

LiDAR揭秘：“波长大辩论”的深入指导

Demystifying LiDAR: an in-depth guide to the great wavelength debate

Bahman Hadji (安森美 (onsemi) 汽车感知部总监)

人们普遍认为，先进驾驶辅助系统（ADAS）和自动驾驶（AD）之所以成功，是因为它可以有效地感测车辆周围的环境，并将感测到的信息输入实现自动导航的算法中。考虑到在生死攸关的情况下对感测技术的绝对依赖性，系统通常使用多个传感器模式，并实现数据融合，以增强彼此，并提供冗余。这样每种技术都能发挥其优势，并提供更好的组合解决方案。

在未来 ADAS 和 AD 车辆中，传感器主要有 3 种模式，分别是图像传感器、雷达和 LiDAR（light detection and ranging，激光雷达）。每一种传感器都有自己的优势，它们可以组成 1 个完整的传感器套件，通过传感器融合提供数据使自主感知算法并能够做出决策，为场景中的每个点提供颜色、强度、速度和深度信息（如图 1）。

	成像	雷达	激光雷达
角分辨率	●	●	●
深度分辨率	●	●	●
速度	●	●	●
深度范围	●	●	●
交通标志	●	●	●
物体边缘精度	●	●	●
车道检测	●	●	●
颜色识别	●	●	●
恶劣天气	●	●	●
微光性能	●	●	●
成本	●	●	●

图1 传感器融合利用每种模式的优势提供有关车辆周围环境的完整信息

尽管早在几十年前就出现了利用光测量距离的概念，但在这 3 种主要模式中，LiDAR 是适用于大众市场的新兴商业化技术。由于需要完整传感器套件的自动驾驶系统激增，汽车 LiDAR 市场将呈现惊人的增长，预计从 2020 年的 3 900 万美元增长至 2025 年的 17.5 亿美元（来源：Yole Développement，2020 年）。这是一个巨大的商机，专注于 LiDAR 技术的公司多达上百家，到

2020 年对这些公司的累计投资额已超过 15 亿美元，而且这一数据源自 2020 年底多家 LiDAR 公司发起 SPAC（special purpose acquisition company，特殊目的收购公司）首次公开募股潮之前。但当有这么多公司投身于同一项技术，而且这项技术基于完全不同的光波长时（最突出的示例就是 905 nm 和 1 550 nm），最终总会有一种技术胜出，并整合其他技术的优势。就像我们一次次看到的那样，网络技术以太网、视频技术 VHS（video home system，家用录像系统）等。

对于 LiDAR 技术用户而言，即汽车制造商以及设计和制造客运和货运自动机器人车辆的公司，他们首先要考虑的是自己的需求。最终，这些公司希望供应商提供高度可靠的低成本 LiDAR 传感器，同时满足低反射率物体的测距和检测性能规范要求。尽管所有工程师都有各自强烈的主张，但如果供应商能够以合适的成本满足性能和可靠性要求，这些公司则可能并不知道实施的是何种技术。正因如此，才引起了本文旨在帮助理清的根本性辩论：哪种波长将在汽车 LiDAR 应用中占据主导地位？

1 LiDAR概述

要解决这个问题，首先需要了解 LiDAR 系统的结构。LiDAR 系统有不同的构造。相干 LiDAR，一种被称为调频连续波（FMCW）的 LiDAR，将发射的激光信号与反射光混合，以计算物体的距离和速度。虽然 FMCW 具有一定的优势，但与最常见的 LiDAR 方法“直接飞行时间（dToF）LiDAR”相比，它仍属于不太常用的方法。该技术测量超短光脉冲从照明光源发出，到达物体后反射回到传感器所用的时间，达到测距的目的。

它通过有关时间、速度和距离的简单数学公式，利用光速来直接计算与物体的距离。尽管波长的选择主要影响发射和接收功能，但典型的 dToF LiDAR 系统有 6 大硬件功能（如图 2）。

