



汽车智能化系列报告之七

感知进阶之路， 激光雷达迎来量产元年

分析师及联系人

• 高登

(8621)61118738

gaodeng@cjsc.com.cn

执业证书编号：

S0490517120001

• 高伊楠

(8621)61118738

gaoyan@cjsc.com.cn

执业证书编号：

S0490517060001

• 袁子杰

(8621)61118738

yuanzj1@cjsc.com.cn

执业证书编号：

S0490520080018

• 陈斯竹

(8621)61118738

chensz1@cjsc.com.cn

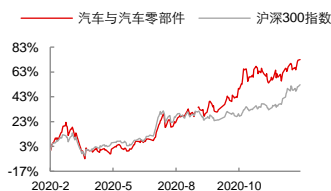
执业证书编号：

S0490519080011

MAIN POINTS OF REPORT

报告日期 2021-01-27
 行业研究 深度报告
 评级 看好 | 维持

市场表现对比图(近 12 个月)



资料来源: Wind

相关研究

- 《变革已至，周期共振——汽车行业 2021 年度投资策略》 2020-12-18
- 《汽车智能化系列报告之六：如何看待华为智能汽车布局？》 2020-11-23
- 《汽车智能化系列报告之五：从 E/E 架构变化看控制器行业机会》 2020-11-08
- 《汽车智能化系列报告之四：智能化如何重塑产业链利益格局？》 2020-11-03

汽车与汽车零部件

汽车智能化系列报告之七：感知进阶之路，激光雷达迎来量产元年

● 后来者居上的核心传感器，激光雷达进入量产元年

汽车变革之际，智能驾驶将成为车企的主战场。“视觉系”使用摄像头凭借 AI 算法实现高阶自动驾驶，特斯拉 NOA 快速推向市场让“视觉系”成为当下主流。以激光雷达为代表的“雷达系”因为成本较高前期主要在 Robotaxi 领域应用。“视觉系”对数据积累、算法的要求较高，先发者优势显著。但激光雷达的高可靠性、定位能力和较低算法依赖有望成为后来者居上的核心传感器。2021 年，各大车企均规划或推出带有激光雷达的车型，激光雷达正式进入量产元年。我们预计激光雷达到 2025 和 2030 年成本有望下降到单只 500 美金和 300 美金，仅汽车应用全球或形成 53 亿和 260 亿美元的市场。

● 激光雷达为何昂贵？如何降本？核心供应链为何？

机械激光雷达需要多组激光器和 IC 实现高线束，结构极其复杂导致成本较高。根据技术原理，激光雷达具有 5 大核心技术，包括测距、扫描系统、发射、接收以及运算单元，每个核心技术均有多条分支可以实现激光雷达的技术优化和成本降低。其中，扫描系统在激光雷达的成本占比超过一半以上，扫描方式从机械到固态是较为有效的降本方式。目前固态激光雷达主要有 MEMS、Flash 和 OPA 三种技术路线。MEMS 供应链较完善有望成为目前主流，Flash 和 OPA 均有供应链痛点需要解决，但均具备较强潜力。从供应链来看，上游核心部件尚未成熟也制约了激光雷达发展。MEMS 激光雷达的核心元件 MEMS 微振镜成本高昂，且掌握在少数海外企业中，头部激光雷达企业均加大对 MEMS 的投入。发射和接收单元中，优化波长从 905nm 到 1550nm，APD 转向 SPAD 能显著优化激光雷达性能，发射和接收单元的技术提升将助力激光雷达发展。

● 玩家百花齐放，技术路线各有不同

激光雷达的前景也迎来玩家的百花齐放，以及技术路线的多元。机械激光雷达主要企业：Velodyne、禾赛科技；MEMS 激光雷达：Luminar、Innoviz、Aeva、速腾聚创、华为；Flash 激光雷达：Ibeo、Ouster；OPA 激光雷达：Quanergy；非往复式激光雷达：大疆。通过对各家企业的历史、技术、财务和战略分析，我们认为：1) 目前知名激光雷达企业均有自己的独到核心技术，均有较大潜力；2) 各家激光雷达均积极开拓下游市场，从乘用车、Robotaxi 到商用无人驾驶，未来 5 年收入或进入爆发期；3) 国内激光雷达企业与海外竞争对手基本处于同一起跑线，中国智能驾驶走在全球前列，发展空间巨大。

● 投资建议：行业迎来大发展，关注国内头部企业

激光雷达进入大发展，目前玩家较多，我们认为优秀的激光雷达企业应具备以下优势：1) 丰富的下游应用，robotaxi、商用车自动驾驶以及乘用车 L3 领域快速放量实现市场验证和技术迭代；2) 向上游核心领域延展加速提高激光雷达性能和优化成本；3) 具备较强的后端算法支持能力。建议关注国内头部激光雷达企业。

风险提示：

1. 高阶智能驾驶渗透速度不及预期；
2. 激光雷达技术成熟和成本下降速度不及预期。

目录

引言.....	5
激光雷达为何必不可少?.....	6
视觉仍有劣势, 激光雷达不可或缺.....	6
后来者的核心传感器, 2021 年成量产元年.....	12
L3 自动驾驶+Robotaxi 放量, 2030 年全球市场空间预计 260 亿美元.....	14
为何激光雷达如此昂贵?.....	18
机械式系统结构复杂.....	18
扫描部件成本占比极高.....	19
激光雷达如何降本?.....	20
5 大核心技术优化激光雷达.....	20
从机械到固态, 降本效果最为显著.....	21
制约激光雷达的核心供应链是什么?.....	25
MEMS 微振镜, 影响 MEMS 激光雷达成本的关键点.....	25
发射接收端, 优化后将提升激光雷达性能.....	26
行业迎来大发展, 关注国内头部企业.....	28
玩家百花齐放, 技术路线各有不同.....	28
国内与海外处同一起跑线, 潜力巨大.....	29

图表目录

图 1: 自动驾驶基本原理.....	5
图 2: 无人驾驶感知环节原理与框架.....	7
图 3: 特斯拉视觉模型数据.....	8
图 4: 特斯拉三目摄像头方案.....	8
图 5: 特斯拉自动驾驶原理.....	9
图 6: 激光雷达 ToF 测距原理.....	10
图 7: 激光雷达“点云”图.....	10
图 8: 激光 SLAM 示意图.....	11
图 9: 视觉 SLAM 示意图.....	11
图 10: 主流车型毫米波雷达数量.....	12
图 11: 奥迪 A8 上的 SCALA 一代激光雷达结构.....	13
图 12: 滴滴无人车顶配备了 Velodyne 的 64 线激光雷达.....	14
图 13: 2025 年、2030 年全球 ADAS 激光雷达出货量分别约 580 万颗和 7618 万颗.....	15
图 14: 2025 年、2030 年全球 Robotaxi 激光雷达出货量分别有望达到 80、320 万颗.....	16
图 15: 2025 年、2030 年全球激光雷达出货量分别有望接近 660、7934 万颗.....	16
图 16: 2025 年、2030 年中国激光雷达出货量分别有望接近 291、3154 万颗.....	16

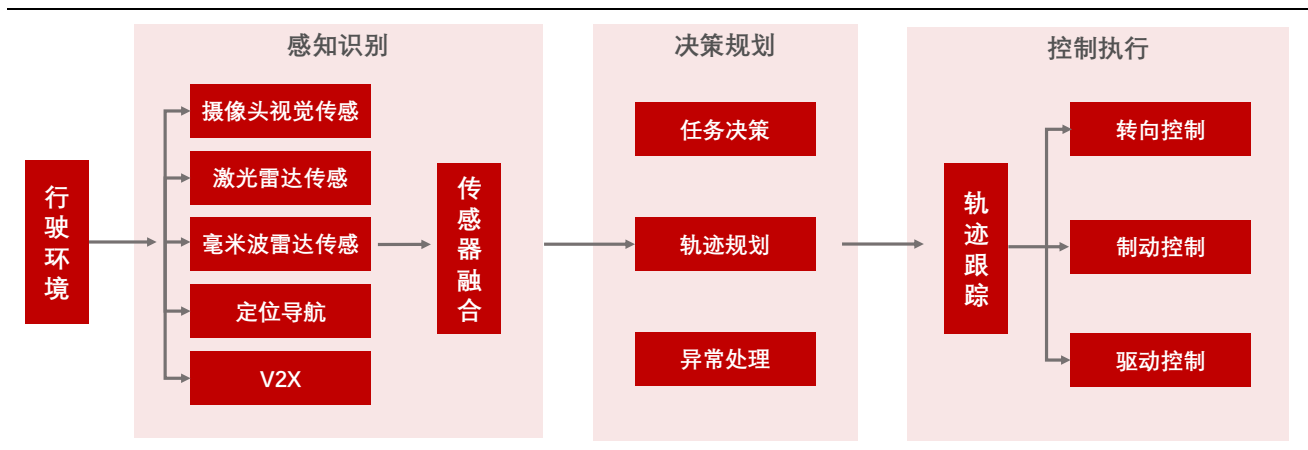
图 17: 2025 年、2030 年全球激光雷达规模分别约 53 亿美元和 260 亿美元	17
图 18: 2025 年、2030 年中国激光雷达规模分别约 21 亿美元和 102 亿美元	17
图 19: 中国自动驾驶应用场景落地时间和渗透率	17
图 20: 全球工业领域激光雷达市场空间 (亿美元)	18
图 21: 全球智慧基建激光雷达市场空间 (亿美元)	18
图 22: 激光雷达组成部分	18
图 23: 激光雷达核心部件的不同分类	19
图 24: Scala 激光雷达拆解	19
图 25: Scala 激光雷达拆解	19
图 26: livox horizon 实物图	20
图 27: Livox Horizon 成本分解	20
图 28: Velodyne 的激光雷达结构	22
图 29: MEMS 微振镜图片	22
图 30: MEMS 激光雷达原理图	22
图 31: Flash 激光雷达原理图	23
图 32: 通过光干涉获得信息	23
图 33: OPA 激光雷达的情况	23
图 34: 激光雷达产业链梳理	25
图 35: 2018 年全球收入 TOP 30 MEMS 企业 (单位: 百万美元)	26
图 36: Innoluce 不同镜面尺寸 MEMS 价格	26
图 37: 美国五家激光雷达公司收入预测 (百万美元)	29
图 38: 美国四家下游应用占比 (2025 年预计)	29
表 1: 各传感器优劣比较	6
表 2: 激光雷达种类	10
表 3: 主流整车厂未来激光雷达搭载规划	13
表 4: 激光雷达降本的各种方法	20
表 5: 根据扫描方式不同激光雷达对比	21
表 6: 市面上主要激光雷达产品以及价格	24
表 7: 发射器对比	27
表 8: 两种接收器对比	27
表 9: 国际激光雷达主要参与者	28
表 10: 国内主要激光雷达企业	29

引言

自动驾驶从 L2 到 L3 级以上，感知识别是关键环节。随着特斯拉 NOA、蔚来 NOP（后续 NAD）、小鹏 NGP 的陆续推出，加以龙头车企（如长城汽车、吉利汽车等）规划在未来 3-4 年实现 L4 级别自动驾驶，L3 级别以上自动驾驶的大规模量产已箭在弦上。

自动驾驶的基础原理与流程在于：首先由感知层的传感器获取与构建精确路况信息（包含物体建模与车辆定位等），再由感知层输出的信息进行决策规划，向执行端发出指令，最后由执行端对车辆行为进行实际操控。从 L2 到 L3 级别自动驾驶的升级，意味着从辅助驾驶到（有限度）无人驾驶的跃进，对于高精度建模、海量实时运算的要求指数级增长，背后的技术难度随之大幅增长，其中关键环节就在于前端感知，即如何感知与构建路况的完整模型。

