耗小于 30%。测距系统波长为 1550 nm。拟在 2020 年 3~4 月输出点云, 7~8 月给客户送工程样机。OPA 产品线定位在 200 m 以上的远距离车载应用。公司目标是两年内达到 1000 台雷达量产能力, 单台激光雷达(光纤激光器+半导体激光器+射频芯片)的价格预期在 6000~8000 元左右。

目前深圳力策科技有限公司主要依赖单线机械式激光雷达(见图 10)盈利, 其成本占 1/5~1/8, 可替代日本和德国产品, 适合于服务机器人以及商用和工业用 AGV 市场。他们使



图 10 深圳力策科技有限公司的机械式激光雷达产品

用了 Velodyne 公司的专利。该专利主要针对多线堆叠的 360° 旋转结构的激光雷达，而多线堆叠的结构被普遍认为是一个暂时性的过渡方案。深圳力策科技有限公司基于 OPA 的物理底层，与 Quanergy 公司及 Analog Photonics 公司开展了新技术的尝试合作。

2.2.2 镭神智能系统有限公司

镭神智能系统有限公司从 2015 年开始研发，并于 2019 年 12 月 5 日与丰田通商先端电子(深圳)有限公司签署了销售代理协议^[27]。目前已形成了市面上最齐全的激光雷达产品矩阵，包括世界领先的车规级 CH 系列混合固态激光雷达(128/32/16 线)、MEMS 固态激光雷达、MS 系列高端远距离测绘激光雷达、N301 系列 TOF 导航避障激光雷达、CX 系列 360° 多线激光雷达、LS03 系列相位法激光雷达、LS01/02 系列三角法激光雷达等等，以及覆盖自动驾驶、汽车辅助驾驶、车路协同、智慧交通、机器人、物流、安防、测绘、港口和工业自动化等多个领域的环境感知整体解决方案^[26]。

满足车规要求的 MEMS 固态激光雷达采用了该公司自研的车规级 MEMS 振镜，并以自研自产且符合人眼安全标准的 1550 nm 光纤激光器提供优质光源。此激光雷达的探测距离高达 300 m，而且超高分辨率和宽广视场可帮助其快速、精准地识别目标物体。

车规级 CH 系列混合固态激光雷达(128/

32/16 线)可满足自动驾驶汽车前装市场对车规标准、精准稳定感知、可量产、低成本等方面的要求；镭神激光雷达车路协同项目在北京、上海、广州、深圳、苏州、郑州、许昌、重庆等多个城市得到了应用；自主创新研发的激光雷达三维 SLAM 无人叉车低成本解决方案可大幅提升无人叉车作业的柔性化程度。

2.2.3 中科天芯公司

在中科天芯公司自主研发设计的 A2 芯片产品(见图 11)中，光波导阵列单元的尺寸为数百纳米。基于 OPA 技术，通过调节相位完成扫描。该芯片采用 CMOS 兼容工艺制成，量产成本低^[28-29]；探测距离为 5 m，可应用于近距离的三维成像；前向 30° 扫描，角分辨率为 0.01°，扫描速度为 1 μs 左右。基于此芯片研制的三维构图设备可广泛应用于手势和人脸识别、AR/VR、无人机避障等领域。2020 年未见该芯片的销售业绩报道。

2.2.4 Livox 激光雷达公司

大疆公司旗下的 Livox 激光雷达公司成立于 2016 年。2020 年 1 月，该公司面向 L3/L4 级别自动驾驶推出了 Horizon 和 Tele-15 两款高性能、低成本激光雷达产品(见图 12)。前者的视场覆盖率为 64 线机械激光雷达相当，视场为 81°，价格为 6499 元；后者在 15° 圆形视场范围内扫描 99.8% 的区域，优于传统的 128 线激光雷达，其价格为 9000 元，计划在 2020 年第三季度供货。Livox 激光雷达公司的

