光学和光电子产业的主导刊物 www.laserfocusworld.com.cn 2026年5/6月 第3期
ISSN: 1817-6917

激光世界
LaserFocusWorld® China



光纤将超低信号损耗引入光子集成电路 10

硅基新型稳定电信量子比特 12

纳米级精度规模化：主动对准光纤阵列解锁下一代光子学 14

光能否突破AI的能耗瓶颈? 15

扫码浏览更多期刊

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

SS OTC

EDI CON Electronic Design Innovation Conference 电子设计创新大会

AI 工业技术及应用研讨会

LaserFocusCon 激光聚会

CS CHINA CON

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)

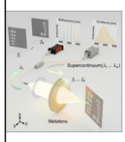
市场观察

5 NIST科学家开发出可耐受极端温度的PIC封装技术



一种新型光子芯片封装方法，有望打开传统光子封装技术无法生存的应用领域之门—如太空任务、核环境和高能物理实验。

7 超构透镜共聚焦成像利用光的颜色来消除机械轴向扫描

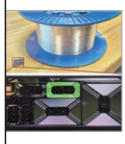


超构透镜共聚焦成像方法不仅实现了现有共聚焦显微镜的小型化，更革新性地利用光谱作为深度扫描手段，取代了传统的机械调焦方式，从而为构建紧凑型、高通量且机械结构简化的三维成像系统开辟了新途径。

技术中心

10 PIC

光纤将超低信号损耗引入光子集成电路



研究人员正致力于弥合光纤与集成光子学之间几十年的性能鸿沟，这将为光子集成电路（PIC）以及便携式光钟、高功率芯片激光器等精密测量领域带来根本性变革。

12 量子光学

硅基新型稳定电信量子比特



新发现的碳氮复合物提供了一种更耐用的量子缺陷，有望加速基于硅的先进量子技术发展。

14 光学

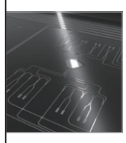
纳米级精度规模化：主动对准光纤阵列解锁下一代光子学



欧盟创新理事会（EIC）加速器奖项正在助力MicroAlign公司将专为超低损耗光子系统设计的纳米精度光纤阵列推向工业化生产。

15 光学

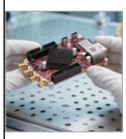
光能否突破AI的能耗瓶颈？



光子学并非要推翻现有计算体系，而是在网络层面开辟新的计算能力，从而对现代计算架构进行增强和补充。

17 激光器与光源

激光稳频系统原型：从模拟锁相放大器到数字实现



基于FPGA的软件定义方法能够实现更灵活、更精密且更具成本效益的稳频工作流程—尤其在光谱学、干涉测量和量子光学等应用中表现突出。

工业应用专栏

19 激光清洗

宝辰鑫推出MOPA 10000W高功率脉冲光纤激光器



创鑫激光旗下子公司宝辰鑫推出了型号为MOPA 10000W的高功率脉冲光纤激光器，该设备主要应用于激光清洗等工艺，可替代部分传统高污染工艺，降低能耗。

20 振镜

从金刚石到细节：PCD刀具的激光加工及现代精密激光加工机床背后的振镜要求



本文围绕振镜在PCD切削刀具激光加工中的应用进行分析，覆盖刀具制造及再修磨两个关键阶段，并基于典型PCD加工工艺引导出振镜系统在实际应用中的关键技术要求。

26 激光微加工

五轴激光微加工的新型控制方法



五轴扫描振镜提供快速灵活的解决方案，用于加工精确的孔、轮廓槽以及其他具有完整横截面的几何形状。借助合适的系统，可以控制整个微加工过程——激光器、扫描振镜和工件定位——从而生产尺寸公差达到亚微米级的部件。

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

MARKET WATCH

5 NIST Scientists Create PIC Packaging That Survives Extreme Temperatures
A new photonic chip packaging approach may open the door to applications where conventional photonic packaging simply can't survive—such as space missions, nuclear environments, and high-energy physics experiments.

7 Metalens Confocal Imaging Uses Colors of Light to Eliminate Mechanical Axial Scan
A metalens confocal imaging approach goes beyond miniaturizing an existing confocal microscope by using the spectrum of light as its depth scanner—rather than mechanically shifting focus—and it opens a pathway to compact, high-throughput, and mechanically simple 3D imaging systems.

TECHNOLOGIES CENTER

10 PIC
Optical Fiber Brings Ultralow Signal Loss to PICs
Researchers are narrowing a decades-old performance gap between optical fiber and integrated photonics, which could fundamentally reshape photonic integrated circuits (PICs) and precision measurement applications like portable optical clocks and high-power chip lasers.

12 QUANTUM
A Robust New Telecom Qubit in Silicon
Newly discovered CN complex provides a more durable quantum defect that may accelerate advanced quantum technologies based on silicon.

14 OPTICS
Nanometer Precision At Scale: Active-alignment Fiber Arrays Unlock Next-gen Photonics
A European Innovation Council (EIC) Accelerator award is helping MicroAlign industrialize nanometer-accurate fiber arrays designed for ultralow-loss photonic systems.

15 OPTICS
Can Light Solve AI's Energy Bottleneck?
Photonics augments modern compute architectures by unlocking new compute capacity within the network itself—rather than replacing existing systems.

17 LASERS & SOURCES
Laser Stabilization System Prototypes: Analog Lock-in Amplifiers to Digital Implementations
Software-defined FPGA-based approaches enable more flexible, precise, and cost-effective stabilization workflows—particularly for applications such as spectroscopy, interferometry, and quantum optics.

INDUSTRIAL APPLICATIONS COLUMN

19 LASER CLEANING
Baochenxin launches the MOPA 10000W High-power Pulsed Fiber Laser
Baochenxin, a subsidiary of Maxphotonics, has launched a high-power pulsed fiber laser model MOPA 10000W. This device is primarily used in processes such as laser cleaning, and can replace certain traditional high-pollution processes while reducing energy consumption.

20 SCANNER
From Diamond to Detail: Laser Processing of PCD Tools and the Galvo Scanner Requirements Behind Modern Precision Laser Machine Tools
This paper analyzes the application of galvanometer scanners in the laser processing of PCD cutting tools, covering two critical stages—tool manufacturing and re-sharpening. Based on typical PCD processing techniques, the key technical requirements for galvanometer scanner systems in practical applications are derived.

26 LASER MICROMACHINING
A Novel Control Method for Five-Axis Laser Micromachining
Five-axis scanning galvanometers provide a fast and flexible solution for machining precise holes, contour slots, and other geometries with full cross-sections. With the appropriate system, the entire micromachining process—including the laser, scanning galvanometer, and workpiece positioning—can be controlled to produce components with dimensional tolerances down to the sub-micrometer level.

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

特约编辑 黄莺 Katie Huang
电邮 katieh@actintl.com.hk

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

以光为桥，让芯片走向光纤级极致

光是信息传输的终极载体；光纤，构筑了全球通信的超低损耗骨架。而将光纤的极致性能搬进硅芯片，一直是光子集成领域的“圣杯”。文章《光纤将超低信号损耗引入光子集成电路》（第 10 页）聚焦加州理工学院克里 • 瓦哈拉团队的突破性成果 —— 在硅晶圆上实现可见光波段媲美光纤的信号传输损耗，这不仅是材料与工艺的胜利，更打破了集成度与高性能长期对立的困局，为新一代光子集成电路（PIC）点亮通途。

几十年来，光纤凭借掺锗二氧化硅体系，在光通信领域书写着低损耗传奇。但光子集成电路始终难以企及这一高度，尤其在可见光波段，散射与材料吸收如两道高墙，让短波长传输损耗居高不下。加州理工团队以“简单而雄心勃勃”的目标，把光纤核心材料体系引入平面集成光子学，用 CMOS 兼容工艺，在 8 英寸、12 英寸硅晶圆上印制出光纤级光学电路。通过 PECVD 沉积、深紫外光刻、干法刻蚀与炉管回流退火的精密组合，他们打造出原子级平滑的波导侧壁，成功抑制瑞利散射，攻克短波长损耗与材料吸收难题。

数据最具说服力：458 纳米波长损耗降至 0.49 dB/m，较此前提升 13 dB；1064 纳米处低至 0.08 dB/m，谐振腔 Q 值峰值达 4.63 亿。更难得的是，工艺无需高温退火，兼容 III-V 族、铌酸锂等温度敏感材料，覆盖 458 纳米至 1550 纳米宽带范围，兼具色散工程、声学限制与大模场优势。团队还展示了孤子微梳、受激布里渊激光器、赫兹级窄线宽可见光激光器等器件应用，可见光激光器线宽较现有最优水平改善 20 dB 以上，让集成光子器件的相干性迈上新台阶。

这项突破的意义，远不止一组惊艳的参数。它意味着“集成度与性能不可兼得”的行业魔咒被打破，光纤精密系统向芯片迁移成为可能。从便携式光学时钟、芯片级陀螺仪，到集成量子光子处理器、低噪声微波光子学，再到高功率芯片激光器，无数技术将因这一工艺迎来范式革新。团队远期目标直指锗硅材料本征损耗极限，向千亿级 Q 值冲刺，一旦实现，将彻底重塑精密计量、量子信息、光通信等领域的技术版图。

从实验室走向晶圆厂，从原型器件到系统集成，光子集成的征途仍在延伸。加州理工团队的探索，让我们看到光与硅的完美融合不再遥远。当芯片能以光纤般纯净的光传输信息，一个更小、更快、更精准的光子时代，正加速向我们走来。这是科学的浪漫，更是技术的力量 —— 以极致创新，突破物理边界，让光的潜能，点亮数字未来。

本刊编辑部

前沿简讯 Leading Edge Snapshots

罗悉激光品牌重塑：整合力量剑指高潜力市场



TroGroup 集团 CEO Bernd Badurek 先生



Luxinar CEO Stefan Hackl 先生

在激光行业竞争日益激烈的今天，品牌已成为企业穿越周期、赢得未来的关键资产。2026 年慕尼黑上海光博会上，全球领先的工业激光解决方案提供商——罗悉激光（Luxinar）宣布了一项重大战略举措，将与激光品牌 Iradion 全面整合，以统一的“Luxinar”品牌形象，开启新的征程。

此次整合并非简单的名称合并，而是奥地利 TroGroup 集团深思熟虑后的战略布局。Luxinar 与 Iradion 同为集团成员，在 CO_2 激光技术领域均拥有深厚积淀。Luxinar 凭借超过 25 年的创新历史和超 25,000 台的全球装机量，已成为工业 CO_2 激光源的可靠代名词；而 Iradion 则以其专利的 Ceramicore® 陶瓷芯 CO_2 激光器技术，以及在纳秒、超短脉冲固体激光器领域的专长闻名于世。

“我们决定采用最强大的品牌——Luxinar”，TroGroup 集团 CEO Bernd Badurek 表示，“此举旨在整合双方的技术专长与服务能力，打造一个统一、专业且强大的品牌形象，使其成为集团进军新能源、微电子、半导体等高潜力市场的关键增长引擎。”