图 1：自动驾驶基本原理



资料来源：长江证券研究所

视觉系智能驾驶从 Mobileye 的史开先河到特斯拉的发扬光大，视觉系仍是当下智能驾驶主流，但对于是否完全能胜任 L3 级以上自动驾驶仍有争议。市场主流前端感知技术可分为两派：视觉系与雷达系，其中视觉系以特斯拉 NOA 的量产化广泛为行业所认知，从硬件角度来看，视觉系以摄像头为核心传感器，辅以毫米波雷达、超声波雷达完成高级别自动驾驶感知工作。

激光雷达早期高成本导致一直应用于 Robotaxi 等，但本身能达到的效果和成熟应用却能超越视觉系。对于雷达系而言，从早期 Waymo 的应用，到埃隆·马斯克的“嗤之以鼻”，再到以小鹏汽车为代表的众多车企站队，激光雷达逐渐进入大众视野。从硬件角度来看，雷达系以激光雷达为核心传感器，辅以摄像头、毫米波雷达、超声波雷达达到精确感知的效果。

从结果看，视觉系与雷达系的核心差异点在于核心传感器方案是否采用摄像头还是激光雷达，尽管各个传感器都有其优劣势，从车企技术规划来看未来更倾向于多传感器、多路线融合使用的方案。激光雷达作为核心传感器，能打破视觉系先行者构建的算法、数据壁垒，有望成为后来者居上的核心传感器，从商业上具有极大的潜力。

表 1: 各传感器优劣比较

传感器方案	探测距离 (米)	原理	频率	探测物体	识别物体	探测行人	精度	夜间适用性	恶劣天气适用性	算法难度	成本
摄像头 (视觉系传感器)	通常为 100 米以内	图像识别	-	√	√	√	高	低	低	高	低
激光雷达 (雷达系主传感器)	200		10 万 GHz	√	-	√	高	高	低	低	高
毫米波雷达	200 (高频毫米波雷达距离优于激光雷达)		10GHz-200GHz	√	-	-	中	高	高	低	低
超声波雷达	10 (通常在 3 米以内应用较多)		大于 20000Hz	√	-	√	可变 (近距离高, 远距离低)	高	高	低	低

资料来源: 搜狐汽车, 盖世汽车等, 长江证券研究所

激光雷达为何必不可少?

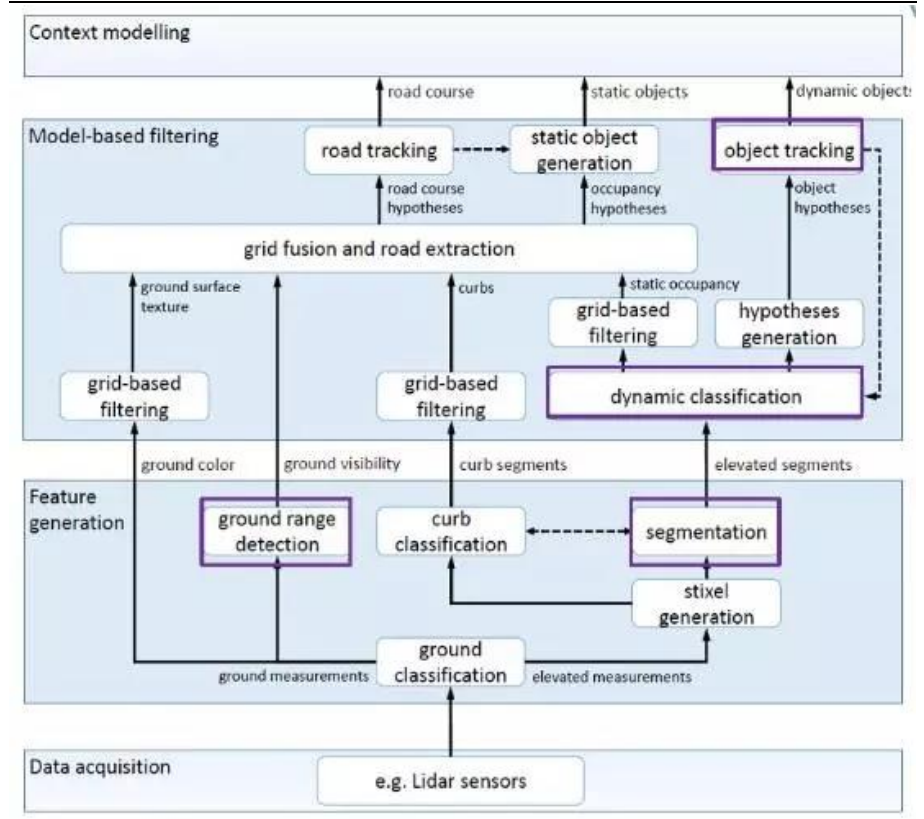
视觉仍有劣势, 激光雷达不可或缺

- 视觉方案仍具有瓶颈, 且需要大量数据积累和处理

采用视觉方案的整车厂以特斯拉为代表, 另外 Mobileye 作为视觉巨头 Tier 0.5 或 Tier 1, 也与多家整车厂建立了合作关系。

视觉方案通过摄像头, 致力于解决“拍到的是什么”问题。从工作原理来看, 视觉方案以摄像头作为主要传感器, 通过收集外界反射的光线从而进一步呈现出外界环境画面, 即我们所熟悉的摄像头功能, 再进行后续图像分割、物体分类、目标跟踪、世界模型、多传感器融合、在线标定、视觉 SLAM、ISP 等一系列步骤进行匹配与深度学习, 其核心环节在于物体识别与匹配, 或者运用 AI 自监督学习来达到感知分析物体的目的, 需要解决的是“我拍到的东西是什么”的问题。

图 2：无人驾驶感知环节原理与框架



资料来源：TMF，长江证券研究所

视觉方案核心优势在于低成本、颜色/纹路识别能力强。其一在于成本低，单目摄像头成本仅在 150-600 元之间，较为复杂的三目摄像头成本也通常在 1000 元以内；其二在于雷达方案主要根据点云的方式来识别目标，重在轮廓识别，但在颜色/纹路等方面摄像头的能力更强，例如在识别标志牌方面有优势。另外，以摄像头类比人类眼睛，相比雷达而言更符合第一性原理（雷达或可类比为拐杖）。

视觉方案主要存在 3 个劣势：

- 1) 视觉方案重在分类，但样本有限限制了视觉识别正确性，而优化样本对于 AI 学习能力、样本数据量要求极高。由于 L3 级及以上自动驾驶需要机器应对较为复杂的路况，要求车辆对于道路状况有精准识别能力，而视觉技术需要解决的是“摄像头拍到的是什么物体”的问题，因而对于神经网络训练集要求很高。对于训练的方法，一种为通过机器视觉，人为设定好识别样本，通过收集到的数据直接与样本匹配来识别的方式，但是能否成功辨别物体高度依赖样本的训练，样本未覆盖的物体将难以辨别；另一种为 AI 学习，能够通过自学习的方式摆脱样本限制，但是对于算法与算力要求很高，并且其学习过程是个“黑盒子”，输出结果的过程未知，因而难以人为调试与纠错。

图 3：特斯拉视觉模型数据



资料来源：麦姆斯，长江证券研究所

- 2) **视觉方案距离检测难度大。**自动驾驶的路径规划需要 3D 的道路信息和 3D 的障碍物，而基于摄像头收集到的仅是 2D 数据，因而要求分析 2D 图像的每个像素，将其还原成真实的 3D 场景，其背后需要先进的图像处理算法以及高算力硬件，并且可能误差较大。

以上弊端主要来自单目摄像头，其他解决方案包括双目或多目摄像头，核心原理是通过 2 个或以上摄像头运用视角差的方式还原 3D 场景，但其弊端有 2 个，其一在于由于摄像头之间的相对位置对距离检测精确度影响很大，而随着路况颠簸、气温等因素其相对位置往往发生变化，因此需要实时标定，难度很大；其二在于单个摄像头的测量误差在多个摄像头上会进一步放大，或使得距离判断结果与实际情况偏离程度过高。因此目前市场主流方案仍然是应用单目摄像头。

图 4：特斯拉三目摄像头方案



资料来源：搜狐汽车，长江证券研究所

3) **摄像头在极端环境下效果欠佳。**由于视觉技术依托于摄像头所采集的图像数据，对于光线依赖度较高，在弱光或光影复杂的地方难以使用，这也是目前特斯拉 Autopilot 在夜晚以及雨雪天气工作准确度有所降低的原因。

特斯拉的视觉方案具有很高的算法与算力复杂度。特斯拉曾公布过自己数据流自动化计划的终极目标“OPERATION VACATION”，从数据收集、训练、评估、算力平台到“影子模式”形成数据采集与学习循环。

数据收集：通过 8 个摄像头对车体周围进行无死角图像采集；

数据训练：使用 PyTorch 进行网络训练，特斯拉的网络训练包含 48 个不同的神经网络，能输出 1000 个不同的预测张量。其背后训练量巨大，特斯拉已耗费 70000 GPU 小时进行深度学习模型训练；

背后算力支持：特斯拉自研打造了 FSD 芯片，具有单片 144TOPS 的高算力值。另外，特斯拉规划创造 Dojo 超级计算机，可在云端对大量视频进行无监督学习训练，目前离开发出来的进度仍然很远；

影子模式：特斯拉通过独创“影子模式”来降低样本训练成本、提高识别准确度，即特斯拉持续收集外部环境与驾驶者的行为，并与自身策略对比，如果驾驶者实际操作与自身判断有出入，当下数据就会上传至特斯拉云端，并对算法进行修正训练。

图 5：特斯拉自动驾驶原理



资料来源：Tesla，长江证券研究所

- **激光雷达重感知、高精度，补足视觉与其他雷达弊端**

激光雷达，英文全称为 Light Detection And Ranging，简称 LiDAR，是一种集激光（频率在 10 万 GHz）、全球定位系统（GPS）和 IMU（Inertial Measurement Unit，惯性测量装置）三种技术于一身的系统，用于获得数据并生成精确的 DEM（数字高程模型）。

民用领域中，激光雷达可以分为一维激光雷达、二维激光雷达、三维激光扫描仪、三维激光雷达等。激光雷达的主要应用仍然在测绘之中，其中二维激光雷达和三维激光雷达可以实现空间建模，可以使用在机器人及自动驾驶之中，尤其在 L3 及以上等级自动驾驶当中作用巨大。

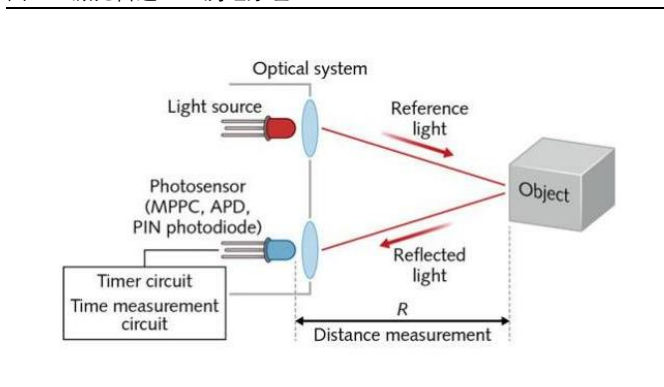
表 2：激光雷达种类

类别	主要供应商	功能	应用
一维激光雷达（激光测距仪）	博世、徠卡	距离测量、定位	多种环境适用：河道、航道，标杆，电信，电缆，地质测量，气象、机场、森林
二维激光雷达	HokuyoURG、德国 SICK、德国 IBEO	轮廓测量、定位、区域监控	城市建筑测量、地形测绘、机器人环境识别、安防、自动门、自动驾驶
三维激光扫描仪	徠卡、FARO、RIEGL、Ocular 等	静态三维建模	测绘、城市建模、建筑建模
三维激光雷达	Riegl、Optech、Trimble、3D Laser mapping、Velodyne、Luminar	动态三维建模	机器人、无人汽车、高精地图测绘

