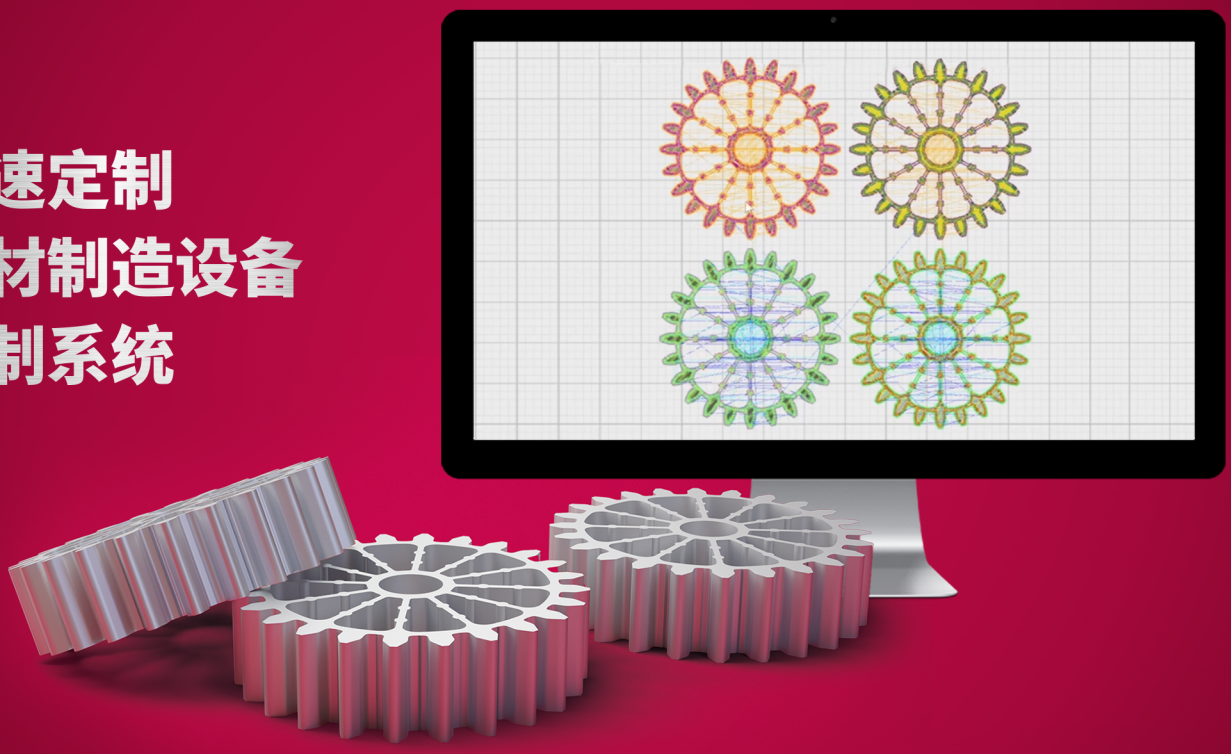
光学和光电子产业的主导刊物 www.laserfocusworld.com.cn 2026年1/2月 第1期
ISSN: 1817-6917

激光世界
LaserFocusWorld® China

21
快速定制增材制造设备控制系统



当硅遇见光：通往AI规模互联的光子路径 9
光学新材料推动先进集成光子学快速发展 15
光子计算显著提升AI硬件的运算速度 19
先进制造工艺助力微电极阵列规模化生产 25
新一代蓝绿激光器赋能工业智造 27



扫码浏览更多期刊

ACT INTERNATIONAL
ENDEAVOR BUSINESS MEDIA

CDIIF
成都国际工业博览会

成都国际工业博览会
Chengdu International Industry Fair

创链新工业 共碳新未来

2026年3月11-13日
中国西部国际博览城
March 11-13, 2026
Western China International Expo City

www.cdiif.com

扫码获取
最新资讯

扫码免费领票



同期展会
Concurrent Exhibitions

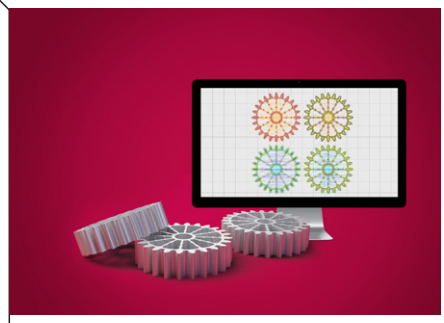
- IAS INDUSTRIAL AUTOMATION SHOW — 工业自动化展
- MWCS METALWORKING AND CNC MACHINE TOOL SHOW — 数控机床与金属加工展
- RS ROBOTICS SHOW — 机器人展
- ICTS INFORMATION & COMMUNICATION TECHNOLOGY SHOW — 新一代信息技术展
- AMS ADVANCED MATERIAL SHOW — 新材料展
- EIAS ENERGY-SAVING & INDUSTRIAL ACCESSORY SHOW — 节能与工业配套展

Deutsche Messe FIERA MILANO 汉诺威米兰展览(上海)有限公司
汉诺威米兰展览(上海)有限公司
电话Tel: 021-5045 6700
CDIIF@hmf-china.com

DEXPO 东浩兰生会展 上海工业商务展览有限公司 SHANGHAI INDUSTRY & COMMERCE EXHIBITION CO., LTD.
东浩兰生会展集团上海工业商务展览有限公司
电话Tel: 021-2206 8388
CDIIF@shanghaiexpogroup.com

四川天府国际会展集团有限公司 Sichuan Tianfu International Conference & Exhibition Group Co., Ltd.
四川天府国际会展有限公司
电话Tel: 028-8025 6232
stex@cdtf.gov.cn

PENG CAN 四川鹏璨文化传媒有限公司 Sichuan Pengcan Culture Media Co., Ltd
四川鹏璨文化传媒有限公司
电话Tel: 028-67646118
CDIIF@pengcan.com

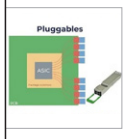


21 封面故事
增材制造
快速定制增材制造设备控制系统
本文介绍了由 SCANLAB 与 Autodesk联合开发的Autodesk Machine Control Framework（AMCF），即面向激光粉末床熔融（LPBF）的类操作系统中间件层。

市场观察

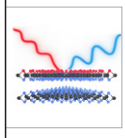
7 可编程光学技术正赢得战略投资者的青睐

光学技术领域的新突破，正在引领自主系统、基础设施与人工智能（AI）迈向全新的发展时代。

9 当硅遇见光：通往AI规模互联的光子路径


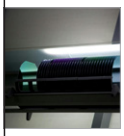
Yole Group预测，硅光子集成电路市场在2030年将达到21亿美元，2024-2030年间的复合年增长率达31%。

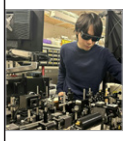
技术中心

12 光调控

双面型过渡金属硫族化合物为光调控开辟新途径
光线照射到双面型过渡金属硫族化合物上，材料内部会产生定向作用力，并可通过二次谐波产生图谱观测到该作用力。

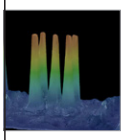
13 光学器件

空间连接的未来：先进光学技术赋能空间激光通信
Exail正为法国政府发射的空间激光通信演示验证系统SOLiS提供先进光学技术，以验证一种依赖地球同步卫星和地面站的激光通信服务的可行性。

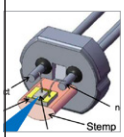
15 光学材料

光学新材料推动先进集成光子学快速发展
将薄膜铌酸锂、钛酸钡和氧化铝等新型材料平台商业化的工业级努力，正在推动下一代光子集成电路（PIC）突破硅材料的局限。

19 光子计算

光子计算显著提升AI硬件的运算速度
一种可实现光速级运算的单次光传输张量计算技术，为下一代光子计算AI硬件的研发开辟了新路径。

工业应用专栏

25 微电极阵列

先进制造工艺助力微电极阵列规模化生产
现代运动控制系统、精密运动平台与五轴旋进激光扫描器的组合，为实现微电极阵列规模化生产提供了新工具。

产品特写

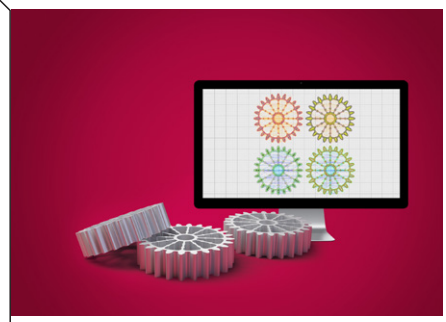
27 新一代蓝绿激光器：以技术创新赋能工业智造新未来


随着蓝绿激光器在产品性能、可靠性、成本优化等方面的不断进步，其应用已深度渗透到工业加工、智能制造、检测测量等诸多领域。

3 编者的话
4 前沿简讯
30 产品撷英
32 广告索引

关于《激光世界》
《激光世界》杂志创刊于 2005 年，是世界著名杂志 *Laser FocusWorld* 杂志的中文版本，也是在中国市场为激光与光电子行业的工程师、研究人员、科学家以及专业技术人员提供的专业期刊。《激光世界》的内容涵盖全球激光与光电子技术、工业与科研应用、市场信息以及中国本地市场的相关报道。
《激光世界》采用简体中文印刷，双月刊，每期发行量超过 9,500 册，面向激光与光电子行业内合格的读者群。同时，我们的电子杂志和网站将覆盖更广泛的读者群。
请查询本刊专业网站：www.laserfocusworld.com.cn。
本刊中包含转载自 *Laser Focus World* 杂志的文章。*Laser Focus World* 由 Endeavor Business Media 独家拥有和出版。Endeavor Business Media 对编辑政策不承担任何责任，并且对本刊的内容、或刊物中提到的独立供应商生产的产品的性能或可靠性，不承担任何责任，也不作任何保证。

扫一扫 免费下载电子书



21 COVER STORY

Additive Manufacturing

Rapid Customization of Additive Manufacturing Equipment Control Systems

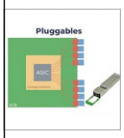
This article introduces the Autodesk Machine Control Framework (AMCF) jointly developed by SCANLAB and Autodesk, an operating system-like middleware layer for Laser Powder Bed Fusion (LPBF).

MARKET WATCH



7 Strategic investors bet on programmable optics

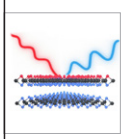
Optical breakthroughs are powering the next era of autonomy, infrastructure, and AI.



9 Silicon meets light: Photonic paths to AI-scale connectivity

Yole Group market analysis of silicon photonic integrated circuits forecasts the industry will reach $2.1B in 2030, fueled by a compound annual growth rate (CAGR) of 31% from 2024 to 2030.

TECHNOLOGIES CENTER



12 Light Manipulation

Janus TMDs Open New Ways to Steer Light

Shining light on Janus transition metal dichalcogenides creates directional forces within the material, which show up in second harmonic generation patterns.

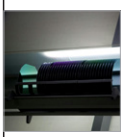


13 Optics

Future of Space Connectivity: Advanced Optical Technologies Enable Space Laser Communications

Exail is providing advanced optical technologies for SOLiS to demonstrate the viability of an optical communications service that relies on geostationary satellites and ground stations.

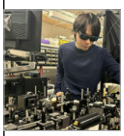
15 Optical Materials



Novel Optical Materials Drive the Rapid Development of Advanced Integrated Photonics

The next generation of photonic integrated circuits is moving beyond silicon, driven by an industrial-scale effort to commercialize new material platforms like thin-film lithium niobate, barium titanate, and aluminum oxide.

19 Photonics Computing

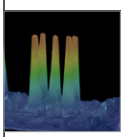


Photonics Computing Significantly Boosts the Computing Speed of AI Hardware

An international team of researchers demonstrates single-shot tensor computing—at the speed of light—and opens the door to next-gen AI hardware powered by optical computation.

INDUSTRIAL APPLICATIONS COLUMN

25 Microelectrode Array

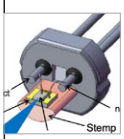


Advanced Manufacturing Processes Enable Scalable Production of Microelectrode Array

A combination of modern motion controls, precision stages, and five-axis precession laser scanners provides designers with a new tool for scaling microelectrode array production.

FEATURED PRODUCTS

27 Next-Generation Blue-Green Lasers: Empowering the New Future of Industrial Intelligent Manufacturing



With continuous advancements in product performance, reliability, and cost optimization, blue-green lasers have been deeply integrated into a wide range of fields such as industrial processing, intelligent manufacturing, and inspection and measurement.

3 EDITOR'S NOTES

4 LEADING EDGE SNAPSHOTS

30 PRODUCTS HIGHLIGHTS

32 AD INDEX

About Laser Focus World China

Published since 2005, Laser Focus World China, the Chinese editionof the world famous *Laser Focus World* magazine, is the professional magazine for engineers, researchers, scientists, and technical professionalsin China. It provides comprehensive global coverage of optoelectronictechnologies, industrial and R&D applications, and market information. The editorial content licensed exclusively from Laser Focus World magazine is supplement by content generated by our own editors in China.

Laser Focus World China is published every other month in simplified Chinese and distributed to over 9,500 qualified optoelectronics professionals in China. Through our digital magazine and website we provide coverage to an even larger audience base. Please visit our relevant website, www.laserfocusworld.com.cn.

Laser Focus World China, ISSN 1817-6917 is published bi-monthly by ACT International, Unit B, 13/F, Por Yen Building, No. 478 Castle Peak Road, Cheung Sha Wan, Kowloon, Hong Kong, under the license of PennWell Corporation, 1421 S. Sheridan Road, Tulsa, OK 74112. Copyright 2010. All rights reserved. This publication contains articles reprinted from *Laser Focus World* magazine. *Laser Focus World* is exclusively owned and published by Endeavor Business Media. Endeavor Business Media is not responsible in any way for the editorial policy and expressly disclaims responsibility for, and makes no warranties, express or implied, with respect to the content of this publication or the performance or reliability of products described herein that are produced by independent vendors.

激光世界
LaserFocusWorld® China

中国/香港特别行政区 China / Hong Kong SAR
电话 (852) 2838 6298
传真 (852) 2838 2766
地址 香港九龙长沙湾青山道478号
百欣大厦13楼B室
出版总监 麦协林 Adonis Mak
电邮 adonism@actintl.com.hk
社长 姚丽莹 Hatter Yao
电邮 hattery@actintl.com.hk
中国版主编 庞会荣 Rossie Pang
电邮 rossiep@actintl.com.hk
记者 张辉 Denny Zhang
电邮 dennyz@actintl.com.hk
记者 胡婴 Lily Hu
电邮 lilyh@actintl.com.hk
技术顾问 顾正
湖北工业大学 刘顿
西安电子科技大学杭州研究院 石理平

免费赠阅咨询
电话 (86) 755-2598 8573
(86) 755-2598 8567
传真 (86) 755 2598 8567
电邮 circulation@actintl.com.hk

特约编辑
In My View Jeffrey Bairstow
电邮 inmyview@yahoo.com
Industrial Lasers David A. Belforte
电话 (1) 508-347-9324
电邮 dbelforte@endeavorb2b.com
Valerie Coffey
电话 (1) 978-263-4485
电邮 stellaredit@gmail.com
Photonic Frontiers Jeff Hecht
电话 617-965-3834
电邮 jeff@jeffhecht.com
Imaging Conard Holton
电话 (1) 603-891-9161
电邮 cholton@pennwell.com
Europe D. Jason Palmer
电话 (44) 7960 363308
电邮 djasonpalmer@gmail.com

尖端技术部市场总监 Adrienne Adler
美术编辑总监 Suzanne Heiser
高级绘图 Chris Hipp
制作经理 Sheila Ward
广告协调员 Steve Archer
客户开发经理 Debbie Bouley

ENDEAVOR BUSINESS MEDIA

尖端技术部通讯与光电子分部
副总裁 / 集团出版人 Alan Bergstein
电话 (1) 603-891-9178
电邮 alanb@endeavorb2b.com
副出版人/总编辑 John Lewis
电话 (1) 603-891-9320
电邮 jlewis@endeavorb2b.com
高级编辑 John Wallace
电话 (1) 603-891-9228
电邮 jwallace@endeavorb2b.com
高级编辑 Gail Overton
电话 (1) 603-305-4756
电邮 goverton@endeavorb2b.com
管理编辑 Lee Dubay
电话 (1) 603-891-9116
电邮 ldubay@endeavorb2b.com

公司行政人员
主席 Frank T. Lauinger
总裁兼行政总监 Robert F. Biolchini
财务总监 Mark Wilmoth

尖端技术分部
读者服务主任 Debbie Bouley

地址 Laser Focus World, 61 Spit Brook Road, Suite 501, Nashua, NH 03060
电话 (1) 603-891-0123
网址 www.laserfocusworld.com

ISSN 1817-6917
© 2026 版权所有 翻印必究

硅光子学市场将迎来快速发展

硅光子学（Silicon Photonics）通过成熟的 CMOS 工艺，将电子器件和光子器件共同集成到硅基衬底材料上，从而在单一芯片上完成光信号的产生、调制、传输与探测等功能。简单来说，它是将光子技术“植入”传统硅基芯片，让芯片同时具备电子信号处理和光子信号传输的双重能力，旨在突破传统电子互连的性能瓶颈。

随着云计算、大数据与 AI 的爆发，高能效且低成本的超高速、低延迟数据传输需求，进一步驱动了硅光子技术的市场发展。全球硅光子市场已进入高速增长通道。市场研究公司 Yole Group 预测，到2030年硅光子集成电路市场将达21亿美元，2024-2030年间的复合年均增长率高达31%。市场增长背后的核心驱动力来源于市场对高速光互连应用的需求，无论是大规模数据中心，还是 AI 计算集群，都离不开高速光互连的支持。

市场的快速发展及可观的未来前景，吸引了众多厂商入局硅光子产业，从设计公司到核心器件供应，再到晶圆厂，整个产业链都在致力于通过技术创新，更好地实现硅光子技术的规模化落地应用。中国企业发展尤其快速，尽管仍有部分技术瓶颈亟待突破，但中国本土企业已具备完备的技术研发能力，正全力攻关高速硅光子解决方案，加速实现技术赶超海外企业（p9）。

AI 算力与数据中心需求将是未来五年硅光子市场增长的核心引擎，共封装光学（CPO）技术将成为关键突破口，中国市场在政策与国产化驱动下将呈现出领先的增长势头。企业需聚焦高速模块、CPO 封装、芯片集成，同时布局新兴应用场景以抢占先机。

调制器是光子集成电路中的重要组件，而调制器材料的选择已成为决定性的竞争因素。目前，业界正在努力将薄膜铌酸锂、钛酸钡和氧化铝等新型材料平台商业化，正在速度、能效和工作频谱方面实现前所未有的性能，旨在推动下一代光子集成电路突破硅材料的局限（p15）。

AI 发展对算力无止境的追求，促使人们正在不断寻求新思路。最近，由芬兰阿尔托大学的一个光子学研究团队提出了一种新颖的光子计算方法——通过单次光传输实现单次张量计算方法，显著提升了通用光子计算的并行运算水平，为下一代光子计算 AI 硬件的研发开辟了新路径（p19）。

此外，本期还收录了如何通过软件快速定制增材制造设备的控制系统（p21）、精密运动平台和运动控制系统与五轴激光扫描器组合实现微电极阵列规模化生产（p25）、以及蓝绿激光器在性能和成本等方面的不断进步和其在工业加工、智能制造、检测测量领域的应用（p27）等内容，供读者参考。

