

(报告出品方/作者：中信建投证券，刘双锋、郭彦辉、郑寅铭)

一、2022——激光雷达放量承上启下之年

1.1 短期来看，乘用车激光雷达迎来一波交付潮

2021-2022H1 国内激光雷达装配量规模较小，下半年新车型密集交付将推动装配加速。高工智能监测数据显示，2021年中国市场（不含进出口）乘用车新车前装搭载激光雷达接近 8 千台。根据佐思汽研统计，2022 年上半年，国内乘用车新车激光雷达装配量达到 2.47 万颗，其中小鹏 P5 最多，为 1.84 万台，占到同期总安装量的 74.4%。上半年国内搭载激光雷达的车型中仅有小鹏 P5 和蔚来 ET7 实现了交付，为装配量主力，其他下半年交付的车型因前置生产或测试有小批量的激光雷达安装。从 7 月开始，国内计划开启交付的激光雷达车型数量明显增多，共计 14 款，有望推动下半年激光雷达快速放量。

国内现有激光雷达车型标配/选配占比近似，标配款激光雷达数量以 1 台为主。近几年发布的激光雷达车型多数来自国内车厂，我们梳理了国内已发布的 19 款激光雷达车型的情况，截止 2022 年 9 月，已确认 8 款标配激光雷达，占比 42%，包括 3 款蔚来系车型、理想 L9 等，单车激光雷达数量大多为 1 台；选配激光雷达的车型为 9 款，占比 47%，包括 2 款小鹏系车型、北汽极狐等，单车激光雷达数量大多为 2-3 台；另有 2 款车型装配方案未知，占比 11%。

图表9：理想 L9 标配一台激光雷达



乐观假设下，2023 年国内激光雷达装配量冲击 50 万台。从几款标配激光雷达车型出发，对 2023 年做出如下乐观假设，①理想 L9 维持 1 万辆车的月均交付量，全年合计 12 万台激光雷达。②蔚来 ET5、ET7、ES7 三款合计维持 1.5 万辆车的月均交付量，全年合计 18 万台激光雷达。③阿维塔 E11 维持 5 千辆车的月均交付量，3 万台激光雷达/车，全年合计 18 万台激光雷达。乐观假设下，上述标配车型合计贡献 48 万台装配量，再考虑到小鹏 G9 等非标配车型的贡献，全年装配量有望冲击 50 万台。

1.2 自动驾驶驱动激光雷达的长期逻辑不变，产业未来几年将保持高增速

自动驾驶解放注意力，赋能汽车成为最大智能终端。未来汽车核心竞争要素将围绕智能座舱与自动驾驶展开，当自动驾驶完全解放驾驶员的双手和注意力后，智能座舱中可提供的休闲娱乐功能将更加丰富，乘车体验也将更加舒适，届时汽车将真正转变为以人为中心的“第三生活空间”，成为下一个互联网的入口，也成为终端消费者的第一触点，因此自动驾驶将长期保持汽车产业未来升级发展的方向。

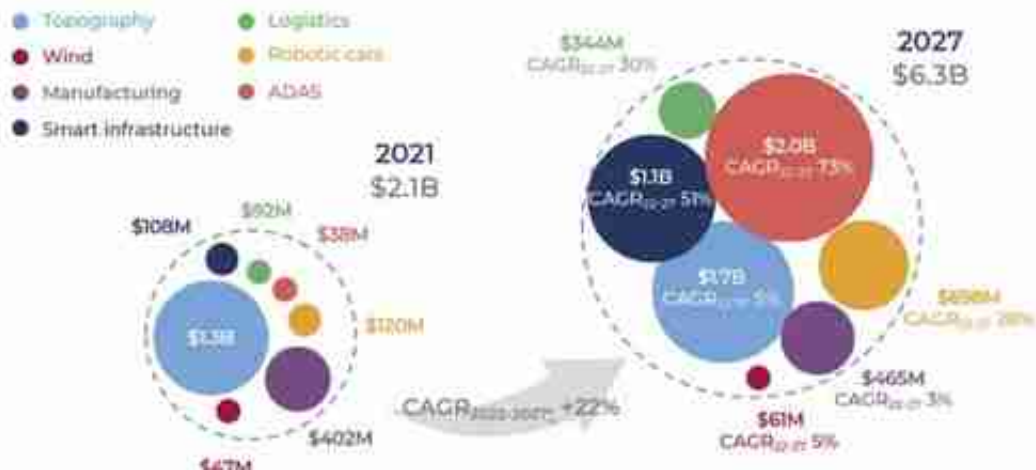
法规问世与扶持政策持续加码，保障全球自动驾驶长期渗透推进。自动驾驶相关法规的缺失一方面使

无人车运营商的测试、运营受到限制，另一方面使大部分乘用车自动驾驶等级在 L2+/L2++ 徘徊。日本和德国分别于 2019 年和 2021

年通过相关法规，允许高等级自动驾驶汽车上路行驶，并对驾驶员的行为和法律责任进行了界定；美国 2017 年出台关于自动驾驶的首部重要联邦立法，各州也积极推动自动驾驶立法；韩国也于近日公布《移动创新路线图》和《第三期汽车政策基本规划案》，制定自动驾驶普及“三步走”计划，并提出到 2027 年实现自动驾驶汽车的商业落地。中国也在稳步推进自动驾驶落地，今年 8 月起正式实行的《深圳经济特区智能网联汽车管理条例》，在权责认定方面做出明确规定，填补了国内相关法律法规的空白，有望为国家和其他地方政府推出相关政策提供参考。此外，今年以来国内多项自动驾驶扶持政策出炉，进一步推动自动驾驶的落地应用。

多传感器融合为自动驾驶感知方案主流选择。虽然 Tesla 迈向纯视觉方案，但从安全性角度，基于摄像头的视觉方案在暗光、环境大光比以及雨水遮挡的情况下容易失效，难以用算法解决，同时深度学习算法难以避免长尾效应。从商业的角度，大多数主机厂缺乏 Tesla 的数据和算法积累，跟随 Tesla 方案难以在同一时期达到相同水平。目前绝大多数厂商均使用多传感器融合技术（包括主打视觉方案的 Mobileye 也开始自研激光雷达），即通过不同种类的传感器遍布车身，实现 360 度无死角和远中近扫描，获取海量数据，融合分析后形成驾驶决策辅助驾驶员或控制汽车。各传感器应对不同场景，实现优势互补。

图表20: 激光雷达市场规模预测



二、中国不仅是激光雷达主要下游市场，还是产业的重要参与者

2.1 国内激光雷达厂商在定点、量产上实现领先

2.1.1 当前市场竞争格局：多家中国厂商脱颖而出，占领市场先机

中国激光雷达厂商快速突破 ADAS 前装定点，禾赛科技引领突围。根据 Yole 统计，2018-2022.08，全球 ADAS 前装定点数量约 55 个，中国供应商占 50%。禾赛以 15 项定点，27%的份额排名全球第一；速腾以 9 项定点，16%的份额排名全球第三、中国第二。对比 Yole 截止 2021Q3 统计的 29 项 ADAS 前装定点，Valeo 以 8 项定点排名第一，目前已下滑至第二，两次统计间仅新增 2 项定点。禾赛在上次统计中仅有 1 项定点，速腾仅有 3 项。以禾赛为首的中国供应商在近一年的时间内强劲突围，极大地改变了全球激光雷达行业的发展局面。