资料来源：盖世汽车，长江证券研究所

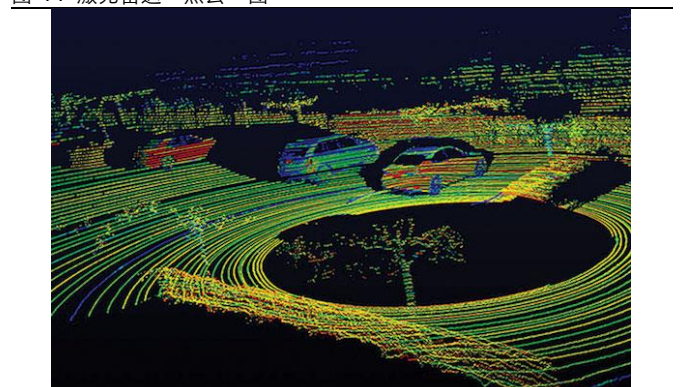
激光雷达通过主动探测技术，可直接构建路况模型，降低分析难度。与视觉方案重在分析不同，激光雷达可以通过主动探测的方式直接实现物体、路况建模，极大降低了视觉方案当中的分析难度。激光雷达的核心原理在于运用蝙蝠测距用的回波时间（Time of Flight, 简称 ToF）测量法，由激光二极管发出红外脉冲光，脉冲光照射到物体表面后发射回一部分光束，光束被激光雷达上搭载的光子探测器接收并记录，通过计算发射和探测的时间差就可以计算出目标物表面与激光雷达探测器之间的距离。由于激光雷达可在一秒内发射大量的脉冲光（目前最高可达百万数量级），因此可以形成庞大的位置点信息（称为点云），绘制出物体的精确轮廓，从而构建出周围环境的三维模型。除了测量距离以外，激光雷达还可以初步识别物体的材料成分等其他特征，其中运用的特性包括诱导多普勒频移等（induced Doppler shift）。

图 6：激光雷达 ToF 测距原理



资料来源：麦姆斯，长江证券研究所

图 7：激光雷达“点云”图

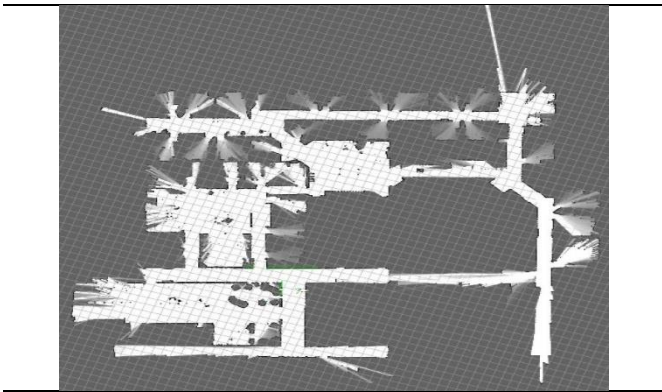


资料来源：搜狐汽车，长江证券研究所

3D 激光雷达另一大特性是同步建图 (SLAM)，强化定位精准度，相比视觉 VSLAM 也有诸多优势。SLAM 基本思想就是利用已经创建的地图修正基于运动模型的位置姿态误差，创建一个更高精度的地图。

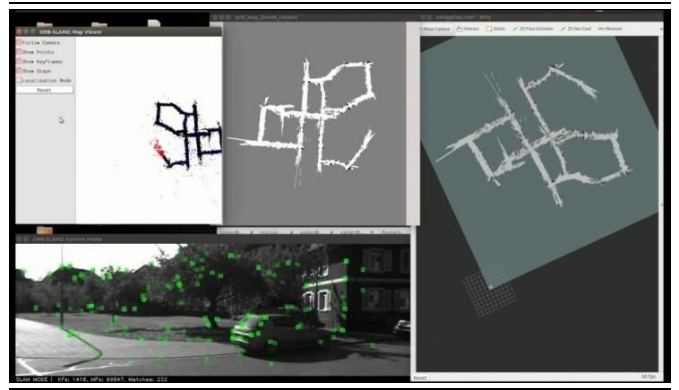
激光 SLAM 与 VSLAM 相比，其一在于不会受到环境光照的影响，夜晚也能正常使用；其二在于定位和地图构建的精度更高；其三在于数据量小，激光雷达单秒数据输出量仅几兆，而视觉方面一秒数十帧图片，单张图片已经有几兆体量，其数据负荷远高于激光雷达。

图 8：激光 SLAM 示意图



资料来源：盖世汽车，长江证券研究所

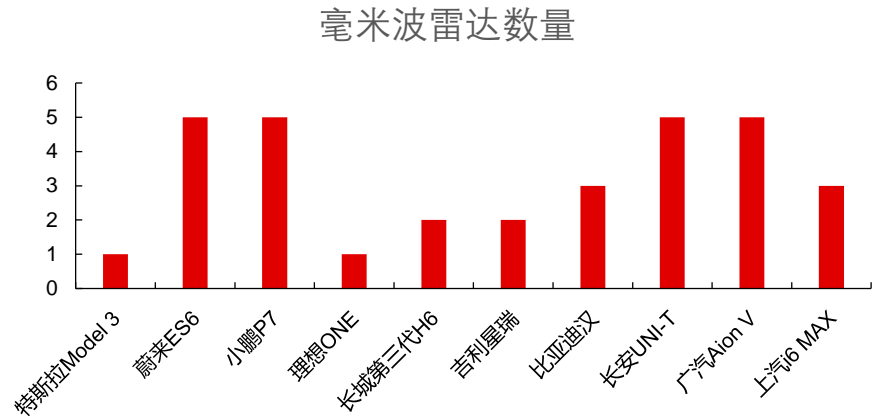
图 9：视觉 SLAM 示意图



资料来源：盖世汽车，长江证券研究所

与毫米波雷达、超声波雷达相比，激光雷达精度优势很突出。毫米波雷达、超声波雷达基础原理与激光雷达类似，主要采用 ToF 的方式，核心区间在于雷达信号不同，毫米波雷达为发射毫米波（频率为 30-300GHz）、超声波雷达为发射超声波（频率通常为 20kHz-58kHz），激光雷达为红外光（大于 10 万 GHz）。由于测量精度通常与波段频率正相关，激光雷达具有明显的精度优势。另外，毫米波雷达探测距离受到频段损耗的直接制约，无法感知行人，超声波雷达受到传播速度问题（仅仅音速传播，与光速传播差距过大）使得仅适用于极短距离的探测。虽然毫米波雷达、超声波雷达各有优势，目前仍为车型标配，但激光雷达的作用不可忽略。

图 10: 主流车型毫米波雷达数量



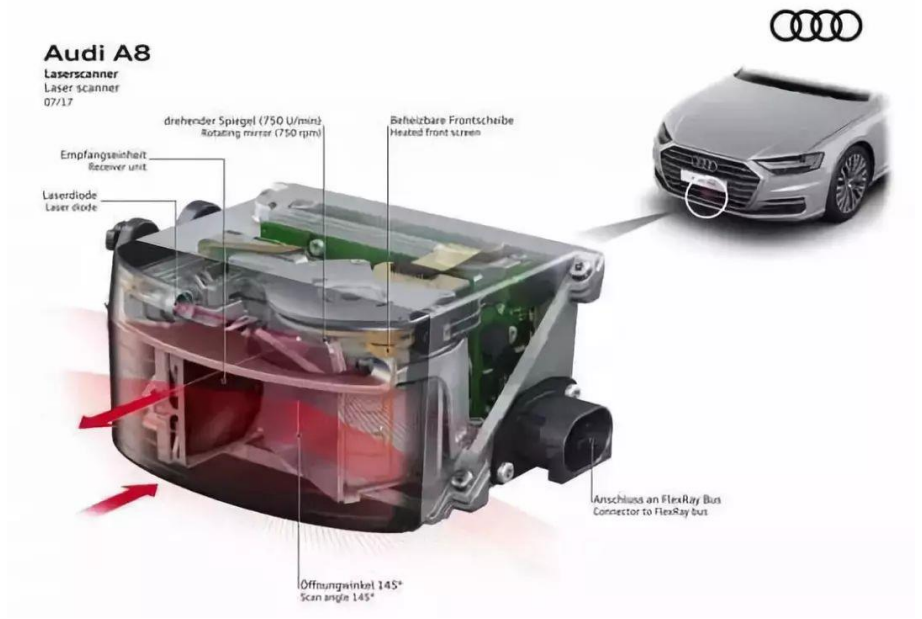
资料来源: 汽车之家, 长江证券研究所

激光雷达的主要缺陷在于成本过高。目前激光雷达最为诟病的地方就在于其过高的成本, 当前高线束机械激光雷达价格平均在 3000 美金以上, 已量产的低线束车载机械激光雷达价格仍然高达 600 美元以上, 与摄像头相比成本差距过大。另外, 雾雨天气仍然会对激光的穿透性以及回波信号造成影响。

后来者的核心传感器, 2021 年成量产元年

如我们之前所说, 成本是制约激光雷达大规模量产的核心问题, 当前市场上已搭载于量产车上的激光雷达仅有 2017 年推出的奥迪 A8 上的法雷奥 SCALA 1 (仅为 4 线激光雷达)。

图 11: 奥迪 A8 上的 SCALA 一代激光雷达结构



资料来源：搜狐汽车，长江证券研究所

自动驾驶临近 L3 级量产时点，多家主流车企将激光雷达应用提上日程。随着技术的逐渐成熟，以及自动驾驶等级提升下对于激光雷达需求激增，激光雷达的成本正进入快速下降时期。2017 年，Velodyne 旗下 64 线、32 线、16 线机械式激光雷达官方定价分别为 8 万美元、4 万美元和 8 千美元。到了 2018 年初，Velodyne 已将旗下 16 线激光雷达价格下调一半至 4 千美元。激光雷达从 2005 年开始发展，至今已出现千元级的产品，例如大疆 Livox 发布的 Horizon 售价为 800 美金，华为宣布未来要将 96 线激光雷达成本降至 200 美元以内。

当前时点，多家整车厂也宣布未来几年车型上将搭载激光雷达产品，其中以自主品牌（造车新势力以及传统整车厂当中的一线品牌）与豪华品牌最为积极。

表 3: 主流整车厂未来激光雷达搭载规划

车企	车型	时间	激光雷达类型	数量
小鹏	-	2021 年	与 Livox 合作开发	2
蔚来	ET7	2022 年	来自蔚来和蔚来资本投资的 Innovusion	1
长城汽车	WEY	2021 年	Ibeo 固态激光雷达	3
吉利汽车	-	-	与 Quanergy 深入合作	-
广汽集团	下一代 Robotaxi	-	搭载一径科技的固态激光雷达	-
长安汽车	CHN 高端品牌	2022 年	华为	5
北汽集团	ARCFOX HBT	2021 年	华为 96 线激光雷达	3
奥迪	A8	2017 年	法雷奥 4 线 SCALA	1
奔驰	S	2021 年	法雷奥 16 线 SCALA 2	1