Our laser sources

› Ceramicore®



依托 Ceramicore® 专利技术，我们打造了纯陶瓷腔体 CO_2 激光器，提供卓越的稳定性、超长使用寿命，保障连续波加工高效生产。

› Duralife®



Duralife® 全系列均为易集成式脉冲 CO_2 激光器，可输出高规格工业级功率，运行稳定性优异，设备有效运行时间更长。

› Pulsecore®



Pulsecore® 系列，为短脉冲与超短脉冲激光加工场景，提供高度可控的工艺稳定性。

整合后的 Luxinar，产品实力得到空前强化，形成了三大核心产品系列：

- Ceramicore® 系列：采用纯陶瓷腔体技术，提供最高 250W 输出功率，以无与伦比的稳定性与超长寿命著称。
- Duralife® 系列：即插即用的高功率脉冲 CO_2 激光源，功率可达 1kW，专为严苛的工业环境设计。
- Pulsecore® 技术：涵盖纳秒与飞秒激光器，为半导体、微电子等行业提供精密加工所需的极致工艺稳定性。

在本次光博会上，以全新品牌形象亮相的 Luxinar，携多款新品惊艳亮相。其中，体积小巧的 Eternity 70 激光器，专为机器人集成和狭小空间应用而生；高功率的 OEM 50iX 则为包装、纺织等行业带来了颠覆性的高速动态加工解决方案。此外，其全新发布的 Aionis 飞秒激光器，平均功率提升至 50W，精准服务于半导体晶圆划片、超薄玻璃切割等尖端领域。

“我们正从激光源制造商转型为工业解决方案提供商，”Luxinar CEO Stefan Hackl 强调，“我们的目标是与客户并肩作战，解决他们的实际问题。”为此，Luxinar 不仅在上海设立了应用实验室，在厦门建立了新工厂，更组建了覆盖销售、服务、应用的完整中国团队，致力于构建持久的合作伙伴关系。

对现有客户而言，品牌整合意味着更强大的后盾。客户不仅能继续享受原有的专业技术支持，还将受益于一个规模更大、响应更快、全球覆盖的服务网络。从应用开发、产线实施到全生命周期的售后维护，Luxinar 承诺提供端到端的可靠保障。

此次品牌重塑，远不止是一次营销活动，更是 Luxinar 对未来的一次精准布局。在全球高端制造向中国加速转移的背景下，中国市场被集团视为最为关键的战场。通过整合资源、聚焦高价值领域，全新的 Luxinar 正以更丰富的产品矩阵和更专业的服务能力，携手全球合作伙伴，共同书写工业激光的新篇章。❑

NIST 科学家开发出可耐受极端温度的 PIC 封装技术

一种新型光子芯片封装方法，有望打开传统光子封装技术无法生存的应用领域之门—如太空任务、核环境和高能物理实验。

作者：Sally Cole Johnson Laser Focus World主编

美国国家标准与技术研究院（NIST）光子测温项目首席研究员兼项目负责人尼古拉 · N · 克里莫夫（Nikolai N. Klimov）博士领导的跨学科科学家团队，创建了一种在极宽温度范围内—从深低温到极高温—将光纤耦合至光子集成电路（PIC）的全新方法。

“我们的工作灵感既源于科学探索，也出于战略考量，”克里莫夫表示。他的团队正致力于开发基于集成光子学的芯片级温度标准—标准光子温度计（SPoT）。该标准最终有望超越并取代全球最优秀的电阻温度计—标准铂电阻温度计（SPRTs）。“如果我们想要一种能够重新定义温度计量学的光子温度计，首先需要发明一种封装方法，使其能够在传统光子封装从未被期望运行的环境中存活。”

SPRTs 几十年来一直是精密测温的标杆，但它们易碎、昂贵，且仅限于受控实验室环境。“如果光子测温要成为下一代标准，它必须既精准又具备可部署性，”克里莫夫说。“这正是封装成为关键任务的地方。而这一挑战—为极端环境创建一种坚固、无粘合剂、对准稳定的光纤 - 芯片接口—成为了我们工作的基础。”

光子芯片——光纤封装的范式转变

大多数光子封装依赖环氧树脂或聚合物来固定光纤，但这些材料在极端温度范围内无法存活—它们往往会软化、开裂、放气或发生漂移。

因此，克里莫夫及其团队着手创建一种兼容各种恶劣环境的光子封装方法。“我们还希望它具有足够的灵活性，适用于多种光子材料—如硅、氮化硅、铌酸锂，”他说。“而且它必须同时适用于端面光耦合（将光纤阵列键合到单个 PIC 芯片的端面）和晶圆级封装（将光纤阵列键合到晶圆表面光栅耦合器的输入 / 输出端口）。”

通过使用硅酸盐网络氢氧化物催化键合（HCB）替代传统的有机聚合物，他们在光子芯片 - 光纤封装领域实现了一次范式转变。

“在 HCB 过程中，我们在两个待连接的氧化物终端界面之间形成一层极薄但极强的硅酸盐网络键合层，”克里莫夫解释道。“这种方法最初于 20 世纪 80 年代在斯坦福大学开发。首次应用于 NASA 卫星任务‘重力探测器 B’，随后用于地面引力波探测器 GEO600，后来也用于其他天文应用。据我们所知，此前从未有人将 HCB 用于具有亚微米对准公差的光子集成电路封装。”

蒙特卡罗模拟

尽管克里莫夫及其同事没有对 HCB 本身进行力学或热学模拟，但他们进行了一组有趣的蒙特卡罗模拟，这对“理解超薄 HCB 层在极端环境测试中实际接收到的电离辐射剂量至关重要，”他说。

在将封装好的光子芯片暴露于累积 1.1 兆戈瑞（MGy）的电离辐射后—一次典型胸部 X 光片约为 0.1 毫戈瑞—并确认组件完好无损后，科学家们希望知道其中有多少辐射剂量实际到达了仅 40 至 200 纳米厚的 HCB 键合层。

由于 HCB 层极薄且埋藏在组件内部，“我们对整个暴露于辐射的光纤耦合芯片封装进行了蒙特卡罗建模，”克里莫夫说。“我们的建模显示，HCB 层接收了约 1.3 MGy 的辐射，略高于外部剂量，这是由于 PIC 的硅衬底层内产生了次级电子。而厚度仅数十纳米的 HCB 键合层仍然完好无损，我们仍能将光耦合到 PIC 中。”

这项工作最酷的一点是什么？“我们的光子芯片封装方法可以使 PIC

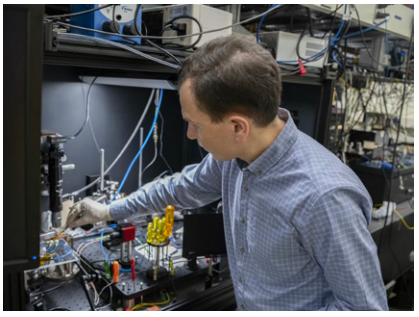
在极其恶劣的环境中可靠部署—从强电离辐射到深低温或高温环境，再到超高真空环境，”克里莫夫说。“我们的光纤耦合 PIC 坚固到在反复快速浸入液氮的系列测试后，没有出现任何键合退化或光耦合效率损失的迹象—依然完好无损。”

这种封装在“我们尚未测试的环境中同样显示出明显潜力，如高湿度和强化学暴露环境，”克里莫夫说。“氢氧化物催化键合（HCB）界面的结构强烈表明，该方法也可扩展至这些条件。”

加速固化时间，扩展封装工艺

尽管该团队已证明其封装方法能够耐受极端温度、超高真空甚至兆戈瑞级电离辐射，但在其成为完全可部署的现场应用技术之前，仍需克服若干挑战。

他们还需要“表征其在长周期循环中的行为：从低温到高温的重复温度循环；数月的真空暴露；以及太空任务中的长期辐射环境，”克里莫夫说。



尼古拉 · 克里莫夫手持一个装有光纤耦合 PIC 的塑料盒 图片来源：M. King/NIST

“了解长期漂移和稳定性对于真正的计量级标准至关重要。”

加速固化时间是另一个挑战。“目前，我们需要一周时间来固化键合层，但我们相信可以缩短至一天甚至几小时。我们还需要在恶劣环境中进行更严格（更长期）的测试，如高湿度和化学暴露，”克里莫夫说。“一旦缩短固化时间，我们还需要想办法扩展封装工艺以实现大批量生产。我们可以测试跨多个器件的封装可重复性—时间线约为 1 到 2 年。”

HCB 界面的结构“表明其与高湿度和化学恶劣环境具有兼容性，”克里莫夫说。“我们尚未通过实验验证这一点，但在这些条件下证明其坚固性将为工业和环境传感应用打开大门。”

目标：可部署系统

无粘合剂、极端环境光子封装的核心技术“已在实验室得到验证，”克里莫夫说。“这为我们从概念验证走向可部署系统奠定了坚实基础。”

一旦可靠性和可制造性得到确立，该团队的长期目标将是重点在太空任务、核设施、低温量子系统和恶劣工业环境中进行测试部署。“这些早期采用场景正是测温技术的优势以及相关坚固光子封装需求最为突出的地方，”克里莫夫说。

克里莫夫相信，他的团队工作“将对光子学界产生深远影响，将光子学的应用范围扩展到新的极端环境领域，包括核电站和太空中的温度传感，”他说。“我们的方法还可支持新兴应用，如光子量子计算、量子通信、量子光力学实验，以及在低温条件下需要可靠光子光纤 - 芯片封装的单光子发射与探测。”❑

CIOE 中国光博会将于 2026 年 9 月 9–11 日在深圳国际会展中心举办

全球光电全产业链一站式平台 CIOE 中国光博会将于 2026 年 9 月 9-11 日在深圳国际会展中心举办，其中的精密光学展 & 摄像头技术及应用展将集中呈现光学测试测量领域的最新成果，围绕光学测量仪器、光学成像系统、机器视觉及工业自动化等核心板块，全面覆盖从光学材料、精密元件加工到测量设备、软件算法的一站式技术能力。展会既有面向自由曲面、非球面等复杂光学元件的纳米级面形测量方案，也将展示融合 AI 算法的在线视觉检测系统在产线上实时完成缺陷判定与分类，为工业用户与科研机构搭建起高效的技术对接平台。

展会现场还将举办“光学半导体检测技术论坛”，汇聚行业专家与企业代表，深度探讨 AI 驱动的智能检测方案、以及面向先进制程与封装的高速高精度量测实践。同期“超精微 / 纳米光学制造技术论坛”、“CIOE 光学真空镀膜大会”等论坛中也将探讨超构 / 纳米与超精密加工中跨尺度检测方案、光学镀膜中膜层精密测量与控制等议题。

今年 CIOE 中国光博会与 IICIE 国际集成电路创新博览会、elexcon 深圳电子展同期同地举办，总规模达 34 万平方米，汇聚超 5000 家展商，覆盖光电、集成电路与电子系统的完整生态。您不仅可以在 CIOE 上，看到从自由曲面、工业智能检测到半导体测量的全系列光学测试解决方案；还可以在 IICIE 上，看到从前道晶圆的光刻套刻误差测量、薄膜厚度检测，到后道先进封装中的 TSV 量测、凸点共面性检查，再到键合质量的非破坏性光学检测等完整半导体光学测量方案。三展联动，助您高效完成技术选型与商务对接，真正打通从检测需求到解决方案的“最后一公里”。❑

超构透镜共聚焦成像利用光的颜色来消除机械轴向扫描

超构透镜共聚焦成像方法不仅实现了现有共聚焦显微镜的小型化，更革新性地利用光谱作为深度扫描手段，取代了传统的机械调焦方式，从而为构建紧凑型、高通量且机械结构简化的三维成像系统开辟了新途径。