定点到量产存在不确定性，订单实际成色是关键。激光雷达的首发上车都会经历波折的验证周期，从定点到量产随时可能出现供应商的更换。回顾乘用车激光雷达近几年的发展，业内已发生多起合作终止或是供应商

被替换的事件，此外还有早已公布的定点项目，迟迟未见量产装车：

1) Quanergy 失去宝马定点：2018 年宝马与 QUANERGY 达成合作，并测试其 OPA 激光雷达，后因技术不成熟，效果不理想，宝马转向与 Innoviz 合作。

2) 长城摩卡激光雷达由速腾聚创供应，而并非之前宣传的 Ibeo：2021 年，长城摩卡对外传递的信息——将搭载 3 颗德国 Ibeo NEXT Flash 激光雷达。但 2022 年 8 月 26 日，速腾聚创却正式宣布为魏牌旗舰车型摩卡 DHT-PHEV 激光雷达版提供 2 颗 MEMS

激光雷达。实测效果不佳可能是此次长城更换激光雷达选型的原因之一，Ibeo 官方声称 Ibeo NEXT 可实现 250 米探测距离和

0.05°的高空间分辨率，但从原理上讲，当前 Flash 激光雷达的探测性能难以达到同期半固态激光雷达的水平。IbeoNEXT

还于近期申请了破产。3) Innoviz 与宝马合作 4

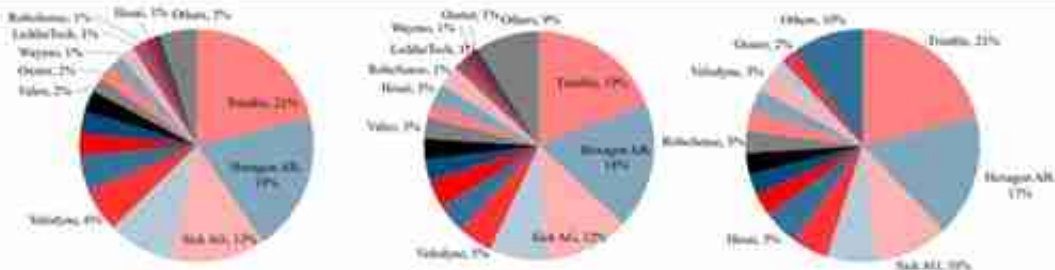
年还未进入量产释放阶段，与大众 40 亿美元定点金额为自行估算：Innoviz 于 2018 年获得宝马定点，麦格纳为 Tier1，但经过 4

年合作还没有进入实际的释放阶段，而且原本传言在 iX

上的搭载计划也被推迟，目前确认的是全新一代 7 系。同时需注意，目前通用的行业规则中，激光雷达厂商对外宣称的与主机厂的合作金额往往不是实际的订单金额，而是激光雷达厂商自行做出的假设。例如今年 8 月初，Innoviz

声明将向大众汽车集团旗下的 Cariad 子公司提供相关硬件和软件，用于大众集团旗下多个品牌的先进驾驶辅助系统和自动驾驶汽车，合作为期 8 年，交易价值 40 亿美元为其自行测算得到。

图表26： 2019-2021年激光雷达市场格局（以销售额，仅标注头部与车载激光雷达厂商）



ADAS 市场：激光雷达新车型陆续交付，国产激光雷达厂商市场份额预计将进一步提升。根据 Yole 数据，2018-2021 年全球 ADAS 前装市场激光雷达出货量约 15.6 万台。在市场早期，法雷奥的转镜式激光雷达 SCALA Gen.1 (2018 年) 是第一款通过车规认证并在 Audi A8 上使用的激光雷达，之后法雷奥还向奔驰 S 和本田 Legend 供应激光雷达，因此具有先发优势，在 2018-2021 年期间独占 70%左右的出货量。法雷奥官方信息显示 2017 年至今已生产 17 万台激光雷达。但 2021 年末起，国产激光雷达车型陆续发布与交付，国内厂商的出货量与份额快速爬升，根据 Yole 预测，2022 年全球 ADAS 前装市场激光雷达出货量有望达到 22.1 万台，前 7 名厂商中有 5 家来自中国，其中禾赛占比 20%，位列第二，速腾和华为分别位列第三和第四。

L4 自动驾驶市场，禾赛科技市占率登顶。主打 L4 自动驾驶的 Robocar 为机械式激光雷达的主要应用场景之一，而 Velodyne 过去以先发优势在该细分市场保持龙头地位，其产品曾供不应求，百度、福特也因此战略投资 Velodyne (现已出售股份)，Waymo 则以自研激光雷达替代。禾赛科技的产品后来居上，以优异的性能和价格优势在市场上快速崛起，已覆盖国内外几乎所有头部自动驾驶公司，包括 Cruise、Nuro 等，在国内的百度、美团无人车、文远知行、小马智行等也以绝对优势领先。根据 Yole 数据，2021 年禾赛科技以 58% 的营收占比排名全球第一，是第二名 Waymo 份额的两倍以上，Velodyne 则跌至第三，市场份额仅为 4%。

在后续发展中，我们认为 L4 自动驾驶市场中半固态激光雷达渗透率有望逐步提高，相关龙头厂商持续受益。此前市场中的 Robotaxi 以及 Robodelivery 的一大标志便是车顶的机械式激光雷达，其主要原因为：1) L4 Robotaxi 相比乘用车更早开始大规模引入激光雷达，彼时只有机械式激光雷达较为成熟。2) 机械式激光雷达拥有 360°扫描视野，且扫描均匀性好。然而实际运用中多台机械式激光雷达的布置也存在各种问题：

- 1) 机械式激光雷达购置成本高昂，且由于寿命较短，后续更新维护成本较高。
- 2) 能发挥机械式激光雷达360°扫描能力的布置方案即水平布置在车顶，而其他方案可能造成扫描功能的浪费，例如使用斜向布置的机械式激光雷达对车辆近距离区域进行覆盖，或将机械式激光雷达布置在车前，都导致相应激光雷达有一部分的工作角度是无意义的。上述情况可以考虑使用几台半固态激光雷达进行替代。

图表38: Velodyne 营收结构预测



规模化量产与良好工程实力促进降本增效。由于面向消费者的乘用车采购激光雷达数量大，OEM 客户对激光雷达的价格敏感度相较于 Robotaxi 更高。低产能是过去激光雷达成本居高不下的主要原因。Velodyne 曾披露其 64 线激光雷达的成本高昂原因之一便是人工调试复杂，生产周期以“周”来计算导致产能低。

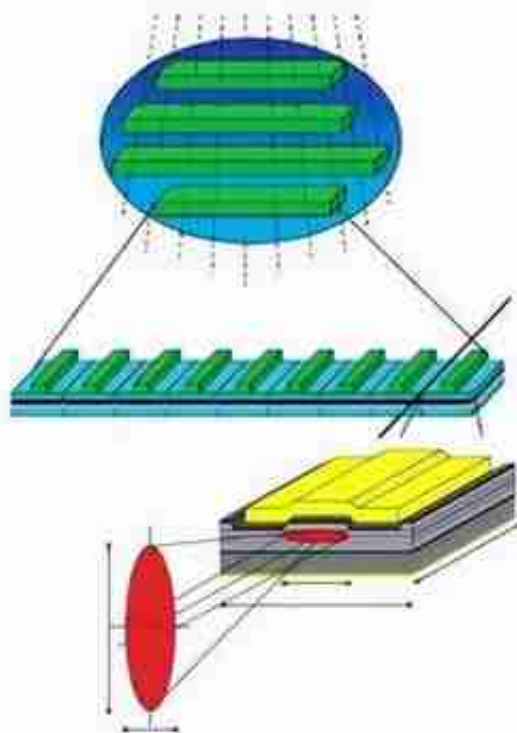
与车企合作紧密的厂商获取先发优势的同时将通过持续工程迭代构建商业、技术壁垒。考虑到汽车市场本身具备产品认证周期长的特点，且搭载激光雷达的车型往往需要定制外观设计、传感器融合算法等方案，因此当下和车企合作密切并有商业化落地项目的厂商有望对竞争对手建立进入壁垒，与车企客户建立粘性，例如图达通与蔚来系绑定，禾赛与理想系绑定。爆款车型将对相应激光雷达的放量带来有力催化。同时可以预见与车