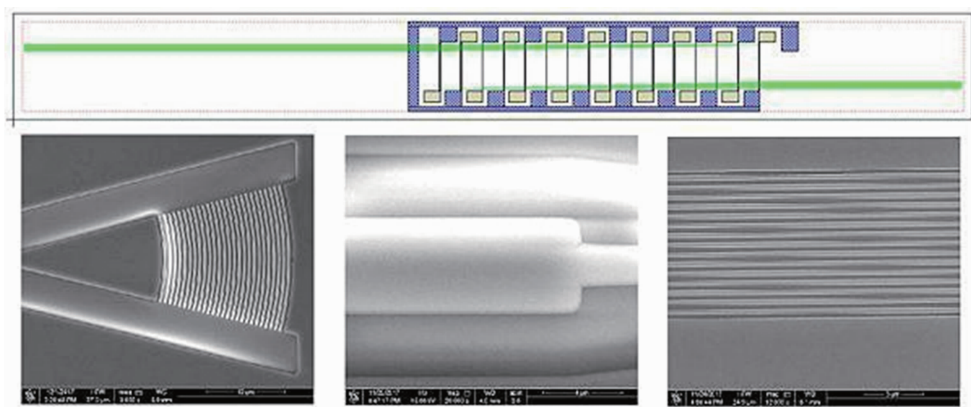


图 11 中科天芯公司的 A2 芯片



图 12 Livox 激光雷达

主要客户为 AutoX、希迪智驾、Refraction AI、东风汽车、高仙机器人以及数字绿土公司, 其雷达主要还是基于机械扫描技术(OPA 技术还在研发中)。Horizon 和 Tele-15 雷达的视场过小, 因此需要 5 个以上雷达才能实现 360°周视。另外, 该公司的雷达波长为 905 nm, 易受可见光影响^[30]。

2.2.5 思岚科技公司

思岚科技公司主要从事激光测距雷达的研究和销售工作。RPLiDAR A2 激光雷达可以测量 6~18 m 的距离, A3 激光雷达可以测量 25 m 的距离, 主要用于家庭清扫机器人。目前, 其技术正在由机械扫描方案向 OPA 方向发展。

国内从事激光雷达集成的公司还有速腾聚创、禾赛光电、北科天绘、北醒科技等公司。其中, 禾赛光电、镭神智能、速腾聚创和北科天绘主要基于机械式激光雷达技术方案, 在 MEMS 激光雷达领域有所涉及; 光珀智能、北醒科技和华科博创等公司主要基于 Flash 激光雷达技术方案。

2.3 激光雷达市场的商业并购

激光雷达作为智能汽车的核心技术而成为汽车商家的竞争焦点。近年来, 激光雷达并购案例频发: 百度、福特投资 Velodyne; Innoviz 和 Leddar Tech 得到注资; 通用收购 Strobe; 沃尔沃和丰田投资 Luminar; 博世投资 TetraVue; 采埃孚收购 Ibeo 的 40% 股份; Quanergy 得到安波福投资; Aurora 收购 Blackmore; 上

汽、北汽投资速腾聚创等等。

作为一家激光雷达研发公司, 美国 Inno-
vusion 公司于 2018 年完成 A 轮融资, 获得了
斯道资本、F-Prime Capital、蔚来资本的 3500
万美元注资。德国 Ibeo 公司(被 SickAG 收购)
研发出了 NEXT 三维固态激光雷达。美国
Waymo 公司在激光雷达研发上耗费了数千万
美元, 其目标销售单价为 7500 美元。华为公
司选择 L4 以上车型, 其技术路线与 Waymo 公
司最为接近。他们已分别在瑞典和加拿大的研
发中心着手研发毫米波雷达和激光雷达^[22-23]。
其中, 瑞典研发中心从事微波基站和 IP 网络
的开发; 加拿大研发中心负责开发华为 5G 技
术, 旨在实现低成本的全天候成像。

就激光雷达的成本结构而言, IC 芯片占
比最大。对于机械式激光雷达, 每线需要 1 组
IC 芯片, 每线 200 美元。64 线及以上的激光
雷达的探测距离大于 150 m, 视场角大于
120°。

2018 年 10 月, 从事激光雷达研发的深圳
力策科技有限公司由高捷资本领投, 元禾原点
跟投。2019 年 7 月已经启动了新一轮融资,
其主要用途是 OPA 激光雷达系统的落地和机
械式激光雷达的持续迭代, 且要拓展到光通信
和消费电子领域(1 μm 波长以下的红外波段)。
2017 年, 从事激光雷达芯片设计的中科天芯
公司完成股权融资, 其投资方为银河金桥投资
和老鹰基金。

2.4 现有市场上固态激光雷达的不足

在现有市场上，固态激光雷达存在以下不足之处：

(1)扫描角有限。现有激光雷达只能进行前向探测，因此需要通过布置多个雷达来实现周视探测。

(2)旁瓣问题。由于光栅衍射，激光存在旁瓣，能量不够集中。

(3)加工难度高。光学相控阵要求阵列单元尺寸为 500 nm (波长 1 μm)。由于工艺要求高且能量集中，高精密加工和散热是技术瓶颈。

(4)接收面大、信噪比差。固态激光雷达需要有整个接收面，因此会引入较多的环境光噪声，进而增加了目标识别难度。

总之，固态激光雷达目前在可靠性、成本以及探测距离等方面还有待提高，而且近期较难实现大规模量产。

3 激光雷达技术展望

激光雷达研发具有重要的技术、社会和经济研究价值。目前已有 Velodyne 和 Quanergy 等一批知名国际企业和 Innoviz、Trilumina 等后起之秀对激光雷达进行了广泛而深入的研究，国内也有大疆无人机、镭神等一些品牌企业开展了集成创新研究，但在核心芯片领域尚未取得重要突破。