作者：Sally Cole Johnson Laser Focus World主编

共聚焦显微镜是一种无损成像技术，能够滤除离焦杂散光并生成高分辨率光学切片，因此在三维（3D）成像中极具价值。但问题在于大多数共聚焦系统仍然依赖机械轴向扫描来获取深度信息，而遗憾的是，这一扫描步骤增加了系统复杂度、拖慢了图像采集速度，也使系统难以实现小型化。

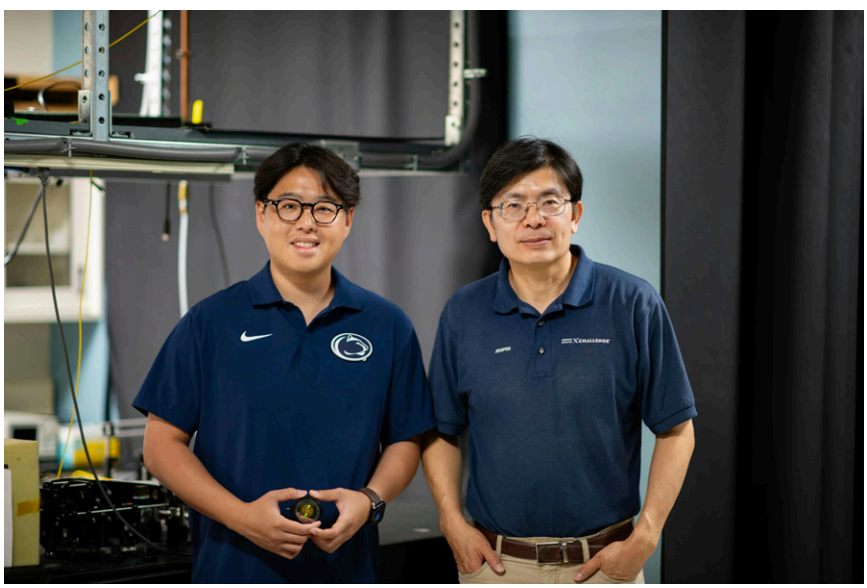
这一长期存在的局限促使宾夕法尼亚州立大学的研究人员思考：我们能否在实现系统小型化的同时，在不物理移动透镜、样品或焦平面的前提下获取深度信息？

“因此我们决定探索超构透镜能否改变这一局面，”电气工程专业博士生林育杰（Yu-Jie Lin）表示。“在传统光学设计中，色差通常被视为需要校正的问题，因为不同颜色的光会聚焦在不同位置。而在这项工作中，我们将这个‘问题’转化为了系统的工作原理。”

超构透镜是一种平面光学元件，由厚度极薄、尺寸小于光波长的纳米结构（即超构原子）构成。每个超构原子对光波进行局部调控，它们共同塑造波前，从而实现透镜的功能。相比之下，传统透镜则依赖弯曲的玻璃表面使光线折射并汇聚。

“我们的系统无需在轴向进行机械扫描，而是直接从反射光谱中读取深度信息，”林育杰说。

研究人员还“希望证明超构光学不仅能将透镜做得更薄，还能催生全新的成像架构，”电气工程教授倪行杰（Xingjie Ni）补充道。“我们的工作探索了超薄超构透镜如何将色散转化为一种紧凑、无扫描、高信息容量的三维共聚焦成像编码器。”



图：林育杰（左）手持该团队开发的超构透镜，其右侧为刘智文教授。

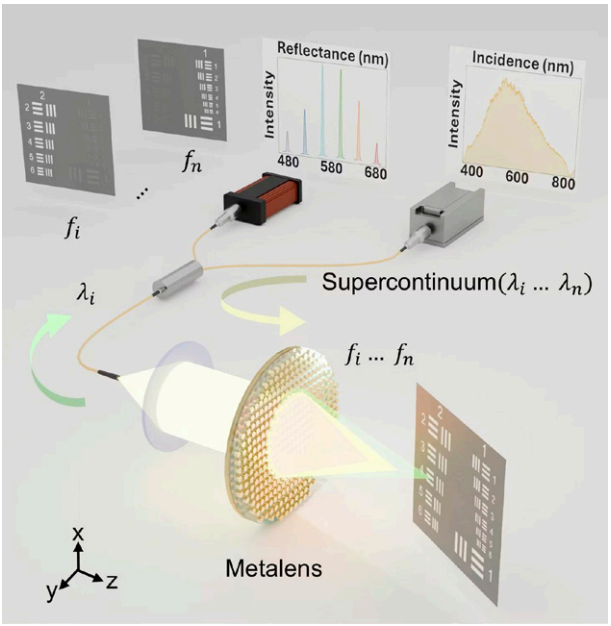
超构透镜共聚焦成像

大多数共聚焦成像系统通过沿轴向物理扫描焦平面或样品来获取深度信息。“我们的方法用波长编码取代了这一机械扫描，”电气工程教授刘智文（Zhiwen Liu）表示。“超构透镜将每个波长聚焦到不同的深度，从而并行创建出多个深度通道。”

另一种理解方式是：超构透镜沿光轴方向产生一道“彩虹”般的焦点序列，当样品反射光时，光谱便能揭示共聚焦信号来自哪个深度。通过光谱仪测量该光谱，即可直接获得轴向信息。

该方法结合了三个关键要素：一个高色散超构透镜、宽带照明光源，以及一根同时充当光传输 / 收集路径和共聚焦针孔的单模光纤。这三个要素使得在毫米级范围内实现并行深度分辨共聚焦成像成为可能。

与先前基于超构透镜的色散共聚焦演示相比，该团队的系统在 1.3 毫米深度范围内实现了大得多的轴向空间带宽积（约 68）。简而言之：它能在紧凑的光学架构中分辨出更多的深度位置。



该团队基于超构透镜的共聚焦成像系统工作原理概览。

“这项工作中最令人兴奋的一点是，我们发现色差可以成为三维成像的核心机制，”林育杰说。“对许多光学系统而言，色差被视为缺陷，因为它使不同颜色的光聚焦在不同位置。而同样的效应在这里变成了有用的信号——不同颜色被有意地分配给不同的深度。”

这一视角的转变至关重要，因为研究人员不再试图消除色散，而是转而利用它。其成果是一个紧凑型系统，其中光谱信息被直接转换为深度信息。

“一个特别令人难忘的‘顿悟’时刻是，当我们用白光通过光纤照明系统时，直接用肉眼就能看到从超构透镜沿轴向方向射出一道彩虹般的焦点线。这是对波长 - 深度映射关系的简单而直观的视觉验证，而这一映射正是整个成像概念的基础，”林育杰说。

超构透镜设计工作

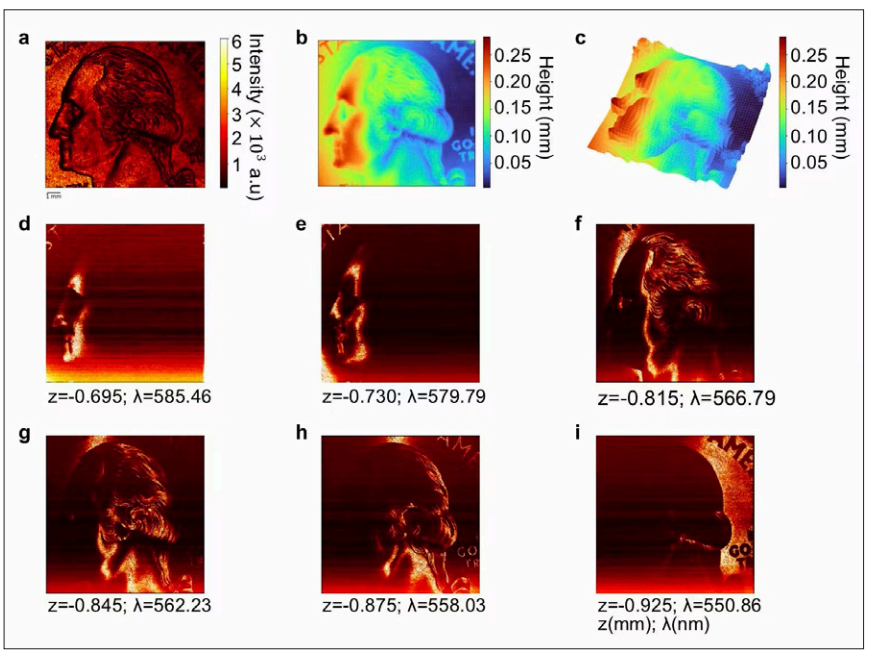
该团队超构透镜设计的一个关键部分是在提供强色散焦距偏移的同时保持良好的聚焦性能。“我们希望焦点随波长发生显著移动，从而使系统覆盖较大的深度范围——但同时我们也需要每个波长都能聚焦得足够好，以保证共聚焦分辨率，”电气工程专业博士生赵灵菡（Linghan Zhao）说。

为此，他们利用解析建模来理解轴向信息容量如何取决于设计参数，如数值孔径、孔径尺寸、波长范围和轴向分辨率。这有助于指导整体系统设计，并通过轴向空间带宽积提供了一个量化目标。

研究人员还使用电磁全波仿真来设计构成超构透镜的氮化硅纳米结构。“在高数值孔径区域，相位在器件上变化迅速，这使得局部光学响应尤为重要，”赵灵菡指出。“设计需要对相位、色散和衍射效率进行精细控制。建模不仅仅是最后的验证环节——它对于理解如何针对这一特定成像功能来设计超构透镜至关重要。”

面临的若干挑战

一个重要的挑战是光学信号吞吐量。“在反射式共聚焦成像中，从陡坡、



一枚 25 美分硬币的表面轮廓测量与光学切片结果，横向步长为 10 微米（硬币向超构透镜方向倾斜，以对应长波长照明的焦平面）。在每个横向位置，研究人员记录一个反射光谱，从而能够通过不同的处理策略从同一光谱数据集中导出两种重建模式——表面轮廓测量和光学切片。



宾夕法尼亚州立大学刘智文教授和倪行杰教授研究团队成员。

尖锐边缘或粗糙表面反射的光可能无法有效耦合回光纤，”林育杰说。“当这种情况发生时，这些区域内的深度反演可能变得不太可靠。”

另一个挑战是在强散射环境（如生物组织）中成像。“散射会降低信号强度、扭曲反射光谱，并使深度重建更加困难，”林育杰说。“解决这个问题可能需要进一步的优化，以及在光学设计、收集效率和计算重建方面的改进。”

超构透镜本身也有提升空间。“未来的设计可以追求更高的效率、更大的轴向空间带宽积、更好的制造均匀性，以及与光纤或内窥镜平台更紧凑的集成，”林育杰说。

纳米级超构透镜将色散转化为优势

该团队的工作确立了概念验证，并通过实验证明，超构透镜能够将色散——传统上被视为光学系统中的有害像差——转化为一种强大的并行深度分辨共聚焦成像机制。“我们的下一步是将这项技术从演示推向实际应用，具体包括提高光学效率、增加轴向信息吞吐量，并在更复杂的成像环境中测试该系统，”林育杰说。

他们的纳米结构超构透镜在表面轮廓测量和光学检测方面展现出潜力——在这些应用中，紧凑、高分辨率、无需扫描的深度测量可以为微光学器件、半导体器件和精密制造部件提供即时价值。“同样的概念还能催生新一代紧凑型三维光学仪器，包括无运动部件即可捕获深度信息的微型共聚焦探头、更快速的工业检测工具，以及用于生物医学应用的光纤兼容内窥镜成像系统，”林育杰补充道。❑