企的深度合作也将反哺激光雷达厂商在技术、量产交付能力上进行迭代提升。

2.2 中国正形成车载激光雷达生态系统，产业链成熟度逐渐提高

激光雷达产业的上游主要包括发射模块（激光器）、光学部件、接收模块（光电探测器）和信号处理电路（前端处理：TDC、TIA 等，主控单元：FPGA、ASIC 等）。元器件直接影响激光雷达产品技术性能与成本控制。产业中游为激光雷达整机厂商，主要负责整合与算法。产业下游主要包括ADAS、无人驾驶、车联网和服务机器人四大应用领域。

图表48： 边发射激光芯片（EEL）

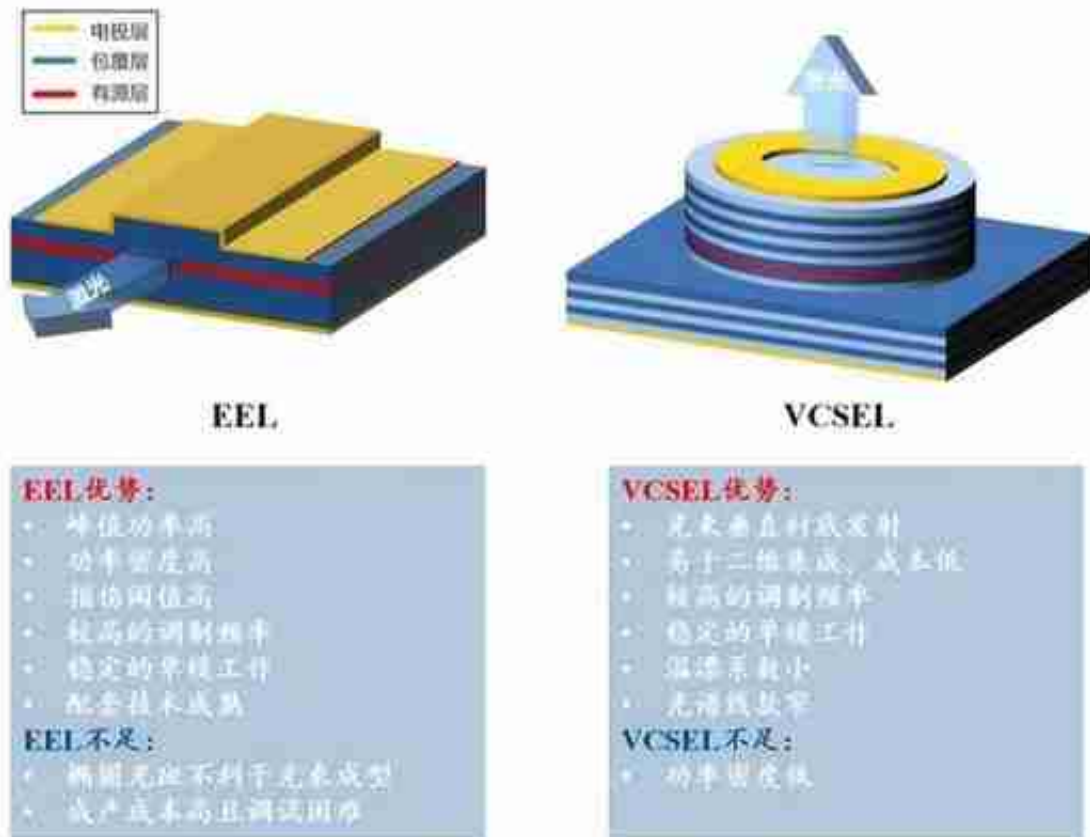


常见的边发射激光芯片相关产品有单管芯片、光纤耦合模块、巴条芯片、阵列模块等。单管芯片只有一个发光单元，巴条芯片是由多个发光单元并成直线排列的激光二极管芯片，巴条芯片经过钝化、解膜后，可解理为单个发光单元的单管芯片，单管和巴条芯片主要用于工业泵浦、科学研究、激光装备等。光纤耦合模块通常是由单管芯片经过光学整形合束耦合封装而成，主要用于光纤激光器、固体激光器泵浦源等；阵列模块通常是由巴条芯片集成封装而成，主要用于固体激光器泵浦源等。

光雷达为 EEL 增速最快的细分市场之一，预计 2026 年市场规模超过 4 亿美元。根据 Yole 数据，EEL 整体市场规模在 2020 年为 28.74 亿美元，预计 2026 年达到 66.13 亿美元，2020-2026 年 CAGR 为 15%。从市场构成来看，目前光通信领域是 EEL 主要应用市场，2020 年占比 60%，未来仍将保持 15% 的高复合增速。EEL 增长最快的领域包括传感、医疗和照明，预计 2026 年市场规模达到 7.78 亿美元，CAGR 为 25%。EEL 在传感领域的增长将主要由激光雷达需求驱动，预计到 2026 年激光雷达领域的 EEL 出货量接近 1 亿个，市场规模将超过 4 亿美元，2020-2026 年市场规模 CAGR 约为 72%。

ams OSRAM 是行业领先的供应商。目前激光雷达 EEL 的供应商主要为海外的 ams OSRAM (速腾聚创 M1、Cepton)、日本滨松 (Livox Horizon)、Excelitas (LeddarTech Vu8)、国内的长光华芯、瑞波光电子等。ams OSRAM 是市场上少有的同时提供 EEL 和 VCSEL 解决方案的厂商，技术领先，其新开发的芯片设计收窄了 EEL 激光器的温漂曲线，在汽车应用的典型工作温度高达 125°C 时可以媲美 VCSEL 的波长稳定性，已有十多款汽车型号所采用的 LiDAR 辅助系统搭载了它的激光器。

图表58: EEL 与 VCSEL 特点比较



2) 易于制作二维集成器件: VCSEL

的一个关键优势是可以制作单片集成的二维阵列用于高功率输出, 而 EEL 无法实现这一点。

3) 窄带宽、温漂低: VCSEL 波长带宽可以做得非常窄, 通常小于 5nm, 这也是 VCSEL 在光通信领域得到 广泛应用的关键原因。VCSEL

的激光波长由谐振腔的光学厚度决定, 而材料的折射率和热膨胀系数随温度变化很小, 使得温度对光学厚度的影响较小, 进而波长随温度的变化较小。EEL 的激光波长由材料的增益谱峰值决