本刊编辑部

前沿简讯 Leading Edge Snapshots

实现超短激光脉冲的实时测量

超短激光脉冲（持续时间短于万亿分之一秒）已经为基础科学、工程技术和医学领域带来革命性影响。然而，其极短的脉冲时长使其难以被精准捕捉和测量。

大约十年前，瑞典隆德大学与葡萄牙波尔图大学的研究人员，合作推出了一款超快激光脉冲时长测量工具。如今，该团队取得新的技术突破，其新方案能够在更紧凑的装置中，对更大参数范围内的单个激光脉冲进行测量。

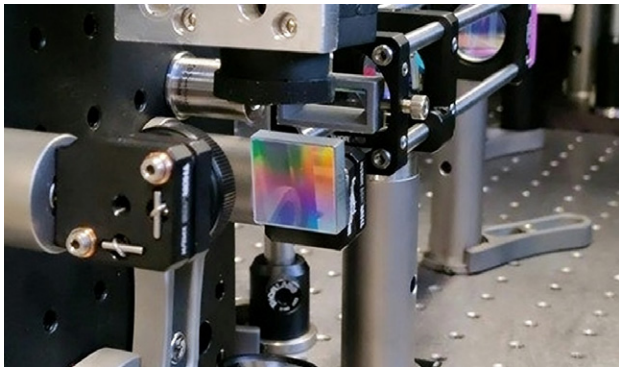


图1：新测量方法的实验室装置。（图片来源：隆德大学）

“目前在工业和医学中常用的飞秒激光标准测量方法，通常只能给出脉冲持续时间的估计值。”隆德大学博士生 Daniel Díaz Rivas 说，“我们的方法提供了更全面的测量，有助于释放超快激光技术的全部潜力。”

飞秒脉冲已广泛应用于眼科手术和工业微加工等领域，并可用于研究光合作用中的能量转移和电子动力学。尽管应用广泛，精确测量脉冲的形状和持续时间仍然具有挑战性。电子测量仪器的响应速度过慢，因此研究人员将目光转向了光学测量方法。

然而，这类光学测量技术需要通过扫描序列完成多次测量，无法实现对单个脉冲的实时捕捉。

目前已有适用于基础科学研究中超短脉冲的单次测量技术，但面对工业和医疗领域更常用的较长脉冲时，该技术则难以胜任。其局限性在于，很难在紧凑的光学装置内实现脉冲的有效拉伸。

隆德大学研究团队研发的新方法，借助一种简单的光学原理对超快激光脉冲进行拉伸：将脉冲激光束射向衍射光栅，该元件可将光束按光谱成分实现空间分离；再通过透镜组对光栅成像，从而实现对激光束中脉冲时长的精准调控。这种方法能在紧凑的光学装置内，将飞秒脉冲的时长拉伸至原来的十倍以上。

该方案无需借助预补偿光学元件，即可实现对脉冲的单次全面表征。这项研究成果催生了一种多用途测量技术，可覆盖从数飞秒到数百飞秒的脉冲时长范围，满足科学研究、工业生产和医疗领域的多样化需求。它为单个脉冲的实时监测开辟了新路径，而这在以往对许多激光系统而言都是难以实现的目标。

除了脉冲表征外，这一光学原理还可用于调控光脉冲的时空特性，并为探索光与物质相互作用的研究提供新思路。❑

通快集团借力量子计算机升级激光技术

通快集团、弗劳恩霍夫激光技术研究所（ILT）与柏林自由大学物理系下属的 Dahlem 复杂量子系统研究中心携手合作，计划借助量子算法开展激光物理基础研究。该项目的远期目标是，未来通过量子计算机大幅加速新型激光器的研发进程。通快集团该项目负责人 Daniel Basilewitsch 表示：“如果我们能更精准地掌握激光产生与放大过程中的物理机制，未来就能进一步提升产品能效与性能表现。”项目的核心议题在于：量子计算机能

否比通快集团目前使用的传统高性能计算机，更出色地模拟激光器内部复杂的量子力学过程。

研究聚焦二氧化碳激光器与半导体激光器

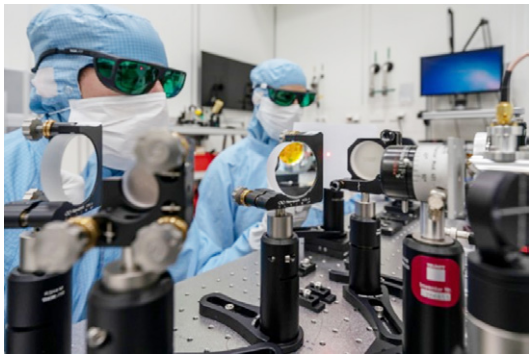
项目合作三方将研究重点锁定于二氧化碳激光器与半导体激光器。弗劳恩霍夫激光技术研究所数据科学与测量技术部门主任、亚琛工业大学光学系统技术研究所主任 Carlo Holly 教授指出："半导体激光器不仅应用于数据传输、智能手机传感技术领域，未来还将赋能自动驾驶行业；同时，无论是作为泵浦源还是直接投入使用，它都是绝大多数工业激光应用的核心支柱。借助量子算法提升激光器放大特性的预测精度，其潜在影响将十分深远。本项目的目标正是利用量子计算机，对半导体激光器内部的量子力学过程展开精准计算。"

不过，量子计算机真正大规模投入工业应用仍需时日。尽管首台原型机已问世，但目前这类设备尚无法胜任复杂的工业任务。Basilewitsch 补充道："即便如此，我们如今仍需着力积累相关技术经验，为未来量子计算机的工业化应用筑牢基础。"

合作各方发挥专业优势，协同攻关

弗劳恩霍夫激光技术研究所在半导体激光器仿真领域处于行业领先地位，Dahlem 复杂量子系统研究中心则在分子碰撞建模方面具备深厚积累，通快集团负责研发首批量子算法，并承担项目整体协调工作。德国联邦教育与研究部为该研究提供了约 180 万欧元的经费支持。

柏林自由大学的 Christiane Koch 教授阐释道："研究的第一步是分析现有的仿真方案，并对首批量子算法进行测试验证。项目的核心任务，是将二氧化碳激光器中存在的有益与有害能量转移过程的物理建模方法，从传统计算框架迁移至量子计算平台。对这些过程的深入理解，将为激光器的设计优化提供关键依据。"



Basilewitsch 强调："我们的二氧化碳激光器已被应用于高能耗的芯片制造领域，该项目的推进，是助力芯片生产朝着更可持续方向发展的重要一步。" ❑

2025 年全球激光材料加工系统市场规模创历史新高

来自市场研究公司 Optech Consulting 的数据显示：2025 年，全球激光材料加工系统市场规模创下 240 亿美元的历史新高；根据 2026 年 1 月公布的数据，该市场较上一年度的增幅预计在 5%-7% 之间。



图 1：激光材料加工系统全球市场规模（单位：十亿美元）。（图片来源：Optech Consulting）

2025 年的市场增长由半导体、平板显示器及电路板行业的微加工应用所驱动，其中中国市场的设备投资力度尤为强劲。此外，用于电动汽车电池制造的激光设备需求，也从上年的低迷状态中实现回暖。

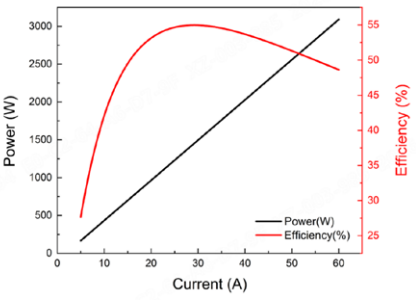
在高功率激光切割系统领域，市场疲软态势从 2024 年持续至 2025 年。与此同时，中国激光切割机的出口量持续攀升，进一步加剧了海外制造商的竞争压力。❑

度亘核芯新一代泵浦源实现单泵功率突破 2600 W

近日，度亘核芯采用公司自产的高功率70 W 单管芯片，通过空间、偏振、波长三重光学耦合合束技术路径，实现单纤2600 W 的功率输出突破，适配2~6 kW 的中高功率光纤激光器、半导体直接输出激光系统的应用，为激光器轻量化、极简集成化设计提供新的解决方案。

核心性能特点

- **紧凑化设计：**单模块功率重量比达到1 W/g，整机体积、重量大幅减小，提升了设备安装适配性，为激光装备应用高效释放作业空间。
- **单纤高功率输出：**搭载高功率70 W 度亘自产单管芯片，通过空间合束、偏振合束、波长合束三者结合，实现单模块365 μm 单纤输出功率2600 W 以上，为高功率激光器的小型化设计奠定了基础。
- **高效散热方案：**模块采用通水直冷的散热设计，通过高效的热交换技术，快速导出热量，减少热累积导致的芯片结温升高。
- **便捷安装体验：**用户安装模块无需涂抹导热硅脂，简化安装步骤，便捷安装。
- **集成指示光设计：**模块内部集成红光以及防反设计，客户无需外置红光及保护光路，光路结构更加简约可靠。
- **降本增效优选：**2600 W 大功率光线耦合模块，为光纤激光器实现更优的成本控制。



相较于同功率多泵并联方案，减少合束器件投入，精简制造流程，显著降低人工与时间成本，降本增效一步到位。

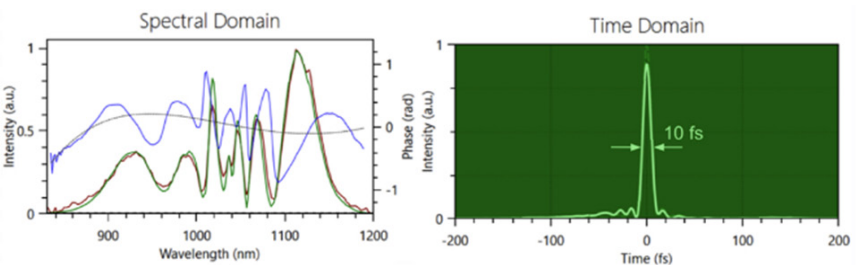
作为高功率光纤激光器泵浦光源，单个泵浦可支持光纤激光器2 kW 输出，多个模块通过合束器后泵浦可支持4 kW、6 kW 及更高功率输出。基于本产品的半导体激光系统，在激光加热、熔覆、热处理等方面具有广泛的应用场景。❑

基于单级多通压缩技术突破 10 fs 脉宽壁垒

Light Conversion 与 n2 Photonics 合作，基于介质反射镜，在单级多通压缩腔（MPC）中实现了超短脉冲的非线性光谱展宽与脉宽压缩，首次突破了10 fs 脉宽壁垒。

此前，仅有少数研究能实现10 fs 脉宽的激光输出，核心瓶颈在于两个方面：一是光学元器件的带宽限制，二是多通压缩腔内色散管理的严苛要求。

本研究团队通过采用定制化色散反射镜（850~1300 nm），并选用氩气作为非线性介质，采用 Light Conversion 研发的工业级飞秒激光器 PHAROS-UP，将脉宽90 fs、单脉冲能量400 μJ 的激光脉冲压缩至10 fs，

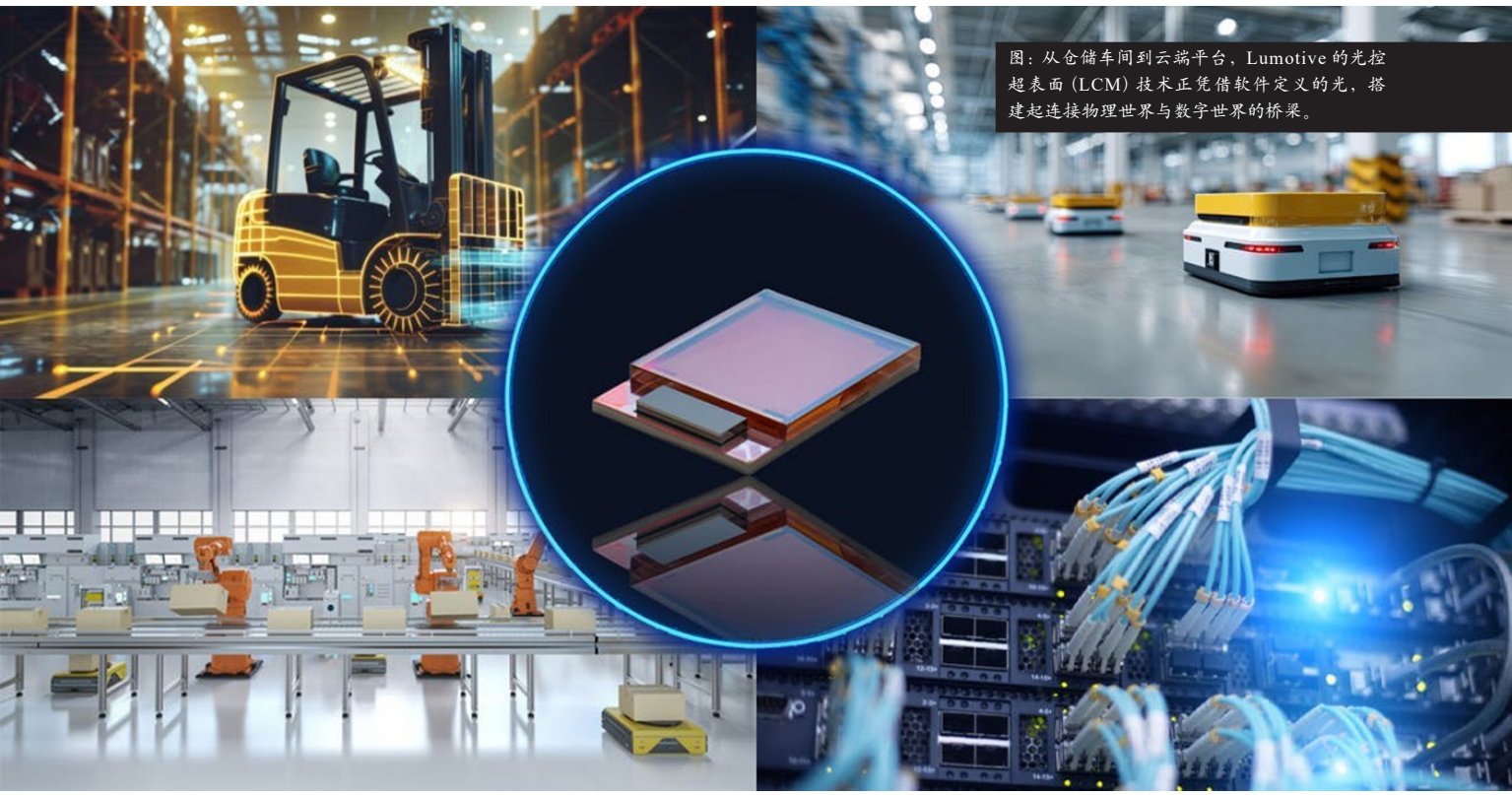


输出平均功率达8 W，转换效率超过80% 。这一成果证明，高集成度、高稳定性的技术方案可推动超快光学领域向10 fs 以下的目标进一步迈进。

整套压缩装置（含多通压缩腔与 MIKS1_L_UP 型色散反射镜）的集成尺寸仅为1.5×0.24 m^2，具备高度紧凑性。

未来的研究将聚焦于进一步提升系统性能。后续测试将探索400 μJ 单脉冲能量下的长期稳定性，并致力于实现对脉宽90 fs、单脉冲能量1 mJ 激光脉冲的压缩。

双方的本次合作研究表明，工业级飞秒激光器可助力物理学探索极限领域，为科研与技术创新开辟全新可能。（来源：Light Conversion）



图：从仓储车间到云端平台，Lumotive 的光控超表面（LCM）技术正凭借软件定义的光，搭建起连接物理世界与数字世界的桥梁。

可编程光学

可编程光学技术正赢得战略投资者的青睐

光学技术领域的新突破，正在引领自主系统、基础设施与人工智能（AI）迈向全新的发展时代。

作者：Sam Heidari，Lumotive公司首席执行官

2025年年中，亚马逊实现了一项十年前看似只存在于科幻小说中的里程碑式的突破：其物流运营网络中部署的自主机器人数量突破了百万台大关。这一惊人的数字，既彰显了自动化技术的飞跃式发展，也体现了其普及速度有多快。

与此同时，立法机构正审议首部针对机器人与自主系统的联邦监管框架，2026 年或将成为这一领域的关键转折之年——这并非源于投机炒作，而是技术规模化落地的必然趋势。

目前仍然有一个核心环节制约着该行业的发展，即感知技术。机器对物理环境的感知与理解能力，是其稳定运行的关键。

无论是工厂、农场、城市还是车辆，机器精准感知并理解周边环境的能力，不仅决定了其运行性能，更直接影响着公众信任度。这正是只能执行预设任务的机器人，与可适应复杂动态环境的智能设备之间的本质区别。如今，战略投资者愈发意识到，模块化、可编程、可扩展的感知技术，是决定企业能否实现自主化技术规模化部署，或是止步于试点阶段的关键所在。

基于以上原因，越来越多的战略投资者与金融资本开始青睐像Lumotive这样的公司，这些公司专注于可编程光学技术，并将其视为构建未来智能系统的核心基石。我们正迈入一个全新阶段：感知不再只是硬件层面的技术难题，而是关乎系统全局的工程挑战。Lumotive的技术平台，能为开发者提供更敏捷的适配能力、更智能的研发工具，助力其紧跟市场步伐实现规模化扩张。

灵活性与模块化优势

Lumotive的光束控制芯片及激光雷达（LiDAR）参考设计，均以灵活性为核心架构原则——可根据不同应用场景，灵活搭配各类激光器、传感器与处理器。这种模块化设计，让感知技术从“一次性定制产品”升级为“可复用的技术平台”，使得工业机器人能够突破固定预设环境的限制，自如应对动态多变的复杂场景。

当前工业自动化领域普遍面临着劳动力短缺问题，项目交付周期也在不断收紧，传统的“18个月定制一款传感器”的研发模式已经难以为继。Lumotive提供的可编程架构，可将研发周期缩短至3-6个月，大幅加速仓储自动化、建筑及农业户外机器人等领域的技术落地进程。

例如，北阳电机（Hokuyo）推出的YLM-10LX传感器，基于Lumotive的光控超表面（light control metasurface，LCM）半导体技术，是全球首款商用固态激光雷达。该产品兼具高精度与可编程特性，且摆脱了机械结构的脆弱性，适用于AGV小车与自主移动机器人（AMR）等应用场景。NAMUGA公司推出的Stella-2传感器，集成了光控超表面技术与基于单光子雪崩二极管（SPAD）的图像传感器，实现了一个轻量化模组，可广泛应用于自动割草机、配送机器人等智能设备。

在机器人领域，我们正观察到一个微妙的趋势：行业重心正从“移动能力”向“智能水平”转移，这一点在自主草坪养护机器人市场尤为明显。这类产品曾一度被视为小众新奇物件，如今已成功跻身主流市场。但一款自主草坪养护机器人产品的优劣，核心取决于其感知能力：它能否准确区分宠物与洒水装置？能否辨别新播草种与落叶？这一细分赛道正在快速成熟，但真正实现规模化普及的关键，在于研发出能应对户外复杂多变环境的高保真固态感知系统。