LiDAR 系统的六大硬件功能模块：

- 发射 · 照明光源
- 接收 · 返回光子检测
- 光场控制 · 整个场景照明
- 光学器件 · TX 和 RX 焦点
- 读出 · 信号处理（模拟 + 数字）
- 电源和系统 · 电源管理

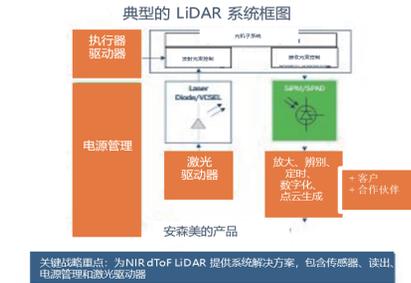


图2 典型dToF系统框图，绿色部分代表安森美产品的一些重点领域

表 1 显示了各种 LiDAR 制造商列表，从知名的一级汽车供应商到世界各地的初创公司。市场报告和公开资料表明，绝大多数公司的 LiDAR 在近红外（NIR）波长下工作，而不是短波红外（SWIR）波长。此外，虽然

表1使用NIR和SWIR波长的LiDAR制造商列表*

NIR (850 nm、905 nm、940 nm)		SWIR (10 604 nm、1 350 nm、1 550 nm)	
Valeo	Hesai	Continental	Aurora
Blockfeld	LeddarTech	Innovusion	AEVA
Veoneer	LeiShen	Luminar	Insight LiDAR
MicroVision	Xenomatrix	Argo AI	SiLC
Ibeo Automotive Systems	TetraVue	AEye	Cruise
Continental	SureStar		Baraja
Magna	Mando		
Quanergy	Hybrid LiDAR Systems		
Waymo	Lumotive		
Aptiv	Benewak		
Velodyne	Ouster		
Cepton	ZF		
SOS LAB	Marelli		
Robosense	Cruise		
Innoviz			
Sense Photonics			
飞行时间LiDAR		相干LiDAR (例如：FMCW)	

* 上述列表并非详尽无遗，数据来源 Yole、IHS Markit 和公开资料

专注于 FMCW (frequency modulated continuous wave, 调频连续波) 的 SWIR (short-wave (length) infrared (band) , 短波红外) LiDAR 供应商只能使用相应波长，但大多数采用直接飞行时间实现的供应商都可以选择使用 NIR (near infrared, 近红外光谱) 波长来构建系统，同时还能够利用其现有的 IP (intellectual property, 知识产权) 相关功能，如波束控制和信号处理。

鉴于大多数制造商（而不是全部）都已选择 NIR 波长，他们是如何做出这一决定的？他们需要考的影响有哪些？本文重点讨论与构成 LiDAR 组件的光和半导体材料性质有关的基础物理学知识。

在 LiDAR 系统中，激光发射的光子到达物体后应反射回来，然后被探测器接收。在此过程中，这些光子必须与来自太阳的周围环境光子竞争。通过观察太阳辐射光谱，并考虑大气吸收因素，我们发现某些波长的辐照度会下降，因而减少作为系统噪声存在的光子量。905 nm 波长下的太阳辐照度是 1 550 nm 的 3 倍（如图 3），这意味着 NIR 系统必须应对更多干扰传感器的噪声。

但这只是选择 LiDAR 系统波长时需要考虑的其中 1 个因素。

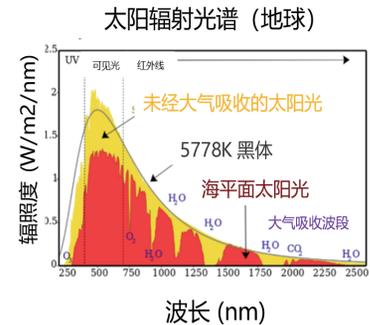


图3 大气对光的吸收会产生明显的峰值

2 传感器

LiDAR 系统中负责感测光子的组件为不同类型的光电探测器，因此必须说明为什么它们可以根据待检测波长而采用不同的半导体材料制成。在半导体中，带隙可将价带和导带分开，而光子可提供能量，以帮助电子克服

