

2025年1月

白皮书

面向商用3D传感的SA系列

简介: 首款 SWIR VCSEL 传感解决方案

我们的 SA 系列产品为尖端应用提供了高性能、高性价比的短波红外 (SWIR) 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 解决方案, 涵盖消费类移动设备、AR/VR 传感、生物标志物监测、数据通信和互连网络、汽车和工业激光雷达 (LIDAR)。

本白皮书深入探讨了现有 SWIR 解决方案面临的挑战、SA 系列背后的创新 InP 技术、其独特特性以及其广泛的当前和下一代应用。

目录

| | |
|-----------------------|---|
| I. 为什么这很重要？ | 2 |
| II. 背景和历史挑战 | 3 |
| III. 我们如何解决这个问题？ | 3 |
| 专有纳米孔 InP (NP-InP) 技术 | 3 |
| SA系列的主要特点 | 4 |
| IV. 应用 | 5 |
| 1) 即时应用 | 5 |
| 2) 下一代应用程序 | 5 |
| 3) 可根据要求定制 | 6 |
| 参考 | 7 |

I. 为什么这很重要？

SA 系列 **VCSEL** 产品提供无与伦比的效率、可扩展性和集成能力，使我们的客户能够充分发挥 **SWIR** 传感的潜力，这是当前市场无法实现的。

短波红外 (SWIR) 波长通常在 1.0 至 2.5 微米 (1,000 至 2,500 纳米) 范围内，由于其独特的光学特性，在各种技术中发挥着至关重要的作用。SWIR 传感的重要性在于它能够以可见光和其他红外波长无法实现的方式与材料和环境条件相互作用。成像、材料检测、遥感、工业自动化、医疗诊断、自动驾驶、数据通信等领域的现有和新兴应用，引起了人们对基于半导体的 SWIR 光源和探测器的浓厚兴趣。

目前，SWIR 光源(或光发射器)仍基于已有数十年历史的技术，即发光二极管 (LED) 和边发射激光器 (EEL)。在成熟的近红外 (NIR) 波长范围 (700-1,000 纳米) 中，VCSEL 因其光束质量好、结构紧凑、与移动应用兼容以及易于集成而成为更理想的选择。下表对这三种类型的半导体发光器进行了高层次的比较。

表 1. 半导体 SWIR 光源 (1,300~2,200 nm) 的现状，并突出了其中理想的品质

| | LED | EEL | VCSEL |
|-------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 器件尺寸 | 100~1,000 μm | 100~1,000 μm | 5~50 μm |
| 集成度 | 出色 | 困难 | 出色 |
| 辐亮度 | 低 | 高 | 高 |
| 功耗 | 高 | 高 | 低 |
| 效率 | 低 | 高 | 高 |
| 光束质量 | 非相干 | 椭圆形不对称 | 圆形对称 |
| 光谱线宽 | 宽 | 窄 | 窄 |
| 商用可得性 | 可获取 (Dowa, Ushio) | 可获取 (Coherent, Vertilas) | 尚不可获取 |

尽管具有明显的优势，SWIR VCSEL的量产尚不现实。在第二部分中，我们将回顾过去30年来该行业在寻求商业解决方案方面所面临的挑战，并在第三部分中描述我们的创新突破性技术。

II. 背景和历史挑战

VCSEL 需要高反射率的镜面。在近红外 (NIR) 波长范围内, 除了传统的 **GaAs-AlAs** 材料系统外, 制造这种镜面一直极具挑战性。工业界和学术界已在 **SWIR VCSEL** 技术上投入了 **30** 多年的研究。

VCSEL 器件的关键组成部分包括:(i) 可提供高光学增益的有源区;(ii) 位于底部和顶部的高反射率分布式布拉格反射器 (DBR), 用于形成垂直腔体。

在过去 30 年中, 近红外 (NIR) VCSEL 技术 (700-1,000 nm) 已使廉价、高性能、可量产的激光器在各种大众市场商业和工业应用中无处不在 [1]。近红外 VCSEL 的商业成功可归因于 GaAs-AlAs 合金体系中独特的材料特性。GaAs 和 AlAs 几乎晶格匹配, 而折射率差异显著 ($\Delta n=0.5$)。高反射率的 GaAs/AlAs DBR 可以在 GaAs 衬底上以同质外延方式制备。同时, 可以在 GaAs/AlAs DBR 上外延生长具有高光学增益的有源区。