Newport 压电促动器

Newport 压电促动器专为需要精细调节的光学镜架而设计，可实现极小的步进。具有卓越的精度和一劳永逸的稳定性。

- 标称轴向驱动力 22 N，最大轴向保持力 90 N
- 30 nm 定位分辨率
- 使用寿命 > 1 x 109 步
- 易于安装
- 微型Picomotor 超级紧凑设计，提供真空和 UHV 版本
- Picomotor可驱动多种光学元件和位移台



请扫描二维码了解更多信息

www.newport.com

mks | Newport

PIC

光纤将超低信号损耗引入光子集成电路

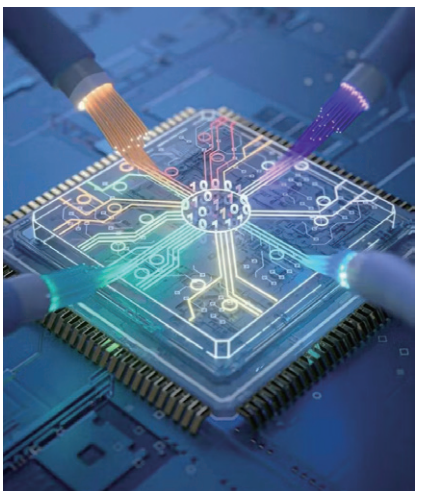
研究人员正致力于弥合光纤与集成光子学之间几十年的性能鸿沟，这将为光子集成电路（PIC）以及便携式光钟、高功率芯片激光器等精密测量领域带来根本性变革。

作者：Justine Murphy Endeavors商业媒体基础设施部门多媒体总监

加州理工学院（Caltech）的研究人员设计了一种在硅晶圆上引导光的方法，其信号损耗在可见光波段可与光纤相媲美，这为新一代光子集成电路（PIC）铺平了道路。

怀着“简单而雄心勃勃”的目标—将光纤的超低信号损耗引入硅芯片—加州理工学院克里·瓦哈拉（Kerry Vahala）教授实验室的研究人员正将光纤材料制成的光学电路直接印制在8英寸和12英寸的硅晶圆上。

将光纤用作片上波导，可在可见光波段实现与光纤相当的超低信号损耗。



加州理工学院的研究团队开发出一种硅晶圆导光技术，在可见光波段实现了与光纤相当的极低信号损耗，为新一代光子集成电路的研发奠定了基础。

“几十年来，光纤通过使用掺锗二氧化硅实现了极低的传输损耗，”博士后学者陈浩静（Hao-Jing Chen）表示，他与博士生凯伦·科尔本（Kellan Colburn）共同领导了这项研究。

但光子集成电路一直难以达到与光纤相当的性能—尤其是在可见光波段，在该波段散射和材料吸收变得十分严重。

“我们的方法将光纤的核心材料体系（掺锗二氧化硅）引入了平面集成光子学，并且采用的是完全兼容CMOS代工厂的工艺，”陈浩静说。

深入解读

该团队的部分工作涉及等离子体增强化学气相沉积（PECVD）——一种在衬底上沉积高质量固体薄膜的真空工艺—在热生长氧化层上沉积一层4微米厚的锗硅（Ge-silica）层。

“我们的工艺支持深紫外步进光刻机进行晶圆级图案化，以及高选择比干法刻蚀，”陈浩静说。

该工艺还支持炉管回流退火，以平滑侧壁并抑制散射。“这使得谐振腔本征Q值在458纳米至1550纳米范围内超过1.8亿，在1064纳米处峰值Q值达到4.63亿，”陈浩静表示，并指出这对应着0.08分贝/米（dB/m）的波导损耗。

他们的波导采用螺旋几何布局，以延长光路长度，并在光纤与半导体激光器之间实现高效的光传输。

重要成果

该团队的方法在458纳米波长处可实现0.49 dB/m的损耗，相比此前可见光集成平台提升了13 dB。在1064纳米处可实现0.08 dB/m的损耗。

“我们还观察到在紫光到电信波段范围内本征Q值达1.8亿，并且在不经退火的情况下，波导损耗相比此前纪录改善了10 dB，”陈浩静说。

该团队展示了三项关键的器件级应用：在锗硅中通过工程化反常色散实现的单环孤子微梳、通过声学限制实现的受激布里渊激光器，以及通过自注入锁定实现的赫兹（Hz）级窄线宽可见光激光器。

“在可见光谱中，我们实现了632纳米处15 Hz、512纳米处12 Hz和444纳米处90 Hz的基频线宽，”陈浩静说。“这比目前最先进的集成可见光激光器改善了20 dB以上。”

扩展难题

该团队的方法克服了若干长期存在的挑战，包括短波长散射损耗。陈

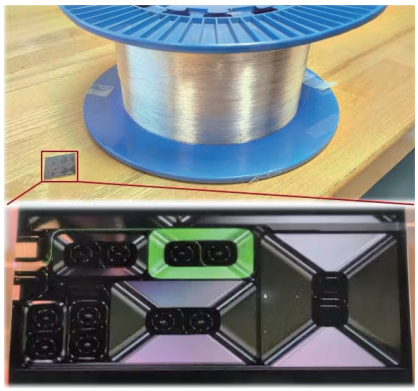
浩静解释说，在可见光波段，瑞利散射通常占主导地位。但他的团队通过炉管回流工艺实现了原子级平滑度，从而抑制了这一限制。

他们还改善了可见光波段的材料吸收问题。

“许多集成材料，如氮化硅，在紫光 / 蓝光波段表现出较高的吸收，”陈浩静说。“掺锗二氧化硅保留了光纤中已知的低本征材料吸收特性。”

热预算限制是该团队克服的另一个挑战。“我们的器件即使不经高温退火也能实现超高 Q 值，”陈浩静说，“这使得其与温度敏感材料（如 III-V 族、铌酸锂和有机光子学材料）具有良好的兼容性。”

该团队工艺的关键优势包括：覆盖 458 纳米至 1550 纳米的宽带工作范围、创纪录的低可见光波段损耗、



光纤卷盘与加州理工学院螺旋波导芯片的对比。图片来源：Hao-Jing Chen/Caltech

CMOS 兼容的晶圆级制造能力，此外还具备色散工程能力、通过锗掺杂实现的声学限制，以及用于抑制热噪声的大模场面积。

下一步计划？

在近期，该团队将集成稀土掺杂剂用于片上放大器和激光器，同时开发可见光波段频率梳，并探索精密计量学和量子光子学等应用。

“长期来看，我们的目标是在芯片上接近锗硅的材料本征损耗极限（约 0.2 dB/km），”陈浩静说。“这对应着超过 1000 亿的微谐振腔 Q 值。这样的性能水平将从根本上改变便携式光学时钟、芯片级陀螺仪、集成量子光子处理器、低噪声微波光子学和高功率芯片激光器等技术的发展。”

如果能在 CMOS 代工厂中大规模实现接近光纤级别的低损耗，该团队设想未来将传统基于光纤的精密系统迁移到芯片上，实现具有前所未有相干性的可见光集成光子学，以及面向原子、离子和量子平台的系统级集成。

“简而言之，”陈浩静说，“这意味着集成度与性能之间长期存在的取舍关系，可能不再是根本性的了。” ❑

光学引领未来™



新 2025 应用方案手册

此份全新手册聚焦于多领域技术应用及其专项配套的创新产品系列，清晰展现了我们的解决方案如何提升系统性能、优化操作效率，精准应对当前工业发展的动态需求。

查看更多详情!

爱特蒙特光学(深圳)有限公司
中国深圳市龙华工业东路
利金城科技工业园3栋5楼，518109
Tel: +86 (0755) 8435 5459 Email: chinasales@edmundoptics.cn

关注公众号

Edmund optics | china
欲了解更多信息，请点击此处:
www.edmundoptics.cn/026-8613

量子光学

硅基新型稳定电信量子比特

新发现的碳氮复合物提供了一种更耐用的量子缺陷，有望加速基于硅的先进量子技术发展。

作者：J. Kevin Nangoi　加州大学圣塔芭芭拉分校博士后研究员
Mark E. Turiansky　加州大学圣塔芭芭拉分校的博士后研究员
Chris G. Van de Walle　加州大学圣塔芭芭拉分校教授

量子技术有望通过利用物质在原子尺度上的特殊行为，变革计算、通信和传感领域。要将量子的前景转化为实用器件，需要同时具备理想量子特性且易于制造的物理系统。基于超导电路的量子比特（量子构建单元）已制成可运行的量子计算机，但设备尺寸、复杂的制造工艺和操作方式仍是实现此类计算机可扩展性的挑战。另一方面，作为当今计算机芯片基础材料的硅，作为平台极具吸引力，因为它能发挥现有万亿美元级半导体产业的优势。这使得在硅中寻找量子比特成为一个重要的前沿研究领域。

量子比特可以基于晶体中的原子尺度缺陷。一个典型例子是氮 - 空位（NV）中心，即金刚石晶体中一个氮（N）原子相邻一个空位（V，即一个缺失的碳原子）。这些缺陷既能与电子相互作用，也能与光相互作用，从而能够发射单光子（光量子），用于传输量子信息或在量子网络中进行处理。

硅作为缺陷量子比特的宿主材料日益受到关注，因为与金刚石不同，硅成熟的制造和加工工艺将有助于实现量子计算机和网络的可扩展生产。我们在加州大学圣塔芭芭拉分校的团队近期在硅中发现了一种稳定的新型量子比特，可望成为已被大量研究的硅基 T 中心的有力替代方案（见图 1）。

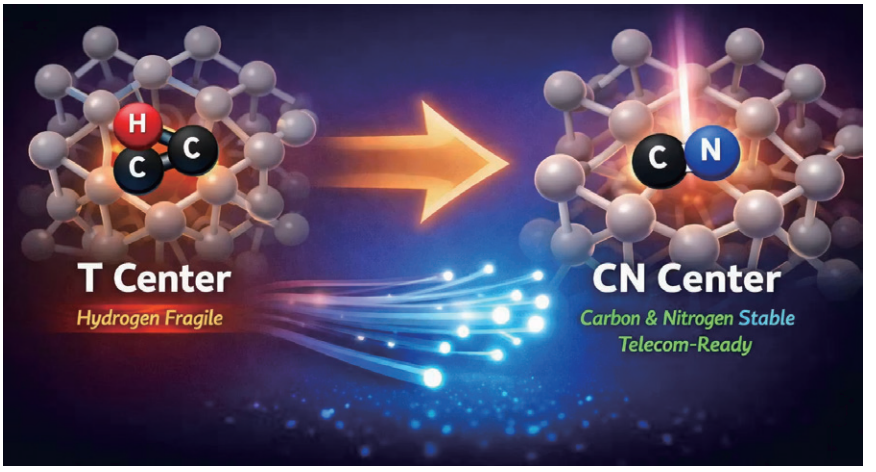


图 1：AI 生成图片展示了硅中稳定、适用于电信波段的 CN 中心缺陷复合体（右）相较于更脆弱的 T 中心的优势。

面向量子信息应用的硅基T中心

近期大量研究聚焦于 T 中心，这是一种由碳原子和氢原子构成的硅缺陷（见图 2 左），能够长时间存储量子信息，其相干时间可与 NV 中心（毫秒级）相媲美。量子信息存储于电子自旋（源于未配对电子）和氢原子核自旋中。T 中心还能在电信 O 波段发光，实验测量的零声子线（ZPL）为 935 meV（1326 nm）。然而，T 中心中氢（H）的存在使其较为脆弱，对制造条件敏感。氢在晶体中容易移动，且在加工过程中难以控制，这给实现可重复且可靠的器件制造带来了挑战。