定, 而材料的增益随温度的变化较明显, 因而波长随温度的变化较大。VCSEL 激光波长随温度的漂移率只有 0.07nm/K, 而 EEL 为 0.22nm/K。

4) 低阈值电流: VCSEL

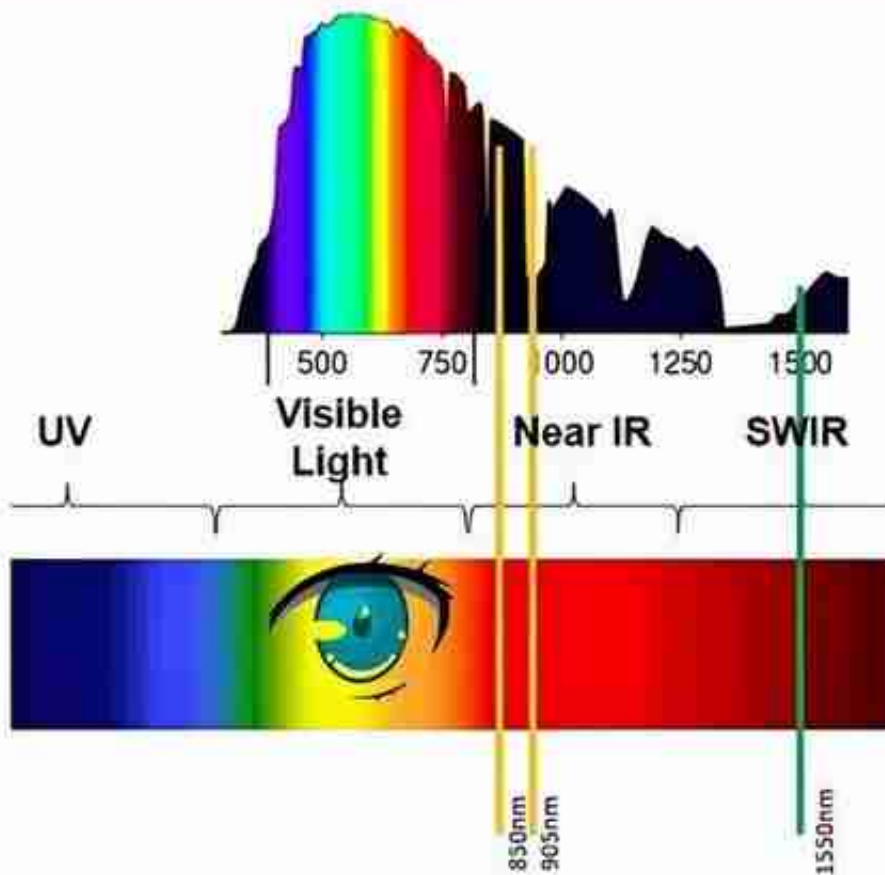
仅需要亚毫安量级的阈值电流, 以及在一些实际应用只需要毫瓦量级的输出功率时, VCSEL 只需要很小的驱动电流, 这大大降低了器件的功耗, 并使得驱动部分的

电路设计更简单容易。

5) 光束质量：由于 VCSEL 可以发射出圆形光斑，因此，通过适当结构设计的 VCSEL 可以发出单横模光束。与 EEL 相比，这种优异的光束质量降低了光束耦合和光束整形系统的复杂性和成本，与光纤耦合效率高。

随着汽车激光雷达的市场需求增长，多结 VCSEL 阵列成为全球领先厂商的重点布局产品。相比单结 VCSEL，多结 VCSEL 可以：①提升能量转换效率（PCE），降低功耗；②提供更高的功率密度，对光学系统设计更加友好；③提高效率，对激光驱动器更加友好；④提供更高的峰值功率，扩大测距工作范围；⑤降低激光器的“每瓦成本（Cost per Watt）”。2020~2021 年，全球主要厂商陆续发布了双结和三结 VCSEL 产品，Lumentum 则在 2021 年 3 月首发五结和六结 VCSEL 阵列，每个发射孔的光功率超过 2W，从而使得 1 平方毫米 VCSEL 阵列的峰值功率超过 800W。

图表72： 激光波长与地面太阳辐照度和可见光谱



3) 接收端信号探测能力：典型 Si 基探测器在 900nm 附近的灵敏度最高，典型 InGaAs 探测器在 1500nm 附近的灵敏度最高。

在车载激光雷达的发展中，光纤激光器与 1550nm 这两种技术路线总是同步出现，一方面也是因为产业链成熟度，另一方面则是为了满足远距离探测的需要。

1) 产业链成熟度：首先，1550nm

在光纤通信中广泛应用，光纤激光器发展成熟。其次，衬底材料基本决定了半导体激光器的波长，采用 InP 基底的 EEL 和 VCSEL 虽然可以产生 1550nm 激光，但相关产业链不成熟，成本高昂。根据 Yole 数据，4 寸 InP 衬底的成本是 6 寸 GaAs 的 3 倍以上，4 寸 InP EEL 的材料和制造成本总和是 6 寸 GaAs EEL 的 1.7 倍以上。

2) 满足探测距离需要：1550nm 光波比 905nm

光波更容易受到大气中水滴的吸收，例如 1550nm 在下雨/雾天的衰减程度是 905nm 的 4-5 倍，因此必须使用更高功率的光纤激光器来克服以提升探测距离。

1550nm 相比 905nm 人眼安全性高，进而能够扩大功率以提高探测距离。905nm 光波一般使用半导体激光器产生，EEL 和 VCSEL (GaAs 基底) 均可，整体实施成本低。905nm 相比 1550nm 更接近人眼可见光波段，同时在水中衰减更弱，容易损害视网膜，因此功率受限，进而影响到探测距离提升。1550nm 距离可见光波段远，且容易被水吸收，在同样的光斑大小和脉宽条件下，对视网膜危害低，功率限制小，可以通过加大功率来提高探测范围。

1550nm 光纤激光器提高功率解决衰减问题，但面临高功耗、低能量转换效率的问题。基于前文的分析，由于 1550nm

有高人眼安全性，光纤激光器能以提高功率来解决衰减问题，并获得超过 905nm 的探测距离。例如图达通 1550nm 激光雷达的最远探测距离达到 500m (905nm 典型值为 200m-300m)，10%反射率条件下探测距离达到 250m (905nm 典型值为 150m-200m)。但这也产生更高功耗的代价。905nm 激光雷达的典型功耗在 20W 左右，而 1550nm 的典型功耗则在 30W 以上。905nm 半导体激光器相对光纤激光器少了光纤耦合和放大的过程，能量转化效率更高。1550nm 光纤激光器方案的系统成本仍较高。1550nm 光纤激光器系统成本较高主要来自激光器和探测器两方面，1) 激光器：根据 Innoviz 上市路演报告，1550nm 光纤激光器单位价格达到 5000 美元，援引某中国供应商的数据显示百万台供货量时单位价格仍达 1000 美元；而 905nm 激光二极管的单位价格约为 10 美元，百万支供货量时单位价格为 4 美元。2) 探测器：因为材料的光敏性不同，1550nm 探测器需采用 InGaAs 制造，成本相比 Si 基上升幅度大。目前 1550nm 激光雷达主要代表厂商为

Luminar 和图达通，对应的车型蔚来 ET7、沃尔沃 EX90 均属于中高端车型。

图表89： 锐科激光连续光纤激光器成本结构



5) 光纤器件行业盈利水平优于光纤激光器。随着功率的降低，光纤激光器毛利水平呈下降趋势。根据中国科学院武汉文献情报中心的《2021年中国激光产业报告》，10kW 光纤激光器毛利率为 30-40%，而 1kW 光纤激光器的毛利率降低到 10-15%。相对而言，光库科技、腾景科技、天孚通信的光纤器件业务毛利率水平更高。