宝马	宝马 iX/iNext	2021 年秋季	Innoviz 第二代	1 到 2 颗
本田	Legend	2021 年	-	5
雷克萨斯	LS	2021 年	电装开发的 3D 激光雷达	-
沃尔沃	第二代 SPA 架构车型	2022 年	-	-

资料来源：搜狐汽车，盖世汽车等，长江证券研究所

Robotaxi 对于自动驾驶等级要求高，且对成本不敏感，激光雷达应用度更高。 Robotaxi 服务商通常资本实力较强，对于成本不敏感，另外由于 Robotaxi 通常面向 L4 级别以上自动驾驶，对于硬件要求更高，目前多家 Robotaxi 服务商均搭载激光雷达，以 Waymo 为例，其规划到 2023 年有 8 万辆无人车投入使用，每辆车上均要配备激光雷达。

图 12：滴滴无人车顶配备了 Velodyne 的 64 线激光雷达



资料来源：搜狐汽车，长江证券研究所

L3 自动驾驶+Robotaxi 放量，2030 年全球市场空间预计 260 亿美元

从全球角度来看，我们认为未来激光雷达将进入加速量产时点，预计到 2025 年、2030 年，全球激光雷达市场规模分别约 50 亿美元和 110 亿美元，其中中国市场规模分别接近 20 亿美元和 50 亿美元。

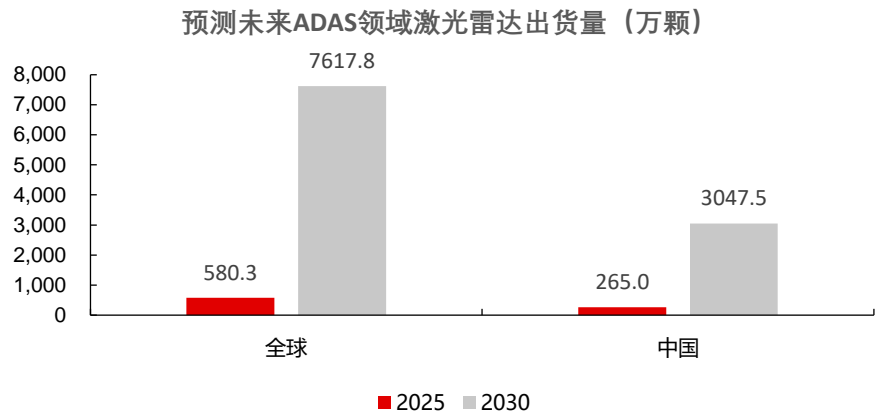
从两个方面来看：

- 1) ADAS 领域，未来全球 L3 级及以上自动驾驶渗透率的提升有望使得激光雷达需求激增。以中国为例，根据国家智能网联汽车创新中心 2020 年 11 月新发布的《智能网联技术路线图 2.0》，到 2025 年，中国 L2+L3 级自动驾驶占比要达到 50%，L4 级别开始进入市场，到 2030 年，中国 L2+L3 级自动驾驶占比要达到 70%，L4 级别占比达到 20%。我们谨慎估计到 2025 年、2030 年，中国 L3 级别渗透率分别达

到 10%、40%，L4 级别渗透率分别为 1%、15%。从全球角度来看，美国与中国对于自动驾驶积极程度接近（特斯拉、通用汽车等），未来高等级自动驾驶渗透率有望与中国相同，其他西欧、日韩以及发展中地区高等级自动驾驶渗透率或相对略低。

我们测算 2025 年、2030 年，全球 L3 级别自动驾驶乘用车销量分别达到 500 万辆和 2435 万辆左右、L4 级别自动驾驶乘用车销量分别为 39 万辆和 916 万辆左右，其中中国 L3 级别自动驾驶车辆分别达到 221 万辆和 975 万辆左右，L4 级别自动驾驶车辆分别为 22 万辆和 366 万辆左右。2025 年受制于成本尚未下降到较低，预计 2025 年 L3 级别搭载 1 颗激光雷达，L4 级别平均搭载 2 颗激光雷达。2030 年，随着激光雷达成本进一步下降，激光雷达将成为主传感器，单车配置数量有望上升，预计 L3 级别将平均搭载 2 颗激光雷达、L4 级将平均搭载 3 颗激光雷达。可测算得到 2025 年、2030 年全球 ADAS 激光雷达出货量分别约 580 万颗和 7618 万颗，其中中国出货量分别约 265 万颗和 3048 万颗。

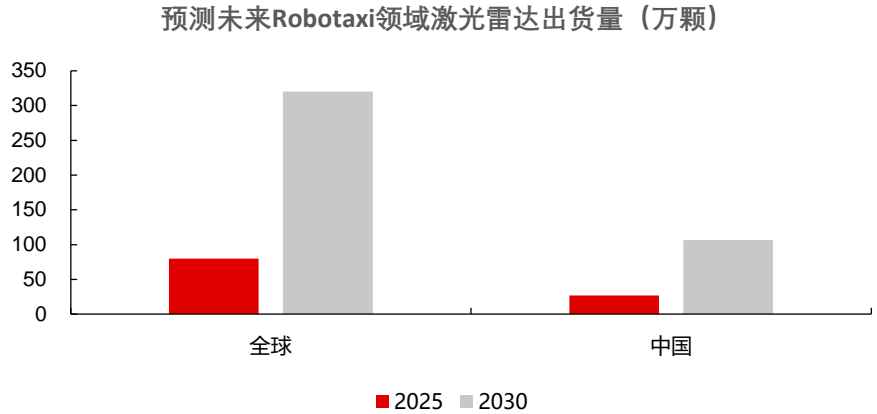
图 13：2025 年、2030 年全球 ADAS 激光雷达出货量分别约 580 万颗和 7618 万颗



资料来源：Marklines 等，长江证券研究所

- 2) Robotaxi 领域，根据 Yole 预测，到 2025 年、2030 年，全球 Robotaxi 销量分别有望达到 20 万辆和 80 万辆，考虑到中国 Robotaxi 进程走在全球前列，我们预计其中中国有望占到约 1/3 的水平，即中国 2025、2030 年 Robotaxi 销量有望达到 7、25 万辆左右。以 Robotaxi 单台车平均配 4 颗激光雷达来算（Waymo 5 颗、百度 4 颗、滴滴 3 颗），2025 年、2030 年全球 Robotaxi 激光雷达出货量分别有望达到 80 万颗和 320 万颗，其中中国分别约有 30 万颗和 100 万颗。

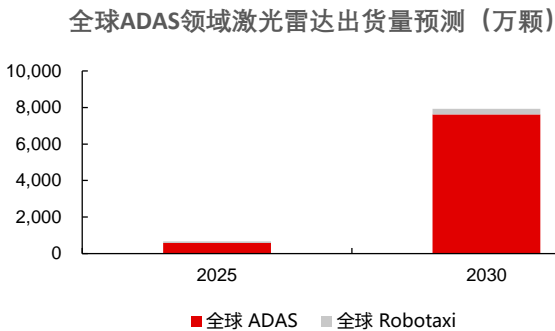
图 14：2025 年、2030 年全球 Robotaxi 激光雷达出货量分别有望达到 80、320 万颗



资料来源：Yole, Marklines 等, 长江证券研究所

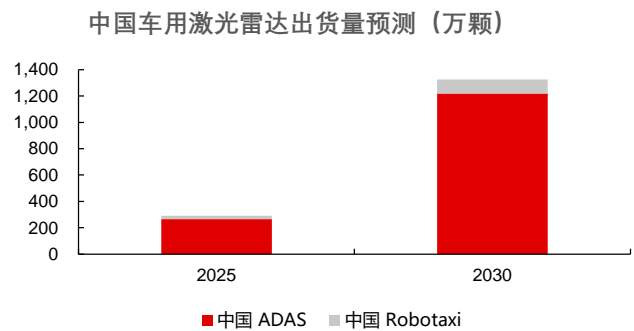
综合来看，2025 年、2030 年全球激光雷达出货量分别有望达到约 660、7934 万颗，其中中国分别出货 292、3154 万颗左右。

图 15：2025 年、2030 年全球激光雷达出货量分别有望接近 660、7934 万颗



资料来源：Yole, Marklines 等, 长江证券研究所

图 16：2025 年、2030 年中国激光雷达出货量分别有望接近 292、3154 万颗

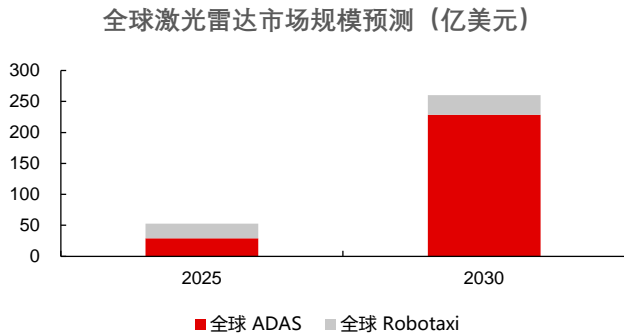


资料来源：Yole, Marklines 等, 长江证券研究所

当前激光雷达价格仍然偏高，根据调研数据，Robotaxi、ADAS 领域单价分别约 10000 美元、1000 美元，我们预计到 2025 年单价分别有望降至 3000 美元、500 美元，到 2030 年单价分别有望降至 1000 美元和 300 美元。

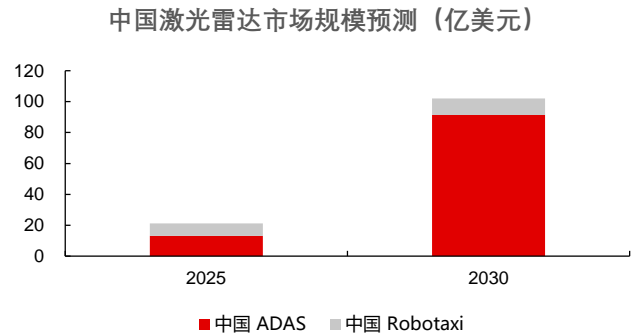
据此测算，2025 年、2030 年全球激光雷达市场规模分别有望达到约 53 亿美元和 260 亿美元左右，其中中国市场规模分别有望达到 21 亿美元和 102 亿美元左右。

图 17: 2025 年、2030 年全球激光雷达规模分别约 53 亿美元和 260 亿美元



资料来源: Yole, Marklines 等, 长江证券研究所

图 18: 2025 年、2030 年中国激光雷达规模分别约 21 亿美元和 102 亿美元

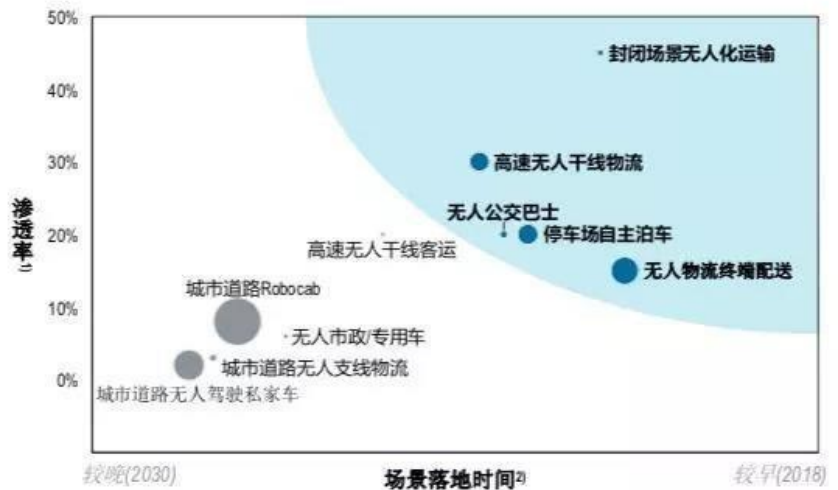


资料来源: Yole, Marklines 等, 长江证券研究所

特定商用场景的无人驾驶应用将更早到来, 进一步拓展激光雷达市场。除了乘用车市场以及 Robotaxi, 实际上在商用领域例如干线物流无人驾驶、客车无人驾驶、工业物流无人驾驶等其他特殊领域对激光雷达的需求同样较大。而这些领域对于激光雷达的尺寸以及价格敏感度较乘用车较低, 更接近于 Robotaxi, 所以采用机械激光雷达较多。根据罗兰贝格的研究, 封闭场景无人驾驶运输将最早到来, 其他场景如高速无人干线物流、无人公交巴士、无人物流终端配送等都有望在 2025 年左右达到 20-30% 的渗透。