CN 中心：一种更稳定的硅缺陷

我们的团队确定了 T 中心的一种有前景的替代方案：CN 中心，它由碳（C）和氮（N）原子构成（见图 2 右）。CN 中心在化学上与 T 中心类似，因为 N 与 C+H 具有相同数量的质子和电子。与 H 一样，N 也具有非零核自旋。由于 CN 中心不含 H，它将更加稳定，且在实际器件中更易实现。

我们采用先进的第一性原理计算机模拟，在原子尺度上对该缺陷进行建模。这些模拟使我们能够预测尚未在实验中实现的新材料的物性，并有助于指导未来新型器件的工程设计与

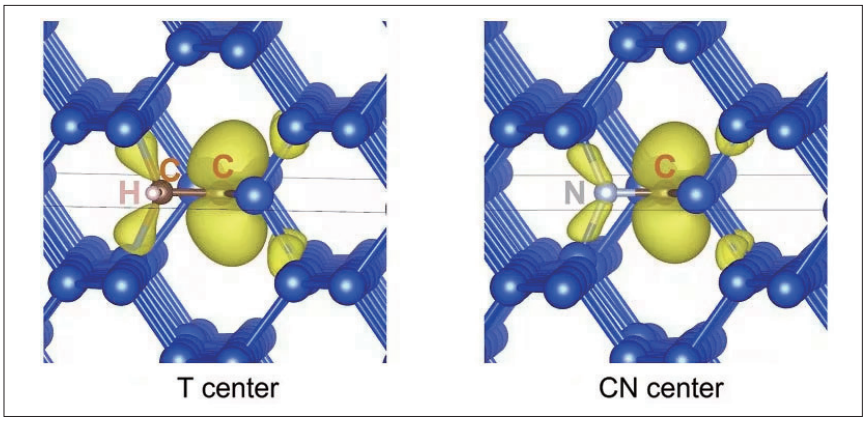


图 2：T 中心和 CN 中心的原子结构以及局域在缺陷处（黄色）的电子密度。蓝色球体为硅原子，棕色为碳，浅粉色为氢，银灰色为氮。

制造。具体而言，我们利用密度泛函理论结合最先进的杂化泛函，精确预测了缺陷的稳定原子结构和相应的电子结构。

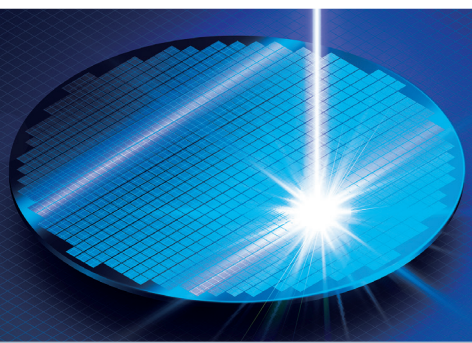
我们将多达 1000 个硅原子放入称为“超胞”的模拟盒子中，并相应放置缺陷原子，以此构建模型系统。结果表明，CN 中心在分解为碳和氮的替位及间隙缺陷方面具有稳定性。我们还证明，CN 中心再现了使 T 中心对量子应用具有吸引力的关键电子和光学特性。与 T 中心类似，对应于 ZPL 跃迁的电子激发态涉及束缚激子，其空间范围超出了计算上可处理的模拟胞尺寸。为应对这一挑战，我们开发了一种新方法，从在计算可行胞中进行的计算外推激子特性，从而能够可靠地计算光学性质。我们预测其 ZPL 位于电信 S 波段，为 828 meV（1498 nm）。

在硅中发现一种无氢、电信波长的量子光发射器，是弥合量子科学与可扩展技术之间差距的重要一步。CN 中心可作为一种实用的新型量子器件构建单元，有望在使用当今电子产业所依赖的同样硅材料的前提下，加速先进量子技术的发展。

本研究由美国能源部科学办公室基础能源科学办公室通过量子优势协同设计中心（C2QA）提供资助。❑

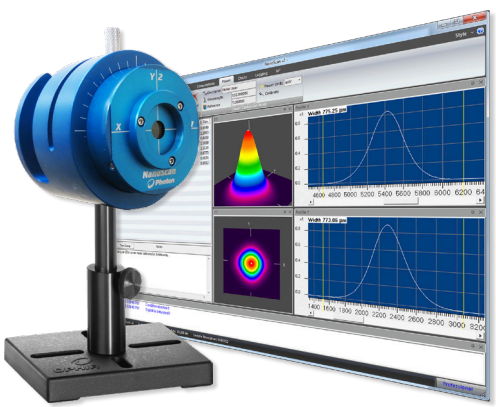
NanoScan

轻松掌控精小聚焦光斑的分析



在半导体、光纤对准、医疗和工业应用中，测量高精度聚焦的光束往往充满挑战。NanoScan 扫描狭缝激光光束分析仪通过精准、可重复的测量，使这一过程变得轻松自如，可有效表征激光性能、提高产能，并减少生产停机复核的频次。

- **更快速的对准**——提供实时光束分析，可测量小至 7 μm 的光斑
- **更高的对准精度**——拥有宽动态测量范围
- **宽波长兼容性**——覆盖全激光光谱范围
- **灵活适用于各种配置**——多样化的 NanoScan 型号满足不同应用需求



更多信息，请访问 www.ophiropt.com

mks | Ophir

光学

纳米级精度规模化：主动对准光纤阵列解锁下一代光子学

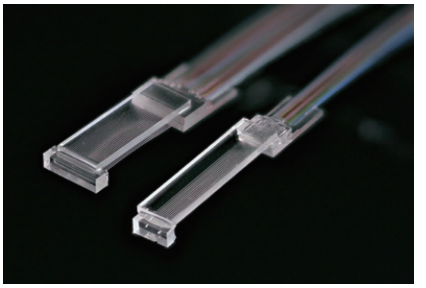
欧盟创新理事会（EIC）加速器奖项正在助力 MicroAlign 公司将专为超低损耗光子系统设计的纳米精度光纤阵列推向工业化生产。

作者：Dario Lo Cascio　MicroAlign 的项目经理

光子量子计算正在快速发展—但硬件平台的规模化需要的远不止量子比特层面的创新。光纤到芯片的连接，尤其正成为一个工程层面的约束瓶颈。

光子量子计算机依赖多通道光纤阵列将光耦合到光子集成电路（PIC）中。即使是纳米级的对准偏差，也会引入光子损耗、降低纠缠保真度，并影响整体系统性能。尽管为数据通信和电信应用开发的传统光纤阵列具有高吞吐量，但它们并非为满足量子架构的超低损耗要求而设计。随着行业从研究原型向早期商业系统过渡，封装精度必须从实验室层面的技术挑战演变为工业化量产能力。

主动对准技术带来的精度优势远不限于量子系统。任何在严格光损耗预算下运行的光子应用—无论是空间通信、国防传感、数据通信还是电信基础设施—都能从更低的插入损耗和更严格的通道间一致性中直接受益。对于模拟光学传感应用，更低的耦合损耗意味着能够探测更微弱的信号，并更高效地利用激光器的全带宽（例如超辐射发光二极管（SLED），如右图所示分别位于右侧和左侧）。更低



12 通道和 24 通道高精度光纤阵列

的损耗还意味着在给定光预算下所需的激光驱动功率更少：激光器运行温度更低、产生更少废热、使用寿命更长。其结果是整体热足迹更小、散热开销降低、产品寿命全面延长。

超越被动对准

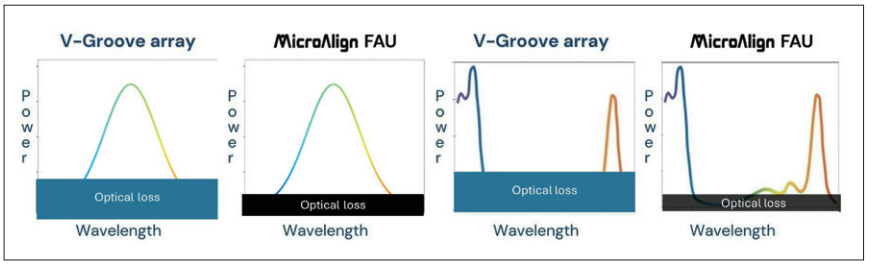
MicroAlign 开发了一种微操作平台，能够以纳米级精度对单根光纤进行主动对准。传统光纤阵列依赖精密 V 型槽内的被动定位，机械公差会在各通道间累积。相比之下，主动对准在组装过程中动态调整光纤位置，在永久固定之前校正间距偏差。这种方法使多通道阵列能够针对最小插入损耗进行优化。

随着性能指标日益严苛，量子及其他高端光子应用中对 0.5 dB 以下光耦合损耗的期望越来越高。要在批量生产中持续维持这样的损耗水平，不仅需要精密性，还需要可重复的工艺控制。

面向新兴需求的规模化生产

为支持工业化进程，MicroAlign 获得了 250 万欧元（约 280 万美元）的欧盟创新理事会（EIC）加速器资助（含股权部分），以加速其光纤阵列制造的自动化。该资助支持在保持稳定

下转第16页



左侧两图展示了使用 MicroAlign 光纤阵列配合宽带激光源（如 SLED）时光学损耗降低的效果。右侧两图展示了与光谱输入结合时的效果。图片来源：MicroAlign

光学

光能否突破 AI 的能耗瓶颈？

光子学并非要推翻现有计算体系，而是在网络层面开辟新的计算能力，从而对现代计算架构进行增强和补充。

作者：Nick New 英国Optalysys 公司 CEO

自2022 年 ChatGPT 等生成式 AI 语言模型问世以来，人工智能基础设施投资一路飙升。随着超大规模企业在 2025 年将 AI 基础设施投资推至历史新高，国际数据公司（IDC）统计的全球投资总额已达惊人的 3180 亿美元，且似乎有望逐年持续增长。

在资本注入急剧攀升的背景下，行业正接近物理层面的“扩展墙”。传统基础设施在数据中心容量限制和激增的能源需求重压下，已开始不堪重负。

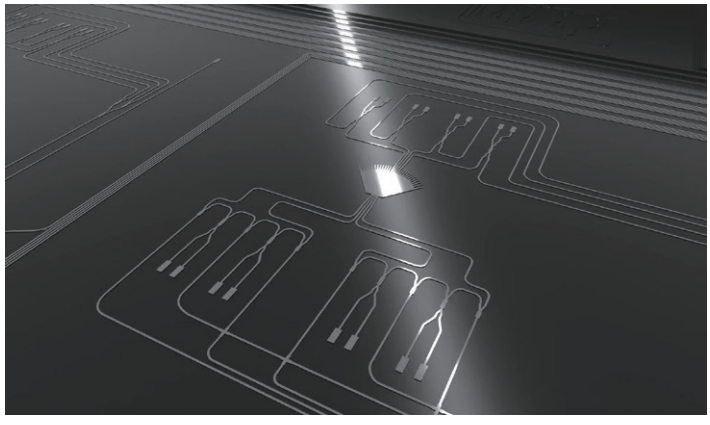
为 AI 供电所需的能源日益增长，这种趋势不可持续，同时人们对由此带来的环境损害也日益担忧。