带隙问题，从而使半导体导电，继而产生光电流。每个光子的能量与其波长有关，而半导体的带隙与其灵敏度有关，这就解释了为什么所需半导体材料取决于待检测光的波长。硅是最常见也是制造成本最低的半导体，可响应高达 1 000 nm 左右的可见光和 NIR 波长。为检测 SWIR 范围以外的波长，可对更稀有的 III/V 族半导体进行合金化，使 InGaAs 之类的材料能够检测 1 000 ~ 2 500 nm 的波长。

早期的 LiDAR 将 PIN 光电二极管用作传感器。PIN 光电二极管本身没有增益，因此无法轻松检测到微弱信号。雪崩光电二极管 (APD) 是目前 LiDAR 中最常用的传感器类型，可提供适当的增益。然而，APD 也需要像 PIN 光电二极管一样在线性模式下工作，以集成光子到达信号，而且在需要非常高偏置电压的情况下也会受到制件质地不均的影响。LiDAR 中开始日益广泛使用的最新型传感器以单光子雪崩二极管 (SPAD) 为基础，SPAD 具有非常大的增益，并且能够从每个检测到光子中产生可测量的电流输出。硅光电倍增器 (SiPM) 是硅基 SPAD 阵列，其额外优势就是能够通过观察所生成信号的振幅来区分单个光子和多个光子 (如图 4)。

PIN 二极管	雪崩光电二极管和 APD 阵列	单光子雪崩二极管和 SPAD 阵列	硅光电倍增器和 SiPM 阵列
✓ 低电压	✗ 高电压	✓ 低电压	✓ 低电压
✓ 均匀性良好	✗ 均匀性较差	✓ 均匀性非常好	✓ 均匀性非常好
✗ 无增益	✓ 适当增益 (10 ²)	✓ 非常高的增益 (10 ⁶)	✓ 非常高的增益 (10 ⁶)
!! 线性模式	!! 线性模式	✓ 盖革模式 - 单光子	✓ 盖革模式 - 单光子
👉 市场采用	👉 市场采用	👉 市场采用	👉 市场采用

图4 LiDAR中用于检测信号的不同光电探测器类型

回到波长这个话题，所有这些类型的光电探测器都可以采用硅 (用于 NIR 探测) 或 III/V 族半导体 (用于 SWIR 探测)。另一方面，可制造性和成本是技术可行性的关键，且 CMOS 硅代工厂可实现此类传感器的低成本、批量生产。正因如此，LiDAR 在实现更高性能的基础上逐渐开始采用 SiPM。尽管存在适用于 SWIR 的 APD 和 SPAD，但由于未采用硅基处理器，所以很难将它们与读出逻辑集成在一起。最后，由于针对 SWIR 的 III/V 基 SPAD 阵列和光电倍增器 (与 SiPM 相似) 尚未实现商业化，所以生态系统更适用于 NIR 波长。

3 激光器

光子生成是另一种完全不同的流程。半导体 P-N 结作为增益介质可用于制造激光器；这可通过泵送的方式使电流通过结，在原子进入较低能带时引起光子共振发射，从而产生相干激光束输出来实现。半导体激光器基于直接带隙材料 (如 GaAs 和 InP)，与间接带隙材料 (硅) 相比，这种材料对于原子进入较低能带时的光子生成非常有效。