图 19: 中国自动驾驶应用场景落地时间和渗透率

中国自动驾驶应用场景落地规模 [2018-2030 年]

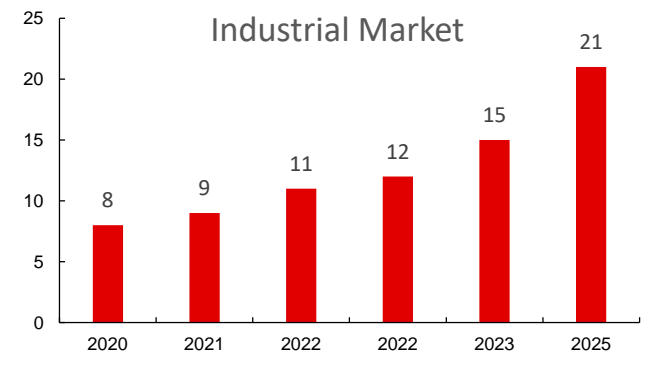


资料来源: 罗兰贝格, 长江证券研究所

预计到 2025 年, 工业以及智慧基建等领域的激光雷达市场需求将超过 49 亿美金。根据麦肯锡的研究, 激光雷达在工业领域和智慧基建上的市场规模到 2025 年分别将达到 21 亿美元和 28 美元。以 5 年时间来看, 激光雷达在其他商业领域的应用不亚于汽车市场。

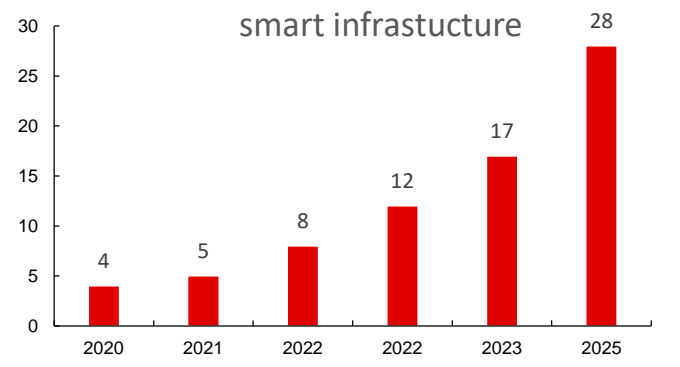
我们认为激光雷达市场的多元性将助力激光雷达企业短期形成一定收入规模, 随着汽车市场需求的进一步成熟, 激光雷达企业的远期收入空间进一步被打开。

图 20: 全球工业领域激光雷达市场空间 (亿美元)



资料来源: 麦肯锡, Ouster, 长江证券研究所

图 21: 全球智慧基建激光雷达市场空间 (亿美元)



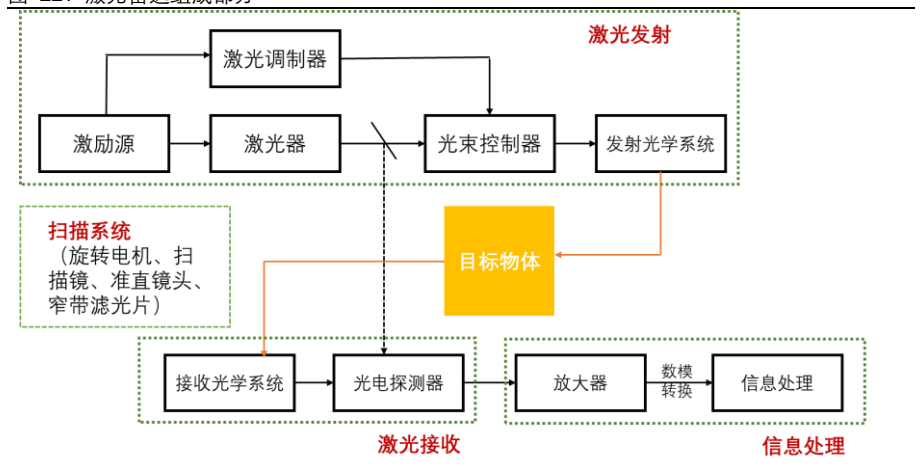
资料来源: 麦肯锡, Ouster, 长江证券研究所

为何激光雷达如此昂贵?

机械式系统结构复杂

激光雷达主要包括激光发射部分、扫描系统、激光接收部分和信息处理部分，结构较为复杂。从激光雷达的工作来看，主要分成四大部分：1) 激光发射部分：激励源周期性地驱动激光器，发射激光脉冲，激光调制器通过光束控制器控制发射激光的方向和线数，最后通过发射光学系统，将激光发射至目标物体；2) 激光接收系统：经接收光学系统，光电探测器接受目标物体反射回来的激光，产生接收信号；3) 扫描系统，以稳定的转速旋转起来，实现对所在平面的扫描，并产生实时的平面图信息；4) 信息处理系统：接收信号经过放大处理和数模转换，经由信息处理模块计算，获取目标表面形态、物理属性等特性，最终建立物体模型。激光雷达本身结构的复杂性和核心部件的高价格决定激光雷达短期价格，尤其是机械式激光雷达价格短期较高。

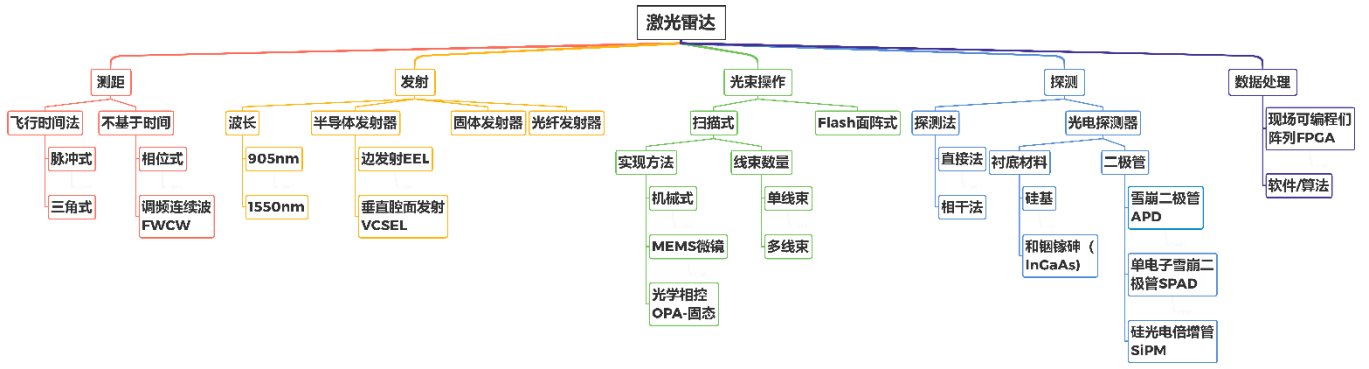
图 22: 激光雷达组成部分



资料来源: 麦姆斯, 长江证券研究所

激光雷达部件较多，每个部件技术选择的不同就会造成效果和成本的不同，这也带来激光雷达技术路线的多元。激光雷达从测距方式、发射方式、光束操作方式、探测方式以及数据处理方式可以分为 5 个核心技术，每个核心技术均有不同的技术分支，效果、成本、当前量产难度等均有不同，在 5 个核心技术上不同的分支技术选取也导致了各家激光雷达技术路线的不同。

图 23：激光雷达核心部件的不同分类

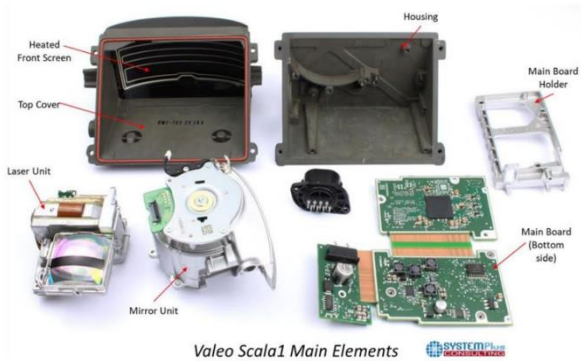


资料来源：麦姆斯，长江证券研究所

扫描部件成本占比极高

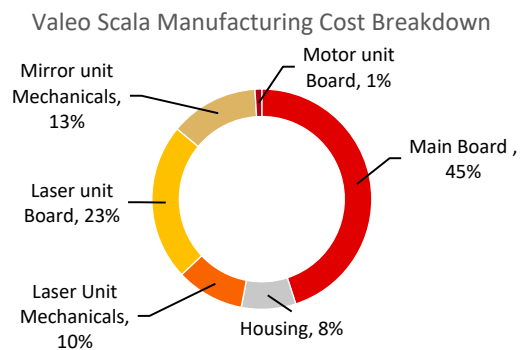
机械激光雷达单组激光雷达就有极高的成本。Scala 目前量产的激光雷达是一款四线机械激光雷达，主要产品包括激光模块、光学模块和主板，其中激光单元成本占比 23%、光学单元占比 13%、激光硬件占比 10%、主板占比 45%。作为四线激光雷达可以理解为一组激光发射器，从成本来看激光单元以及对应后续运算、光探测模块的成本占比基本相当。

图 24：Scala 激光雷达拆解



资料来源：Systemplus Consulting，长江证券研究所

图 25：Scala 激光雷达拆解



资料来源：Systemplus Consulting，长江证券研究所

随着线束提升，即便是激光雷达对应的光学模块（包括扫描系统）成本占比依然是最大的。Livox Horizon 是大疆旗下最新一代激光雷达，采用非往复扫描技术，基本可以等价 100 线束激光雷达，目前售价为 800 美金。根据 Systemplus Consulting 的测算分拆，光学模组在其中成本占比达到 54%，而发射模块、接收模块成本占比分别在 7%和 4%，其他成本占比较大的是 MCU 模块。

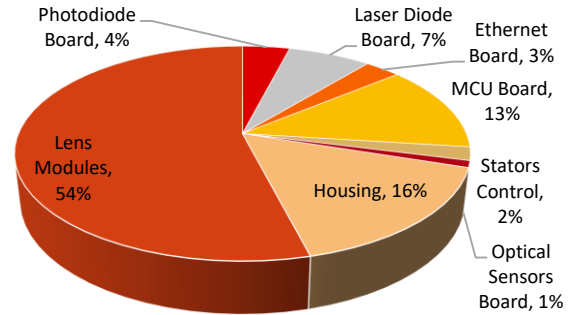
图 26: livox horizon 实物图



Livox Horizon

资料来源: Systemplus Consulting, 长江证券研究所

图 27: Livox Horizon 成本分解



资料来源: Systemplus Consulting, 长江证券研究所

激光雷达如何降本?