城市发展同样在转型升级，现在已经不仅是打造“智慧城市”，更是构建能主动响应需求的“感知城市”。下一代城市基础设施，需要具备实时感知、自主学习与快速响应能力的技术支撑，而非单纯的数据采集工具。目前，美国内华达州拉斯维加斯市与新加坡，已经借助激光雷达网络实现交通流量的实时优化。但未来智慧城市的建设，需要更分布式、可编程的感知网络作为底层支撑。Lumotive的技术平台，可支持感知系统的规模化部署，并能根据实际任务需求，在现场灵活调整分辨率、视场角与功耗水平。正是这种情境智能，赋予了城市“主动响应”而不仅仅是“被动采集”的能力。

用于交通领域的自主系统也已跨越试点阶段，正式进入商业化落地阶段。美国自动驾驶公司Waymo，目前每周在美国多个城市提供超过25万次付费自动驾驶出行服务，并计划在2026年将自动驾驶车队规模扩充至3500辆。即便如此，这家隶属于谷歌母公司Alphabet的行业标杆企业，仍需应对极端场景处理、公众信任建立与运营复杂度提升等诸多挑战。而可根据外形尺寸、功耗限制与应用场景定制的可扩展感知技术，将推动该行业迈入全新阶段——从人行道配送机器人，到规模化自动驾驶配送车队，再到AI赋能的电动垂直起降飞行器（eVTOL），都将从中受益。

超越感知

除感知领域外，可编程光学技术也正在重塑着信息传输方式，为AI时代开启动态、高能效的互联方案。基于光子学的光束控制技术，可实现动态光交换，助力构建更快速、更低延迟的互联系统，在降低能耗的同时，满足海量数据传输需求。随着AI计算负载的指数级增长，行业瓶颈正从图形处理器（GPU）转向光学背板，而这正是固态化、软件定义的光子学技术能够大显身手的舞台。

支撑未来智能世界的技术架构，绝非“一刀切”的标准化方案，这也正是可编程光学技术掀起产业变革的核心原因。它赋予了开发者（无论是国际科技巨头，还是创新生态中的中小企业）打造“能够随着市场需求持续迭代的”感知系统的能力。

可编程光学技术的价值，远远超过自主化应用本身，它旨在实现可适配、可扩展、可持续的感知能力。从穿梭于复杂环境的机器人，到以光速完成数据路由的数据中心，可编程光学技术正成为构建全球化智能基础设施的核心基石。对于那些塑造未来十年发展格局的企业与城市而言，前行的方向已然清晰：感知越精准，发展越深远（See better, go further）。❑

当硅遇见光：通往 AI 规模互联的光子路径

Yole Group 预测，硅光子集成电路市场在2030年将达到21亿美元，2024–2030年间的复合年增长率达31%。

作者：Martin Vallo，Yole Group资深光子学技术与市场分析师

光子技术在数据通信领域扮演着关键角色，尤其在满足高速率、大带宽、高能效数据传输的迫切需求上不可或缺。

数据中心依赖于多个层级的光学互连，应用范围从芯片到芯片连接（<1 m）到数据中心互联（<100 km）。高速光收发模块可以容纳多种光子器件用于硅光子集成电路（PIC），例如用于硅光子集成电路的垂直腔面发射激光器（VCSEL）、外调制激光器（EML）和连续波分布式反馈（CW-DFB）激光器。具体应用需求决定了选择哪种激光技术。

EML 具备显著优势：技术成熟度高，稳定性与可靠性经过验证，适用于中长距离传输，且信号质量优异、生产良率可观。但在更高带宽场景下，其功耗效率与成本控制面临瓶颈。当传输速率提升至1.6 T 及以上时，单模块需集成的器件数量大幅增加，直接导致功耗攀升和成本上涨，且器件小型化与集成化的空间已十分有限。

在飞速发展的光互联市场中，人工智能（AI）计算集群与超大规模云数据中心的扩张，推动了对可扩展、高速率、高能效光模块的需求激增。光子集成技术作为实现器件小型化、提升功耗效率、增强性能、降低成本、拓展可扩展性的核心路径，同时也为拓展全新功能应用提供了技术平台。

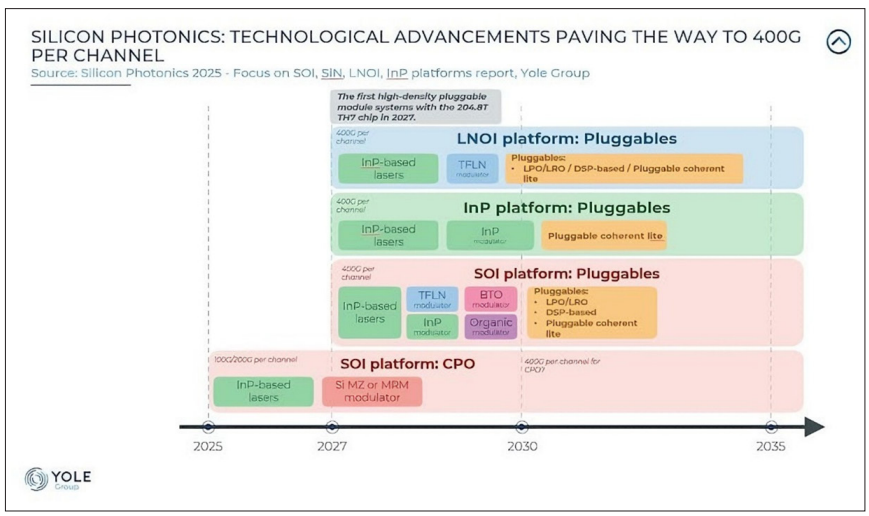


图1：硅光子技术突破，促使单通道速率迈向400G 时代。

为何选择硅基PIC?

硅光子技术被视为实现高速光互联的最具潜力的技术平台。基于绝缘体上硅（SOI）材料、采用互补金属氧化物半导体（CMOS）兼容工艺制备的硅基 PIC，能够依托成熟的晶圆代工基础设施，实现大规模、低成本的量产。

PIC 是一种专用芯片，它将激光器、调制器、探测器等各类光学组件集成在单一衬底上，可在非常紧凑的尺寸内实现对光信号的调控。要实现成本效益最大化，需兼顾材料经济性、集成化设计以及使用更少的激光器。

高密度集成架构还能有效降低光损耗。在实际应用中，硅光子技术通常与磷化铟（InP）材料结合，采用混合集成或异质集成方案构建光源。这种混合集成方案已广泛应用于100 G/ 通道的传输场景，并有望拓展至200 G/ 通道，但要实现平稳技术过渡，仍需攻克多项技术挑战。

为实现 400 Gbps/ 通道乃至更高的传输速率，行业正在探索在 SOI 衬底上深度集成新型材料，用于制备调制器、探测器与光波导。异质集成技术不仅需要集成 III-V 族激光器，还需引入多种新型材料，这无疑增加了工艺复杂度，导致器件良率下降，提高了 PIC 的生产成本，甚至可能延

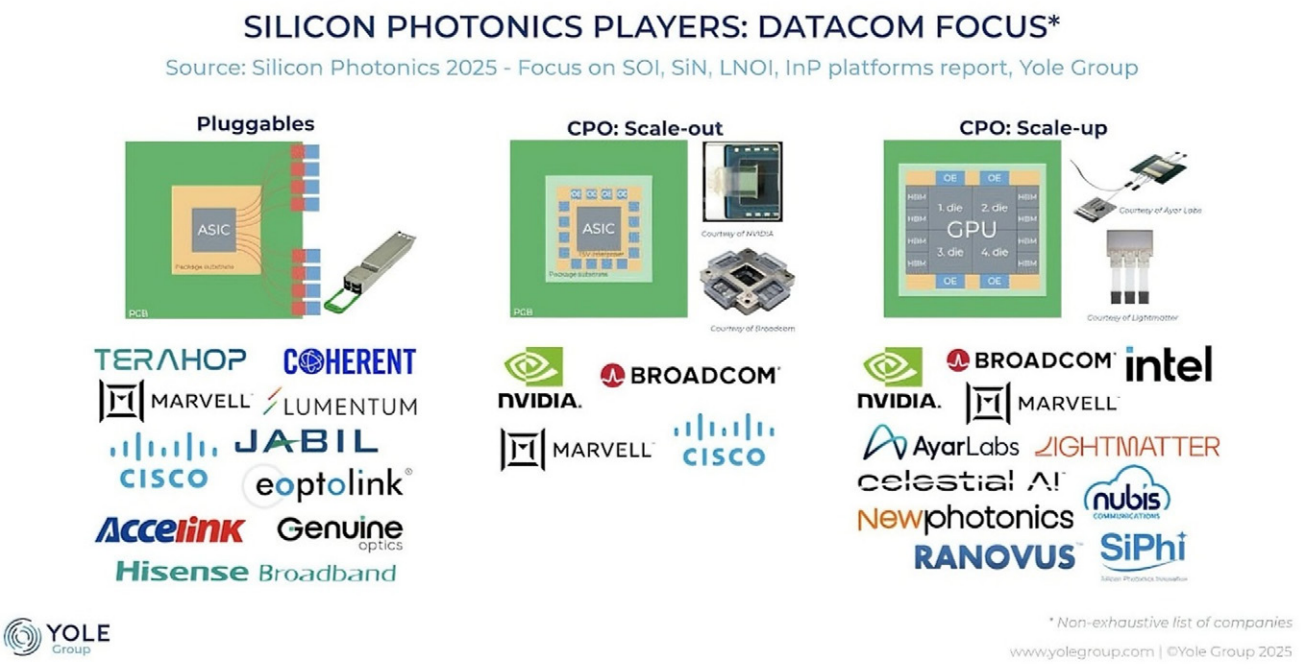


图2：数据通信领域的硅光子技术厂商布局。

缓其市场化进程。因此，研发符合未来带宽需求且具备商业可行性的新型PIC，已成为行业发展的核心要务。

两大技术路线之争：单通道提速 Vs. 低速多通道

当前，硅光子学市场的增长主要由数据中心应用的可插拔光模块驱动。除此之外，还有两大极具潜力的应用方向：一是面向横向扩展网络的共封装光学技术（CPO），作为面板可插拔交换机的替代方案，它能实现更高的集成密度、更低的功耗，以及更优的每吉比特每秒成本；二是面向纵向扩展系统的共封装光学技术，它可以实现硅芯片或各类计算架构处理器（xPU）之间的光互联。

可插拔光模块的技术路线侧重于提升单通道传输速率，而CPO系统则代表了低速多通道路径。尽管CPO在超低功耗与高集成密度方面优势显著，但多数网络运营商与系统厂商仍然更青睐可插拔光模块，因为它们具有经过验证的成本效益、便捷的前端面板维护性，以及良好的多厂商设备兼容性。

目标：更高的单通道速率

将单通道传输速率提升至400 Gbps，可使单端口以太网速率达到3.2 Tbps及以上，同时实现约20%-30%的功耗节省，并减少50%的激光器用量。这一突破能够有效降低资本支出（CapEx），简化供应链体系，同时削减设备冷却与电力供应相关的运营支出（OpEx）。

我们认为，以下几类光学技术方案具备广阔的市场前景：

- 分立器件型400 G EML：将实现大规模量产，主要配套3.2 T可插拔光模块应用。
- 增强型硅基PIC：集成磷化铟（InP）、薄膜铌酸锂（TFLN）或钛酸钡（BTO）调制器的硅基PIC，其技术关键在于攻克大规模异质集成工艺。
- 混合有机电光调制器（OEO）：相比薄膜铌酸锂/钛酸钡-硅基集成方案，有机电光调制器可实现PIC的小型化，并支持真正的晶圆级后端精加工。但该技术需在规模化应用中验证长期稳定性与可靠性。
- 绝缘体上铌酸锂（LNOI）技术平台：该平台具备卓越的电光效率，适用于超宽带应用场景（如线性可插拔光器件、线性重定时光器件、简版相干可插拔光模块）。尽管目前面临成本高昂、量产能力有限的挑战，但薄膜铌酸锂/绝缘体上铌酸锂（TFLN/LNOI）厂商正积极研发相关PIC产品，未来有望与SOI平台展开竞争。
- 磷化铟（InP）基PIC：该技术的核心优势在于可单片集成有源光子器件，大幅降低封装复杂度。但受限于当前量产规模，其成本仍处于较高水平。

“低速多通道”光学方案

到2028年，在SOI平台上集成新材料的良率，以及绝缘体上铌酸锂（LNOI）、磷化铟（InP）平台的大规模量产能力，可能仍难以满足市场的成本预期。

低速多通道技术路线的核心逻辑是：保持单通道低速传输，通过增加光纤数量或波长信道数量来实现总带宽的提升。这种方案能够简化模拟电路设计，提升信号完整性与传输余量，降低单通道功耗，减少数字信号处理器（DSP）的复杂度与传输时延，同时可复用成熟、低成本的器件（尤其适用于短距传输场景），有助于提升产品良率与可靠性。

但该技术路线也存在明显短板：需要配备更多的串并转换器（SerDes）与光纤，对封装引脚数量、重定时芯片性能、共封装设计余量以及前端面板集成密度，都提出了严苛要求。总体而言，低速多通道方案在短距机架内 / 机架间互联场景，以及对时延敏感的AI/机器学习计算集群中优势显著，其采用基于非归零码（NRZ）或脉冲幅度调制（PAM）的简易调制格式，非常适合CPO系统。

下转第18页

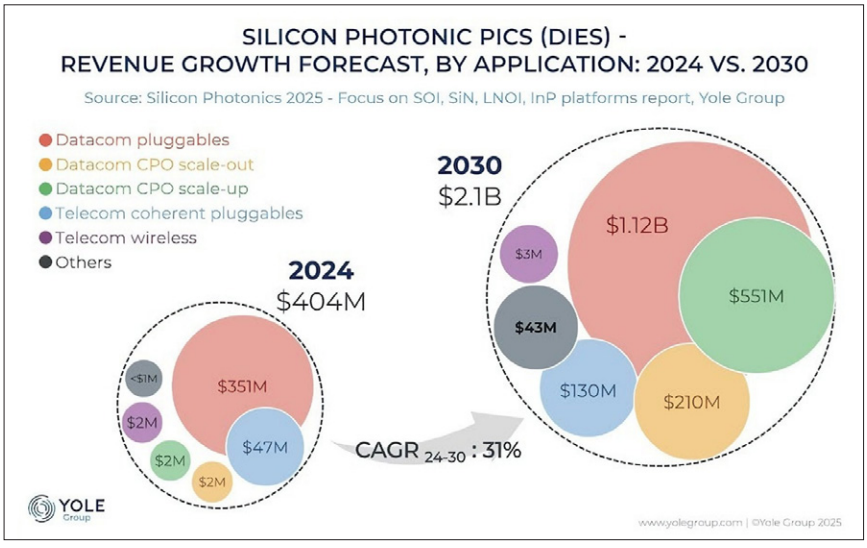


图3：按应用划分的硅光子集成电路收入增长预测（2024年 Vs. 2030年）。



光调控

双面型过渡金属硫族化合物为光调控开辟新途径

光线照射到双面型过渡金属硫族化合物上，材料内部会产生定向作用力，并可通过二次谐波产生图谱观测到该作用力。

作者：Sally Cole Johnson

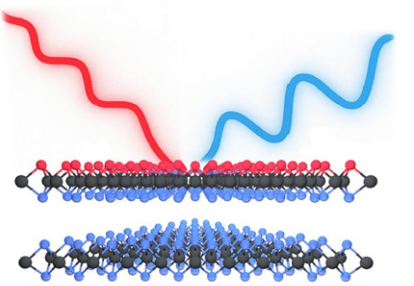


图1：双层结构的双面型过渡金属硫族化合物，能够通过二次谐波产生(SHG)效应实现光的转换：材料会发射出频率为入射光两倍的光束(左)。二次谐波光束通常呈现六瓣花形状，但特定波长的入射光会使该图案发生畸变。右上：灰色为对称的花状图谱，红色为不对称的二次谐波信号图谱。右下：样品的光学图像。(图片来源：Kunyan Zhang/加州大学伯克利分校)

最近，一个国际研究团队发现：当原子级厚度的半导体材料——双面型过渡金属硫族化合物（Janus TMD）受到光激发时，其原子晶格内部会发生物理形变。这一特性有望助力研发出具备可调控性能与响应机制的新一代光学器件。

过渡金属硫族化合物属于二维材料，其光电特性与材料厚度密切相关。以二硫化钼（MoS_2）为例，单层MoS_2的光发射强度远高于其体相材料。此外，二维单层材料具有优异的柔韧性，可通过扭转、堆叠等方式创造出更多有趣的功能。

“Janus TMDs 的特殊之处在于，夹在过渡金属原子两侧的硫族元素原子种类不同。”加州大学伯克利分校博士后 Kunyan Zhang 解释道，“二硫化硒钼（MoSSe）就是一个被广泛研究的典型案例。这种特殊的结构会在垂直于二维材料平面的方向上产生内建电场，从而赋予材料诸多传统过渡金属硫族化合物不具备的特性。”

二次谐波产生效应是指光穿过材料后频率加倍的过程。“该效应不仅可用于实现光频率转换、表征材料对称性，还能为量子光学应用提供技术支撑。”Kunyan Zhang 表示，“尽管 TMD 材料本身就表现出极强的二次谐波响应，但不同入射光对 Janus TMD 二次谐波特性的调控机制，此前尚未被深入研究。”

对称性的偏差

研究团队对二硫化硒钼 / 二硫化钼（$MoSSe/MoS_2$）异质结构的二次谐波信号进行了检测，该信号对晶体结构变化极为敏感。结果显示，其信号图谱偏离了理论预期的六重对称性。更值得注意的是，当入射光能量与材料的光吸收阈值相匹配时，这种对称性偏离现象会进一步加剧。这一现象表明，入射光会对材料施加作用力，导致原子发生微小位移。

“随着入射光波长的改变，六重对称性出现变化，这一现象令人十分意外。而且这种特性仅存在于 $MoSSe/MoS_2$ 双层结构中，在单层 MoSSe 或单层 MoS_2 中均未观测到。”Kunyan Zhang 指出，“这说明 MoSSe 与 MoS_2 之间的层间耦合作用，是实现上述光诱导效应的关键。”

这种对称性变化由微弱的应变效应驱动，但如何精准量化应变大小是研究的核心难点。“我们借助群论（一门建立材料结构与性能关联的学科）分析二次谐波信号，最终计算出了这种超薄二维材料中存在的微小定向应变数值。”Kunyan Zhang 补充道，“整个过程需要经过严谨校准，才能确保分析结果的可靠性。”

计算机模拟为研究团队的工作提供了重要支撑。“我们将第一性原理计算与群论分析相结合，深入解析了对称性破缺的内在机制。”Kunyan Zhang 介绍，“针对不同激发波长的第一性原理计算结果，可用于重构双层结构的二次谐波信号，计算结果与实验观测数据完全吻合。”

主动调控非线性光学响应

Kunyan Zhang 表示，这项研究证实：利用堆叠不对称性和层间耦合作用，能够主动调控材料的非线性光学响应。该发现为研发可编程二次谐波器件、波长依赖性调制器以及基于定制化二维异质结构的超薄光子元件，开辟了一条全新途径。

展望未来，研究团队计划探索二次谐波图谱的力学调控方法，并将这一研究思路拓展至其他二维材料体系。这些具备可调控特性的非线性光学响应，有望被集成到微型光子芯片中，以推动光子集成技术的进一步发展。❑