对于短波红外垂直腔面发射激光器 (VCSEL) [2], 目前最成熟的有源区 (InGaAlAs 或 InGaAsP) 必须在 InP 衬底上制备。在 InP 衬底上生长的两种常见外延生长的分布布拉格反射器 (DBR), InGaAsP/InP 和 InAlGaAs/InP [3], 不支持高折射率对比度 ($\Delta n \sim 0.2$) ; 这些 DBR 需要超过 60 对四分之一波长层才能达到高反射率。基于锑化物的四元 AlGaAsSb DBR (生长于 InP 上) 支持更高的光学折射率对比度 [5], 但与基于砷 (As) 和磷 (P) 的化合物半导体相比, 基于锑 (Sb) 的外延技术尚未达到同等的成熟水平 [3]。为了克服 InP 上异质外延 DBR 的挑战, 人们也尝试了其他方法, 包括:

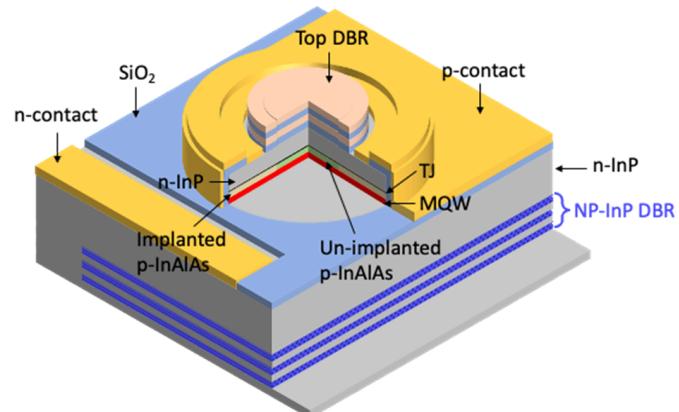
- 1) 在 GaAs 衬底上生长长波长有源区 (InAs 量子点和稀氮化物) [6,7];
- 2) 使用 InP/气隙 DBR [4];
- 3) 上下镜均采用介质型 DBR [8,9];
- 4) InP 有源区与 AlGaAs DBR 的晶圆熔合 [10,11]。

然而, 上述方法均未能成功实现可扩展、可量产的 SWIR VCSEL; 如果不是受到复杂外延生长的限制, 那么就会受到昂贵的制造和加工的限制。

III. 我们如何解决这个问题?

专有纳米孔 InP (NP-InP) 技术

我们开发了一款 SWIR VCSEL, 它将我们专有的同质外延 NP-InP 底部 DBR 与成熟的电信波段 InAlGaAs 标准有源区相结合。采用晶圆级电化学工艺, 我们可以在外延生长完成后制造高反射率 NP-InP DBR 反射镜(如右图所示)。该制