5 大核心技术优化激光雷达

激光雷达降本的方式可以从 5 大核心技术去实现降本, 其中扫描方式的改变以及算法优化是较为重要的降本手段。扫描系统成本占比较高, 扫描系统的降本是最主流的方式。探测和发射阶段也具有效果和成本的矛盾, 尤其关键技术 InGaSa 基底以及 SPAD 等能有突破将极大推动部分技术的发展。测距也提出了 FMCW 的方式实现测距, 但目前技术尚不成熟且最终成本下降潜力没有 TOF 大。算法软件层面具备较大的优化空间, 通过算法的提升可以降低对硬件的依赖, 比如减少激光雷达线束的要求从而降低整个系统成本。

表 4: 激光雷达降本的各种方法

核心技术	降本方式	降本逻辑	难点
扫描方式	实现方式: 机械向固态	扫描系统从机械转向固态扫描	相对机械激光雷达扫描角度下降, 效果打折扣, MEMS、Flash、OPA 等技术路线各有自身难点要突破
扫描方式	线束数量: 降低线束	从 128 线束下降到 16 线束有较大的降本空间	要保证垂直层面角度够大, 16 线依然必要, 线束下降导致点云数量下降, 分辨率的降低需要算法弥补
探测	光电探测器: SPAD 成本下降	目前主流采用 APD, 使用 SPAD 可以降低对激光器功率的需求	探测与发射相辅相成, 综合发射功率和接收效率达到效果和成本的平衡, 目前高效能发射器和接收器依然成本较高
发射器	波长: 1550nm 成本下降	1550nm 对人眼损伤小, 功率大, 但需要基底是 InGaSa	
测距	测距原理: TOF 与 FMCW	FMCW 理论性能更为优秀	技术仍尚不成熟, 短期能实现降本, 但最终降本的潜力有限

数据处理 算法 优化算法 通过优化算法可以减少硬件依赖 通过算法的补充可以减少激光雷达线束的依赖，目前算法相对并不成熟

资料来源：麦姆斯，长江证券研究所

从机械到固态，降本效果最为显著

扫描部件是最大成本单元也直接影响到性能，扫描部件从机械到固态是降本最为有效的手段。从前两个激光雷达拆解可以看到激光雷达目前成本最大部分来自于扫描部分，所以固态激光雷达替代机械式激光雷达成为降低成本的必然选择。根据扫描方式的不同，目前激光雷达技术路线主要为机械、MEMS、Flash 和 OPA 四种。每个技术路线各有自己的优劣势，同时也有自身亟待解决提升完善产品的核心痛点。从目前产品的成熟度来看，MEMS 激光雷达将是当下主流方案，OPA 潜力最大，FLASH 光探测痛点解决潜力也较为显著。

表 5：根据扫描方式不同激光雷达对比

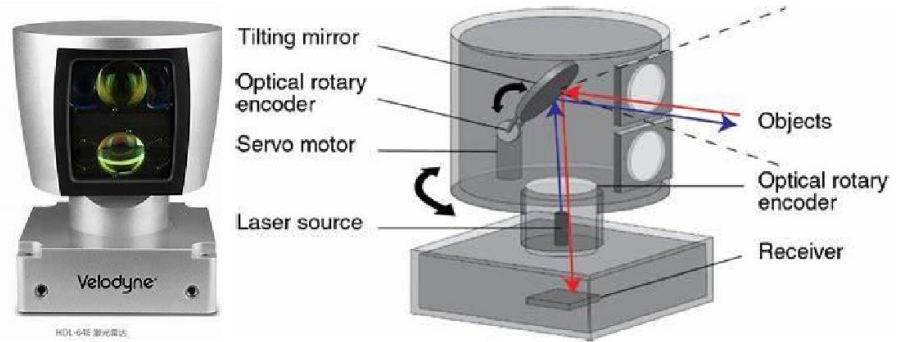
种类	方式	优势	劣势	技术完善核心突破点	发展阶段	
扫描方式	机械	机械式	环形扫描，多线激光器设计;供应链成熟;	硬件集成难度高;	结构复杂成本难以下降	尽管成本较高，但效果卓越、产品成熟，是目前 Robotaxi 的主流应用，但高线束激光雷达成本较难下降到\$3000 以下
	半固态	MEMS	MEMS 微振镜将极大简化扫描器结构; MEMS 具有现成供应链;	目前器件价格较高; MEMS 扫描控制难度大;激光器的 FOV 参数不佳;	MEMS 微振镜持续优化	MEMS 激光雷达因为上游供应链相对成熟，是现阶段的主力产品，现阶段可以将价格探至 \$500-\$1000
	固态	Flash	成本低; 扫描频率高; 符合车规;	距离短，难以适应自动驾驶的应用场景	光探测 SPAD 成熟	Flash 激光雷达主要需要解决测量距离，主要在于发射器和接收器进一步的优化，目前成本预计较 MEMS 激光雷达较高，远期有望下降到\$500 以下
	固态	OPA	低成本方案（硅基方案）; 量产一致性高;	技术成熟度不足;	供应链技术突破	OPA 激光雷达潜力最大，保证性能的同事具有最高的成本下降空间，当前供应链 5 年内突破成熟仍有困难，但远期价格有望下降到\$200

资料来源：麦姆斯，长江证券研究所

机械激光雷达实现高线束需要多个激光发射器，同时扫描系统依赖电机，部件、制造、系统成本都极高。机械式激光雷达价格较高的原因：1) 高线束需要多个激光发射器，带来成本较高；2) 扫描系统需要旋转电机，一方面加大了结构的复杂程度，另一方面高可

靠性的电机本身成本较高；3) 系统的综合制造成本较高。以 Velodyne 的 64 线激光雷达为例，采用了 16 组激光发射器以及 2 组激光接收器，产品结构极为复杂。

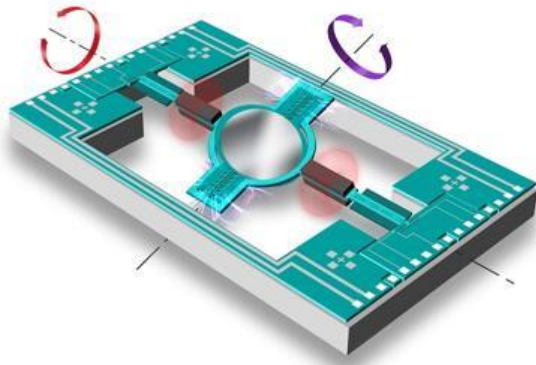
图 28: Velodyne 的激光雷达结构



资料来源: Velodyne 官网, 长江证券研究所

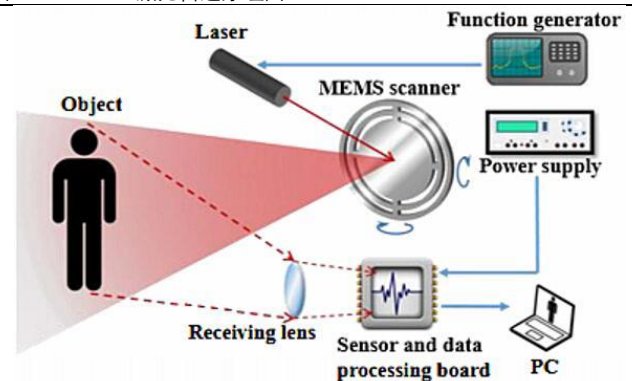
MEMS 半固态激光雷达供应链最为成熟，目前是量产产品的首选，当前阶段产品价格已经可以达到 500 美金-1000 美金。 MEMS 微振镜本质上是一种硅基半导体元器件，其特点是内部集成了“可动”的微型镜面，采用静电或电磁驱动方式。采用 MEMS 微振镜简单讲就是以电机为主的扫描系统换成 MEMS 驱动的镜片，实现激光雷达的扫描。MEMS 作为较为成熟的半导体元件具备大规模生产后成本下降的特性。MEMS 激光雷达的优点在于：1) MEMS 微振镜的引入可以减少激光器和探测器数量，极大地降低成本；2) MEMS 激光雷达结构精巧，大幅下降尺寸；3) MEMS 微振镜并不是为激光雷达而诞生的器件，它已经在投影显示领域商用化应用多年，供应链较为成熟。

图 29: MEMS 微振镜图片



资料来源: mems.me, 长江证券研究所

图 30: MEMS 激光雷达原理图

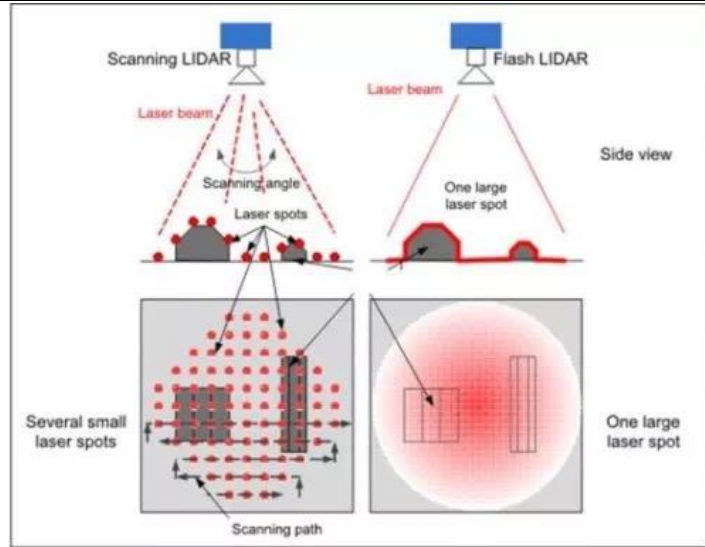


资料来源: mems.me, 长江证券研究所

Flash 激光雷达产品在消费电子领域产品成熟度较高，但在车载领域需要解决高能量发射的痛点，目前价格相对 MEMS 较高，远期仍有潜力下探到 500 美金以下。 Flash 顾名思义，就是「闪光」，这种固态激光雷达像一个手电筒一样，发射一个面阵光，再通过高灵敏度的传感器绘制环境图像。FLASH 激光类 3D Flash 技术的天然优势在于：首先是全固态，没有任何移动部件，更像是一个半导体产品。如此一来，在大批量生产从而降低成本、通过车规级方面，3D Flash 技术有天然的优势。Flash 激光雷达需要较高功率的脉冲才能实现较远距离的探测，主要解决方法是采用高功率的固态激光发射器，或

采用 InGasa 材质的 SPAD 作为探测器，简单讲就是提升发射端功率或提高接收端的能力，目前这两种途径成本均较为昂贵。目前 Flash 产品价格依然较高，Ouster 预计到 2024 年将量产 ES2 产品，价格为 600 美金，而且随着技术的优化，将有望下探到 100 美金以下。