光学器件

空间连接的未来：先进光学技术赋能空间激光通信

Exail 正为法国政府发射的空间激光通信演示验证系统 SOLiS 提供先进光学技术，以验证一种依赖地球同步卫星和地面站的激光通信服务的可行性。

作者：Simon Jumel

自由空间光（FSO）通信正在改变数据在太空和大气层中传输的方式。从卫星星座到安全的国防链路和地面网络，对宽带连接的需求正呈爆炸式增长。光链路作为一种能够传输更多数据、速度更快、安全性更高的解决方案，正日益被广泛采用。

Exail 公司最近被选中为超高吞吐量空间激光通信演示器 SOLiS 提供先进光学技术。该项目由泰雷兹阿莱尼亚宇航公司（Thales Alenia Space）牵头的联合体代表法国国家空间研究中心（CNES）开发，是法国政府发起的“法国2030”计划的一部分，其目标是验证一种依赖于地球同步卫星和地面站的光通信服务在技术和经济上的可行性。

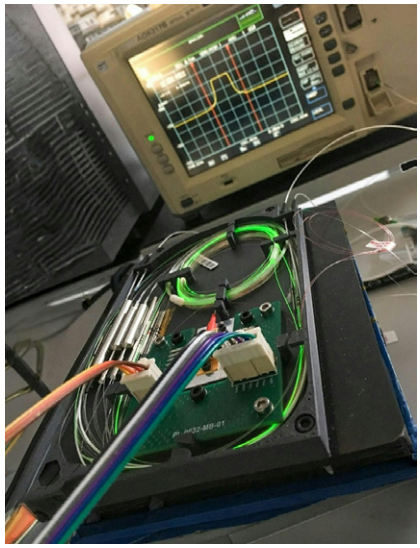


图 1：Exail 公司的掺铒（Er-doped）和掺铒镱（Er:Yb-doped）光纤，使得为飞行载荷和光学地面站（OGS）中的光学馈电链路开发低噪声光学放大器和高功率光学放大器成为可能。（图片来源：Exail）

Yole Group 预测，到2030年，光学卫星通信硬件市场规模将达到约30亿美元。目前，该领域正进入产业化阶段，激光终端和标准化组件正开始规模化生产。Exail 是价值链中日益被视为关键参与者的组件供应商之一，该价值链涵盖了激光源、调制器、放大器和光学地面站（OGS）。

从无线电到光：自由空间光通信开启连接新纪元

像 SOLiS 这样的卫星激光通信计划，正在推动电信技术向多轨道网络演进。这些基于激光的 FSO 链路，正如同光纤到户（FTTH）在地球上带来的革命一样，有望提供比传统射频系统高出10-100倍的数据传输速率。

未来的卫星星座将依赖于与轨道高度从400公里（近地轨道，LEO）到36,000公里（地球同步轨道，GEO）的卫星连接的光学地面站（OGS）。每颗卫星还将与其他卫星共享光链路，以从太空提供对地球的网状覆盖。

尽管在自由空间中建立和维护光链路存在诸多挑战，但 FSO 通信将解决当前射频（RF）电信的关键限制：

- **无需频谱许可，无干扰**：光频率消除了频谱许可问题和干扰。将不再存在射频频率拥塞。
- **高安全性**：激光束极其狭窄，难以被拦截或干扰，使其非常适合安全要求高的国防和政府链路。
- **覆盖广泛**：FSO 链路将在部署光纤电缆不切实际的地区（如偏远地区、海事或战术网络）提供高速连接。

在陆地和海底光纤链路遭受破坏日益增加的时代，像 SOLiS 这样的服务旨在增强洲际网络的韧性。地球同步卫星为“地球上两个用户之间超安全地传输大量数据”，提供了一个技术上可行的选择。

利用光纤光学技术的可扩展性、稳定性和可靠性

为了实现超高吞吐量和远距离性

能，运行在 LEO 或 GEO 轨道上的星载光学终端，必须在辐射和极端温度变化的条件下，产生并保持高度稳定的激光束跨越数百至数千公里。

Exail 通过参与 CNES 监督的项目（如 TELEO 和 CO-OP），积累了作为航天级光学组件设计者和制造者的丰富经验。Exail 已经为光学卫星开发并提供了空间级低功率放大器、无源光学组件和激光通信设备，同时还为美国国家航空航天局（NASA）的 GRACE 任务提供了经过飞行验证（TRL9）的铌酸锂电光调制器。SOLiS 演示验证系统将受益于这一技术传承。

基于光纤的光放大器

FSO 系统需要衍射极限的单模光束，以实现长距离指向精度并最小化发散。特种光纤（例如大模场面积光纤）确保激光束在星间或地空链路上保持其形状和相位完整性，从而提高信噪比和数据吞吐量。光纤放大器技术也受益于电信和工业激光市场数十年的发展。

Exail 利用其丰富的经验和专利光纤成分，制造出空间级、抗辐射（rad-hard）的光纤，目前已部署在数千个低噪声（LNOA）和高功率（HPOA）光放大器中。Exail 制造的掺铒光纤和保偏光纤是空间级光纤陀螺（FOG）的核心。与空客公司联合开发的基于高性能光纤陀螺的 Astrix 系列惯性参考单元，已在 LEO、GEO 甚至拉格朗日轨道上积累了超过490年的在轨运行经验，部署数量超过64台。

基于铒镱共掺（Er:Yb）光纤的光放大器，在紧凑的外形尺寸下提供了高光学增益和功率转换效率。它们能够达到有助于 FSO 系统技术成熟度的功率水平和稳定性。Exail 最近推出了一种单模 Er:Yb 光纤，旨在确保 FSO 系统（特别是光学地面站）中的功率可扩展性。该光纤具有10 μm 的纤芯，可在超过700小时内实现30 W 的输出功率，并且具有抗光暗化能力。结合 Exail 的配套无源光纤、光纤布拉格光栅（FBG）和泵浦合束器，用户可以高效地开发完全集成的放大器架构。其他类型的掺铒和铒镱共掺光纤（单包层或双包层）也可用于开发功率超过 100 W 的光放大器，用于光学地面站中的光学馈电链路。

对于 SOLiS 项目，Exail 正在为激光通信载荷的接收通道提供光学放大器。这包括一个基于已在 TELEO 项目上得到验证的 TRL9 技术的完整低噪声放大器模块，以及多个单通道光学放大器。这些放大器将利用 Exail 的空间级、抗辐射掺杂光纤，即使在信号衰落或闪烁条件下，也能提供更高的增益和稳定的输出。

用于地空通信的超坚固微光学组件

FSO 激光模块必须能够承受发射振动、真空循环和温度梯度，同时不影响光学对准。Exail 在微光学组件方面的专业知识提供了密封、抗振动的封装。Exail 为地面通信（Telcordia 标准）和其他恶劣环境（如 Exail 的微光学组件用于在西西里岛近海 3500 米深处运行的 KM3NeT 水下中微子望远镜）开发的精密对准技术，目前正应用于 FSO 终端和飞行载荷。

Exail 基于自由空间微光学组件的多路复用器 / 解复用器（MUX/DEMUX），是一种紧凑、高性能的解决方案，旨在减小其尺寸并在宽温度范围内保持对准稳定性。该解决方案已部署在光学地面站中，并正在作为通向 SOLiS 的 CO-OP 项目的一部分进行空间资格认证。对于 SOLiS 项目，MUX 和 DEMUX 将以集成模块的形式交付。

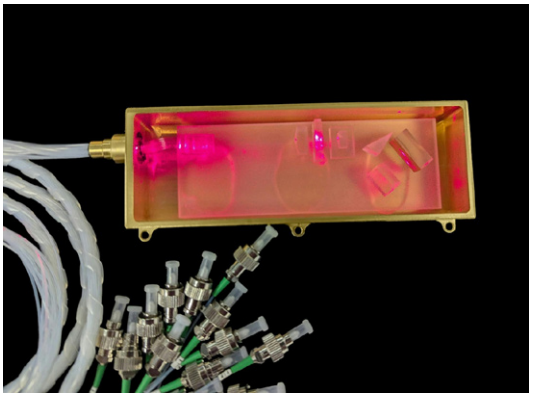


图2：基于自由空间微光学组件的解复用器（Exail 的 DEMUX），目前正在 CO-OP 项目中进行空间资格认证。（图片来源：Exail）

TELEO 项目在2024年的成功，验证了 Exail TRL9 光学组件和子系统的性能，为下一代自由空间光通信系统的开发提供了支持。Exail 的专业知识涵盖了从特种光纤制造到有源激光调制及系统集成的整个光子学链条。除了光收发器，Exail 的 ModBox-OGS 平台还为光学地面站中的参考发射机和接收机，提供了精确的调制解决方案。

以光为桥，连接地球与太空

通过在光纤技术、激光稳定性和强化集成方面的持续创新，Exail 正在为光通信系统的持续发展做出贡献。凭借其现有的高性能电光调制器和专用于量子密钥分发系统实现的自由空间微光学组件产品组合，Exail 已经为迈向“量子就绪”的互操作自由空间光链路时代做好了充分准备。❑

光学材料

光学新材料推动先进集成光子学快速发展

将薄膜铌酸锂、钛酸钡和氧化铝等新型材料平台商业化的工业级努力，正在推动下一代光子集成电路（PIC）突破硅材料的局限。

作者：Ivan Nikitski

调制器仍然是光子集成电路（PIC）上最具战略重要性的组件。根据设计不同，调制器可以控制光的振幅或相位，而相位调制器通常能实现复杂的多级编码方案。大多数器件可归为三类：简单的波导相移器、谐振环结构或马赫 - 曾德尔干涉仪（Mach-Zehnder interferometers）。每种方法都在尺寸、效率和可制造性方面存在权衡取舍。

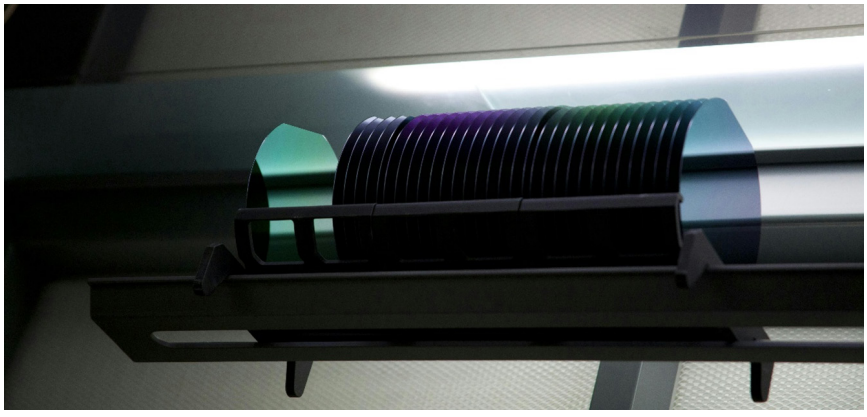


图 1：铌酸锂晶圆的加工过程。

调制的核心在于材料本身。一些器件依赖于相变材料，通过金属 - 绝缘体转变在透射态和不透明态之间切换；另一些则利用载流子调制，即通过施加电偏压注入或耗尽电荷载流子来改变材料的折射率。实现高速运行最有前景的机制是电光效应，即普克尔效应（Pockels effect）和克尔效应（Kerr effect），其中电场直接改变材料的折射率。

这一追求源于硅光子学的成熟。在过去的几年中，芯片制造商已经将单芯片上的光学元件集成度提升至超过10,000个，这将该领域推向了堪比20世纪70年代电子技术发展的规模化阶段。随着生产规模的扩大，晶圆尺寸变得至关重要。尽管150 mm晶圆服务于早期研发，但英特尔正转向200 mm平台以实现规模化制造的经济效益。近期英特尔光子部门出售给捷普（Jabil）的交易，凸显了市场正从研究规模迈向大规模生产。

调制器材料的选择

调制器材料的选择已成为决定性的竞争因素。2023 年的一篇综述文章，从性能和互补金属氧化物半导体（CMOS）兼容性两方面对候选材料进行了排名。[1] 硅仍然是最容易集成的材料，但由于依赖热效应，其功耗较高。铁电材料，如 铌酸锂（$LiNbO_3$）、钛酸钡（$BaTiO_3$）和铁电聚合物，可提供真正的电光调制，但在制造方面面临挑战。铌酸锂具有出色的带宽和低损耗，但器件体积较大，且锂污染对硅晶圆厂来说也是个棘手的问题。钛酸钡有望实现创纪录的高调制效率，但其仍处于开发阶段。聚合物灵活且速度快，但在 80°C 以上会降解，必须进行密闭封装。

尽管目前铌酸锂调制器的市场规模不大，但增长迅速。预计到2033年，铌酸锂调制器的市场规模将达到12亿美元，[2] 年增长率超过40%。这一激增反映了传统硅基解决方案的局限性。基于热光效应或等离子体色散效应的硅调制器虽然可靠，但速度慢且功耗高。数据中心流量、人工智能（AI）工作负载和下一代光互连，都要求器件兼具低驱动电压（$V\pi < 3.5$ V）、最小损耗和延伸至数十 GHz 的带宽。硅材料难以达到这些目标。

这正是铌酸锂和钛酸钡脱颖而出的地方。铌酸锂的 r33 系数（约

35 pm/V）支持太赫兹级性能，而钛酸钡巨大的系数（体材料中约1300 pm/V）能在短距离内实现强调制。后者的效应主要源于光学声子和应变贡献，使其即使在低温下也具有高效率。与硅的集成通常需要引入钛酸锶（$SrTiO_3$）缓冲层来管理晶格失配，并通过分子束外延（MBE）或溅射实现沉积。近期的演示显示，单晶钛酸钡薄膜在200 mm 和300 mm 晶圆上具有出色的均匀性，其普克尔系数接近1000 pm/ V 。

行业进展

器件性能正在快速提升。学术界和工业界的研究小组已经报道了基于钛酸钡的环形谐振器和马赫 - 曾德尔干涉仪，其光学品质因子高达100万，传播损耗低至0.14 dB/cm 。这可与成熟的铌酸锂技术相媲美，且无需晶圆级极化处理。随着这些薄膜从实验室原型过渡到晶圆厂就绪的平台，钛酸钡成为少数能同时实现高速、高效和 CMOS 兼容性的材料之一。

调制器的前景类似于早期晶体管，存在多种竞争材料。铌酸锂可能主导高性能电信和数据中心链路。钛酸钡可能在紧凑、节能的片上应用中领先。硅对于协同集成和低成本规模化仍然至关重要。那些掌握了这些材料（在200 mm 及更大尺寸晶圆上）异质集成的公司，将定义大规模光子集成的下一个时代。

La Luce Cristallina公司

美国德克萨斯州初创公司 La Luce Cristallina（La Luce）率先将钛酸钡（BTO）与硅集成，这为电光技术开启了新纪元。该公司建立在摩托罗拉实验室数十年的研究积累，当初科学家们探索了钙钛矿集成用于先进晶体管栅极堆叠。

2023 年，La Luce 公司通过提供 2 英寸 BTO-on-Si（硅基钛酸钡）和 BTO-on-SOI（绝缘体上硅基钛酸钡）产品，成为全球首家硅集成 BTO 晶圆供应商。该公司还启动了 8 英寸晶圆厂建设，预计2026年第一季度开始初步生产。BTO 卓越的电光特性（在硅基薄膜中高达900 pm/V），结合低波导损耗（约0.1 dB/cm）、CMOS 兼容性和300 GHz 的工作频率，使其成为马赫 - 曾德尔干涉仪、环形谐振器、激光雷达（LiDAR）和光计算的理想平台。

尽管 BTO 前景广阔，但广泛采用仍面临挑战，特别是缺乏晶圆厂就绪的工艺和光子设计套件（PDK）。La Luce 正积极与晶圆厂和设备制造商合作以弥合这一差距，将 BTO-on-Si 定位为下一代光子学的基石。

CCraft公司

瑞士初创公司 CCraft 从瑞士电子和微技术中心（CSEM）分拆而来，该公司正崛起为首批专注于薄膜铌酸

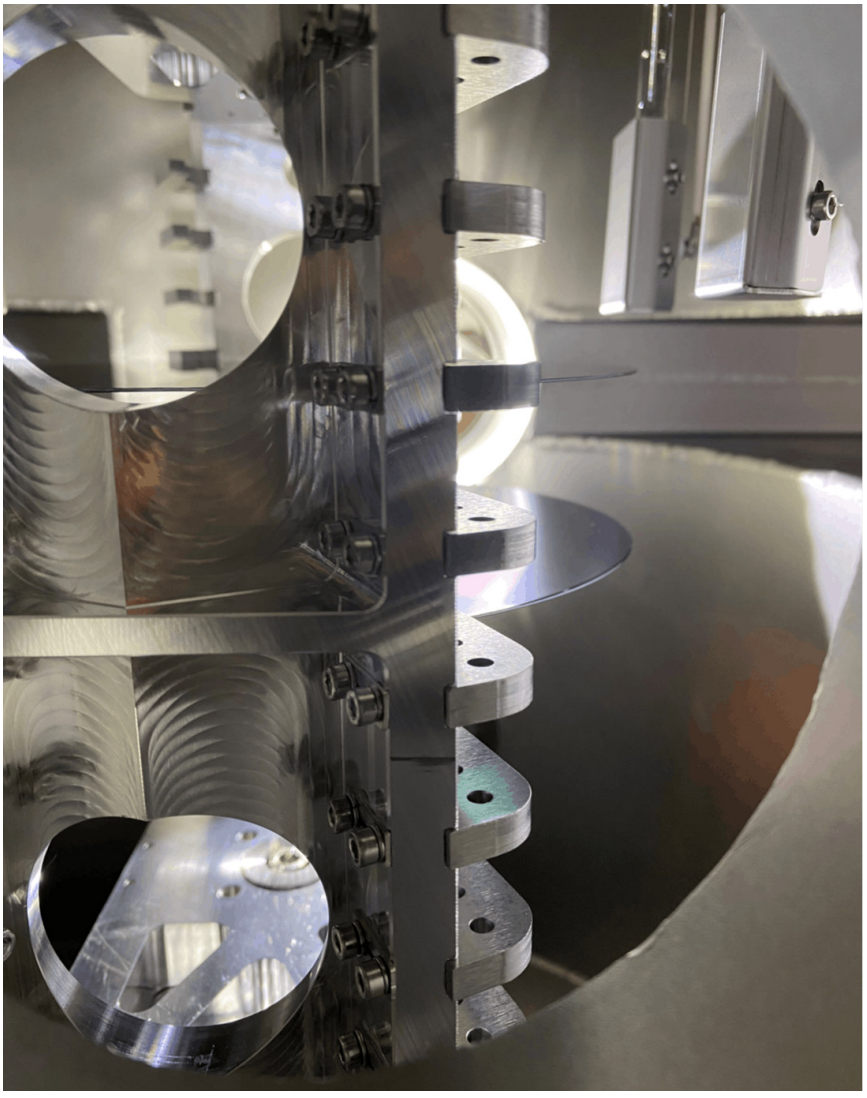


图2：BTO 沉积系统负载腔内的 SOI 晶圆。

锂（TFLN）光子芯片的晶圆厂之一。CCraft 拥有自己的设施，使其能完全控制工艺配方，这对于保护知识产权和在快速发展的领域中确保灵活性至关重要。

在 CSEM 进行的四年预商业合作期间，CCraft 深入了解了数据通信、电信、航天和量子应用领域的客户需求后，所得出的结论是：没有任何单一材料能满足所有光子功能，但对于超快调制和频率转换，铌酸锂无与伦比。迄今为止，市场上缺乏能够提供工业界所需的可靠性和产量的商用薄膜铌酸锂器件代工厂 CCraft 旨在填补这一空白。