泵浦源为光纤激光器核心零部件，成本占比高达 50%。光纤激光器的核心器件包括泵浦源、谐振腔、增益 光纤，其他器件包括隔离器、合束器、耦合器、波分复用器等。半导体激光芯片（例如 EEL）可封装为泵浦源。根据长光华芯招股说明书，泵浦源是激光器的核心器件之一，占光纤激光器成本比例高达 50%。泵浦源内部是将多颗半导体激光芯片的光线进行合束，激光芯片占泵浦源成本的 10%。

从供应商来看，目前涉足激光雷达光纤激光器整机供应的厂商普遍具有定制化能力，例如海外 Lumbird 可面向激光雷达市场提供定制产品，国内海创光电推出了用

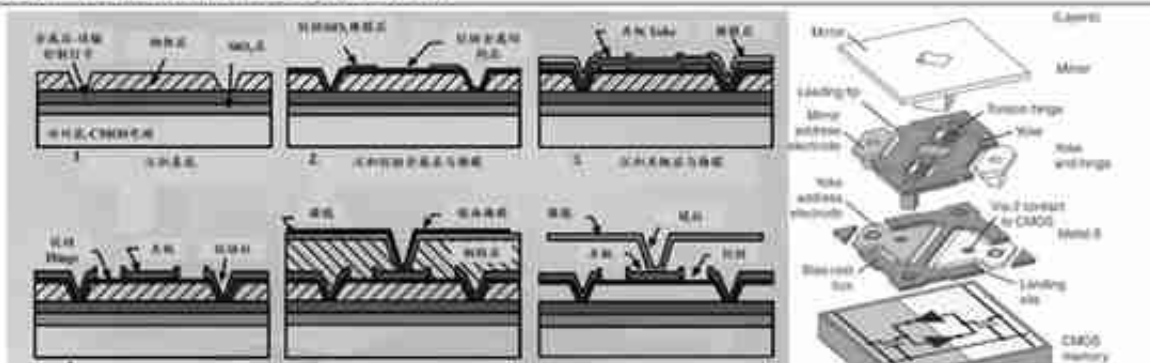
于自动驾驶的迷你脉冲激光器。从元器件角度，泵浦源厂商与半导体激光器厂商重合度高，包括 II-VI、Lumentum 和长光华芯等，虽然目前没有看到上述公司专门面向激光雷达光纤激光器路线推出的泵浦源，但具有能力迁移。其他光学组件方面，国内光库科技可提供隔离器、合束器、光纤光栅等产品，为国内外多家基于光纤激光器 1550nm 光源方案的激光雷达公司提供全系列高性能、低成本、高可靠性的光纤元器件。

四、扫描模块：振镜、转镜关联技术路线，常规光学件走量应用

4.1 MEMS 振镜：MEMS 激光雷达核心光束操纵件，技术壁垒高

MEMS 技术应用广泛，光学 MEMS 市场规模快速增长。MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 即微机电系统，集传感器、微机械结构、信号处理和控制电路于一体，其内部结构一般在微米甚至纳米量级，常见的产品包括 MEMS 麦克风、MEMS 加速度计等。光学 MEMS 是 MEMS 技术的重要分支，主要应用领域包括光通信、光显示 (例如 DMD 芯片)、智能终端等。根据 Yole 数据，2020 年全球光学 MEMS 市场规模为 5.3 亿美元，预计 2026 年达到 9.16 亿美元，期间年复合增长率为 9.5%，以激光雷达、VR/AR 为代表的新兴光学 MEMS 应用将迎来快速增长。

图表105: MEMS 微镜制造工艺 (以 DMD 为例)



规模效应有望带来可观成本下降空间。MEMS 制造的晶圆以 8 英寸和 6 英寸为主，制程在微米级，全球领先的纯 MEMS 代工企业 Silix 使用的制程在 0.25 μ m-1 μ m 之间。假设 MEMS 振镜直径为 5mm，Die Size 为 15mm \times 15mm / 10mm \times 10mm，则可在一片 8 英寸晶圆上产出超过 100/250 颗 Die，产量能够得到迅速提升。随着 规模提升带来的价格下降空间预测可以参考

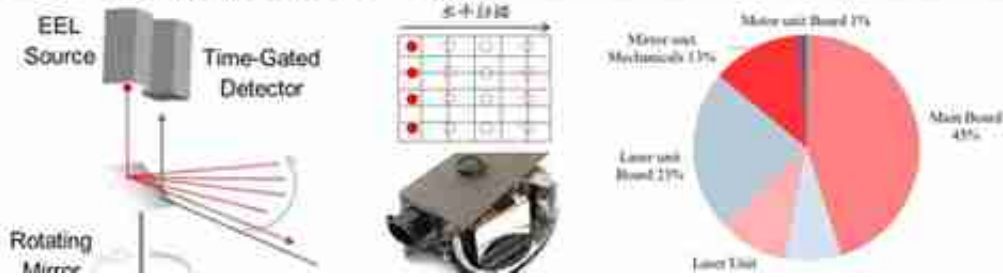
DMD 的情况。DMD 目前被 TI 垄断，从结构上看，我们认为它的设计复杂度和工艺难度不比激光雷达的 MEMS 振镜低，然而每年投影仪百万级的出货量支撑了它的成本下探。根据 TI 官网信息，用于 4K 超高清投影的 DMD 最低单价已降至 40 美元，多数车载 DMD 型号的单价则在 100 美元以下。我们判断激光雷达 MEMS 振镜的难度相对 DMD 较低，规模效应有望推动其价格下降到车载 DMD 芯片的水平或更低。

我们预测 2022 年车载激光雷达 MEMS 振镜市场规模约为 2450 万美元，预计 2027 年增至 1.6 亿美元，期间 CAGR 为 45%。测算假设如下：1) 根据 Yole 对出货量份额的预测，2022 年乘用车 ADAS 前装市场的 MEMS 激光雷达占比约为 22%。我们认为未来 5 年，半固态激光雷达仍将占据市场主力，固态技术尤其是 OPA 尚未成熟，未能开启大规模替代。在半固态激光雷达中，我们看好 MEMS 路线的发展潜力，一方面是该路线已被众多厂商选择，包括速腾、Innoviz 等行业龙头，法雷奥第三代产品也将加入；另一方面则源于对半固态激光雷达进一步降低体积和成本的路径推演。基于此，我们乐观假设 5 年后 MEMS 激光雷达出货占比达到 70%。2) 根据 2.1 节的讨论，我们认为未来在无人车市场中，半固态激光雷达以其低成本、长寿命的优势也将逐步替代机械式激光雷达的份额。假设 2022-2027 年，MEMS 激光雷达的占比由 1% 提升至 30%。3) 价格方面，预计规模效应将驱动 MEMS 振镜成本快速下降，假设 2022-2027 年，规模化量产的 MEMS 振镜价格由 500 美元降至 50 美元。

4.1.3 符合车载激光雷达需求的 MEMS 振镜仍处于稀缺状态

不同场景下，激光雷达的 MEMS 振镜设计面临取舍，自动驾驶场景要求苛刻。MEMS 振镜的主要扫描参数包括：1) 扫描视场 FoV，包括水平和垂直方向。2) 扫描光孔径，对应 MEMS 振镜尺寸。振镜尺寸越大，激光雷达的空间分辨率、探测距离参数表现越好，但扫描角度会受到限制，因此尺寸选择面临取舍。3) 扫描速度及谐振频率，对于自动驾驶应用的双轴 MEMS 激光雷达，MEMS 振镜的横轴（水平方向，快轴）扫描频率应在 0.5-2KHz 之间，纵轴（垂直方向，慢轴）扫描频率应在 10-30Hz 之间。此外，若选用的 MEMS 振镜的谐振频率较高，激光雷达的分辨率、帧率及鲁棒性均更佳。总体而言，自动驾驶对 MEMS 振镜的技术参数要求较为苛刻。