我们现在正处于一个拐点。传统的电学数据传输方式正接近其极限，英伟达（NVIDIA）近期向两家光子学公司 -Coherent Corp. 和 Lumentum- 投资 40 亿美元，便是一个明确的信号。英伟达押注的是一个通过光（光子）而非电来传输数据的未来。

AI 能耗

电力研究协会（Electric Power Research Institute）估计，到 2030 年，数据中心的年耗电量可能占美国总发电量的 9%，而 2023 年这一比例为 4%。随着 AI 模型面临不断增长的消费需求并需要更多算力，全球能源需求将随之上升。考虑到近期能源价格的波动性，这对 AI 服务扩展的成本构成了严峻挑战。我们已看到这一问题正在显现 -OpenAI 将能源账单上涨列为缩减其英国扩张计划的原因之一。

处理器正逼近物理极限。晶体管——构成电子电路基础的电子开关——如今宽度仅有几个原子，在这样的尺度下，量子效应和发热成为重大制约因素。



Optalysys 波导 图片来源：Optalysys

隧道尽头的光芒

除了处理和传输数据所消耗的巨大能量之外，处理单元与存储单元之间的物理距离（无论是片内还是系统级）现在也限制了 AI 模型的运行和训练速度。将数据中心建立在光子学基础之上，是顺理成章的下一步。

很快，在光数据路径内进行计算将成为可能，这为降低延迟、扩展基础设施提供了机会，而无需按比例增加功耗。

光子学可直接集成到硅芯片上，从而实现相对于电学方案的可扩展性和效率提升。光子学效率提升的核心原理很简单：光比电子传输速度更快、承载信息更多，同时产生的热量更少。这带来了显著更高的计算密度、更低的功耗和更优的热性能，从而克服了传统芯片上“暗硅”问题所施加的限制。

在芯片层面提升效率的收益，在能耗节约的复利效应中体现得尤为明显。芯片节省一瓦电能，同时也会减少用于供电和散热的能源浪费。光子学为 AI 基础设施的发展开辟了一个以更快、更清洁、且具备根本可扩展性为基础的未来。

光子学数据中心实施

大规模 AI 的根本瓶颈不再是原

始算力，而是以现代 AI 工作负载所需的速度和体量传输数据所带来的惊人能源成本。前沿模型的快速演进意味着系统在同时协调数千颗芯片时始终承受着巨大压力。传统数据中心基础设施根本无法跟上持续、高强度数据交换的需求。

光子学提供了一个从战略层面解决这一问题的机会，而不仅仅是缓解日益紧张的电学架构所带来的散热需求螺旋式上升。早期行业估算表明，使用光传输数据相比传统电子方案，可提供约 5 倍的能效和 10 倍的网络韧性。

硅光子的收益不仅限于即时的效率和可持续性提升。通过消除显著的数据传输瓶颈，光子学还解锁了此前因能源成本过高而被认为不切实际的计算类型，例如全同态加密（在不解密的前提下处理加密数据）。

通过消除传统计算架构的局限，光子学对国防、金融和医疗保健等行业具有深远影响—这些行业对性能和数据隐私的要求是刚性的。

迄今为止，AI 行业对其不断升级的能源需求反应迟缓，且未能解决传统硅架构的结构性缺陷。英伟达近期数十亿美元的投资是一个明确信号，表明超大规模企业现已认识到这本质上是一个基础设施问题。

我们现在必须自问：是继续走老路—将巨额资金持续投入到数据中心的建设和冷却基础设施中—还是投资于光子学等创新解决方案，从源头上解决关键限制？

光子学代表了一片新的机遇疆域。光子学并非取代现有系统，而是通过在网络内部释放新的计算能力，来增强现代计算架构。光子学正推动芯片行业迎来自冯 · 诺依曼架构问世以来最大的架构变革，它为释放无限算力提供了机遇。❑

上接第14页

高质量产出的同时提升生产吞吐量。这一转变至关重要，因为量子计算公司正开始规划更大规模的部署。光纤阵列在光子量子计算机中并非边缘子系统。单个大规模系统可能就需要数千个阵列。随着应用加速落地，可靠且可扩展的供应链具有战略意义。

更高密度与更小间距

除提升产能外，MicroAlign 还在攻克密度问题。2026 年内，MicroAlign 计划推出新一代超高精度光纤阵列，通道间距小至 127 微米。更小的间距使光子封装更加紧凑，并支持集成芯片上更高的 I/O 密度。随着光子电路集成更多通道，高密度光纤阵列对于控制可管理的尺寸和布线复杂度至关重要。

在密集配置中，主动对准优势更为明显，因为位置上的微小偏差会显著影响多个通道的总光学损耗。

量子之外的广泛应用

尽管量子计算是主要驱动力，但超低损耗连接的需求还延伸至许多其他先进光子学领域—且这些市场的商业机会可能同样重要。

在光交换与路由领域，微机电系统（MEMS）开关和波长选择开关是数据中心和电信骨干网可重构网络的核心组件。这些器件对插入损耗高度敏感：光纤 - 芯片界面每增加 0.1 dB 的耦合效率损失，都会直接侵蚀系统裕量，并可能迫使使用更昂贵的光放大方案。能够持续达到 0.5 dB 以下损耗目标的主动对准阵列，使系统设计人员得以放宽放大器要求、降低功耗，并在无需额外基础设施的情况下延长传输距离。

国防与空间光子学同样展现出令人信服的应用场景。自由空间光通信终端、激光雷达传感器和卫星载荷都要求在受限的体积、重量和功耗（SWaP）预算下实现尽可能高的耦合效率。在这些环境中，光纤 - 芯片界面节省的零点几分贝可直接转化为更小、更轻、更远距离的系统。所有通道的性能一致性—主动对准阵列的一大标志—对于多通道传感器阵列尤为关键，因为通道间的差异会降低测量精度。

精密封装作为竞争差异化优势

主动对准的工业化反映了光子学制造的一次更广泛的范式转变。光纤阵列正从通用化的电信组件演变为对系统性能至关重要的精密工程子系统—涵盖量子计算、先进传感、光通信和国防光子学等各个领域。

新兴的量子与高端光子学市场正在重新定义行业期望：纳米级间距精度、0.5 dB 以下耦合损耗、高通道密度和可扩展的自动化。同时满足这四个要求需要重新思考组装方法。

随着光子量子计算迈向商业部署，封装技术的可扩展性可能被证明与量子比特架构的进步同等关键。而对于许多不涉及量子比特的高性能光子学市场，同样的道理同样适用。在一个每零点几分贝都至关重要的行业中，精密封装已不再是一个细节—它是一种战略优势。❑

激光器与光源

激光稳频系统原型：从模拟锁相放大器到数字实现

基于 FPGA 的软件定义方法能够实现更灵活、更精密且更具成本效益的稳频工作流程—尤其在光谱学、干涉测量和量子光学等应用中表现突出。

作者：Črt Valentinčič Red Pitaya公司首席技术官

构建激光稳频系统过去通常意味着购置一台庞大且昂贵的模拟锁相放大器。尽管这类系统行之有效，但与现代数字方案相比，它们在灵活性、延迟和集成度方面存在局限。采用数字信号处理（DSP）的数字设备在性能上超越了前代产品，这一点已在实际案例研究中得到验证。激光稳频的未来是否属于数字化？

激光稳频至关重要。在许多激光稳频装置中，表征频率偏差的信号极其微弱，且常淹没于背景噪声之中。环境扰动和探测器噪声极易主导测量结果，使得可靠地提取误差信号颇具挑战性。

尽管看似纯净，激光器实际上并不能产生完全单一频率和恒定功率的输出。由于对环境敏感，温度、振动、压力或电源的微小变化都可能导致激光频率漂移和功率波动。即便在实验室和教学环境中，这些微小变化也会产生显著影响。

对于高精度应用（如高分辨率光谱学）而言，这种不稳定性是不可接受的。研究人员必须借助激光稳频系统来主动校正波动，并将激光输出锁定至高度稳定的外部参考基准。

激光稳频的通用方法是反馈环路。将一部分光束分出来，送入稳定参考基准，探测器测量激光频率相对于该稳定参考的偏差。误差信号为零表示激光锁定在参考条件上，而高于或低于零的偏差则指示频率漂移。

误差信号通常极其微弱，因为它们被淹没在背景噪声之中。传统的提取方式是使用模拟锁相放大器——一种经过专门调谐、用于在指定频率上寻找信号的物理设备。

模拟锁相放大器的局限

在过去，构建激光稳频系统意味着购买一台独立的模拟锁相放大器，并将其通过物理线缆连接至探测器和其它电子模块。这种方式有效但缺乏灵活性。若要改变调制频率，专业人员必须修改甚至更换硬件。

几十年来，模拟锁相放大器一直是灵敏测量的基石，因为它们能从极嘈杂的环境中提取微弱信号—在这些环境中准确的数据获取至关重要。它们在历史上发挥了重要作用，但在满足不断演进的性能期望方面已力不从心。用户无法轻易更改器件的核心功能和设置，包括工作频率范围、滤波器类型和时间常数。

数字锁相放大器通过数字信号处理算法对输入信号进行数字化，实现精确滤波和多频解调，且不受元件漂移影响。它们专为高性能、实时、并行的数学运算而设计。

数字实现是在数字设备上通过代码复现模拟锁相盒的全部功能。它通过滤波和数字处理实时提取误差信号，随后由数模转换器生成校正激光所需的电压。这种方法在性能和功能上均可超越模拟实现，特别是在需要灵活性和集成度的应用中。

数字信号处理基础

现代方案是对锁相放大器的核心功能进行数字化。高速模数转换器（ADC）将探测器输出的含噪模拟信号转换为数字数据流。数字信号处理对该数据执行数学运算，经过滤波和处理后实时输出提取的误差信号。

将信号转换为数据——ADC 将连续的模拟输入信号转换为离散的数字序列。以高固定速率对输入电压进行采样，产生一个近似原始波形的数据流。目标是将输入信号与参考信号

（通常为正弦波）进行比较。

为此，系统将输入信号分为两路。两路分别与参考信号及其 90 度相移副本相乘。与模拟仪器不同，数字技术在分路时不会引入信噪比损耗。这些信号随后通过相同的数字低通滤波器，以消除噪声并进行数据平均。

解调过程的输出是两个稳定的直流（DC）值。为将其进一步净化，可使用数字滤波器，如级联积分梳状（CIC）滤波器或有限脉冲响应（FIR）滤波器，以抑制高频信号并得到无噪声的直流信号。

净化信号—— CIC 滤波器应用广泛，因为它无需存储滤波器系数，也不涉及乘法运算。它依赖最简单的计算—仅需减法和加法即可实现。与 FIR 相比，能以显著更低的计算复杂度实现低通滤波。

尽管 FIR 仍有其用途，但它需要极低的截止频率，导致运算复杂、资源消耗大且延迟更高。若偏好 FIR，可通过共享同一系数表的双滤波器进行优化。该方法兼顾优异性能、低计算复杂度和低资源占用。