CCraft 在纳沙泰尔（Neuchâtel）获得认证的一家晶圆厂运营，并正在该地区扩建更大的场地。该公司正在构建一个工业级 TFLN 平台，目标是在四年内实现每年高达20,000片（200 mm）晶圆的产能。

CCraft 还满足了对混合集成不断增长的需求。其高良率工艺生产的晶圆上可包含多达10,000个 TFLN 小芯片，用于微转移印刷到硅光子学器件上，以支持异质集成和键合芯片的后端处理。这种灵活性使该公司成为关键供应商，能够增强那些难以满足下一代带宽和效率要求的硅光子学平台。

Aluvia Photonics公司

Aluvia Photonics 公司成立于2022年，是特温特大学（University of Twente）的衍生公司，它正开创基于氧化铝（Al_2O_3）的光子集成电路，这种材料有望填补光子学频谱中最后一个主要空白。

与磷化铟、硅或氮化硅（Si_3N_4）平台不同，氧化铝提供了异常宽的透明窗口，从深紫外（约200 nm）延伸至中红外。它特别适用于紫外（UV）光子学，这是现有材料的短板领域。Aluvia Photonics 公司已经展示了在电信波段的传播损耗低至1~5 dB/m，在405 nm 处约为1 dB/ cm，这为低损耗紫外操作设定了新基准。

除了透明性，氧化铝还可以掺杂稀土离子以实现有源功能。掺铒器件已实现约25 dB 的光纤到光纤净增益、50 mW 的输出功率和6 dB 的噪声系数——这些指标与掺铒光纤放大器相当，但体积和成本仅为其一小部分。掺铥器件已产生瓦级连续波输出和高峰值功率脉冲放大。该平台还具有高线性度和功率处理能力，非常适合要求信号保真度的数据中心和电信系统。

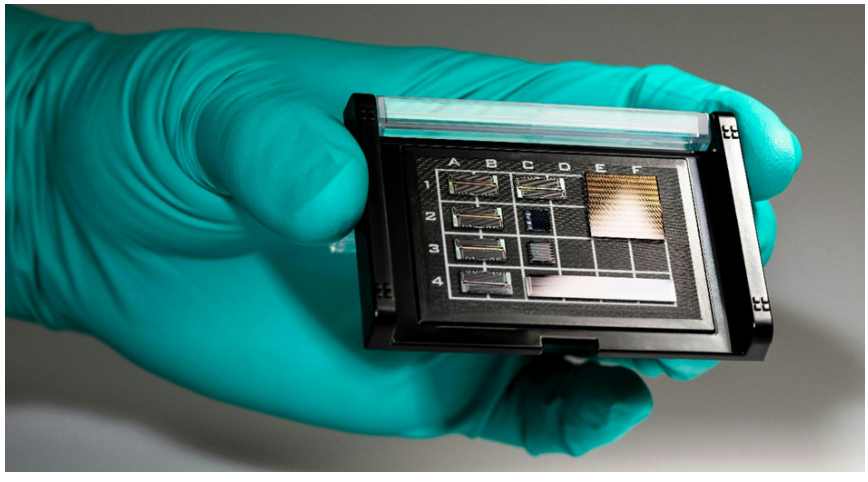


图3：CCraft 公司生产的铌酸锂 PIC 芯片。

Aluvia Photonics 与 CMOS 工艺兼容的氧化铝平台，将半导体放大器的紧凑性与光纤系统的性能相结合。通过将集成光子学扩展到紫外领域并提供有源、可扩展的解决方案，该公司已准备好重新定义下一代光子集成电路的材料基础。

SCIA Systems公司

总部位于德国的 SCIA Systems 公司，为先进的微米和纳米技术制造薄膜工艺设备，并正将其在离子束和等离子体技术方面的专业知识应用于 PIC 。

对于光子学制造，晶圆级性能关键取决于薄膜厚度均匀性和结构精度。SCIA Systems 通过两种互补工艺解决了这两个问题：离子束修整和反应离子束蚀刻。离子束修整能够对200 mm 晶圆上的薄膜厚度进行亚纳米级校正，将几纳米的变化减少到仅0.1 nm 的均方根（RMS）粗糙度。

为了优化波导几何形状，SCIA 使用反应离子束蚀刻。聚焦离子束能以超过 75° 的侧壁角度和亚纳米级粗糙度清晰地雕刻特征。该工艺避免了再沉积和损伤，即使在处理敏感光刻胶或复杂多层堆叠时也是如此。

SCIA Systems 为铌酸锂、氮化铝（AlN）和氧化铝等材料中的高性能波导提供了所需的精确控制。其离子束技术提供了集成光子学规模化工业生产所必需的均匀性、结构保真度和良率，这使其成为光子学制造价值链中的关键推动者。

Leybold Optics公司

随着 PIC 向更大晶圆尺寸和更严格的性能公差迈进，Leybold Optics 公司提供了连接光学和半导体制造的

精密表面处理。该公司的离子束修整（IBT）和磁控溅射技术，能在氮化硅、铌酸锂和氧化铝平台上实现超均匀、低损耗的光子层。

Leybold Optics 的200 mm 和300 mm 系统，是对传统化学机械抛光（CMP）的补充，执行定义器件良率的最终平坦化步骤。离子束修整将总厚度变化减少到小于 5 nm，微粗糙度从0.5 nm 降至0.2 nm，以确保整个晶圆上光学特性的一致性。

Leybold Optics 的磁控溅射工具沉积无氢氮化硅层，这对于1.55 μm 处的低损耗波导至关重要，且与半导体级温度限制兼容。该公司与光子生态系统中的合作伙伴合作，对这些工艺进行大规模生产认证。

Leybold Optics 通过提供将创新材料转化为可制造光子器件所需的表面精度，完成了价值链中的关键一环。

该公司认识到大多数材料平台缺乏原生激光能力，因此开发了带有外部增益段的混合激光模块，可适配多种技术平台，包括硅光子学、氮化硅和氧化铝（氧化铝平台是与 Aluvia Photonics 合作实现的）。这些混合光源可作为独立评估模块进行测试，或与晶圆厂制造的电路结合，为设计人员提供了在投入完整晶圆生产前验证性能的实用途径。

通过将多平台设计专业知识与即插即用的激光解决方案相结合，该公司填补了 PIC 生态系统中最后一个功能空白，并补充了 CCraft、SCIA Systems、Aluvia 和 Leybold Optics 在制造方面的进展，使光子集成更接近工业成熟度。

结论

PIC 领域正在经历一场深刻的变革，逐步突破硅材料的局限。薄膜铌酸锂、钛酸钡和氧化铝等专用材料的兴起，正在速度、能效和工作频谱方面实现前所未有的性能。这场材料革命，在精密制造和跨平台设计进展的支持下，正在打造一个全新的、异构生态系统。随着这些技术在更大尺寸晶圆上成熟并实现规模化，它们正共同推动集成光子学从专业研究领域，迈入工业化规模生产和商业成功的新时代。❑

上接第11页

硅光子学产业聚焦技术创新

硅光子产业生态已呈现出多元化格局，涵盖四类核心参与主体：深度布局硅光子学领域的垂直整合型龙头企业、专注技术突破的初创公司与设计厂商、光器件核心供应商（光源厂商），以及提供制造支撑的晶圆代工厂。

众多初创企业深耕硅光子技术研发，致力于为市场带来创新产品，其研发方向主要集中于高速光收发模块、CPO 用光引擎及激光雷达（LiDAR）系统等细分领域。晶圆代工厂则是硅光子技术创新的基石合作伙伴，通过提供晶圆制造能力、工艺开发支持与量产商业化服务，助力企业实现硅光子技术在多元应用场景的规模化落地。

中国企业加速追赶，缩小技术差距

中国在硅光子技术领域正快速崛起，致力于跻身全球领先行列。借助政策扶持与资金投入，中国企业正聚焦自主创新，推动高速光通信解决方案的量产能力，逐步缩短与西方企业的技术差距，在全球硅光子市场中占据重要的一席之地。

尽管仍有部分技术瓶颈亟待突破，但中国本土企业已具备完备的技术研发能力，正全力攻关高速硅光子解决方案，加速实现技术赶超。

市场预测：未来增长潜力巨大

随着数据中心运营商对单位功耗带宽与总拥有成本（TCO）的要求日益严苛，各类光学技术平台——磷化铟 / 薄膜铌酸锂 / 钛酸钡 - 硅基集成平台、传统分立激光器（VCSEL 与 EML）、绝缘体上铌酸锂（LNOI）光子集成平台及磷化铟光子集成平台之间的竞争将日趋激烈。

可插拔模块，无论是强度调制 - 直接检测（IM-DD）型还是简版相干型，都将持续在速率、集成度与功耗效率上实现突破。与此同时，CPO 技术需要在性能稳定性与部署便捷性上充分验证，才有望在主流系统中取代可插拔光模块。未来五年，将是决定哪一种材料平台能在成本、功耗与性能之间取得最优平衡的关键窗口期。

2024年，硅基 PIC（芯片）的市场规模为4.04亿美元，预计2024-2030 年，该市场将以31% 的年复合增长率持续扩张，到2030年将突破21亿美元。高速率可插拔光模块是驱动这一增长的核心动力，其市场需求源于光纤网络容量提升的迫切需求。此外，随着 AI 训练数据集规模的飞速增长，机器学习服务器需要依托光输入输出（光 I/O）技术实现算力扩展，这也将进一步打开硅光子技术的市场空间。❑

光子计算

光子计算显著提升 AI 硬件的运算速度

一种可实现光速级运算的单次光传输张量计算技术，为下一代光子计算 AI 硬件的研发开辟了新路径。

作者：Sally Cole Johnson

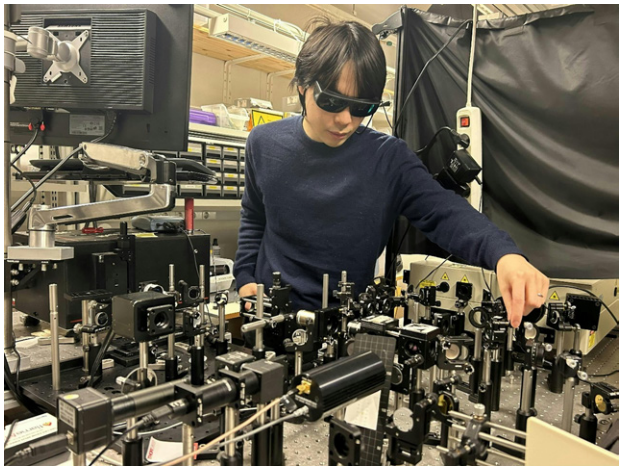


图 1：该团队在实验室搭建的实验装置。（图片来源：Yufeng Zhang）

圆级性能关键取决于薄膜厚度均匀性从图像识别到自然语言处理，人工智能（AI）的各类应用都依赖于张量运算，即复杂的数学计算。最近，由芬兰阿尔托大学（Aalto University）电子与纳米工程系 Yufeng Zhang 教授带领的光子学研究团队，提出了一种通过单次光传输实现单次张量计算方法，以大幅提升 AI 运算速度。

与传统电子电路不同，光的物理特性能够支持多组计算任务同步进行，且运算速度可达到光速级。

“光子计算是一个新兴领域，受到前人研究的启发，我开始投身这一方向。”Yufeng Zhang 表示，“但在以往的多数相关实验中，光子计算的并行度仍低于图形处理器（GPU）这类电子硬件，而并行矩阵 - 矩阵乘法运算正是 GPU 的核心优势所在。这种性能差距，导致多数光子计算系统难以真正满足通用 AI 的计算需求。”

2023 年夏天，Zhang 开始思考：是否有可能在单次光传播中实现矩阵 - 矩阵乘法甚至张量 - 矩阵乘法？“有一天，我在阅读 Joe Goodman 教授的《傅里叶光学导论》时，看到了早期的基于空间光学的向量 - 矩阵乘法器‘斯坦福方法’。

这让我产生了一个疑问：为什么二维光场只能用来编码一维向量？这个问题，成为了我们研究工作的起点。”

该团队工作的核心概念源于波动光学，特别是光学傅里叶变换的特性（见图 2）。

那么，该团队的技术究竟是如何实现的呢？ Yufeng Zhang 解释道：“我们将输入矩阵 A 直接编码到光场的空间振幅中。利用空间域与空间频率域之间的相位 - 位置对偶性，我们为矩阵 A 的每一行都赋予了独特的线性相位梯度。通过光学傅里叶变换与成像技术的结合，所有编码行对应的光场在空间中实现了融合。”

在这个融合后的光场中，“矩阵 A 的每个行向量都能与矩阵 B 的每个列向量并行完成点积运算。”Yufeng Zhang 说，“线性相位编码相当于一个‘位置标记’，它能确保每一组运算结果都精准呈现在输出矩阵的对应位置上——而整个过程，仅需一次光传输即可完成。”

由于线性相位对不同波长的光调制效果存在差异，研究团队借助多波长复用技术，将这项技术从矩阵 - 矩阵乘法运算拓展到了张量 - 矩阵乘法运算的范畴。

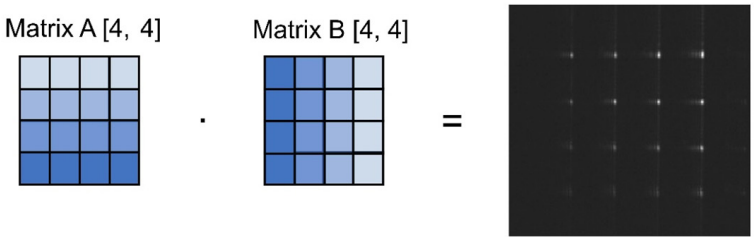


图 2：本研究的技术流程与核心原理。（图片来源：Yufeng Zhang）

研究中的“顿悟时刻”

Yufeng Zhang 坦言，研究过程中有两个瞬间令他印象深刻。“第一个时刻发生在2023年冬天。在耗时三个月组装、校准完第一套原型系统后，我用两个简单的4×4矩阵进行了测试。”他回忆道，“当探测器上出现16个清晰可辨的光斑（见图3）、且光斑分布与预期输出完全吻合时，我激动不已。这是首个明确的信号，证明我们的方法切实可行。尽管这组数据最终没有出现在论文中，但它始终是我个人最珍视的研究成果。”

另一个“顿悟时刻”则出现在2024年夏天。“我当时在思考，能否将标准神经网络的权重参数直接应用于光子张量处理器中？”Yufeng Zhang 回忆道。传统光子神经网络的设计，是基于光传输的物理特性，这与标准神经网络的结构并不一致。为了验证这一设想的可行性，研究团队通过数值模拟构建了一个理想化的系统模型，并将未经修改的传统卷积神经网络权重参数直接植入其中。令他意外的是，该系统的推理精度与数字模型几乎完全一致。这一结果让研究团队确信，只要攻克相关工程技术难题，他们提出的方法就有望真正推动下一代计算技术的发展。

研究过程中，数值模拟也发挥了重要作用。“由于我们的研究本质上是一种方法学创新，因此我们开展了大量的模拟实验，既用于验证计算方法本身的有效性，也用于演示该方法在光子神经网络中的应用潜力。”Yufeng Zhang 表示，“这些模拟结果是本研究不可或缺的组成部分，它们不仅证实了方法的可靠性，也揭示了技术目前存在的局限性。”

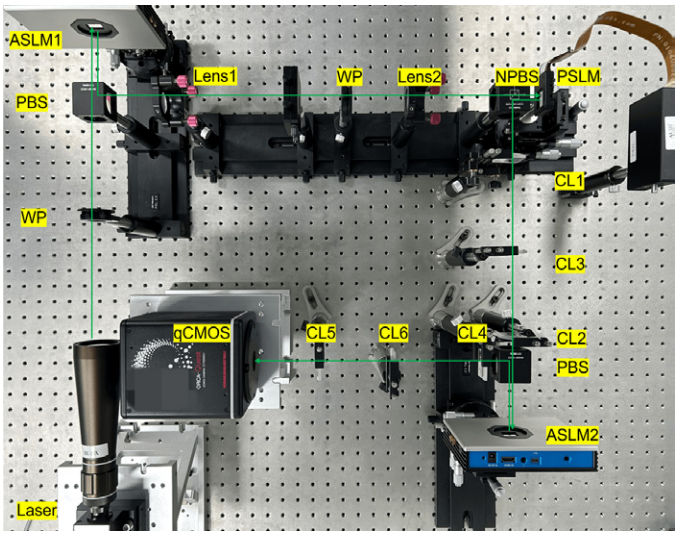


图4：初始实验装置。（图片来源：Yufeng Zhang）

系统对准与校准挑战

这项工作涉及两大挑战。“首先是系统对准。在空间光调制器之间实现像素级对准极其困难，”Yufeng Zhang 说，“为了解决这个问题，我开发了一种像素级校准技术，我们将其收录在最近发表在《自然· 光子学》上的论文的补充信息中，希望能帮助面临类似对准任务的其他研究人员。”

第二个挑战是实验装置本身（见图4）。因为它是一个“实验室规模的光学系统，噪声和环境干扰使其难以达到理论预测的精度，”Yufeng Zhang 说，“我们进行了广泛的校准和优化，虽然性能并不完美，但足以验证我们的方法。”

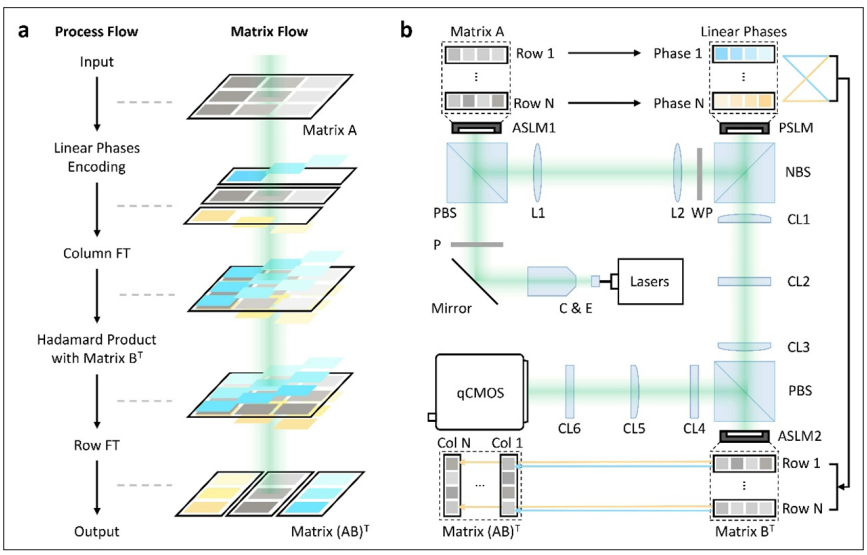


图3：该团队取得的首批实验结果。（图片来源：Yufeng Zhang）

未来并行计算的发展方向

该团队的研究成果，显著提升了通用光子计算的并行运算水平。这项技术未来的应用场景十分广阔，既可以作为神经网络的高效计算平台，也有望与下一代光子器件结合，应用于量子模拟领域。