图表117: SCALA Gen.1 激光雷达扫描原理及 BOM 结构



2) 图达通 Falcon

也是运用反射镜控制光线，具体为振镜（运动的平面反射镜，不同于 MEMS 振镜）与旋转棱镜分别调整光线在水平和垂直方向上的扫描角度，镜组 BOM 占比为 20%。

3) 大疆 Livox Horizon 运用双楔形旋转透镜来调整光线扫描角度，其特点是非重复性扫描，随着时间推移，可以获得极高密度的点云。Livox 特殊的结构也致使镜组 BOM 占比高达 54%。目前除了小鹏 P5 外，Livox 暂未获得其他乘用车量产项目。

除去定制化程度较高的光束操纵件，激光雷达系统内部还有一系列光学常规件，典型的如准直镜、视窗等，大部分光学常规件的使用与激光雷达技术路线无关，用量大体上与激光雷达出货量成倍数关系。光学件普遍有镀膜需求。由于激光雷达内部是特定波长，对于实现光线折射和反射的透镜和反射镜来说，适当的光学镀膜是必要的，以增大在特定波段的反射率和透过率。例如，大约 4% 的入射光将在未镀膜玻璃组件的每个表面上反射。可以应用抗反射涂层将每个表面的反射率降低到 0.1% 以下，还可以应用高反射性电介质涂层将反射率提高到 99.99% 以上。根据 Alluxa，许多转镜激光雷达使用反射率 > 99.5% 的高反射率电介质扫描镜。

1) 快慢轴准直镜：半导体激光器的初始光束是高度发散的，例如 EEL 光斑呈椭圆形发散，椭圆形的长轴称为快轴，短轴称为慢轴。高度发散的光线会导致能量随着传播距离快速衰减，为了获得均匀的平行光束，半导体激光器必须搭配快轴准直镜（FAC）和慢轴准直镜（SAC）进行调节。传统方案是采用模制非球面透镜或多元素玻璃透镜，目前较新的微透镜技术可以粘合在激光二极管的发射孔前面实现非常紧凑的封装。快慢轴准直镜的用量与激光器数目相关，例如速腾聚创 M1 内部有 5 组激光收发模组，对应 5 组快慢轴准直镜。

2) 激光雷达视窗：视窗需要进行镀膜，以增大特定波长光线的透过率并隔绝其他波长的干扰光线。此外，由于激光雷达可安置在汽车保险杠附近，有一定概率遭到

路面碎石的撞击，视窗必须保持高硬度防冲击。

3) 聚焦透镜：将返回光线聚焦到探测器平面上，在接收端基本是必备的。4) 窄带滤光片：窄带滤光片在特定的波段允许光信号通过，用在接收端以降低其他波段光线的干扰。5) 分光镜：分光镜与激光雷达光路方案存在一定的关联，主要在共轴扫描的激光雷达中分隔激光发射光线和探测光线。大多数 Flash 激光雷达都采用了非同轴光路的设计思路，不再需要分光镜。国内光学元件供应商众多，可提供一体化解决方案且成本管控优秀的企业有望获得竞争优势。国内具备光学元件供应能力的上游企业较多，已有多家公司表示已与激光雷达厂商建立合作关系或已经开始供货，产品包括透镜、视窗等。国内也有部分公司向满足激光雷达厂商定制化需求方面发展，例如炬光科技为智能驾驶激光雷达发射模组或系统专门设计透镜、光束扩散器等。由于常规件用量多，技术壁垒相对较低，预计量产能力强且可提供一体化解决方案的平台型企业有望获得竞争优势。同时，若未来行业竞争加剧，曾在消费电子市场竞争中建立良好成本管控能力的企业有望获得竞争优势。

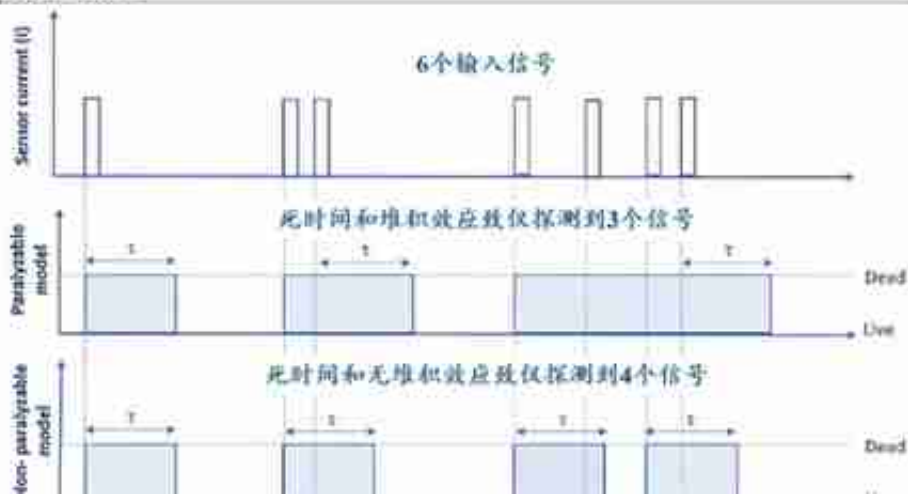
4.3 半固态扫描方案推演：2D MEMS 配套 VCSEL 有望进一步降低体积与成本

以 SCALA Gen.1 为初代机，当下典型的半固态激光雷达可视作两种不同改进思路所产生的结果。统一分析法雷奥 SCALA Gen.1、Livox HAP、图达通 Falcon、速腾聚创和禾赛 AT128，若视法雷奥 SCALA Gen.1 为初代机，其他激光雷达为不同的改进方案，则可以划分出两类演进路线：扫描系统重设计和发射系统重设计。1) 扫描系统重设计：如 4.2 节所述，越复杂的转镜/棱镜设计，对应越强大的光束操纵功能。扫描系统复杂度的提升带来激光收发的复杂度降低，最终实现性能提升——利用较少的激光收发模组实现高线束扫描，同时尽可能地降低成本和体积。例如采用双楔形棱镜的 Livox HAP 在性能提升的同时，体积相比 SCALA Gen.1 有所下降（图达通 Falcon 体积增加主要源于引入了光纤激光器以追求更好的测距性能）。而速腾聚创 M1 通过 MEMS 振镜替代多个转镜/棱镜实现二维扫描，整机体积进一步缩小。2) 发射系统重设计：禾赛 AT128 扫描端维持一维转镜方案，但发射端改为 VCSEL 阵列，高度集成化的 VCSEL 相比分立激光源以更小的体积和成本实现了高线束扫描。然而，一维转镜将固定占据一部分空间，这将限制整机体积的进一步微缩。

2D MEMS+VCSEL 或将有利于半固态激光雷达进一步降低体积与成本，成为半固态激光雷达的终局方案。我们认为结合 2D MEMS 与 VCSEL 或将有利于激光雷达整机体积的进一步下降。而 2D MEMS 和 VCSEL 都是采用半导体工艺制造，规模效应带来的成本下降空间可期。若上述设想实现，半固态激光雷达内部除去常规光学件，激光器、扫描器、探测器全部实现芯片化，将充分受益