最小化延迟——混频之后，信号可能仍含有噪声。为净化信号，锁相放大器必须对信号进行平均。平均是延迟的常见来源，因为其本质上无法瞬间变化，必须随时间积累测量。

若平均时间极短，输出对变化的响应非常迅速，但滤除的噪声有限。反之，长时间平均可有效消除噪声，得到干净稳定的结果，但在实际信号发生变化时响应缓慢。

将时间常数——衡量系统响应输入速度的指标——设为极短值。此时输出可能有噪声，但对任何变化几乎瞬间响应。随着时间常数逐渐增大，输出开始出现滞后。为获得尽可能短的平均时间，只需在信号稳定到足以可靠测量时即止。

数字实现的优势

使用数字锁相放大器，实验室专业人员只需编辑一行代码即可更改参数——如滤波器设置、调制频率和增益——无需触碰任何硬件。数字控制使得更复杂、自适应的稳频技术成为可能，而这些技术用模拟元件实现极为困难甚至不可能。

除了更直观之外，数字系统通常也更经济。单个可编程器件的成本远低于多个搭载模拟元件的专用电子机箱。在实际应用场景中，采用数字信号处理的激光稳频系统高效、强大且性价比突出。

以扫描探针显微镜（SPM）为例，该技术提供微纳尺度表面形貌图。通常，扫描点布局在矩形拓扑光栅图案内定义。这种策略的风险在于，扫描密度不足可能导致有价值的数据被遗漏；另一方面，在分辨率要求不高的情况下，系统又可能被数据淹没。

支持自适应扫描的控制器可显著提高数据采集效率。一项案例研究表明，即使是低成本的数字信号处理器也能达到与先进商用显微镜相当的性能，支持 16 位、18 位和 20 位操作。该实验展示了利用灵活的标准组件构建强大仪器的潜力。

位深越高，控制器能测量的高度差就越小。纳米级成像需要极端精度以探测微小特征。该定制系统使用附加板将原生 14 位分辨率提升至 18 位和 20 位，从而实现更精细的控制和测量。

激光稳频系统原型

由于采用频率合成和相敏检测技术，数字锁相放大器的精度显著优于模拟对应产品（见图 1）。尽管实现复杂度有所增加，数字实现提供了更大的灵活性和可扩展性。在设计模拟器件时，受限于模拟电子器件的固有局限，某些误差难以有效抑制。

无论是量子光学研究人员利用数字信号处理构建复杂反馈网络，还是大学实验室向学生传授激光物理原理，这些激光稳频系统显然都优于其模拟前代。

下转第25页

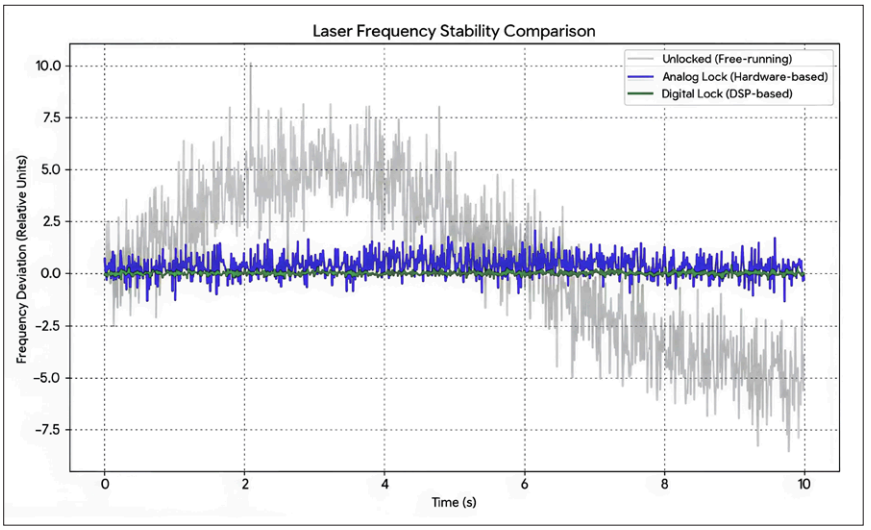


图 1. 激光频率偏差对比：未锁定的激光器（灰色）表现出显著的环境漂移；模拟锁定（蓝色）抑制了大部分噪声，但受限于硬件引入的漂移和元件容差；数字实现（绿色）利用高速 DSP 实现了近乎为零的误差信号，提供了卓越的稳定性。

激光清洗

宝辰鑫推出 MOPA 10000W 高功率脉冲光纤激光器

创鑫激光旗下子公司宝辰鑫推出了型号为 MOPA 10000W 的高功率脉冲光纤激光器，该设备主要应用于激光清洗等工艺，可替代部分传统高污染工艺，有助于降低能耗。



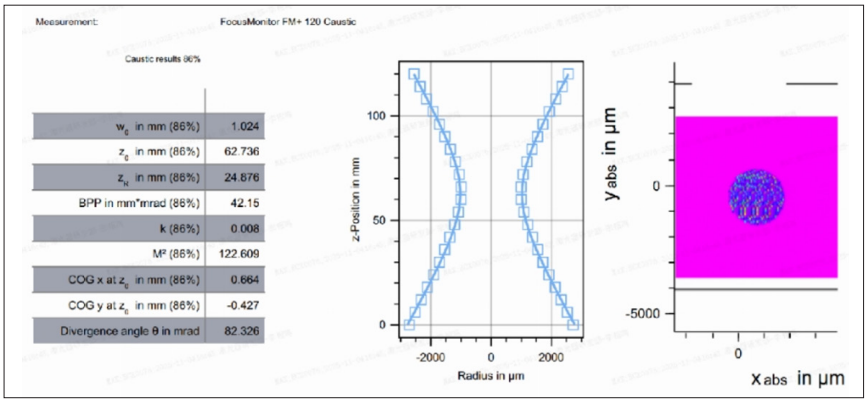
MOPA 脉冲光纤激光器的特点在于脉冲宽度和频率可以独立调节，适合处理异种材料焊接、精细清洗、精密切割等复杂加工任务。宝辰鑫围绕万瓦级 MOPA 脉冲激光器进行自主研发，解决了非线性效应、热管理、高峰值功率与高平均功率难以兼顾等技术问题，研制出波长为 1060-1070nm、单脉冲能量达 300mJ、输出功率 10000W 的激光器系统。

MOPA 脉冲光纤激光器实测脉冲激光单纤输出数据达 10.38kW，峰值功率最高达 1.7MW，最大单脉冲能量达 314mJ。高能量的输出，为超大规模工业清洗、表面处理和高端制造场景提供强劲动力，实现高效高质的应用。

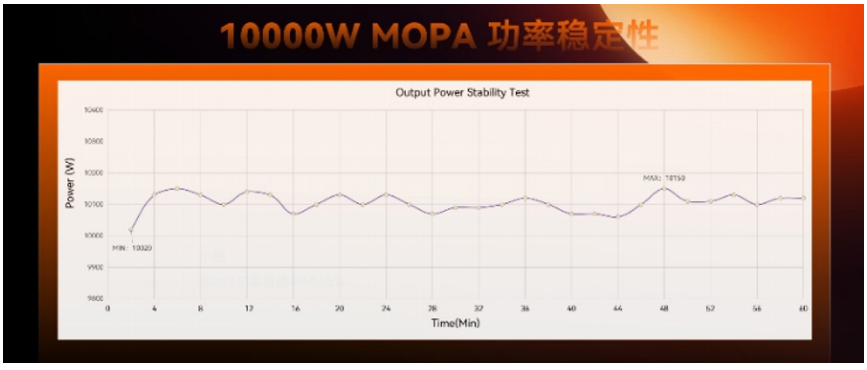
MOPA 10000W 激光器在光束质量、稳定性等核心性能指标上均进行了系统性优化：短时功率稳定性（1H）控制在 ±1% 以内，光束参数积 ≤45 mm×mrad，以极致性能为激光器在工业场景下的长期稳定运行提供支撑，可满足高端制造领域对工艺一致性与加工质量的严苛要求。

创鑫激光长期从事工业光纤激光器研发，作为子公司，宝辰鑫依托总公司的技术研发和产业链资源，将 MOPA 脉冲激光器的功率从 6000W 提升至 10000W。这次突破的目标是为轨道交通、船舶与海洋工程等行业的激光清洗等工艺提供更高效率的工具支持，推动高端激光装备的自主可控和国产化替代。

随着该系列产品在重点领域的逐步应用，可能会进一步扩大激光清洗等工艺在工业制造中的适用范围，并带动相关配套技术的升级。❑



光束质量



功率稳定性

振镜

从金刚石到细节：PCD 刀具的激光加工及现代精密激光加工机床背后的振镜要求

作者：SCANLAB

为什么PCD刀具需要“非传统”加工方式

当刀具需要对高磨蚀性、难加工材料进行加工，并同时满足持久的使用寿命和稳定几何精度要求时，通常会选用多晶金刚石(PCD) 材料—典型应用包括复合材料、有色金属合金以及高性能木基板材等。然而，PCD 所具备的超高硬度与优异耐磨性在带来性能优势的同时，也显著提高了加工难度，使其难以仅通过传统磨削工艺完成高质量成形及再修磨。在传统工艺体系中，通常依赖电火花加工(EDM)或侵蚀加工，以及针对性的复合磨削工艺来加以弥补—但这一类方法往往以加工效率受限、工艺流程复杂化以及微观几何加工能力不足为代价。

激光加工作为一种新兴且具有显著优势的替代技术正逐步在这个行业中得到应用，其核心优势在于能够以较高的工艺灵活性直接生成切削刃、断屑槽结构以及复杂的精细几何特征。本文围绕振镜在 PCD 切削刀具激光加工中的应用进行分析，覆盖刀具制造及再修磨两个关键阶段，并基于典型 PCD 加工工艺引导出振镜系统在实际应用中的关键技术要求。在此基础上，进一步将这些需求对应到两类广泛应用于高精度微加工及工业化生产的 SCANLAB 扫描振镜：intelliSCAN IV 和 excelliSCAN。



激光在PCD刀具制造与再修磨中的应用定位

在 PCD 刀具制造领域中提及“激光加工”时，通常特指激光烧蚀工艺，即通过材料的汽化或喷射实现去除，而非传统意义上的熔融或切削加工方式。在实际刀具加工流程中，激光技术主要应用于两个关键环节：

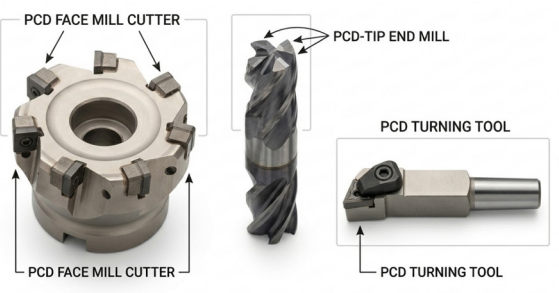
A) 新刀具制造

- 在钎焊或层状 PCD 刀片上实现切削刃以及前刀面、后刀面几何形貌的直接成形
- 在可转位刀片或旋转刀具上高精度加工断屑槽以及刃口强化结构
- 用于提升切削性能的功能化微结构加工（例如减摩纹理、受控刃带等）

B) 磨损刀具再修磨

- 在保持刀具基准面不变的前提下精确恢复刃口轮廓
- 重构微观几何特征（包括刃口圆弧、倒角、负倒角以及断屑槽结构）
- 实现局部修复，在避免过量材料去除的同时优化刀具使用经济性

传统刀具加工主要基于磨削机床，广泛用于各类刀具(如铣刀、钻头等) 的制造与再修磨。在多工艺并行的刀具制造环境中，激光加工与传统磨削通常呈互补关系：磨削工艺主要适用于硬质合金和高速钢(HSS) 材料加工，