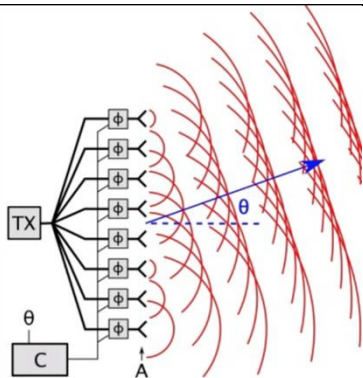
图 31: Flash 激光雷达原理图



资料来源: Ibeo, 长江证券研究所

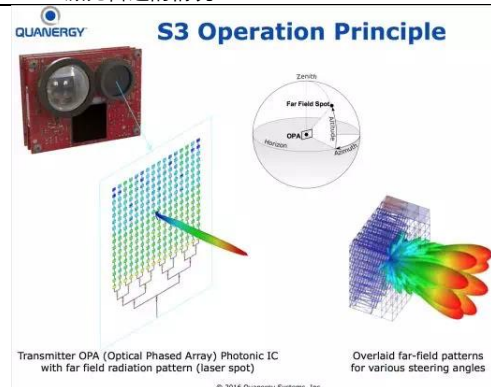
OPA 固态激光雷达，潜力最大，但没有成熟产业链支持，难度较高，Quanergy 预期未来有望价格下降到 250 美金。光学相控阵 OPA 固态激光雷达原理是各处振动产生的波相互叠加，有的方向互相增强，有的方向抵消，采用多个光源组成阵列，通过控制各光源发射的时间差，可以合成角度灵活、精密可控的主光束。OPA 光学相控阵的核心是相控阵单元目前市面上并没有成熟的技术，突破时间较为漫长。Quanergy 是采用 OPA 激光雷达的典型代表，公司预计随着技术成熟价格有望达到 250 美金左右。

图 32: 通过光干涉获得信息



资料来源: Quanergy 官网, 长江证券研究所

图 33: OPA 激光雷达的情况



资料来源: Quanergy 官网, 长江证券研究所

高线束机械激光雷达基本仍在 2000 美金以上，随着固态激光雷达的推广，价格可以下沉到 500 美金以下。从目前市面上的主要激光雷达来看，机械激光雷达价格浮动较大，但高线束的机械激光雷达基本在 2000 美金以上。固态激光雷达多数仍处于推广中，集

中出货预计在 2022 年以后，MEMS 激光雷达基本可以将价格稳定在 500-1000 美金。我们认为机械激光雷达受制于复杂的结构与生产工艺，稳态价格依然会在 1000 美金以上，而固态激光雷达有望在 2025 年平均价格实现 500 美金，随着 OPA 等技术成熟未来价格有望下沉到 200-300 美金。

表 6：市面上主要激光雷达产品以及价格

技术路线	厂家	型号	探测距离 (10%反射下)	体积/重量	距离精度	角精度	FoV (水平×垂直)	售价	供货时间
机械式	Velodyne	VLP-16	120m	830g	3cm	(0.1-0.4)×2°	360×30°	\$4000	2018 年
		HDL-32E	80m-100m	1Kg	2cm	(0.08-0.33)×1.33°	360×40°	\$30000	2016 年
	禾赛科技	PandarQT 64 线	200m	1.63Kg	2cm	0.1×0.125°	360×40°	\$4999	2020 年
	法雷奥	SCALA-1(4 线)	150m	106×100×60mm		0.25×0.8°	145×3°	\$600	2018 年
	大疆览沃	Horizon	90m	77×115×84mm/1180g	2cm		82×25°	\$800	2020 年
Mems	Velodyne	Velarray H800	200m				120×35°	低于 \$500	2021 年
		velabit	100m	61×61×35mm			60×10°	\$100	2023 年
	Luminar	Iris	250m		1cm	0.07°	120×30°	\$500-1000	2022 年
	Aeva	Aeries	250m			0.05°	120×30°	低于 \$500	2021 年
	Innoviz	Innovizone	250m		3cm	0.1×0.1°	115×25°	估计近 \$1000	2021 年
	速腾聚创	M1 Smart	120m	108×110×45mm	5cm	0.2×0.2°	120×25°	\$1898	2020 年
	镭神智能	LS20D (等效 200 线)	150m	161×180×64mm	3cm	0.25×0.1°	120×20°	\$868	2020 年
	禾赛科技	PandarGT	300m	96×119×130mm/1.8kg	2cm	0.1×0.16°	60×20°	数百美金	未公布
	Flash	Ibeo	IbeoNext	150m	108×102×83mm/780g	4cm	远距: 0.04°×0.07°、中距: 0.125°×0.20°、短距: 0.07°、中距: 32°×20°、短距: 60°×37.5°	未公布	2021

距: 0.23°×

0.38°

	Ouster	ES2	200m	116 x 68 x 48 mm	5cm	0.1°x0.1°	26x13°	\$600	2024
OPA	Quanergy	S3	150m	100x60x120mm/500g	5cm	0.1°-0.5°	120x10°	\$250	未公布

资料来源: 各公司官网, 长江证券研究所

制约激光雷达的核心供应链是什么?

目前激光雷达除了本身系统层面的技术优化, 上游核心部件的进一步完善和降本也对激光雷达, 尤其固态激光雷达的性能和成本有明显的影 响。从激光雷达的上游来看, 主要核心部件是扫描器、光电探测器及接收 IC 以及激光器, 相关产品也分特有件和通用件, 目前整体上游以半导体为主, 国外企业处于相对垄断状态。1) 扫描器: 从部件本身不管是旋转电机以及镜头还是 MEMS 产品在其他领域也有较多应用, 但需要针对激光雷达特定开发; 2) 激光器: 激光雷达的专有部件, 基本上以半导体激光器为主; 3) 光电探测器级接收器 IC: 光电探测器为专有部件, 其他通用部件包括放大器、数模转换器、FPGA 等。

图 34: 激光雷达产业链梳理



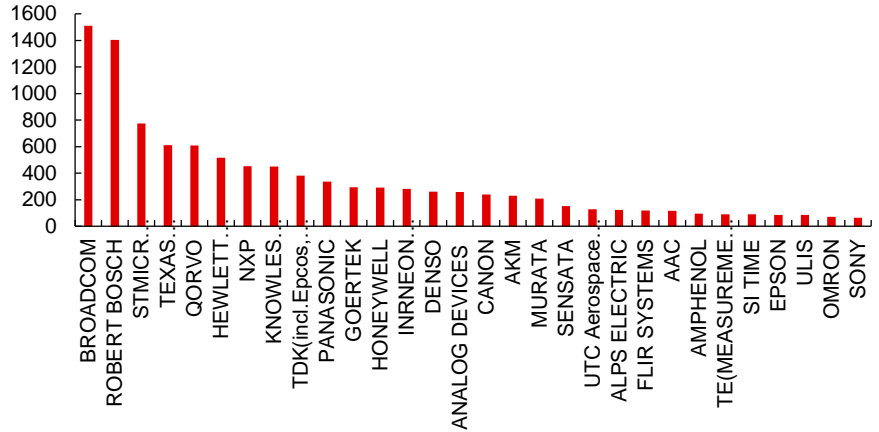
资料来源: 盖世汽车, 长江证券研究所

MEMS 微振镜, 影响 MEMS 激光雷达成本的关键点

MEMS 微振镜技术门槛较高, 目前主要集中在海外企业手中。MEMS 作为一个半导体核心技术主要掌握在海外企业手中, 目前全球前 30 家 MEMS 企业均为海外半导体知名企业。MEMS 微振镜的技术难度更大, 具备技术成熟且量产的 MEMS 微振镜企业基本集中国外, 如欧洲 Innoluce、美国 Mirracle、日本滨松、瑞士意法半导体、美国 MicroVision

等。中国 MEMS 微振镜企业近些年发展迅速，如西安知微传感、台湾 Opus、苏州希景科技等均有产品推出。

图 35：2018 年全球收入 TOP 30 MEMS 企业（单位：百万美元）



资料来源：Yole，长江证券研究所

MEMS 微振镜在 MEMS 激光雷达中不管从技术制约还是从价值量而言，都是最为核心部件，激光雷达企业为提升自身核心竞争力努力向上游延伸。MEMS 微振镜在激光雷达中尺寸要求较大，根据 Innoluce 目前报价来看，7.5mm 微振镜的价格在 1199 美元，价格较为昂贵。MEMS 微振镜本身从消费级向车规级的升级中也需要更多技术要点需要克服，因此部分激光雷达企业也积极布局 MEMS 微振镜上游。目前 Innoviz、Aeva、Luminar、禾赛科技等均开选择自研 MEMS 微振镜，速腾聚创也投资了希景科技。

图 36：Innoluce 不同镜面尺寸 MEMS 价格

4-QUADRANT MEMS MIRRORS (BI-DIRECTIONAL TILT ON TWO-AXES):
Point-to-point or quasistatic two-axis MEMS mirrors with bi-directional tilt on each axis

	Actuator series	Integrated 0.8, 1.2 mm	Integrated 2.0, 2.4mm	Bonded 0.8, 1.2 mm	Bonded 1.6 - 2.4 mm	Bonded 3.0, 3.6 mm	Bonded 4.2, 4.6, 5.0 mm
4.25mm Actuator	A1xx, A3xx	\$449.00	-	\$639.00	\$689.00	\$769.00	-
5.20mm Actuator	A7Mx, A7Bx	\$478.00	\$598.00	\$868.00	\$718.00	\$798.00	-
7.25mm Actuator	A5M24*, A8L2.2	-	*\$657.00	-	-	\$876.00	\$926.00
7.25mm Actuator	13Z2.1, A5L2.2	-	-	-	\$815.00	\$895.00	\$945.00

"Oversized" Quasistatic two-axis MEMS mirrors with bi-directional tilt on each axis:

	Actuator series	Package	Bonded 6.4mm	Bonded 7.5mm
±1° Mech. Angle	A5L2.x	TINY48.4	\$999.00	\$1,199.00

NEW REDUCED PRICING

资料来源：Innoluce 官网，长江证券研究所

发射接收端，优化后将提升激光雷达性能

发射器与接收器本身相辅相成，一方面提高接收器效能可以降低发射器功率，另一方面，比如 1550nm 发射器需要特定的传感器介质。激光器本身行业较为成熟，主要分为固体激光器、气体激光器、半导体激光器、光纤激光器等。目前激光雷达主要采用半导体激光器，主要的提供商为滨松、Lumentum、ams、Manlight、Finsar 等。

表 7: 发射器对比

		905nm	1550nm
安规	波长越短，光子能量越高，对人眼伤害越大，安规限制越严格	限制大	限制小
传感器	传感器材料决定了光谱响应灵敏度，InGaAs 材料价格远高于 Si	Si	InGaAs
光源器件	主要考虑成本、体积、光束质量和功率	半导体激光器	光纤激光器
日光干扰	地面日光光谱受多个因素影响，影响背景光水平	干扰大	干扰小

资料来源：麦姆斯，长江证券研究所

接收器中的核心部件主要是光电二极管，主流采用的 APD（雪崩光电二极管）。SPAD（单电子雪崩二极管）较 APD 相比，灵敏度极高，是 APD 的上百倍，可以大幅降低激光回传要求的质量。目前 SPAD 价格远高于 APD，但随着供应链的改善以及突破，SPAD 潜力巨大。目前光电二极管的主要提供商为滨松、SensL、Osram、STM、Sens-Tech 等公司。

表 8: 两种接收器对比

	SPAD(单光子雪崩二极管)	APD(雪崩光电二极管)
类比	相当于单个底部有大洞，特别浅的桶，一次只装一个光子	相当于单个底部有小洞的深桶，一次能装大量光子
灵敏度	单光子响应，灵敏度极高，极限量程大	灵敏度高，极限量程相对较大
成像输出	仅输出 0/1 信号（黑白）	动态范围大，输出模拟信号（灰度）
噪声干扰	动态范围极小，噪声影响严重，户外白天易饱和和失效	动态范围大，信噪比高
量子效率	光子探测效率低（~5%）	光子探测效率高（~70%）
阵列化工艺	阵列化工艺成熟，已有 MPPC/SiPM 方案	阵列化工艺不成熟
信号处理电路	输出黑白信号，处理电路简单	输出灰度信号，处理电路相对复杂