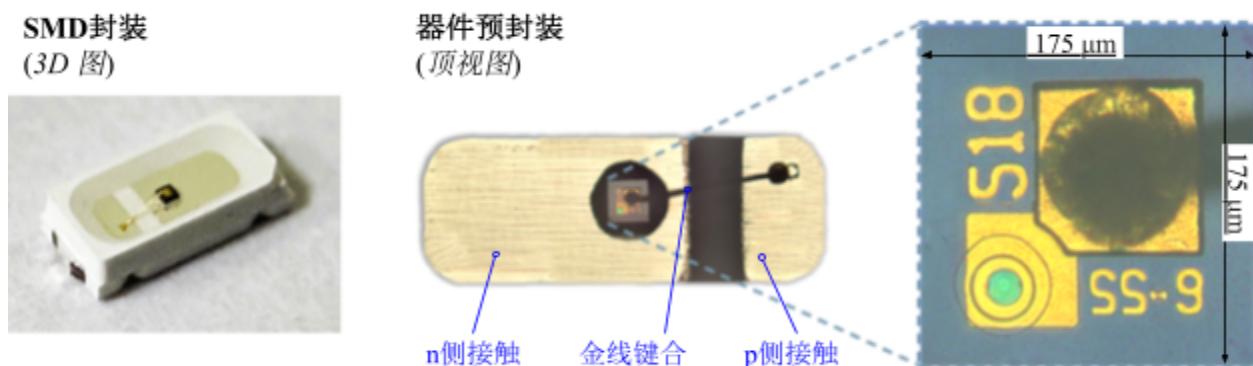


造工艺为单片工艺,已在半导体工厂中得到验证。

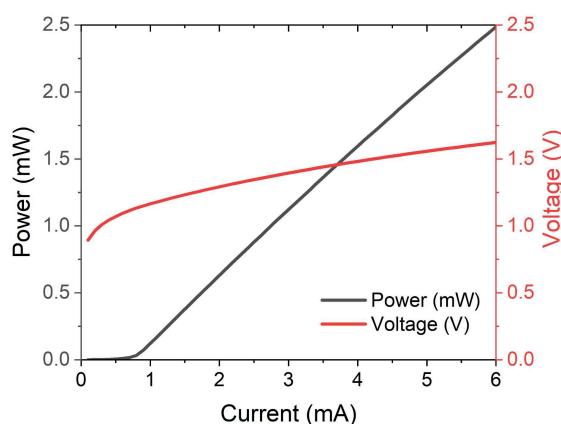
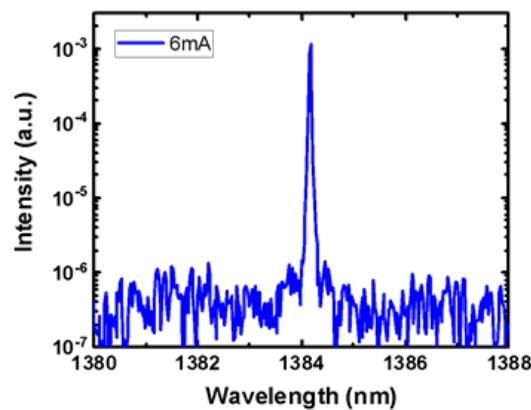
与其他现有的 SWIR VCSEL 技术相比,我们的工艺采用简单成熟的外延工艺和可批量生产的制造工艺——并且我们与领先的商业化工厂合作,以商业规模提供产品。

SA系列的主要特点

SA 系列是单孔径 VCSEL, 设计用于 $1.3\text{-}2.3\ \mu\text{m}$ 范围内的高质量单模发射, 同时保持低功耗、低工作电流和高热稳定性, 并且尺寸小巧。



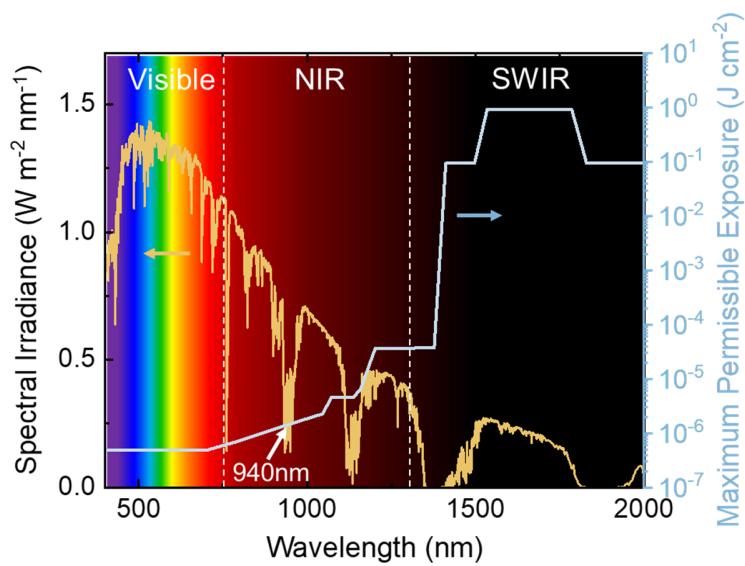
- **高效率:** 我们的产品输出功率为 $2\text{-}3\ \text{mW}$ (每孔径), 峰值功率转换效率 (PCE) 高达 30%, 并且有明确的发展规划来实现更高的效率。此外, 我们的产品性能在其他方面与 $850\ \text{nm}$ 和 $940\ \text{nm}$ 近红外 (NIR) VCSEL 相当, 而后者是目前短距离低功耗消费电子或工业传感应用的行业解决方案。与近红外 (NIR) 发射相比, SWIR 波长具有更好的人眼安全性、信号清晰度和屏下传感能力。
- **低激射阈值:** 阈值电流密度约为 $1\ \text{kA/cm}^2$, 对于低功耗移动应用, 阈值电流可低至 $0.5\ \text{mA}$ 。
- **单模、低发散角:** 单模工作, 边模抑制比 (SMSR) 接近 30dB 。根据孔径大小, 发散角在 10 到 20 度之间。
- **可靠性:** 我们的产品已通过行业标准湿高温运行寿命测试 (WHTOL) 和环境可靠性测试。



IV. 应用

1) 即时应用

与近红外 (NIR) VCSEL 相比, SWIR 波长在更高功率下仍保持人眼安全, 同时太阳背景噪声较低, 从而实现更高的信噪比 (SNR) 和显著更佳的图像质量。SWIR 还更适合全环境传感, 包括夜间、雨天、多云、多尘和其他不利的弱光条件。结合脉冲飞行时间测距 (TOF) 操作, SWIR VCSEL 可以提供具有更清晰深度对比度和实时扫描的 3D 成像。