谈及技术的实际落地时间，Yufeng Zhang 表示：“这需要高速光电接口与核心器件的支撑，同时还需实现集成光子学平台的应用转化。这些方向，正是我们团队下一步的研究重点。”❑

封面故事 Cover Story

增材制造

快速定制增材制造设备控制系统

本文介绍了由 SCANLAB与Autodesk联合开发的Autodesk Machine Control Framework（AMCF），即面向激光粉末床熔融（LPBF）的类操作系统中间件层。

作者：Daniel Reitemeyer，Huihong Qian；SCANLAB GmbH
Alexander Oster；Autodesk Inc

激光制造属于典型的“数字驱动型”现代生产模式：能量输入（功率、脉宽、频率、占空比等）可以通过软件化配置；运动轨迹可以计算生成；工艺窗口依赖高频传感与监测数据进行闭环迭代。在越来越多的行业场景中，激光工艺已经成为关键的核心能力，并持续创造可观的商业价值，尤其是在微孔加工与精密加工、焊接、表面改性与纹理、消费品加工以及电池制造等关键应用领域。

本文介绍通过使用经过验证的现成硬件和软件组件，如 AMCF（SCANLAB 与 Autodesk 联合开发的 Autodesk Machine Control Framework，即面向激光粉末床熔融的类操作系统中间件层，简称 AMCF），OEM 制造商和系统集成商们现在有机会在这个领域加快产品上市速度，并将研发费用降低 90%，提升竞争优势。

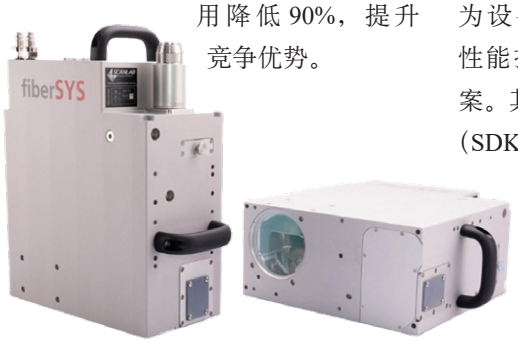


图 1：SCANLAB fiberSYS：用于增材制造的三维激光扫描振镜。

激光技术催生现代增材制造产业

高端激光工艺依赖于能兼顾精度和产能而优化的高速、精确可控的光束。在工业增材制造领域，主流路线是激光粉末床熔融（LPBF）工艺：通过振镜扫描与光束精准控制，把能量“只投递到需要熔融的区域”，来实现逐层成形。

LPBF 是完全数字化的加工过程，其能量分布直接决定熔池行为，从而影响微观组织形成、孔隙缺陷、残余应力场，这些因素最终会映射到零件成品的各项机械性能。对激光和材料相互作用的掌控，意味着工程师不仅能在构建过程中动态调参来“塑造性能”，还能在同一零件内部做局部性能调制，如局部强化、局部减应力、局部表面质量提升等。

一直以来，SCANLAB 致力于为设备集成商与整机 OEM 提供高性能扫描振镜以及实时控制解决方案。其硬件与配套的软件开发工具包（SDKs）在光束投递和同步控制下，能提供极高的打印精度和粒度的控制。

在软件工具端，Autodesk 作为全球领先的 CAD/CAM 与制造软件厂商，覆盖从设计、工程到制造与工厂运营的全流程。Autodesk Fusion 的优势在于 CAD 内数据准备、过程仿真与路径生成的一体化能力，使“制造意图与元数据”能够在同一环境中从设计端贯通到 CAM 端（见图2）。

但长期以来，行业真正缺少的是流程两端之间的“结缔组织”：一个能够阐释路径，协调设备中激光 / 振镜 / 传感 / PLC 等子系统，并让闭环控制在量产规模下真正可用的生产级中间件（middleware）。

激光制造中的集成鸿沟

现代 LPBF 设备越来越多采用标准化的最佳子系统：激光器、光学原件、光束传输、扫描振镜、传感器、以及 PLC 驱动的外围设备（见图3）。对设备开发者而言是一个好消息，这意味着硬件能够像组件一样更快的拼装起来。

迄今为止，市场上还不存在一个可以直接覆盖“从 CAD 几何到镜片运动”的全栈通用软件组件。更关键的是，把 CAM 输出连接到真实硬件绝不是简单的“发送矢量”——一台量产设备必须具备确定性状态过渡、安全互锁、与 PLC 的协同编排、用户管理、全量数据记录、错误传播，

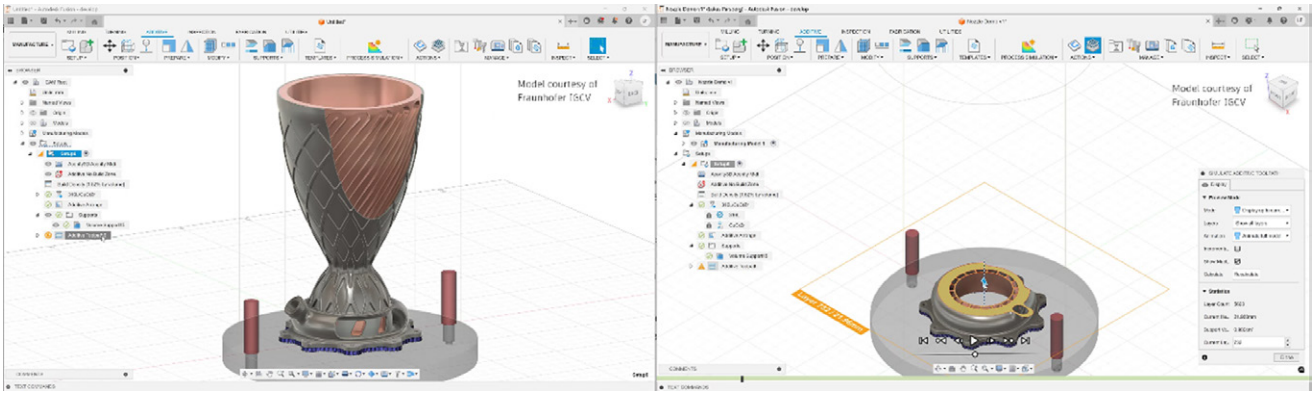


图2：Autodesk Fusion：用于增材制造的集成式 CAD/CAM 。

以及一整套扫描器 / 激光器 / 传感器 / 监测设备的驱动体系。

从零开始构建这些行业标配的系统，一般要消耗大量高技能工程资源，也往往以牺牲真正形成竞争优势的差异化功能为代价。

此外，激光控制系统通常以远高于通用 PLC 的频率运行，这决定了它必须采用不同于传统设备控制的体系结构。这会给首次开发设备控制软件的集成商带来困难；早期架构一旦走偏，后续返工与维护成本往往成倍放大。

Autodesk 与 SCANLAB 为何要构建 AMCF

AMCF 是一个开源的中间件，也是设备控制架构，旨在将 CAD/CAM 软件与设备硬件直接集成为一个面向量产、紧密结合的闭环系统（见图4）。

AMCF 针对激光增材（尤其 LPBF）做了专门设计，并给出执行范例：结合使用 SCANLAB 硬件与驱动，将 Autodesk Fusion 的工作流程与 LPBF 设备执行紧密耦合。该项目基于增材制造行业数十年的经验积累，并已经在学术界与工业界部署的数十种不同机型中得到验证。

理解 AMCF 的一个直观类比是“手机操作系统”：OS 提供通用服务，抽象层与底层管道，让应用与产品团队把精力用于创新，而不是重复搭建基础设施。AMCF 将这种思路引入设备控制领域，显著降低重复工程投入，让许多集成任务从“按月计”缩短到“按天计”。

此外，作为首个实现增材制造端到端集成的现成项目，SCANLAB 在其前沿控制产品上投入大力开发（见图5），其中包含：



图3：标准化的工业增材系统配置。

- SCANahead：一种独特的跳跃加速方法，充分利用振镜的机械性能，将激光关闭时间减少高达 90% 。
- SCANmotionControl：基于物理的路径规划算法，能够在微秒级别精确控制光束行为。
- Open Interface Extension：一种将现场测量通道（如高温计）与振镜扫描位置同步的标准化机制。

任何 AMCF 执行者都可以使用这些技术，无需额外的执行工作——任何启用这些技术的机器都有望在市场上脱颖而出，同时又符合行业的一般基准状态。

设计即开放——并对OEM知识产权安全

设备控制软件通常被视作企业最核心的知识资产之一，因此 OEM 往往倾向于全部自研。AMCF 针对这一现实选择了 BSD-3-Clause 开源许可：OEM 可以在保留全部自有代码与专有扩展所有权的同时，使用 AMCF 作为公共基础设施而不受限制。

AMCF 框架基于 Linux 基金旗下3MF 联盟的开放标准，以3MF 路径文件作为原生输入格式，把构建参

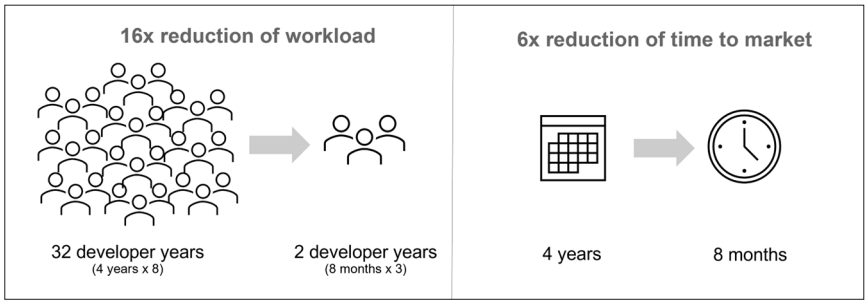


图4：AMCF 将 CAD/CAM 软件与设备硬件直接集成到一个可直接用于生产的、紧密结合的闭环系统中，从而减少了工作量并缩短了产品上市时间。

数与制造元数据以标准方式从 CAD/CAM 端传递至硬件执行端。这种开放、模块化的基础，有效促进生态协作与长期可持续性，而自由许可又能保护执行方的工艺 IP 与对业务关键的 know-how 。框架明确鼓励专有与商业衍生版本。

架构概览

AMCF 的核心架构采用现代 Client-Server 设计与 API-first 设计理念：

- 无外设设备服务器（Headless Server）：核心功能在设备集成服务器上运行，确保确定性与稳定性；
- 基于 REST 的通信：客户端通过标准 REST API 与上层系统交互，并以 OpenAPI 3.0 文档化，确保与 MES 及工厂自动化平台兼容；
- 基于插件的可扩展性：牢固的插件机制将通用框架服务（如数据管理、用户认证、硬件通信）与机型特定功能分离。这样可将最终机床软件限制在易维护的数千行代码范围，显著提升研发效率；
- 轻量数据库后端：基于 SQLite 的紧凑后端保证数据一致性、持久化与版本兼容；
- 轻量数据库（SQLite）：保障数据一致性、持久化与版本间兼容；
- 有限状态机（FSM）工作流程：框架强制采用清晰、可视化的有限状态机来组织来操作设备，提高机械、工艺、软件团队以及操作员之间的协同清晰度。

该架构强调关注点分离：通用框架代码与特定于机器的执行保持独立，从而简化升级、测试与长期维护。由于 AMCF 是由群体驱动且由 Autodesk 与 SCANLAB 等知名公司赞助，任何 AMCF 设备无需额外研发投入即可持续获得改进。

PLC与实时协同

在典型 LPBF 配置中，AMCF 直接与基础机的 PLC（可编程逻辑控制器）对接。PLC 负责传统设备功能——安全、气层控制、粉末处理、运动控制，而 AMCF 负责激光与振镜子系统的高频协同与实时数据交换。



图5：SCANLAB 前沿控制产品。

这种混合式方案使传统设备制造商的工程经验与现代软件驱动的过程控制能够共存，弥合工业可靠性和数字化灵活性之间的差距。

数据粒度与可扩展性

AMCF 数据模型支持多层级元数据挂接——可在构建（build）、零件（part）、风格（style）、填充（hatch）、子填充（sub-hatch），甚至子矢量（sub-vector）层级。这意味着监测与控制可以在各应用所需的分辨率上实现。

系统设计目标支持单次构建产生 GB 级数据，并支持设备连续运行数周不间断。集成的日志与信号处理基础设施以微秒级精度记录每一次变量变化、事件与异常，并可回放用于分析。

闭环控制的实际落地

激光增材的关键优势之一是：可实现多尺度反馈控制。AMCF 为这些反馈回路提供统一架构与同步机制（见图6）：

1.逐件（离线）回路——工艺优化：

全面的数据记录可重建任一构建过程；过程数据可与原始 CAD 几何建立关联，并回馈至 Autodesk Fusion 用于参数优化，从而提升后续构建结果。

2.逐层回路——热补偿：

每沉积一层后，对上一层数据进行分析以识别过热区域；随后在这些

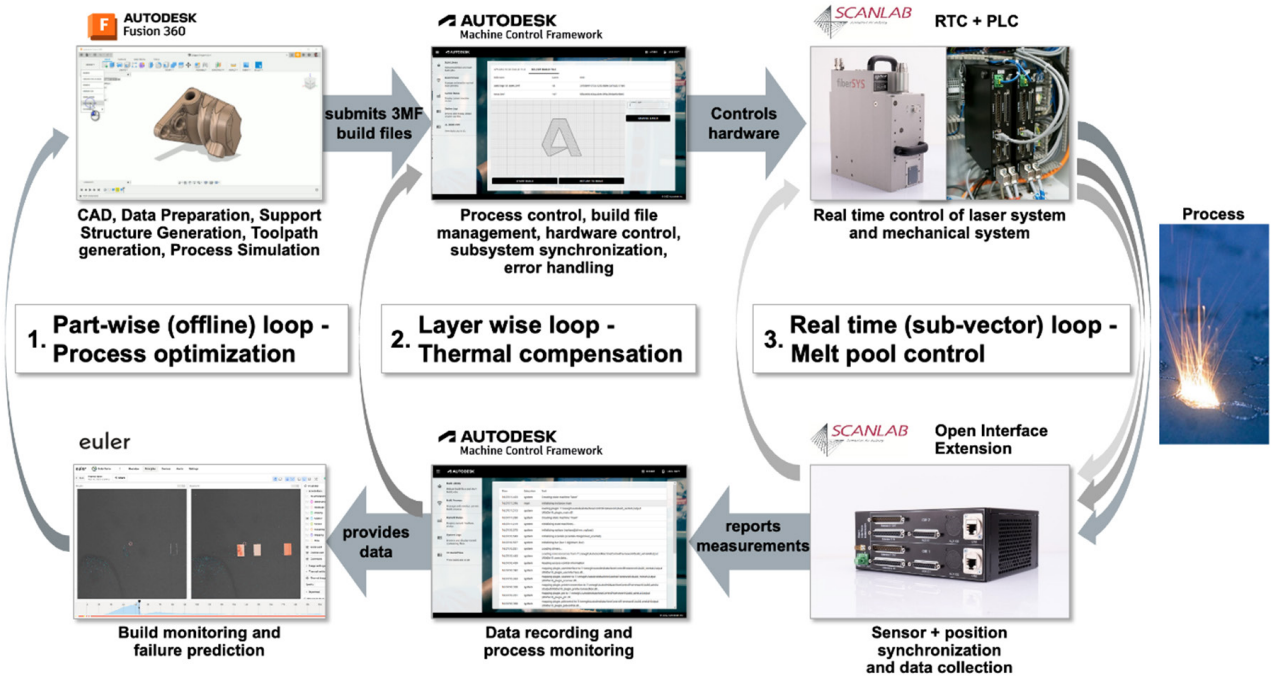


图 6：数据流和上述三个控制回路，都在同一个 AMCF 架构中。

区域自适应降低激光功率，稳定加工过程并避免缺陷。

3. 实时（子矢量）回路——熔池控制：

使用 SCANLAB 的 Open Interface Extension（OIE），利用高温计或其他同轴传感器来监测熔池温度；PID 控制器实时调节激光功率，以稳定热输入。

AMCF 的分阶段且可记录的信号系统，使这些并行反馈系统变得可管理且透明；其插件生态也支持与第三方方案紧密集成，如 Euler3D（AI 驱动的构建监测与失效预测）。

HMI：人机界面

AMCF 包含可配置、基于组件（widget）的 HMI，可从后端直接组装，无需 Web 开发经验。界面遵循现代设计原则，支持企业品牌定制、快速配置与安全的多用户访问。

这种方式可降低开发开销，同时为操作员提供熟悉、响应迅速且视觉一致的操作环境。

为设备开发者带来的实际收益

- 开发提速：将初始软件实现周期从“数年降至数月”，并将所需团队从大型、多技能软件团队缩减为少数技术专家。
- 降低维护成本：通过稳定 API 与清晰插件，实现升级与集成。
- 供应商独立：开放架构减少供应商锁定风险，同时保留完整 IP 所有权；
- 量产就绪：确定性执行与完善错误处理，使其从一开始就适配工业现场；
- 面向未来：API-first 与模块化结构天然支持数字孪生、AI 监测、分布式制造等未来技术接入。

总结

AMCF 是一个开源、面向量产的中间件，将 CAD/CAM 软件直接连接到设备硬件，形成统一、连贯的闭环系统。它提供实时控制、状态管理、监测与 UI 集成的“即用型基础”，使设备制造商把工程资源集中在真正决定竞争力的部分：工艺创新、材料体系与设备结构设计，而不是从零搭建基础设施。

在 SCANLAB 高性能振镜与专用驱动的支撑下，AMCF 展示了如何把精密扫描、位置同步监测与分层反馈回路统一在同一架构中，构建更智能、更可靠、更自适应的激光增材系统。

建立可长期演进的软件栈，通常并非设备制造商的核心强项，而 AMCF 将大型软件平台的工程严谨性、可扩展性与开放协作模式带入激光制造领域。正如 Android 加速了移动通讯的生态系统，AMCF 也在推动设备行业更快开发、更快创新，并保持对自身工艺 IP 的完全掌控。

您可通过项目入口，开始构建您的设备控制软件：

Project page: autodesk.github.io/AutodeskMachineControlFramework

GitHub repository: github.com/Autodesk/AutodeskMachineControlFramework 。❑

激光加工

先进制造工艺助力微电极阵列规模化生产

现代运动控制系统、精密运动平台与五轴旋进激光扫描器的组合，为实现微电极阵列规模化生产提供了新工具。

作者：Eric Belski，Travis Schneider；Aerotech公司

微电极阵列（MEA）的应用场景覆盖多个行业，包括用于紧凑型精密传感器的微机电系统（MEMS）、半导体芯片的测试设备，以及诸如电池或燃料电池技术等能量存储解决方案。值得注意的是，微电极阵列（在各种医疗应用中也扮演着关键角色，例如用于心脏电生理学的植入式传感器、用于药物输送和皮肤感测的微针，以及脑机接口（BCI）设备。

微电极阵列属于一个细分市场，但市场需求正迎来大幅增长。仅美国地区潜在的脑机接口市场规模，预计到 2045 年将达到 4000 亿美元。这一快速扩张的市场，再加上其他众多新兴应用场景，凸显出了微米级、高深宽比特征的巨大应用潜力——前提是能够解决当前的制造挑战，以推动技术向前发展。