资料来源：麦肯姆，长江证券研究所

行业迎来大发展，关注国内头部企业

玩家百花齐放，技术路线各有不同

头部激光雷达玩家技术路线各有不同，但均有客户落地，迎来高速发展期。国际上机械雷达路线的是 Velodyne，MEMS 有 Innoviz、Aeva、Luminar 等，Flash 的有 Ibeo、LeddarTech、Ouster 等，OPA 有 Quanergy；目前 Velodyne 和 Luminar 均已经在美股上市，Innoviz、Ouster 和 Aeva 等已有上市计划。5 家公司在技术上均较为鲜明：Velodyne 在机械激光雷达领域较为成熟；Luminar 掌握多项 MEMS 激光雷达的核心技术潜力较大；Innoviz 采取更为保守的 MEMS 激光雷达接受发射方案，获得宝马认可；Ouster 用 VCSEL+SPAD 组合来解决 Flash 激光雷达的痛点；Aeva 另辟蹊径采用 FMCW 的技术。各家公司在产品采取不同的技术方案配合自身的市场策略，均获得不同客户的试验与应用，未来发展值得跟踪和研究。

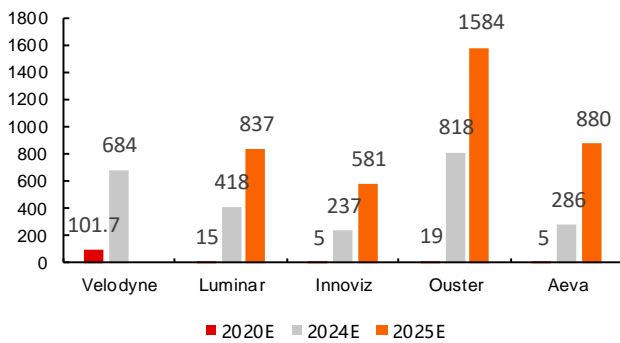
表 9：国际激光雷达主要参与者

厂商	国别	成立时间	产品线	客户与合作方	市值 (估值)	2020 年预计收入	公司特点
Velodyne	美国	1983	机械、MEMS	通用、现代摩比斯、Aptiv 等	42 亿美元	1 亿美元	激光雷达的鼻祖企业，机械激光雷达具有较高市占率
Luminar	美国	2012	MEMS	沃尔沃、丰田、Mobileye 等	118 亿美元	1500 万美元	1550nm 大功率光纤激光器、MEMS 双轴镜面技术、高度敏感 InGaAs 探测器和自研的 ASIC 芯片等多项核心技术
Innoviz	以色列	2016	MEMS	菲亚特、上汽、大众、滴滴、Liber 等	作价 14 亿美元	500 万美元	自研 MEMS 振镜及后端芯片，宝马首个激光雷达供应商
Ouster	美国	2015	Flash、机械	日立、微软、宝马、NVIDIA 等	约 19 亿美元	1900 万美元	采用了 850nm 波长的多激光 VCSEL+SPAD 组合，Flash 技术代表公司
Aeva	美国	2017	MEMS (FMCW)	采埃孚、大众、宝马、戴姆勒等	约 21 亿美元	500 万美元	业内唯一采用 FMCW 技术路线企业
Quanergy	美国	2012	OPA	Koito 等			首次提出 OPA 方案企业
Ibeo	德国	1998	Flash、低线机械	法雷奥、奥迪、长城等			全球首个量产车规级激光雷达 Scala，目前采用 Flash 的技术路线
禾赛科技	中国	2013	40、64、128 线机械、MEMS	Robotaxi、博世等			2.5 亿元人民币（2020 年前 9 月）
速腾聚创	中国	2014	机械、MEMS、OPA	一汽			
北科天绘	中国	2005	机械、Flash				
镭神智能	中国	2015	16 线机械、MEMS	华为、东风、菜鸟等			
华为	中国		96 线 MEMS	北汽新能源、长安新品牌			
大疆览沃	中国		非往复机械	小鹏			
Innovusion	中国	2016	MEMS	蔚来、均胜			
亮道智能	中国	2015	算法和测试	和长城签订战略合作协议			

资料来源：各公司官网，长江证券研究所 注：Velodyne 和 Luminar 已上市，为 1 月 26 日收盘日市值。

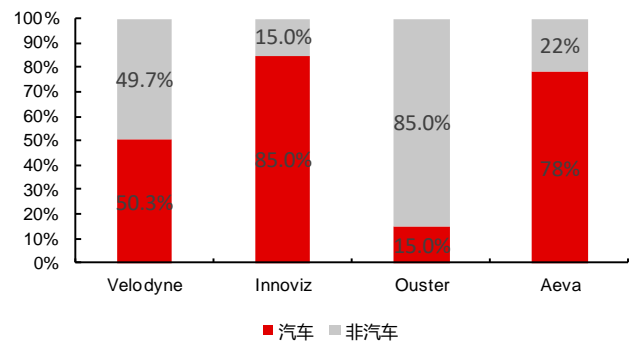
美国头部激光雷达对未来 5 年发展前景较为乐观，市场侧重略有不同。以 5 家每股上市或即将上市公司（Velodyne、Luminar、Innoviz、Ouster、Aeva）来看，各家公司对未来 5 年发展前景均较为乐观，2025 年中枢收入预计在 8 亿美元左右，相较目前有数十倍的成长空间。每家公司对下游市场的侧重略有不同，我们根据各家激光雷达对未来的预测将市场分为汽车市场（主要是指面向消费者的乘用车）以及非汽车市场（包括 robotaxi、无人驾驶物流、港口、矿山等商用落地）。Velodyne 较为均衡，预计 2025 年汽车与非汽车收入占比均为 50%左右，Innoviz 和 Aeva 主打汽车市场，预计 2025 年汽车收入达到 80%左右。Ouster 主打非汽车市场，预计非汽车收入 2025 年将达到 85%。

图 37：美国五家激光雷达公司收入预测（百万美元）



资料来源：各公司官网，长江证券研究所

图 38：美国四家下游应用占比（2025 年预计）



资料来源：各公司官网，长江证券研究所

国内与海外处同一起跑线，潜力巨大

国内头部企业具备和海外同等技术水平，市场面向全球。国内方面，禾赛科技、速腾聚创、镭神科技等初创企业起步较早领跑市场。禾赛科技目前产品主要为机械激光雷达，目前也已发布下一代 MEMS 激光雷达。速腾聚创主要在 MEMS 激光雷达，同时也储备 OPA 激光雷达。镭神智能已有机械、MEMS 产品，并探索 OPA 和 Flash 方面探索。国内企业产品不管在技术层面和市场层面均与海外企业处于同一水准，禾赛科技的明星产品 Pandar64 目前已实现全球领域的大面积销售，速腾聚创的产品也获得北美某车企的定点。

华为和大疆也均进入激光雷达赛道。华为在 2020 年年底推出第一款激光雷达产品，采用多棱镜方案实现 96 线效果，预计将在北汽新能源汽车上搭载。大疆的 Livox 此前在无人机领域获得大量验证，最新产品采用非往复机械方案的 Livox Horizon 已获得小鹏定点。华为和大疆均具备较强综合实力，也是激光雷达领域的重要玩家。

表 10：国内主要激光雷达企业

厂商	成立时间	产品线	客户与合作方	公司特点
禾赛科技	2013	机械、MEMS	Robotaxi、博世等	机械激光雷达 Pandar64 已实现全球销售，公司对发射、接受单元芯片有多项自研技术
速腾聚创	2014	MEMS、机械	一汽	国内首家推出 MEMS 产品的企业，目前已获得某北美车企定点
北科天绘	2005	机械		由测绘领域转向车载激光雷达，技术积累较长
镭神智能	2015	机械、MEMS	华为、东风、菜鸟等	推出多个机械激光雷达低成本方案，并已在多个场景落地

华为		96 线多棱镜	北汽新能源、长安新品牌	具备较强的制造能力和大量核心技术，综合实力较强
大疆览沃		非往复机械	小鹏	通过无人机领域的验证和积累具备较强的技术实力
Innovusion	2016	MEMS	蔚来、均胜	团队来自硅谷，获得蔚来定点
亮道智能	2015	算法和测试	和长城签订战略合作协议	具备完整的测试和算法能力，与车企合作多年

资料来源：各公司官网，长江证券研究所

激光雷达进入大发展，目前玩家较多，我们认为优秀的激光雷达企业应具备以下优势：
 1) 丰富的下游应用，robotaxi、商用车自动驾驶以及乘用车 L3 领域快速放量实现市场考验和技术迭代；2) 向上游核心技术领域延展，如 MEMS 微振镜提高激光雷达性能；
 3) 具备较强的后端算法支持能力。国内激光雷达企业与海外企业目前基本处于同一起跑线，而国内智能驾驶走在全球前沿，国内激光雷达有望诞生全球级别的优秀公司。建议关注国内领军企业。

投资评级说明

行业评级	报告发布日后的 12 个月内行业股票指数的涨跌幅相对同期沪深 300 指数的涨跌幅为基准，投资建议的评级标准为：
看好	相对表现优于市场
中性	相对表现与市场持平
看淡	相对表现弱于市场
公司评级	报告发布日后的 12 个月内公司的涨跌幅相对同期沪深 300 指数的涨跌幅为基准，投资建议的评级标准为：
买入	相对大盘涨幅大于 10%
增持	相对大盘涨幅在 5%~10%之间
中性	相对大盘涨幅在-5%~5%之间
减持	相对大盘涨幅小于-5%

无投资评级：由于我们无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使我们无法给出明确的投资评级。

相关证券市场代表性指数说明：A 股市场以沪深 300 指数为基准；新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准；香港市场以恒生指数为基准。

办公地址：

上海

Add /浦东新区世纪大道 1198 号世纪汇广场一座 29 层
P.C / (200122)

武汉

Add /武汉市新华路特 8 号长江证券大厦 11 楼
P.C / (430015)

北京

Add /西城区金融街 33 号通泰大厦 15 层
P.C / (100032)

深圳

Add /深圳市福田区中心四路 1 号嘉里建设广场 3 期 36 楼
P.C / (518048)

分析师声明：

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。分析逻辑基于作者的职业理解，本报告清晰准确地反映了作者的研究观点。作者所得报酬的任何部分不曾与、不与、也不将与本报告中的具体推荐意见或观点而有直接或间接联系，特此声明。

重要声明：

长江证券股份有限公司具有证券投资咨询业务资格，经营证券业务许可证编号：10060000。

本报告仅限中国大陆地区发行，仅供长江证券股份有限公司（以下简称：本公司）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告的信息均来源于公开资料，本公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证，也不保证所包含信息和建议不发生任何变更。本公司已力求报告内容的客观、公正，但文中的观点、结论和建议仅供参考，不包含作者对证券价格涨跌或市场走势的确定性判断。报告中的信息或意见并不构成所述证券的买卖出价或征价，投资者据此做出的任何投资决策与本公司和作者无关。

本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可升可跌，过往表现不应作为日后的表现依据；在不同时期，本公司可以发出其他与本研究报告所载信息不一致及有不同结论的报告；本报告所反映研究人员的不同观点、见解及分析方法，并不代表本公司或其他附属机构的立场；本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本公司及作者在自身所知范围内，与本报告中所评价或推荐的证券不存在法律法规要求披露或采取限制、静默措施的利益冲突。

本报告版权仅为本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。如引用须注明出处为长江证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。刊载或者转发本证券研究报告或者摘要的，应当注明本报告的发布人和发布日期，提示使用证券研究报告的风险。未经授权刊载或者转发本报告的，本公司将保留向其追究法律责任的权利。