- **移动和消费类传感:** 我们的 SA 系列产品可“即插即用”, 适用于目前使用近红外 (NIR) VCSEL 的移动和消费类传感应用, 例如智能手机和其他消费电子产品中的接近传感器、家用机器人、生物识别安防系统等。
- **增强现实 (AR) / 虚拟现实 (VR):** SA 系列满足了对精确深度感知、实时户外环境测绘以及轻量级可穿戴设备紧凑外形日益增长的需求。
- **环境监测:** SWIR 光谱可用于在各种环境、农业和工业环境中检测污染物或痕量气体。SWIR VCSEL 具有高效的功耗和在宽温度范围内稳定的工作性能, 非常适合在偏远或恶劣环境中部署。

2) 下一代应用程序

- **激光雷达 (LiDAR) (光探测与测距):** 人眼安全的 SWIR 波长对于远距离激光雷达 (>200 m) 至关重要。在此类应用中, 需要运行高功率激光器, 才能为自动驾驶车辆、无人机等场景提供精确的环境映射。SWIR VCSEL 具有高功率, 低发散度和高性价比, 可支持精确的物体感知和识别。
- **数据通信和网络:** 目前, 近红外 (NIR) VCSEL (850 nm) 常用于数据中心的短距离 (<100 米) 光纤链路。SWIR VCSEL 是理想的直接调制的换能器, 可在局域网 (LAN), 城域网 (MAN) 和区域枢纽应用中, 取代 1,300 nm 和 1,550 nm 边发射激光器, 用于中距离 (100 米至 10 公里) 应用。
- **生物标志物传感和成像:** SWIR 光在穿透生物组织方面特别有效, 同时对许多目标生物分子 (血糖, 血氧, 皮质醇等) 也具有光学敏感性。SWIR VCSEL 凭借其经济高效,

体积小巧和低发散度等优势，成为非侵入式可穿戴监视器或医学成像应用的理想选择，可实现高质量的成像模式。

- 光学计算：SWIR VCSEL 有望助力未来计算领域的硅光子集成电路 (PIC) 的发展。

3) 可根据要求定制

我们目前提供 1,380 nm VCSEL (SA-E02 VCSEL)，但也可根据要求提供定制波长、输出功率水平和发射特性。我们简洁的设计和工艺能够按需快速集成到大批量生产线，以满足客户的特定需求。

我们以客户为中心，渴望与客户紧密合作，了解具体需求和用例规范，并为您量身定制解决方案。如有任何疑问，请发送电子邮件至 info@inphred.com 联系我们。

作者

- ❖ Rebecca Levonian, Ph.D. 是 InPHRED 的首席战略官
- ❖ Jung Han, Ph.D. 是 InPHRED 的首席科学家和耶鲁大学电气工程教授

参考

1. “VCSELs - Technology and Market Trends 2021,” Yole Group report, **YINTR21171** (2021).
2. A. Babichev, S. Blokhin, E. Kolodeznyi, *et al.*, “Long-wavelength VCSELs: status and prospects,” *Photonics* **10**, 268 (2023).
3. D. A. Francis, D. B. Young, J. Walker, *et al.*, “Monolithic 1310 nm buried heterostructure VCSEL using InGaAsP/InP DBR reflectors,” *Proc. SPIE* **6013**, 60130A (2005).
4. C.-K. Lin, D. P. Bour, J. Zhu, *et al.*, “High temperature continuous-wave operation of 1.3-and 1.55- μ m VCSELs with InP/air-gap DBRs,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **9**, 1415–1421 (2003).
5. S. Nakagawa, E. Hall, G. Almuneau, *et al.*, “1.55- μ m InP-lattice matched VCSELs with AlGaAsSb-AlAsSb DBRs,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **7**, 224–230 (2001).
6. J. A. Lott, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov, *et al.*, “InAs-InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3 μ m,” *Electron. Lett.* **36**, 1384–1385 (2000).
7. M. Gebski, D. Dontsova, N. Haghghi, *et al.*, “Baseline 1300 nm dilute nitride VCSELs,” *OSA Contin.* **3**, 1952–1957 (2020).
8. T. Gruendl, P. Debernardi, M. Mueller, *et al.*, “Record single-mode, highpower VCSELs by inhibition of spatial hole burning,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19**, 1700913 (2013).
9. S. Spiga, W. Soenen, A. Andrejew, *et al.*, “Single-mode high-speed 1.5- μ m VCSELs,” *J. Lightwave Technol.* **35**, 727–733 (2016).
10. A. Caliman, A. Mereuta, G. Suruceanu, *et al.*, “8 mW fundamental mode output of wafer-fused VCSELs emitting in the 1550-nm band,” *Opt. Express* **19**, 16996–17001 (2011).
11. S. A. Blokhin, A. V. Babichev, A. G. Gladyshev, *et al.*, “High power single mode 1300-nm superlattice based VCSEL: Impact of the buried tunnel junction diameter on performance,” *IEEE J. Quantum Electron.* **58**, 2400115 (2022)