实现微电极阵列生产的自动化，对于实现这些先进设备所需要的精度、一致性和特征尺寸至关重要。目前主流的制造方法以光刻工艺为主，虽然能够达到一定的精度，但存在耗时长、成本高的问题。而且，光刻技术往往需要依赖后续的切割工艺或整体机械加工，这不仅限制了器件设计的灵活性，还可能影响器件的性能。

突破现有制造技术的限制，是释放微电极阵列全部应用潜力的关键。先进的激光微加工和自动化装配技术等新兴方法，有望提升微电极阵列生产效率，并拓展设计自由度。随着这些技术的不断成熟，微电极阵列将在保持高精度的同时实现规模化生产，进而推动其在医疗、电子、储能等领域的广泛应用。

微电极阵列的制造挑战

制造微电极阵列面临几个独特挑战。以植入式脑机接口为例，这类器件需要采用具备生物相容性的材料以保障稳定的电学性能，这就将基材的选择范围限定在了少数特种材料中。同时，这些电极还需要极小的有效直径和非常精细的锥形尖端，以最大限度地减少插入过程中的组织损伤，但又必须足够大以保持机械完整性。为了兼顾这两点，电极通常需要设计成数百微米长的高长径比结构，才能精准抵达目标脑区。

确保植入式医疗器械所需的质量和一致性，进一步使生产复杂化。OEM 通常依赖于复杂的光刻或电子束光刻等微加工技术，从硅基针尖上精确生长阵列。

这些过程通常涉及多个步骤，包括划片、蚀刻、金属化、沉积、绝缘和去绝缘等多道工序，才能得到符合要求的电极结构与性能。即便不考虑为保障性能可靠性而额外增加的工序，仅从上述简化流程也能看出微电极阵列制造工艺的复杂性。

尽管这类微加工技术具备高精度优势，但也存在明显局限性。电极长度会受整体机械加工与划片工艺的实际条件限制。随着器件结构尺寸的缩小，划片过程中产生的机械应力会随之增大，极易引发产品质量问题，对于高长径比结构的影响尤为显著。

此外，切割工序要求在工件整个宽度范围内保持一致的切割深度。后续的研磨工艺虽然能加工出倾斜或复杂的轮廓，但必须在工件表面进行平面或对称加工，这就需要增加额外的蚀刻工序来实现电极尖端的成型，这进一步增加了制造流程的复杂度与工序数量。其他类型的探针或电极技术，虽然能在一定程度上突破这些限制，但往往需要以牺牲通道数量、分辨率或增加成本为代价。

微电极阵列的激光加工

先进的激光微加工技术为解决上述问题提供了极具前景的解决方案，既能大幅缩短生产时间、减少工序步

骤、提升效率、降低成本，还能实现单个电极的定制化几何结构设计。整合现代运动控制系统、精密运动平台与五轴旋进激光扫描器，为致力于器件规模化生产的设计与制造工程师赋予了全新的能力。

在传统激光加工应用中，需要整合多个领域的专业技术：既要掌握精密运动控制技术，以精准控制基材与激光加工头的相对位置；又要在独立的编程环境中完成激光扫描路径的规划，激光的触发控制也通常由独立的软件系统负责。

而一套真正实现一体化的控制架构，能够同时向旋进扫描器与直线伺服轴发送激光控制与运动控制指令，为终端用户带来多重优势。当所有激光扫描头与运动轴的控制指令都在统一平台上进行开发与发出时，用户无需再耗费精力排查不同控制系统之间的兼容性与通信问题，而是将所有精力都专注于工艺优化。这种一体化控制环境还能解锁更多创新控制功能（见图1）。

由于这些命令由同一个控制器发出，可以从根本上避免拼接误差，提升产品质量。同时，激光扫描头的扫描运动与运动系统的连续运动可同步进行，突破传统分步扫描工艺的限制，大幅提高生产效率。

部分运动控制器支持第三方设备的直接集成。用户可以在单一环境中直接控制激光源，无需在不同操作界面之间反复切换，显著缩短开发周期。如果该编程环境支持原生 G 代码与 M 代码指令，熟悉传统机床编程的用户可以快速将通用加工方案迁移至激光加工控制系统中。理想情况下，能够输出这两种代码格式的 CAD/CAM 软件均可直接用于生成运动控制指令，并在该控制系统中直接运行。这种一体化环境支持用户快速完成工艺开发与迭代，无需单独调试激光加工系统中的各组成部件。

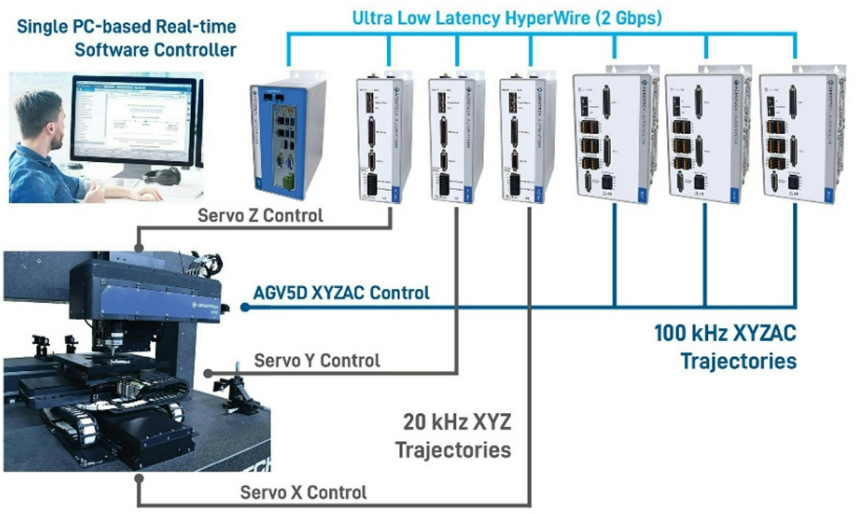


图1：Aerotech Automation1 激光控制架构示意图。

微电极阵列制造

借助成熟的配套制造设备，这类微电极阵列的生产流程已相对简化。

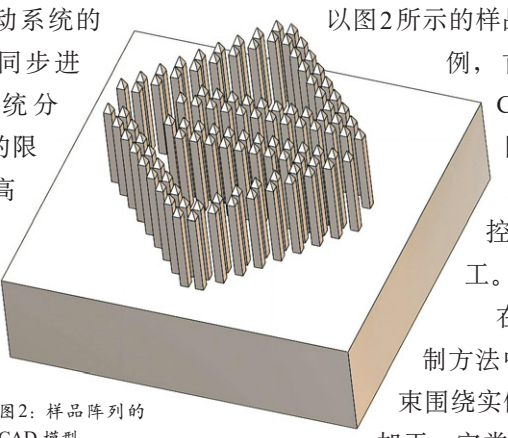


图2：样品阵列的 CAD 模型。

以图2所示的样品阵列制造过程为例，首先将模型导入 CAD/CAM 软件，随后可采用两种加工方案：自由光束控制加工与铣削加工。

在自由空间光束控制方法中，锥度受控的光束围绕实体模型的特征进行加工。它类似于二维（2D）激光扫描操作，不同之处在于，随着材料被烧蚀，焦点会向下移动，并且光束锥体会从已加工壁面倾斜离开，以实现所需的壁面锥度。CAD/CAM 软件包利用光束几何形状和扫描仪的锥度控制，生成适当的路径来烧蚀材料，并形成所需的几何形状。该工艺既可以单独通过扫描器完成，也可以结合伺服运动轴，加工超出扫描器视场范围的大尺寸工件。

在铣削加工方案中（见图3），光束在圆柱形轮廓内旋进并倾斜，以实现由光束形成的圆柱形铣削工具的所需锥度。如果希望有不同的锥度或铣削直径，可以动态改变铣削参数。然后，CAD/CAM 软件会根据铣削工具的几何参数生成加工路径，扫描器负责形成铣削轮廓，伺服运动系统则驱动工件完成加工路径的运动。

铣削加工可高效完成大尺寸工件的加工，加工范围可覆盖伺服运动平台的最大行程。该方案的局限性在于，加工精度受伺服运动平台的精度限制。

自由空间光束控制加工方案则更适用于尺寸在五轴旋进扫描器视场范围内的工件。虽然加工范围相对较小，但得益于扫描器的高精度，其加工精度优于伺服运动平台。

下转第29页

新一代蓝绿激光器：以技术创新赋能工业智造新未来

随着蓝绿激光器在产品性能、可靠性、成本优化等方面的不断进步，其应用已深度渗透到工业加工、智能制造、检测测量等诸多领域。

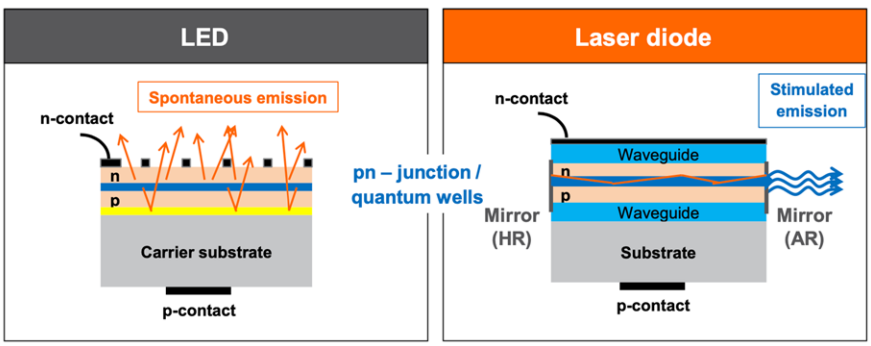
作者：郑运强，艾迈斯欧司朗可视化产品市场经理
王尔东，大联大品佳集团产品事业部经理

在全球工业向智能化、高精度化转型的浪潮中，激光技术正从传统工业领域向更广阔的应用场景拓展，为智能制造注入全新动能。在工业自动化、精密测量、医疗健康、消费电子等多个领域，激光光源正逐步取代传统光源，成为实现高精度、高效率、高可靠性的核心驱动力。在此背景下，蓝绿激光凭借独特的波长优势和性能表现，成为解锁高难度应用场景的关键。

艾迈斯欧司朗以全面的蓝绿激光产品组合、领先的芯片与封装技术，持续定义激光应用的边界，为工业智造注入强劲动能。艾迈斯欧司朗可视化产品市场经理郑运强表示：“激光技术的核心价值在于以极致的光性能突破传统应用的局限，从传统的红外光源到近几年热度持续攀升的蓝绿激光，我们始终致力于在功率效率、可靠性和光束质量方面实现技术突破，通过持续的技术迭代，让蓝绿激光成为驱动各行业创新的‘关键之光’。”

蓝绿激光的原理优势与性能突破

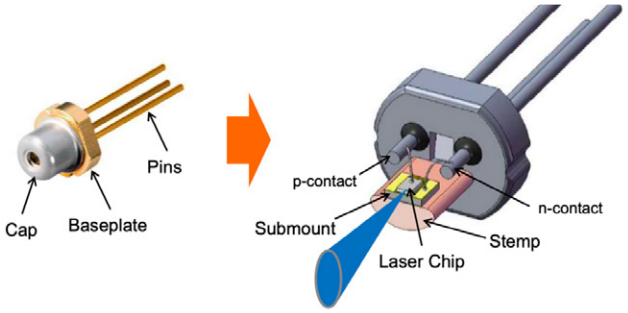
在光电技术的发展中，LED（发光二极管）、LD（激光二极管）扮演着关键角色。两者均基于半导体 PN 结的电致发光原理，区别在于前者为 PN 结表面发射，后者经谐振腔筛选后仅从单一窗口出光，形成高度集中的光束。相较于 LED，LD 不仅光斑尺寸极小、光束准直性优异，光谱范围也更窄，其功率密度更是达到 10^7 W/cm^2，较同功率 LED（100 W/ cm^2）高出五个数量级。



在 LD 领域，艾迈斯欧司朗深耕多年，持续拓展激光技术产品线，覆盖汽车、工业、医疗、消费等多个行业及应用。具体而言：

- 在汽车与工业激光器方面，公司提供用于汽车安全和工业激光雷达的红外脉冲激光器，其中汽车安全应用相关产品生产已超过15年；
- 在材料加工方面，提供用于此领域的红外及蓝光激光器，相关产品的生产经验已超过20年；
- 在专业应用方面，公司是单模和多模可见激光领域的关键供应商，产品广泛应用于多种工业和医疗场景。

蓝绿激光是近几年产业关注的焦点，艾迈斯欧司朗可针对特定应用提供丰富的彩色单模和多模边发射激光二极管，这些器件安装在密封的 TO 金属封装中，并有不同尺寸可供选择。其中，单模激光光束质量优异，光斑呈高斯分布，适用于激光水平仪、测距、医疗检测等对精度要求高的场景。目前，艾迈斯欧司朗的单模



Package	Diameter
TO38	3.8 mm
TO56	5.6 mm
TO90	9.0 mm

激光器产品线已实现全面覆盖，提供三种波长选择（520 nm 绿光、450 nm 蓝光、488 nm 青光）、两种封装尺寸（TO56 标准封装及 TO38 小封装），光功率范围 10~300 mW，可满足从微型设备到工业级应用的全方位需求。

郑运强指出，在单模激光器领域，绿色激光的发展非常迅速。根据人眼视觉曲线，520 nm 绿激光的能见度比 650 nm 红激光高 5-10 倍，这一特性使得绿激光在户外和复杂光照条件下仍能保持高清晰度，大幅提升了工业应用的可靠性和用户体验。在这一产品方向上，艾迈斯欧司朗最新推出的 PLT5 520 HB_P 搭载新一代绿光芯片，光功率提升 18%，效率提升 12%，散热性能进一步优化，典型波长 520 nm，连续波（CW）输出光功率典型值为 130 mW，封装于 TO56 标准尺寸中。该产品在户外水平仪、工程测量和娱乐投影等高亮度场景中表现出色。

PLT5 488HB_EP 是艾迈斯欧司朗目前功率最高的单模激光器，搭载最新青色单模激光芯片，专为医疗及生命科学研究应用优化，提供 ±2 nm 的窄波段选择，输出光功率达 300 mW，较前代产品提升 400%，电光转换效率提高 40%，可极大提升测量精度与分析效率。

多模激光则通过多个单模叠加实现高功率输出，主要面向投影显示、材料加工、舞台照明等需要高光通量的应用。艾迈斯欧司朗在这一领域推出了重磅新品 PLPT9 450 MD_E，其配备最新的蓝色多模激光芯片，输出光功率达 7 W，效率提升 15%，波长 440 nm，更适合材料加工和激光雕刻应用。与上一代 5.5 W 产品相比，在 20 W 模组中，激光管数量从 4 颗降至 3 颗，透镜组也相应减少，实现了系统成本优化和性能提升。

此外，艾迈斯欧司朗在多模激光领域的代表产品还包括：

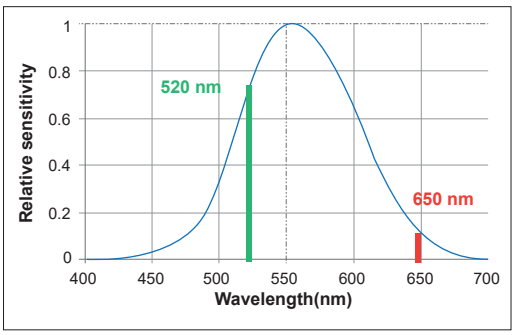
- TO56 PLPT5 447KA（孔径 15 μm）：提供一流的光束性能，非常适合耦合到光波导和光纤中，或用于需要高功率密度的应用场景；
- TO90 PLPT9 450LC_E/PLPT9 450MD_E：具备出色的光功率及散热性能，适用于对光功率要求较高的应用场景；
- CoSa 系列：为灵活的光学设计和紧凑的模块设计提供了理想选择。

围绕这些产品，艾迈斯欧司朗提供全面的应用技术支持。这一支持体系涵盖光学设计、电子驱动、测试验证等多个关键环节，确保客户能够快速、高效地将激光技术集成到其产品中。例如，在光学设计阶段，艾迈斯欧司朗提供全面的 CAD 文档和光源文件支持；在电子设计方面，提供完善的电子模拟和设计支持服务；同时，公司配备先进的测量实验室，为客户提供全面的测试验证服务。

工业智造赋能：多场景应用的技术落地与价值释放

艾迈斯欧司朗蓝绿激光产品凭借“高性能 + 高可靠性 + 成本优化”的组合优势，已深度渗透到工业加工、智能制造、检测测量等核心领域，并

Relative sensitivity of human eyes max at 550 nm



	PLPT5 447 KA	PLPT9 450LC_E	PLPT9 450MD_E	PLPCOS 450E
Wavelength	447nm	455nm	435nm	447nm
Output power	2.0 W	5.5 W	7W	5 W
Forward current (Typ)	1,2 A	3.3 A	3.7 A	3.0 A
Operating voltage (Typ)	4,6 V	4.1 V	4.1 V	4.3 V
Threshold current	0.1A	0.32 A	0.3 A	0.3 A
Thermal Resistance	13 K/W	8 K/W	8 K/W	6.2 K / W
Operating temperature	-20°C ~ 85°C	0°C ~ 70°C	0° C ~ 60° C	-20° C ~ 80° C
Storage temperature	-20°C ~ 100°C	-40°C ~ 85°C	-40° C ~ 85° C	-40° C ~ 85° C
ESD Diode include	Yes	Yes	Yes	No
Package	TO56	TO90	TO90	CoSa

通过与大联大品佳集团的战略合作，加速了技术落地与场景拓展。大联大品佳集团产品事业部经理王尔东表示：“大联大和艾迈斯欧司朗合作超过15年，共同推动了从红激光到绿激光的技术转型和应用落地，并在水平仪、3D扫描、医疗仪器等应用中形成了一系列成熟解决方案。”

具体应用方面，艾迈斯欧司朗单模激光器面向的主要场景包括激光水平仪、激光测距、扫码枪、显示/投影、生命科学等。例如，激光水平仪作为工程建设与家居装修的核心工具，绿色激光正快速取代红色激光，采用艾迈斯欧司朗PLT5 520DB_P/PLT5 520FB_P/PLT5 520HB_P，可为水平仪应用带来高能见度、高光束质量和小封装尺寸优势；在扫码枪应用中，艾迈斯欧司朗PLT5 520DB_P/PLT5 520EB_P可实现低至1.5°的精确角度控制，配合高能见度特性，确保近距离识别的精准性与稳定性，其光功率维持率超过70%（20000小时），可满足工业级长寿命需求。

艾迈斯欧司朗多模激光器面向的主要场景包括医疗、材料加工、舞台灯光、车载照明等。比如，在医疗场景中，艾迈斯欧司朗PLPT9 450LC_E多模激光器可用于医疗汽化切割领域的中大功率激光手术系统，助力实现高能量转化吸收率、高汽化效率，出血量较传统电切手术方式减少约70%；在车载照明领域，艾迈斯欧司朗PLPT9 450B_E A01多模激光器不仅符合车规要求，还具备小发光面、小光束尺寸、耐腐蚀等领先特性，在激光大灯应用中通过荧光转换实现高强度白光远距离照明。