于半导体产业链红利。

图表126: SPAD 死时间模型



SPPC 与 SiPM 都是 SPAD 组成的探测器阵列，区别在于信号输出方式。SPAD 可以单点独立运行，也可以组成阵列。SPPC 和 SiPM (Silicon Photomultiplier, 另称 MPPC) 都是由 SPAD 组成的阵列，其中 SPPC 中的各个 SPAD 独立工作，输出的信号只有 0 和 1，属于数字信号；SiPM 由多个独立的 SPAD 传感器并联组成，输出的信号会有幅度级别的区分，属于模拟信号。

SPPC 优势为分辨率，SiPM 优势为信号提取速度。SPPC 阵列下每个单元的信号独立输出，输出信号只有一个幅度，为减少噪声影响，需要根据空间和时间相关度确认是否为信号，因而抗噪能力相对较差。SiPM 阵列的每一个输出端对应多个并联的单元，输出电流是所有并联单元的总和，因而输出的信号有幅度区分，可以通过设定阈值直接提取信号，提取简单速度快。若两种阵列达到同样的分辨率，SiPM 比 SPPC 需要更多的 SPAD 单元，面积更大，所以相同面积下，SPPC 的分辨率显然要高于 SiPM。

在扩大信号增益外，SPAD 阵列也有望大幅减少外围电路芯片需求。根据阜时科技，分立 APD 做探测器时，接受端需要包含时数转换器 TDC、跨阻放大器 TIA、高速 ADC 等一系列信号处理芯片。单点 SPAD 和阵列 SPPC 输出仅有 0 与 1 区分的数字信号，在理想情况下，搭配 TDC (测时电路) 即可将各像素点的信号转换为距离信息，可大幅减少外围元器件数量，有利于激光雷达小型化与成本控制。

激光雷达的探测器方案趋势：905nm 采用 SPAD 阵列，1550nm 或延用 APD。在当前主流的 ToF 测距体系下，905nm激光雷达将逐步采用高增益的 SPAD 阵列，从抗环境光干扰的角度，SiPM 是优于 SPPC 的选择。1550nm 需要 InGaAs 材料制作探测器，但 InGaAs SPAD 阵列存在暗电流较高、产业链不成熟的缺陷，其次 1550nm 激光雷达发射端功率高，可以弥补接收端增益不足的问题，因此 1550nm 激光雷达或将保持 APD 的使用。预计探测器价值量占比 10%左右。光电探测器在一个激光雷达中的用量取决于不同扫描方式产生的光路结构：1) Velodyne 早期的机械式激光雷达，64 线激光雷达每束光束都有一个对应的 APD，总共 64 个。2) 速腾 聚创 MEMS 激光雷达 M1 内部有 5 对收发模组，对应 5 个 SiPM。3) Flash 激光雷达测量原理类似于开闪光灯 的照相机，探测器最少只需要一个，但估计为保持足够分辨率，对阵列的像素量有较高的要求。价值量方面，索尼的激光雷达探测器 IMX459，样品价格约 750 元人民币（15000 日元），正式产品价格估计为 200-400 元人民币。First Sensor 预计探测器未来占激光雷达价格的 10%左右。

图表140： 日本滨松将 PD/APD 和 TIA 进行模块化集成



2) 芯片级集成：在单芯片上集成 SPAD 阵列和测距电路后，可明显降低外围电路的设计复杂度，同时还有利于降低整体系统功耗和减小体积。索尼的 IMX 459 将 SPAD 像素和测距处理电路堆叠在单芯片上，成功开发出紧凑而高分辨率的传感器。

国内新晋厂商崭露头角。国内目前在一级市场已涌现了一批研发 SPAD/SiPM 的初创公司，主要有阜时科技、芯视界、灵明光子、芯辉科技、飞芯电子、宇称电

子、秉正讯腾等，其中芯视界、阜时科技获得了华为、禾赛科技等激光雷达厂商的投资，并推出了面向激光雷达市场的产品。

5.2 信号处理：FPGA 适应算法迭代需求，未来自研 ASIC 运用比例有望上升

激光雷达为车载算力硬件增速最高的应用板块，2027 年市场规模有望增至 4 亿美元。根据 Yole 数据，2021 年全球车载激光雷达算力硬件的市场规模约为 800 万美元，预计到 2027 年将增长至 4 亿美元，期间年复合增长率为 94%，为车载算力硬件中增速最高的板块。

全球 FPGA 主要被海外厂商主导，国内自给率低。全球的 FPGA 主要供应商包括赛灵思、Intel (Altera)、Microsemi 和 Lattice 等国际芯片设计公司，合计市场份额较高。根据 Frost & Sullivan，以出货量统计，2019 年全球市场上，赛灵思、Intel (Altera)、Lattice 和 Microsemi 的市占率分别达 51.7%、33.7%、5.0%和 4.0%。中国市场上，赛灵思、Intel (Altera) 和 Lattice 分别占据了 36.6%、25.3%和 23.2%的市场份额。目前国内主要的 FPGA 厂商有紫光同创、复旦微电、安路科技、高云半导体和京微齐力等，其中安路科技和紫光同创产品结构偏向消费电子、工业控制和通讯等，复旦微电产品结构偏向特种应用，三者属于国内 FPGA 第一梯队。

图表153: 禾赛科技营业收入



资料来源: 禾赛科技招股书, 中信建投

营收来源产品丰富, 地区集中北美与中国大陆。公司激光雷达销售收入的结构变化与产品迭代升级过程相对应。营收地区来源方面, 2018年, 公司40线激光雷达产品受到 Aptiv、Aurora、Delphi、Lyft 等美国客户的认可, 北美的销售占比达到 65.52%。2019年, 公司向博世集团等欧洲客户的销售显著增长, 该地区收入占比有所提升; 同时, 国内的百度等在无人驾驶领域增加投入, 中国大陆的收入占比提高至 36.11%。2020年 1-9月, 受新冠疫情的影响, 欧洲地区销售收入占比下降至 3.25%; 北美、中国大陆的销售占比相应提升。

毛利率高于 70%, 扣非已连续两年实现盈利。根据禾赛科技招股书, 报告期内公司主营业务毛利率一直维持在 70%以上。2018年公司收入大幅增长, 并实现盈利。2019年, 受到计提诉讼相关的专利许可补偿的影响, 公司净利润再度转负。若剔除该偶发性事件的影响, 公司当年仍为盈利。2020年 1-9月, 受到国内外新冠疫情的影响, 公司复工时间有所延迟, 且上半年部分客户需求出现临时性放缓, 导致营业收入同比 2019年 1-9月略有下降, 而研发投入、期间费用较高, 出现净亏损 9,379.75 万元。

6.1.2 速腾聚创

速腾聚创 (RoboSense) 2014

年成立于深圳，是全球领先的智能激光雷达系统科技企业。速腾聚创通过激光雷达硬件、感知软件与芯片三大核心技术闭环，为市场提供具有信息理解能力的智能激光雷达系统，颠覆传统激光雷达硬件纯信息收集的定义。截止 2020 年，公司全球布局激光雷达相关专利超过 600 项。合作伙伴覆盖全球各大自动驾驶科技公司、车企、一级供应商等，产品技术已广泛应用于自动/辅助驾驶乘用车&商业车，无人物流车，机器人，RoboTaxi，RoboTruck，RoboBus，智慧交通新基建等细分领域，其中前装定点量产项目覆盖超跑、轿跑、SUV、重卡等各类车型。