就激光雷达的成本结构而言，占比最大的是 IC 芯片。据测算，16 线机械式激光雷达一般需要 16 个 IC 芯片组，其成本高达 3200 美元，而且 64 组的成本会加倍增长。因此开展芯片研发是当前牵引激光雷达产业发展的关键，对于我国掌握具有自主知识产权的激光雷达组件和智能汽车技术具有全局战略性意义。

尚待解决的关键技术如下：(1)OPA 波束引导组件系统设计。比如需要高度的光束相干性设计，以满足 0.1° 的角分辨率要求，从而区分 150~200 m 处的行人。(2)另一方面，实现 OPA 的单元功耗设计与热管理，以解决现有发射单元的高功率发热问题^[31-32]。

现在固态激光雷达已成趋势，并朝着车规级及量产方向发展。Innoviz 公司从 2021 年开始成为宝马车型固态激光雷达的供应商；Waymo 公司研制出了短程激光雷达，并开始试销售；Velodyne 公司开始涉足毫米波雷达芯片，并推出了 VelaDome 短程激光雷达；2019 年 8 月，德国 IbeoNEXT 公司推出了四维固态激光雷达，并将其应用于长城汽车。目前国内激光雷达的成本还是较高，因此成本在 50 美元左右的激光雷达将会在未来市场上具有竞争力。

国内的中国科学院上海技术物理所、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等科研单位都在红外激光探测器方面有多年积累，且主要集中于激光、红外器件的基础研究方面。其中，中国科学院上海微系统与信息技术研究所拥有国内领先的 MEMS 中试生产线和优秀的光电子研发团队，有望在激光探测器芯片开发方面做出有显示度的工作^[33-35]。

目前，激光雷达是无人机和智能交通行业的技术热点，几乎所有相关公司都获得了投资，其主要技术以机械扫描技术为主。由于没有机械损耗，光相控阵雷达成为各家公司争相研发的技术热点。但是该技术需要获得 MEMS 和微电子加工平台所需的巨额投资，门槛较高，因此至今参与研发的企业较少，主要还是通过与国外公司合作或者购买国外芯片来组装雷达。我国技术水平有待提高，国内科研机构在 OPA 雷达芯片研究方面也落后于国外。

展望未来，国家科技管理部门应在 OPA 雷达芯片以及激光与毫米波雷达复合芯片方面加大投入。同时，激光雷达企业应抓住重要战略机遇期，与中科院等科研院所联合进行研发，突破激光芯片关键核心技术，提高激光雷达领域的技术水平和产业化水平，走小型化、低成本路线，为我国在该领域的国际竞争中争