此外，水下激光雷达、三维扫描仪等应用是单模激光器和多模激光器均适用的领域，客户可根据自身方案需求进行选择。

综上所述，艾迈斯欧司朗的可见光激光器拥有广泛的终端应用场景——从单模绿激光到多模大功率蓝激光，艾迈斯欧司朗正通过持续的技术迭代不断拓展激光器的应用边界；相关产品在功率提升、效率优化与系统集成方面的突破，正推动现代激光系统向更高效、更紧凑、更智能的方向发展。未来，随着工业4.0、智能汽车、高端医疗设备的进一步普及，艾迈斯欧司朗将继续深化蓝绿激光技术布局，与生态伙伴协同创新，为全球工业智造提供坚实的光学核心支撑。❑

上接第26页

由于微电极阵列制造需要去除大量材料，采用锥度可控的铣削加工方案最为适宜。对于尺寸在扫描器视场范围内的阵列，自由空间光束控制加工可实现更高精度的烧蚀加工；而铣削加工则更适合大尺寸工件的高效加工。

此工艺能够直接加工高长径比结构，无需额外的切割或沉积工序，能大幅减少微电极阵列高长径比结构的制造工序。此外，采用自由空间光束控制加工方案时，还可以对单个电极进行定制化加工，赋予每根电极独特的结构与性能参数。

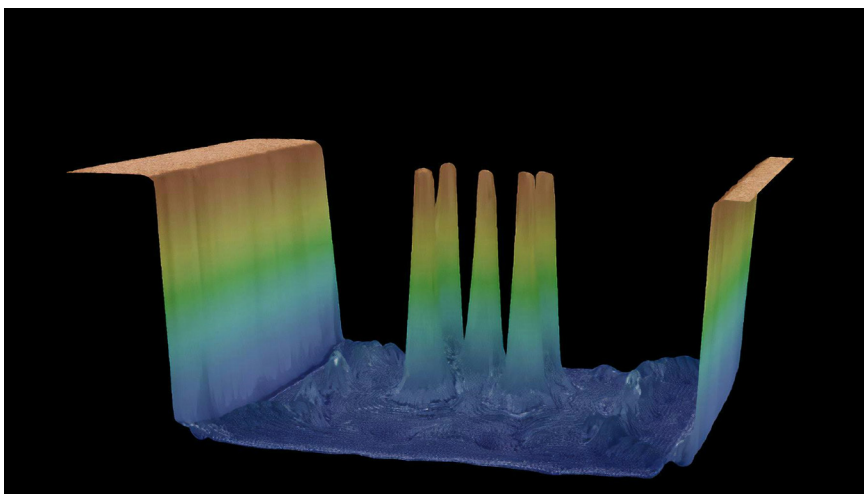


图3：在Aerotech激光应用实验室加工的样品阵列；电极尖端直径为50 µm，底部锥度扩大至100 µm，加工深度为1.2 mm。

微电极阵列的未来

多种市场信号表明，微电极阵列制造市场正处于快速崛起阶段，尤其是在脑机接口领域。长期以来，传统微加工技术的局限性，使得器件制造商难以低成本地制造出具有多样化电极几何结构的微电极阵列。而现代运动控制技术、旋进扫描器与激光技术的融合，为这一难题提供了切实可行的解决方案。新型软件化工艺工具的应用，进一步提升了生产效率，实现了更高的加工吞吐量与更低的单位成本。这不仅将拓展微电极阵列的终端应用场景，还将推动相关器件与技术的普及。❑

Aerotech 扩展双轴激光扫描振镜产品线

Aerotech 推出的 AGV-CPO 高性能双轴激光扫描振镜，旨在适应广泛的激光应用，兼具卓越的动态性能、精度和高性价比。其核心性能包括：



- 单一控制器架构 – 借助 Aerotech 强大且统一的编程环境 Automation1，可无缝控制多达 32 个伺服轴和振镜轴。该环境简化系统集成，支持数据可视化，并能生成复杂、协调的运动路径。其功能包括符合 RS-274 标准的 G 代码编程、运动预读和 C 变换。
- 精度与动态性能：所有 Aerotech AGV 扫描振镜均采用数字光学编码器和先进材料，为最严苛的激光应用提供业界领先的分辨率和动态性能。
- 无限视场（IFOV）：借助 IFOV 技术，扫描振镜运动可与伺服平台运动无缝集成，扩大有效工作区域，消除拼接误差或复杂的工件重新定位需求，从而提高精度并缩短周期时间。
- 位置同步输出（PSO）：PSO 功能允许根据来自扫描振镜反射镜位置以及任何协调的伺服平台位置的实时反馈，实现高精度激光触发，确保精准切割、焊接和增材制造等应用所要求的一致能量输出。
- 超低热漂移与高工艺稳定性：集成的电机水冷和扫描振镜反射镜气冷确保超低热漂移，最大限度地减少工艺随时间的漂移。

AGV-CPO 适用的激光微加工应用包括：研究与开发，特别是新型超快激光工艺开发；医疗器械制造，用于微加工、平面切割和钻孔；电子元器件制造，用于显示屏切割和 PCB 钻孔；半导体元件制造，用于玻璃通孔钻孔和晶圆切割；增材制造，支持双光子聚合等工艺。

Aerotech，www.aerotech.com

度亘新一代980 nm泵浦激光器

度亘核芯研发出用于 EDFA 的 980 nm 高功率双芯半导体激光泵浦源，关键性能指标优于国际同类产品水平，填补了国内同类产品市场的空白。

核心性能特点：

- 双路激光输出：双芯集成设计，集成化程度高，相较于传统的单芯激光器，极大地减小了器件体积，模块体积缩减 30% 以上，最大输出功率可达 2 × 680 mW；
- 宽温工作范围：0~75℃范围内无需额外温控设备即可稳定运行；
- 长期稳定可靠：长期功率稳定性＜ 1%。

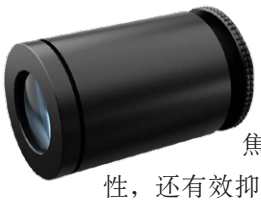


产品技术创新包括：高密度双芯封装和热管理技术，显著提高系统集成度；低应力高可靠性耦合封装工艺；高效光学耦合系统设计和工艺实现等。

度亘核芯，www.dogain.com

激光扩束镜

联合光科推出的定倍率激光扩束镜系列提供多种标准型号，核心波段覆盖从深紫外到近红外的 193 nm、355 nm、532 nm、633 nm、1030 nm 及 1064 nm，精准适配准分子、固态、光纤及半导体等多种激光器。所有镜片都选用熔融石英，保证使用安全。



该系列提供从 2 倍至 40 倍共十余种固定倍率选项。产品采用经典的伽利略式设计，其光路无焦点的特性不仅提升了功率耐受性，还有效抑制了像差，确保输出光束具备优异的准直精度与波前质量。作为标准产品，定倍扩束镜以其结构稳定、性价比高、即装即用的特点，成为工业加工（如打标、切割）、科研实验中对工作距离与光斑尺寸有固定要求的理想选择。所有型号均针对其目标波段进行了优化，确保在指定参数下实现稳定可靠的性能表现，方便用户快速选型与系统集成。

联合光科，www.gu-optics.com

凯普林蓝光激光器用于3D打印

凯普林开发的 250 W 蓝光组件，在 3D 打印及增材制造应用领域表现突出。其采用复合材料组合式水冷散热设计，确保铜水冷通道模块具备优异散热性能；同时搭配轻量级铝合金框架，在保障机械强度的前提下，实现材料组合与工艺的最优匹配。



这款蓝光激光器已通过多项严苛可靠性测试，涵盖 85℃高温存

储、-40℃低温存储、-20℃ ~70℃温度循环、振动冲击及7000小时加速老化测试。测试结果显示，其能稳定输出高可靠性蓝光激光，是3D铜粉打印等应用的理想光源选择。
凯普林，www.bwt-bj.com

埃赛力达SPCM–1064单光子计数模块

埃赛力达Excelitas® 近日宣布推出SPCM-1064新型单光子计数模块专，其为905~1064 nm波长范围内的高性能探测而设计，在众多分析系统和量子光学系统的工作波段内，提供卓越的近红外（NIR）灵敏度。



SPCM-1064的核心是一款高效率硅雪崩光电二极管，在1064 nm波长处可实现典型10%的单光子探测效率（PDE）——而这一波长长期以来一直是可靠光子计数的难点。该模块在750~950 nm波长范围内还可提供超过50%的PDE，并在大尺寸500 μm有效探测面积上实现优异的一致性，从而获得更稳定的信号采集，并减少精密测量所需的校准工作。SPCM-1064在保留埃赛力达成熟的SPCM-AQRH产品系列既有优势的同时，进一步增强了其近红外及1064 nm波段的响应能力。
埃赛力达，www.excelitas.cn

映讯芯光1310nm超窄线宽高功率激光器

珠海映讯芯光科技有限公司发布自主研发的1310 nm（O-波段CWDM波长）超窄线宽高功率激光器，凭借kHz级窄线宽、数百毫瓦级高功率输出的核心优势，完美适配CPO（光电共封装）、光通讯及光纤传感三大核心场景，为下一代光电系统提供高性能光源解决方案。

该激光器实现三大关键技术突破：一是超窄线宽和稳频特性，通过优化谐振腔结构与稳频技术，频谱线宽压缩至kHz级别，超长相干长度大幅提升信号探测精度与传输稳定性；二是高功率高效输出，突破功率与线宽的技术矛盾，数百毫瓦级稳定光输出可补偿CPO系统光学损耗，满足高密度集成需求；三是精准波段适配，1310nm O波段波长契合数据中心短距互联、光纤传感传输特性，兼容主流光电子器件生态。

在CPO光互联领域，该激光器作为核心外部光源，可匹配硅光集成架构，为800G/1.6T高速光模块提供稳定泵浦，助力数据中心提升带宽密度、降低能耗，适配百万卡级AI训练集群需求。在光通讯领域，其与公司2025年推出的C/L波段产品可作为本振光源，支撑400G/800G相干传输，抑制相位噪声，保障城域骨干网等场景可靠传输。在光纤传感领域，依托高相干性能，可实现百公里级温度、应变监测，适用于高压电网、输油管道等基础设施安全监测。
映讯芯光，www.inxuntech.com

Light Conversion台式瞬态吸收光谱仪

HARPIA-LIGHT是一款台式瞬态吸收（TA）光谱仪，其采用紧凑的一体化设计，兼具易用性、多功能性与卓越性能，可实现超高的测量灵敏度、高时间分辨率与宽光谱覆盖范围。它在紧凑小巧的体积中集成了工业级风冷飞秒激光器与高分辨率光谱仪，并搭载操作便捷的专业数据采集软件。简洁的操作界面与工作流程，可帮助用户节省大量时间与精力。



对于终端用户而言，HARPIA-LIGHT攻克了飞秒光谱技术普及的核心障碍——操作复杂性。传统飞秒级时间分辨率瞬态吸收光谱仪，对光路对准精度要求极高，光路搭建复杂且软件集成难度大，通常需要配备专业激光工程师进行操作。而HARPIA-LIGHT采用Class1级激光产品的一体化紧凑设计，光路全封闭，控制系统高度集成，无需额外配置光学平台，即使是光谱学背景有限的人员，也能在数分钟内启动测试。

操作的便捷性并未牺牲性能。凭借宽光谱覆盖、高时间分辨率及内置飞秒激光器的优势，研究人员无需借助外部合作资源或复杂的实验设施，即可对飞秒至纳秒时间尺度内的溶剂化、激子能量转移、光化学反应动力学等动态过程展开研究。在实际应用中，这一特性有效缩短了研究周期，支持科研人员自主规划实验设计与数据采集的节奏。该设备交付用户仅数月，相关研究成果便已在同行评审期刊发表，充分印证了其作为光化学与材料科学领域一站式解决方案的核心价值。

HARPIA-LIGHT不仅是一款实验设备，更是加速科研创新的赋能工具。它拓宽了超快技术的应用范围，降低了科研基础设施建设与运维的复杂度，正在重新定义瞬态吸收光谱领域的科研边界，让更多科研人员有机会参与到该领域的研究中。
Light Conversion，www.lightcon.com

Advertiser	广告客户	网址	页码
CDIIF 2026	2026成都国际工业博览会	www.cdiif.com	IFC
Edmund Optics China	爱特蒙特光学 (深圳) 有限公司	www.edmundoptics.cn/115-8612	11

文章投稿指南

《激光世界》不发表公然推销某一具体产品或服务的文章。只有文章内容需要或与主题相关时，才可偶尔提及某一具体产品。

具体要求

1、最好配两幅以上相关图表。
2、应在预定发表日期之前一个月投到编辑部。
3、切勿一稿多投。
5、编辑部有权修改稿件。作者或供稿公司如需在出版前确认修改后的稿件，请事先声明。
6、请留下作者的各种联系方式。

发布新产品投稿指南

1、请清晰地写明新产品的名称、型号、功能、独特之处和用途等。
2、请附上产品照片。照片的分辨率不低于300dpi，大小不低于100万像素。最好是在单色背景下的简单的产品实物照片。
3、请提供能查阅产品更多信息的网址。
4、写清负责答复读者咨询的人员的姓名和联系方式。
5、写清能提供进一步信息的人的姓名、电话、e-mail。
6、本刊有权决定稿件录用与否。编辑部有权修改稿件。
7、本刊收到的稿件会在最近的一期发表，时间最长会延迟2个月。当提供对时间敏感的信息时，请注意预计发表的时间。
8、出版日期前5天截稿。

请将您的新闻或文章 E-mail 至庞会荣女士 Rossie Pang, E-mail:rossiep@actintl.com.hk,电话：13641292731

eFOCUS VIDEO Magazine Webcast
www.laserfocusworld.com.cn

行政及销售人员 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

HK Office (香港办公室)

ACT International (雅时国际商讯)
Unit B, 13/F, Por Yen Building,
No. 478 Castle Peak Road,Cheung Sha Wan, Kowloon, Hong Kong
Tel: 852 2838 6298

Publishing Director (出版总监)
Adonis Mak (麦协林), adonism@actintl.com.hk

Sales Director-Worldwide (全球销售总监)
Floyd Chun (秦泽峰), floydc@actintl.com.hk

Associate Publisher (副社长)
Hatter Yao (姚丽莹), hattery@actintl.com.hk

Editor-in-Chief (总编辑)
Rossie Pang (庞会荣), rossiep@actintl.com.hk

Editor (编辑)
Vicky Zhang (张青勉), vickyz@actintl.com.hk
Denny Zhang (张辉), dennyz@actintl.com.hk

US Offices

ENEADOR Business Media, LLC
61 Spit Brook Road, Suite 501,Nashua, NH 03062-5737 USA

Associate Publisher (Sales)
TOM LARRANAGA, tlarranaga@endeavorb2b.com
Tel: 973-460-9476

Market Leader
PETER FRETTY, pfretty@endeavorb2b.com
Tel: 231-329-2739

Executive Vice President
TRACY SMITH, tsmith@endeavorb2b.com
Tel: 816-519-2496

销售人员 Sales Offices

China (中国)

Shanghai (上海)
Tel: 86 21 6251 1200

Sales Director-China (中国区销售总监)
Hatter Yao (姚丽莹), hattery@actintl.com.hk

Amber Li (李歆), amberl@actintl.com.hk

Shohan Shen (沈璟晓), shohans@actintl.com.hk

Cecily Bian (边团芳), cecilyb@actintl.com.hk
Tel: 86 13552621310

Hong Kong (香港特区)
Floyd Chun (秦泽峰), floydc@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

Taiwan (台湾地区)
Simon Lee (李若龙), simonl@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

Asia (亚洲)

Japan (日本)
Masaki Mori, masaki.mori@ex-press.jp
Tel: 81 3 6721 9890

Singapore, Malaysia (新加坡，马来西亚)
Simon Lee (李若龙), simonl@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

North America (北美)

East Coast
Tom Larranaga, tlarranaga@endeavorb2b.com
Tel: 973-460-9476

West Coast
Renee Rubens, rrubens@endeavorb2b.com
Tel: 917-734-4308

Europe & Middle East (欧洲及中东)

Holger Gerisch, hgerisch@endeavorb2b.com
Tel: 49-(0)8847-6986656

ACT INTERNATIONAL

国际知名媒体授权
报道全球高新科技信息



免费索阅

服务于机器视觉设计、电子制造、激光 / 光电子、射频 / 微波、化合物半导体
半导体制造、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的专业读者及与会者

品牌会议

VisionCon 视觉系统设计技术会议
SSOTC
EDICON Electronic Design Innovation Conference 电子设计创新大会
AIM 工业技术及应用研讨会
LaserFocusCon 激光聚会
CSCON CHINA
CHIP China 晶芯研讨会
CleanRooms China

国际代理

CQ Publishing (Japan)　Chomdan (Korea)　Pan Global (Europe)
Endeavor Business Media (USA)　Horizon House (USA)　Angel Business Communications (UK)

VisionCon 2026
视觉系统设计技术会议

机器视觉赋能数智化生产

人工智能（AI）、大数据、边缘技术等技术的发展，正持续不断地让机器视觉技术迎来更广泛的应用场景，同时也让机器视觉技术能够更加智能、精准、高效地帮助企业解决生产中的诸多检测测量难题，实现降本增效。如何将机器视觉、AI、边缘计算等先进技术融合部署于半导体、电子、汽车、光伏等重点行业的生产制造中，是现代智能制造业重点关注、探讨的话题。

雅时国际商讯将于 2026 年在国内多个制造业活跃的城市举办 VisionCon 视觉系统设计技术会议，此外还将针对汽车制造、半导体晶圆制造和先进封测环节，推出多场网络研讨会，继续为机器视觉厂商和行业用户搭建交流互动的平台！

视觉系统设计技术会议 — 1月 西安

- 汽车/新能源
- 半导体
- 光伏
- 航空航天
- 军工装备
- 高端装备

视觉系统设计技术会议 — 4月 深圳

- 具身智能
- 机器人
- 消费电子
- 仓储/物流
- 通信设备
- 新能源

视觉系统设计技术会议 — 5月 苏州

- 半导体
- 汽车及零部件/新能源
- 液晶显示
- 消费电子
- 精密机械加工
- 自动化装配
- 高端装备

视觉系统设计技术会议 — 7月 东莞专题

- 手机及智能终端
- 新能源及智能网联汽车电子

视觉系统设计技术会议 — 8月 合肥

- 半导体晶圆制造及先进封测
- 显示制造
- 汽车/新能源

视觉系统设计技术会议 — 9月 武汉

- 光通信
- 半导体
- 显示
- 汽车及零部件
- 高端装备

视觉系统设计技术会议 — 9月 重庆

- 新能源
- 轨道交通
- 消费电子
- 通用零部件
- 高端装备
- 半导体

视觉系统设计技术会议 — 11月 惠州专题

- 手机及智能终端
- 新能源及智能网联汽车电子

VSDC Webinar — 线上 专题会议

- 主题：汽车整车、零部件制造及锂电制造
- 主题：半导体晶圆制造
- 主题：半导体先进封装与测试

视觉系统设计技术沙龙 — 沙龙 厦门

- 显示制造
- 半导体制造
- 封装测试
- 电子组装
- 锂电制造

视觉系统设计技术沙龙 — 沙龙 北京

- 半导体装备
- 航空航天
- 汽车制造
- 医药生产

主办单位

ACT INTERNATIONAL

大会媒体

视觉系统设计 VisionSystems China

会议咨询

扫码预登记