LiDAR 使用的 2 种主要激光器为：边缘发射激光器 (EEL) 和垂直腔面发射激光器 (VCSEL)。与 VCSEL 相比，EEL 的成本更低，输出效率更高，所以目前使用更广泛。但 EEL 在封装和组装成阵列方面难度更高，而且还会受到温度范围内波长变化的影响，导致探测器不得不寻找更宽的光子波长波段，才能将更多的环境光子检测为噪声。尽管较新的 VCSEL 技术成本更高、功效更低，但由于其光束是从顶部生成的，所以具有封装简单高效的优势。由于 VCSEL 的成本将继续显著降低，功效将提高，所以其市场采用率开始上升。EEL 和 VCSEL 可用于 NIR 和 SWIR 波长生成，两者之间的关键区别在于：NIR 波长可使用 GaAs 生成，而 SWIR 波长则需要使用 InGaAsP。大尺寸晶圆厂能帮助降低 GaAs 激光器成本，从成本和供应链安全角度来看，这再一次突出了 NIR LiDAR 制造商生态系统的优势 (如图 5)。

边缘发射激光器 (EEL)	垂直腔面发射激光器 (VCSEL)
✓ 更高输出功效	✗ 更低输出功效
✗ 目前成本更低 (\$/W)	✗ 目前成本更高 (\$/W)
✗ 封装难度更高	✓ 封装难度更低
✗ 来自边缘的椭圆光束	✓ 来自表面的对称光束
✗ 阵列组装难	✓ 可使用集成阵列
✗ 热导导致波长变化	✓ 在各种温度条件下比较稳定
!! 7 家主要供应商致力于 NIR, 3 家致力于 SWIR	!! 8 家主要供应商致力于 NIR, 只有 1 家致力于 SWIR
👉 市场采用	👉 市场采用

图5 LiDAR中使用的不同激光类型

4 激光功率和人眼安全

在讨论波长大辩论时，必须考虑 LiDAR 系统对人眼安全的影响。dToF LiDAR 概念涉及以高峰值功率，沿着特定视角将短激光脉冲发射到场景。站在 LiDAR

发射路径上的行人需确保自己的眼睛不会被射向自己方向的激光损伤, IEC-60825 规范规定了不同波长的光的最大容许照射量。类似于可见光的 NIR 光能够穿过角膜到达人眼的视网膜, 而大部分 SWIR 光在角膜内可被吸收, 因此照射量更高 (如图 6)。

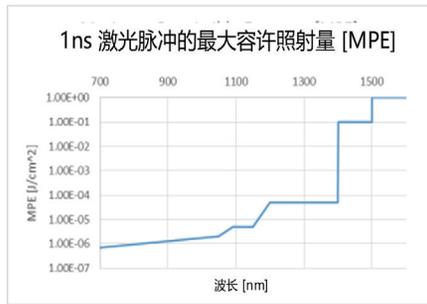


图6 IEC-60825人眼安全型激光照射量规范

从性能角度来看, 对于基于 1 550 nm 的系统来说, 能够输出高出多个数量级的激光功率是 1 个优势, 因为这样可以发出更多光子, 从而检测到更多返回的光子。但更高的激光功率也意味着需要进行热权衡。需要注意的是, 适当的人眼安全型设计必须在不考虑波长的情况下进行, 同时必须清楚地考虑每个脉冲的能量和激光孔径的大小。对于基于 905 nm 的 LiDAR, 可以通过其中的任意 1 个因素来增加峰值功率, 如图 7 所示。