得一席之地。

参考文献

- [1] 刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展 [J]. *光电工程*, 2019, **46**(7): 190167.
- [2] 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.
- [3] 陈晓冬, 张佳琛, 庞伟淞, 等. 智能驾驶车载激光雷达关键技术与应用算法 [J]. *光电工程*, 2019, **46**(7): 19018.
- [4] Thomas N L, Houdré R, Kotlyar M V, et al. Exploring Light Propagating in Photonic Crystals with Fourier Optics [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, **24**(12): 2964–2971.
- [5] 胡薇. 详细分析光学相控阵 LiDAR [EB/OL]. www.elecfans.com/article/809344.html, 2018.
- [6] 固态激光雷达形成的三种技术路线解读 [EB/OL]. <https://blog.51cto.com/14035552/242-923-3>, 2019.
- [7] Joseph W G. Introduction to Fourier Optics [M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1986.
- [8] Acoleyen K V, Bogaerts W, Jágorská 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.
- [9] Oskooi A F, Roundy D, Ibanescu M, et al. A Flexible Free-software Package for Electromagnetic Simulations by the FDTD Method [J]. *Computer Physics Communications*, 2010, **181**: 687–702.
- [10] Kwong D N, Yang Z, Hosseini A. Integrated Optical Phased Array Based Large Angle Beam Steering System Fabricated on Silicon On-insulator [C]. *SPIE*, 2011, **7943**: 79430Y.
- [11] Acoleyen K V, Komorowska K, Bogaerts W, et al. One-dimensional Off-chip Beam Steering and Shaping Using Optical Phased Arrays on Silicon-on-Insulators [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2011, **29**(23): 3500–3505.
- [12] Li Y, Meersman S, Baets R. Realization of Fiber Based Laser Doppler Vibrometer with Serrodyne Frequency Shifting [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(17): 2809–2814.
- [13] Yurtsever G, Dumon P, Bogaerts W, et al. Integrated Photonic Circuit in Silicon on Insulator for Fourier Domain Optical Coherence Tomography [C]. *SPIE*, 2010, **7554**: 75541B.
- [14] Sun J, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale Nanophotonic Phased Array [J]. *Nature*, 2013, **493**(7431): 195–199.
- [15] Suni P J M, Colosimo J R, Ben Yoo S J, et al. Photonic Integrated Circuit FMCW Lidar On A Chip [C]. Okinawa: 19th Coherent Laser Radar Conference, 2018.
- [16] 殷飞. 二维 MEMS 光栅引领光学相控阵变革: 高速、宽谱、高分辨率 [EB/OL]. <https://36kr.com/p/5241157>, 2019.
- [17] Sense Photonics 为自动驾驶汽车推出首款模块化 FLASH 激光雷达 [EB/OL]. www.laserfocusworld.com.cn/DeIN.asp?id=5276, 2020.
- [18] 余秋云. 韩国研发超小型 3D 图像传感器可用于自动驾驶汽车 [EB/OL]. www.sohu.com/a/294373220_180520, 2019.
- [19] 索尼将开发基于硅芯片的“固态”激光雷达 [EB/OL]. www.laserfocusworld.com.cn/DeIN.asp?id=5296, 2020.
- [20] 3D 图像传感器 REAL3™ [EB/OL]. www.infineon.com/cms/cn/product/sensor/radar-image-sensors/3d-image-sensor-real3/redirId=55479, 2019.
- [21] 日本一研究小组利用慢速光开发出低制造成本的激光雷达传感器 [EB/OL]. www.laserfocusworld.com.cn/DeIN.asp?id=5299, 2020.
- [22] 张璇. 当华为造起激光雷达, Velodyne 在干嘛 [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1648389301534586790&wfr=spider&for=pc>, 2019.
- [23] 赵晶. 自研操作系统/激光雷达 华为有何胜算? [EB/OL]. www.autohome.com.cn/news/201910/948684.html, 2019.
- [24] 罗珊. Aeva 发布下一代激光雷达系统 Aeries 集关键元件于微型光子芯片 [EB/OL]. <https://www.auto.gasgoo.com/news/201912/23170147-073C409.shtml>, 2019.
- [25] 恒润科技. 无人机“蜂群”协同控制与自主避障

- 技术 [EB/OL]. www.52rd.com/Blog/Detail_RD.Blog_hirain_88434.html, 2017.
- [26] 张忠祥. OPA 激光雷达的坚守者 [EB/OL]. www.kgula.com/article/1474811.html, 2019.
- [27] 胡小波. 激光雷达作为一种前沿应用产品, 设计时须具备前瞻性的眼光 [EB/OL]. www.sohu.com/a/342227848_324615, 2019.
- [28] A2 芯片首发, 刷新国内光学相控阵扫描技术记录 [EB/OL]. <http://doc.pcpop.com>, 2018.
- [29] 中科天芯联合中科院推 A2 芯片首发, 国内完全自主研发首款光学相控阵技术固态激光雷达芯片 [EB/OL]. www.elecfans.com/article/634340.html, 2018.
- [30] 沈鹿. 激光雷达白刃战前夜, 大疆拔剑 [EB/OL]. www.3snews.net/column/2520000597-37.html, 2020.
- [31] Geng C, Li X Y, Zhang X J, et al. Coherent Beam Combination of an Optical Array Using Adaptive Fiber Optics Collimators [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(24): 5531–5536.
- [32] Kim J, Oh C, Escuti M J, et al. Wide-angle, Non-mechanical Beam Steering with High Throughput Utilizing Polarization Grating [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(17): 2636–2639.
- [33] 叶金晶, 周健, 孙谦晨, 等. 主动毫米波成像隐私保护算法 [J]. *红外与毫米波学报*, 2017, **36**(2): 88–95.
- [34] 周健, 赵敏, 孙芸, 等. 小型化前倾毫米波双狭缝天线设计与制作 [J]. *红外*, 2019, **40**(10): 20–25.
- [35] 周健, 孙芸, 孙晓玮. 毫米波探测器多普勒信号分析与目标识别方法研究 [J]. *红外*, 2019, **40**(12): 22–27.