图表164：一径科技产品性能及效果示意图



6.2 发射模块

6.2.1 长光华芯

长光华芯建成投产了国内首条具有完整生产工艺的 VCSEL 芯片生产线，国内主要竞争对手包括纵慧芯光等，国外主要竞争对手是 Lumentum、II-VI、Osram 等。由于过去 VCSEL 主要应用领域是消费电子，因此作为苹果公司主要供应商的 Lumentum 和 II-VI 占有近 80% 的 VCSEL 市场份额。在车载领域，国内车厂搭载激光雷达的

进度较快，据不完全统计，目前已经及拟搭载激光雷达的量产车型达 30 款以上，其中国产车型 20 款以上。而其激光雷达供应商排在首位是速腾聚创，其次是禾赛科技。因此，不难看出，国产激光雷达厂商目前在行业内较为领先，依托供应安全方面的优势，VCSEL 国产厂商长光华芯、纵慧芯光等将有望占据车载领域 VCSEL 的绝大部分份额，而和国内其他厂商相比，长光华芯是唯一的 IDM 厂商，其在客户响应速度、供应安全、定制化 容易程度、成本等方面优势显著，因此我们认为长光华芯有望成为未来车载激光雷达用 VCSEL 领域的龙头厂商。

6.2.2 炬光科技

激光雷达发射端除光源外，也有厂商提供集成度较高的模组。激光雷达发射端按照技术路线可分为点光源 二维扫描、线光斑一维扫描、面光斑固态三种。点光源二维扫描是常见的技术方案，其中点光源较容易获取，但扫描系统较为复杂，通常需要转镜、棱镜、MEMS 振镜等一种或两种光学件搭配使用，复杂的光学扫描系统 在提高成本的同时其可靠性也面临挑战。线光斑一维扫描的方案减少了扫描系统的复杂度，但增加了接收端及 软件算法处理的难度。面光斑零扫描的方案彻底摆脱了对扫描系统的依赖，是真正意义的纯固态方案，但目前其探测距离较短或需要较高成本，还未能大范围使用。

6.2.3 光库科技

前文已述激光雷达光源按照波长主要分为 905nm 和 1550nm，其中 1550nm 的技术方案由光纤激光实现。光 纤激光器是应用最广泛的激光器，应用领域包括宏观领域激光加工、通信等，光纤激光器和其他种类激光器的最大区别是其增益介质是掺杂稀土元素的有源光纤。

图表177： 深圳 MEMS 振镜研发及产业化项目项目效益分析

项目	单位	T+1年	T+2年	T+3年	T+4年	T+5年	T+6年	T+7年	T+8年	T+9年	T+10年
销售收入	万元	-	-	11,700.00	35,600.00	43,050.00	56,400.00	56,400.00	56,400.00	56,400.00	56,400.00
利润总额	万元	-213.44	-287.12	4,304.21	13,677.96	14,850.06	18,096.47	18,096.52	18,096.58	18,096.64	18,096.70
净利润	万元	-512.44	-587.12	3,600.00	10,767.49	11,737.47	14,475.14	14,475.16	14,475.17	14,475.18	14,475.19

6.3.2 舜宇光学

汽车领域布局广泛。公司主要产品包括三大类：一是光学零组件；二是光电产品；三是光学仪器。目前，公司已经形成了手机行业、汽车行业、安防行业、显微仪器

行业、机器人行业、AR/VR 行业、工业检测行业、 医疗检测行业八大事业板块。公司在汽车行业主要产品应用领域包括车载镜头，激光雷达，HUD 抬头显示器以及智能大灯。公司目前提供激光雷达视窗和镜头，并进入 Leddar 生态系统。2020 年 4 月，LeddarTech 宣布，宁波舜宇车载光学技术有限公司现已加入 Leddar 生态系统，与其它技术行业领军者并肩携手。舜宇车载光学技术有限公司将与 LeddarTech 协作，为车载和移动应用锻造 LiDAR 解决方案。

6.3.3 永新光学

国内光学显微镜行业龙头企业和核心光学部件细分领域优势企业。公司从事光学显微镜、光学元件组件和其他光学产品的研发、生产和销售，常年为尼康、徕卡等国际一流显微镜品牌提供 OEM 服务，自主研发的产品重点拓展在生命科学、智慧医疗和工业检测领域的专业精密仪器应用；公司是光电行业多个细分领域国际知名企业的核心光学部件核心供应商，近年来不断拓展车载光学、机器视觉、激光雷达等新兴业务领域。公司目前可为激光雷达客户提供全套光学件，如视窗、转镜、透镜等。公司已与 Quanergy、禾赛、Innoviz、麦格纳、Innovusion、北醒光子等激光雷达领域国内外知名企业保持稳定、良好的合作关系。

6.3.4 水晶光电

全球知名滤光片供应商。水晶光电主要产品包括精密薄膜光学元器件、生物识别元组件、新型显示组件、薄膜光学面板、反光材料等。公司是国内滤光片行业龙头，设备先进、技术优异，是全球众多知名手机品牌的滤光片供应商。公司已关注到车用视觉传感器的行业潜力，在车载摄像头、激光雷达领域率先切入布局，为公司未来业绩提升注入新的力量。激光雷达业务拓展取得进展。公司已和多家激光雷达罩厂家有业务沟通，激光雷达罩、反射镜产品已率先实现量产出货，棱镜等其他产品未来也有可能是在激光雷达罩上实现业绩上贡献销售收入。

6.3.5 腾景科技

公司是专业从事各类精密光学元件、光纤器件研发、生产和销售的高新技术企业。公司的产品主要应用于光通信、光纤激光等领域。公司与下游知名企业及科研机构建立了合作关系，包括光通信领域的 Lumentum、Finisar、华为等；光纤激光领域的锐科激光、nLIGHT 等企业。激光雷达光学元件获得车规级认证，开始出货。公司在模压非球面透镜、光学镀膜等方面拥有核心技术，可以为雷达厂商提供多款核心光电子器件，目前已经获得车规级认证，向禾赛科技、镭神智能等出货。

6.3.6 福晶科技

公司主要从事晶体元器件、精密光学元件和激光器件等产品的研发、生产和销售。公司产品均是激光器的关键元器件，其中晶体元器件包括主要应用于固体激光器的非线性光学晶体、激光晶体、磁光晶体等；精密光学元件包括窗口片、反射镜、棱镜等，主要用于激光器、AR、激光雷达、半导体设备等；激光器件包括磁光器件、声光器件、电光器件、驱动器、光纤传输系统等，主要用于激光器制造。公司在激光雷达领域可提供包括窗口片、反射镜等在内的部分激光雷达用光学件，目前处于送样阶段。

6.4 接收模块

6.4.1 阜时科技

阜时科技从 2019 年开始布局激光雷达 SPAD 芯片研发，引入海外专家团队，联合内部资深芯片设计团队，用两年多时间攻克工艺、器件和电路集成的难点，2021 年成功流片，2022 年批量交付客户。2022 年 9 月 7

日，阜时科技与镭神智能签订战略合作协议，双方围绕激光雷达接收传感芯片，在 SPAD 芯片等激光雷达接收传感芯片的技术、市场开发、产业生态融合、产业助力等领域开展深度合作，双方此前已经就 SiPM 芯片已经达成合作，此次合作是基于前次合作的认可和信任开展的新合作，双方合作将帮助车载激光雷达 SPAD 芯片进入标准化量产时代。同时，凭借与知名激光雷达厂商深度绑定，阜时科技有望将在激光雷达接收端领域取得更快的成长。