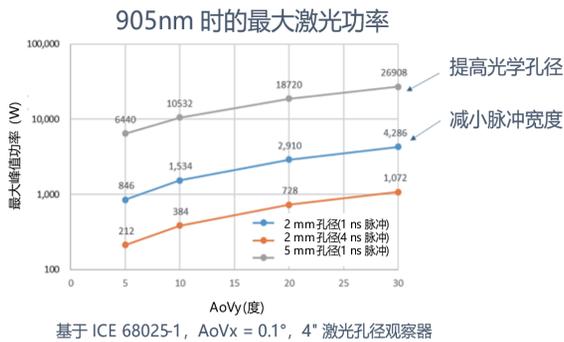


图7 基于不同光学器件和激光器参数的NIR LiDAR人眼安全型激光器设计

5 NIR与SWIR LiDAR系统对比

上文着重描述能够输出的激光功率大小, 现在我们继续探讨所用的传感器。显然, 可检测更微弱信号的更高性能传感器可为系统带来多方面的益处——能够实现

更长的测程, 或能够使用更少的激光功率来实现相同的测程。安森美开发了一系列可提高光子探测效率 (PDE) 的 NIR LiDAR SiPM (silicon photomultiplier, 硅光电倍增管), PDE 是指示灵敏度的关键参数。其新推出的 RDM 系列传感器 PDE 达到市场领先的 18%。



图8 安森美SiPM的工艺发展路线图

为比较 NIR dToF LiDAR 与 SWIR dToF LiDAR 的性能, 我们利用相同的 LiDAR 架构和不同激光和传感器参数的环境条件进行了系统建模。LiDAR 架构为共轴系统, 配有 1 个 16 信道探测器阵列和 1 个遍布整个视场的扫描机制, 如图 9 所示。该系统模型已通过硬件验证, 使我们能够准确估计 LiDAR 系统的性能 (表 2)。

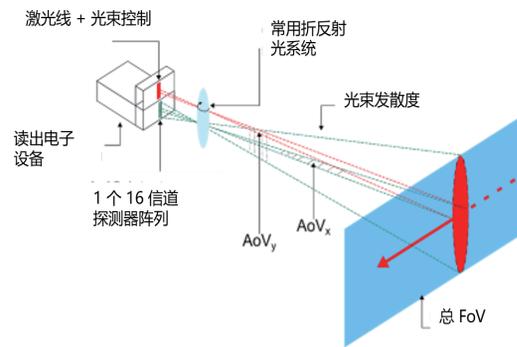


图9 dToF LiDAR传感器的系统模型

表2 NIR和SWIR系统模型模拟的LiDAR传感器和激光器参数

参数	905 nm系统	1 550 nm系统
传感器PDE/%	15	50
激光功率 (超过 0.1°×5° AoV) /W	800	2 000

由于使用了 PDE 较高的 InGaAs 合金, 所以 1 550 nm 系统采用更高的激光功率以及更高的 PDE 传感器, 这样就可以在我们的系统模拟中实现更出色的测距性能。通过使用传感器镜头 (分别对焦在大约 905 nm 和

1 550 nm) 上 50 nm 带通滤波器过滤的 100 klux 环境光系统级参数, 以 30 fps、500 kHz 激光频率和 1 ns 脉冲宽度进行超过 80° 的水平 0.1°×5° 视角扫描, 并使用 22 mm 镜头直径, 得出图 10 的结果。

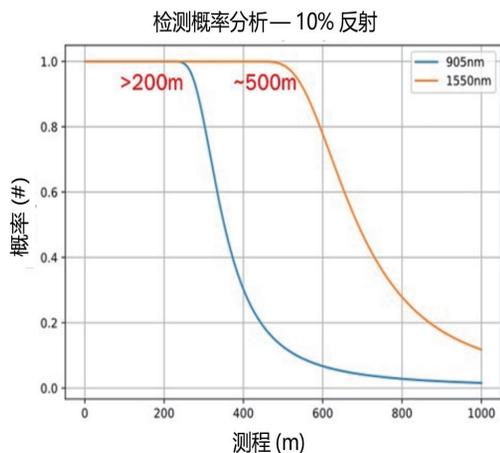


图10 基于 905 nm和1 550 nm的类似LiDAR系统的模拟结果

正如预期, 1 550 nm 系统能够对低反射率物体进行更远的测距, 99% 的测距概率下可达到 500 m。然而, 基于 905 nm 的系统仍可以实现超过 200 m 的测距, 这表明 2 种类型的系统在典型环境条件下都可以达到汽车远程 LiDAR 的要求。在雨水或大雾等恶劣环境条件下时, SWIR 光的吸水性会使其性能比基于 NIR 的系统下降得更快, 而这是另一个考虑因素。

6 成本考虑因素

在广泛研究了 LiDAR 系统所用技术以及使用不同波长的影响之后, 现在, 我们回到成本考虑因素上。我们之前就解释过, 用于 NIR LiDAR 的传感器采用天然 CMOS

(complementary metal oxide semiconductor, 互补金属氧化物半导体) 硅铸造工艺, 这可最大限度地降低半导体的成本。此外, 通过使用代工厂目前已经掌握的堆叠芯片技术, 可将

CMOS 读出逻辑与传感器集成到一个芯片中, 这进一步压缩了信号链并降低了成本。相反, SWIR 传感器使用成本更高的 III/V 半导体代工厂 (如 InGaAs) 和新型 Ge-Si 混合技术, 虽然可降低 SWIR 传感器成本, 并能更轻松集成读出逻辑, 但即使在技术成熟后, 估计仍比传统的 CMOS 硅贵 5 倍以上。从激光器方面看, 用于制造 NIR 系统激光器芯片的 GaAs 晶圆与用于制造 SWIR 系统激光器芯片的 InGaAs 晶圆尺寸差异同样会导致成本差异, 而 NIR 系统可以使用 VCSEL, 并且现成的供应商更多, 这一事实亦可降低集成成本。

综合以上因素, 市场调查公司 IHS Markit 进行的一项分析调查 (Amsrud, 2019) 显示, 使用相同类型的组件 (传感器或激光器) 时, SWIR 系统的成本比 NIR 系统高 10 ~ 100 倍。2019 年, NIR 系统传感器和激光器的平均组件总成本估计为 4 ~ 20 美元 / 信道, 到 2025 年将降至 2 ~ 10 美元 / 信道。相比之下, 2019 年, SWIR 系统传感器和激光器的平均组件总成本估计为 275 美元 / 信道, 到 2025 年将降至 155 美元 / 信道。考虑到 LiDAR 系统包含多个信道, 即使使用 1D 扫描方法, 这也会是 1 个巨大的成本差异, 因为仍需要使用单点信道的垂直阵列 (如表 3)。

LiDAR 市场动态也不利于 SWIR 阵营。自动驾驶市场并未像五年前市场预期的那样迅速发展, 而必须使用 LiDAR 的 Level 4 (4 级) 和 Level 5 (5 级) 自主性系统也还需要几年才能实现大规模部署。同时, 利用 LiDAR 的工业和机器人市场对成本更加敏感, 并且 SWIR 系统的超高性能优势并非不可或缺, 这些系统制造商没有办法像通常所说的那样通过增 (下转第45页)

表3 成本考虑因素总结 (来源: IHS Markit)

近红外 (例如: 905 nm)	参数	短波红外 (例如: 1 550 nm)
<ul style="list-style-type: none"> ● 天然 CMOS 硅铸造工艺 ● 晶圆级传感器 + 当今 MP ROIC 技术 	传感器	<ul style="list-style-type: none"> ● III/V 半导体代工厂 (InGaAs) ● 使用 Ge-Si 新技术时, 晶圆成本估计高出 5 倍以上 ● 传感器 + ROIC 复杂集成
<ul style="list-style-type: none"> ● GaAs 代工厂 (晶圆更大) ● VCSEL 阵列可降低系统成本 	激光器	<ul style="list-style-type: none"> ● InP 代工厂 (晶圆更小)
<ul style="list-style-type: none"> ● 2019 年约为 4 ~ 20 美元 / 信道 ● 2025 年约为 2 ~ 10 美元 / 信道 	传感器 + 激光器组件成本	<ul style="list-style-type: none"> ● 高出 10 ~ 100 多倍 (针对相同类型的组件) ● 2019 年约为 275 美元 / 信道 ● 2025 年约为 155 美元 / 信道