以及部分几何形貌的成形；而激光加工则更适用于超硬材料以及对微观几何灵活性要求较高的应用场景。

PCD激光加工工艺窗口：质量、生产效率与风险控制

PCD 加工质量通常从以下关键维度进行综合评估：

- 刃口完整性（无微崩口、刃带宽度一致、刃口半径可控）
- 前刀面及后刀面表面质量（直接影响切削力水平及刀具磨损行为）
- 几何精度（包括角度精度、与跳动相关的特征以及关键几何位置精度）

当前，一个显著的发展趋势是超短脉冲（USP）激光—即皮秒级和飞秒级激光技术—的应用持续增长。与传统长脉冲加工方式相比，USP 激光能够显著降低热效应，并在高硬度材料加工中实现更优的表面质量与边界控制能力。

在 PCD 激光加工过程中，主要风险因素包括：

- 热影响区（HAZ）及石墨化风险（与具体工艺密切相关，可通过脉冲策略、波长选择及工艺参数优化进行有效抑制）
- 再沉积碎屑问题（当排屑效率或扫描路径规划不足时，可能导致刃口钝化或加工表面粗糙度劣化）
- 脉冲落点精度误差（尤其在高重复频率条件下，当运动控制与激光触发未实现严格同步时尤为突出）

正是在这一关键环节，振镜系统的性能不再仅仅作为“性能提升项”，而是直接演变为影响加工质量与工艺稳定性的核心约束因素。

振镜扫描系统在现代激光刀具机床中的关键作用

现代激光刀具机床通常由多个核心子系统构成，包括：用于实现刀具定位及复杂几何加工可达性的多轴精密运动系统（通常为五轴）、激光光源（在超硬材料加工中多采用皮秒 / 飞秒激光）、由聚焦光学组件构成的光束传输链，以及用于在小范围内实现高速光束偏转的振镜扫描头。从系统分工角度来看，机床各运动轴主要负责将目标加工区域精确定位至光学系统之下，而振镜扫描系统则承担微观几何结构的“高速精细加工”功能，包括切削刃轮廓、断屑槽结构、转角过渡、微观纹理以及局部精细形貌的构建。振镜系统的作用看似直接，其实际技术实现却极具挑战性，需要在多个维度上同时满足严格要求：

- 高动态响应能力（具备快速加速与减速特性）
- 高精度性能（实现微弧度级重复性及低漂移特性）
- 稳定的光学性能（包括镀膜一致性、损伤阈值及波长匹配能力）
- 长期运行可靠性（具备长使用寿命及低维护需求）

基于上述功能定位，以下从刀具加工结果导向出发，分析 PCD 刀具制造与再修磨过程中最关键的振镜系统技术要求。

1. 精度：重复性、非线性与分辨率

PCD 切削刃对加工误差极为敏感，微小的角度偏差即可引发刃带宽度变化、几何角度误差以及刃口位置偏移。从振镜系统性能角度，需要重点关注以下指标：

- 高重复精度：确保编程几何在批量加工中具备良好的可复现性
- 低非线性误差：保证整个扫描视场范围内几何形貌的一致性
- 高定位分辨率：确保控制系统能够稳定、精确地完成激光脉冲定位

在高精度加工场景中，采用带编码器反馈的振镜系统通常为首选方案。典型刀具加工应用要求振镜重复性（RMS）达到数微弧度（μrad）级别。

2. 漂移：温度特性与长期稳定性

刀具加工通常并非在严格恒温环境中进行。振镜系统在运行过程中会产生温升，光学元件会吸收部分能量，同时环境温度在不同工作时段也会发生变化。因此，系统漂移成为关



键的生产控制指标（KPI）。漂移问题往往具有隐蔽性，会在加工过程中逐步累积，使加工特征产生漂移，最终导致工件超出公差范围。对于 PCD 刀具再修磨生产线（目标是实现“第一件产品 = 第一百件产品”的稳定一致性），低漂移性能（结合有效的热管理设计）具有显著的工艺与经济价值。

3. 动态性能：短矢量、拐角以及“刀具式”几何

PCD 修磨与普通激光打标完全不同。其加工路径通常包含大量短路径段、紧密拐角、频繁的方向变化以及随扫描速度变化的特征尺寸要求。在此类应用中，扫描控制模式尤为关键。更优的动态性能直接体现在：能够有效减少拐角处的加工缺陷，降低不必要的边缘圆角化现象，同时在满足相同加工精度要求的前提下，实现更高的加工效率与设备产能。

4. 波长与镀膜匹配（包括 USP 适配性）

PCD 激光加工可根据具体工艺策略采用不同波长，包括红外波段（如基于 Yb 的激光源）、绿光或紫外波段。振镜扫描系统必须具备与所选波长及脉冲工艺相匹配的反射镜镀膜特性，在部分应用中还需考虑偏振相关特性，以确保系统在不同工艺条件下均能保持稳定的光学性能和加工效率。

技术要求：激光、光学与振镜系统

PCD 激光加工对系统性能提出了极高要求。材料本身具有极高硬度（维氏硬度 5,000-8,000 HV）以及优异的导热性能，这要求对激光参数进行精确控制，以实现稳定、洁净且无损伤的烧蚀过程，并有效避免金刚石基体发生热裂，以及加工区域出现石墨化现象。从系统架构来看，振镜扫描系统位于三个核心子系统的关键交汇点，即激光光源、光学传输链以及运动控制系统，其性能直接影响整体加工质量与工艺窗口。

激光源要求

在 PCD 加工中，必须采用超短脉冲（USP）激光光源—即皮秒（ps）或飞秒（fs）激光，以实现低热影响的“冷烧蚀”加工机制。相比之下，纳秒激光或连续波激光会引入明显的热影响区（HAZ），从而导致 PCD 材料发生石墨化，并显著降低刀具使用性能。以下参数定义了典型工业应用中激光系统选型的关键技术依据：

参数	加工要求	技术依据
脉冲宽度 (Pulse Duration)	优选 1-15 ps（皮秒）；< 350 fs 用于超精细刃口加工	最小化热影响区（HAZ），实现低于石墨化阈值的稳定“冷烧蚀”
波长 (Wavelength)	1064 nm（Nd:YAG/Yb:YAG基频）；532 nm（二倍频）用于精细特征加工	PCD在近红外波段吸收效率较高；绿光波长可降低反射损耗
平均功率 (Average Power)	50-100 W（量产加工）；10-30 W（精细几何加工）	高功率提升加工效率；低功率更适用于微米级刃口与精细结构
脉冲重复频率 (Pulse Repetition Rate)	200 kHz-2 MHz 按需触发 (Pulse-on-Demand)	必须与振镜扫描速度精确匹配，以确保脉冲重叠率与能量分布一致性；支持恒定能量输入的先进加工策略，提升加工一致性
光束质量 (Beam Quality, M^2)	< 1.3	接近衍射极限，以实现工作距离条件下 < 10 μm 的高质量光斑
脉冲能量稳定性 (Pulse Energy Stability)	< 0.5% RMS 波动	能量波动会直接导致表面粗糙度波动及尺寸精度误差
偏振状态 (Polarization)	圆偏振、可控	偏振相关吸收效应会影响各向异性PCD表面的烧蚀对称性

光学系统要求

激光源与工件之间的光学传输链路必须在整个加工过程中持续保持光束质量，最大限度降低系统像差，并在目标工作距离范围内提供稳定且参数高度可控的焦点光斑。对于 PCD 振镜加工而言，光学系统不仅影响加工精度，同时也是决定工艺窗口稳定性和一致性的关键因素：

• F-Theta 扫描透镜（F-Theta Scan Lens）：

整个扫描视场范围内实现平场校正（Flat-field correction），以确保在有效扫描区域刀具表面各位置的烧蚀深度一致性。针对工作波长（1064 nm 或 532 nm）优化的抗反射镀膜可将每个光学面的能量损失降低至 0.5% 以下。为进一步降低全视场范围内的光

CIIF CHINA INTERNATIONAL INDUSTRY FAIR 中国工博会

金属成型 金属切削 激光器及配套 检测及测量

MWCS 数控机床与金属加工展

www.metalworkingchina.com

国家会展中心（上海）

2026.10/12-16

80,000m²展示面积

800+ 展商

230,000+ 专业观众

同期9大主题，
共享30万平方米展示面积

“码”上关注
获取更多展会资讯

孔令国 / 郑悦 / 赖禧翔 137-0188-8775 / 137-6466-3437 / 187-0172-8594

斑尺寸变化，通常优选采用远心光学系统（telecentric lens），以提升加工一致性与尺寸稳定性。

• 焦点光斑尺寸（Focal Spot Size）：

一般轮廓成形加工的典型工作光斑直径为 20-80 μm；对于刃口精修及微观结构加工，光斑尺寸通常控制在 5-15 μm 范围。在整个扫描视场内，光斑尺寸的稳定性是关键控制指标—其视场相关变化需控制在 ±3% 以内，以避免对加工尺寸和表面质量产生影响。

• 工作距离（Working Distance, WD）：

标准工作距离通常设定在 80–200 mm 区间，以满足三维复杂刀具几何加工所需的 Z 向运动范围。对于大直径旋转刀具（如大尺寸铣刀），则需要采用扩展工作距离配置（最大可达 300 mm），以保证加工可达性与系统布置合理性。

• 景深（Depth of Focus, DOF）：

针对复杂曲面 PCD 刀具，加工所需景深通常在 ±0.5 至 ±2 mm 范围内。对于深结构或高起伏表面加工，可通过引入动态 Z 轴焦点调节模块（基于可变发散角的扩束系统）来扩展有效景深，从而避免机械聚焦系统频繁调整所带来的效率损失。

• 光学系统热稳定性（Thermal Stability of Optics）：

在持续高功率运行条件下，光学系统需采用热膨胀系数（CTE）匹配的结构设计，以降低热变形对光束路径的影响。在 15-40°C 的工作温度范围内，控制焦点位置的热漂移，以确保长时间加工过程中的稳定性与一致性。

• 同轴观察系统（Coaxial Observation）：

通过在振镜扫描头内部集成同轴 CCD/CMOS 成像通道，可实现加工过程中的在线对位校验以及加工完成后的快速检测，无需对工件进行重新定位。该功能已逐渐成为自动化 PCD 刀具生产线中的标准配置，对于提升加工可靠性与自动化程度具有重要意义。

振镜扫描系统要求

振镜扫描系统是激光加工设备中实现高精度动态控制的核心执行单元。在 PCD 加工过程中，其性能直接决定加工表面质量、几何精度以及整体生产效率，是影响工艺稳定性与一致性的关键因素之一。在定义适用于 PCD 加工的振镜系统时，需要重点关注以下核心技术指标，以确保系统在高精度与高动态工况下的稳定表现：

对于三维 PCD 刀具几何加工，集成动态 Z 轴调焦模块的 3D 振镜扫描头正逐步成为行业标准配置。该类系统能够在 Z 轴方向实现高速动态响应，并在复杂曲面刀具上实现连续、平滑的表面跟随加工。这种方式有效避免了传统机械 Z 轴调焦所带来的响应时间限制，从而显著提升系统动态性能与整体加工效率。

典型PCD刀具应用的振镜配置示例

基于上述技术要求，以下给出两个具有代表性的“起始配置”建议（用于方案设计参考，仅作概念性说明）：

场景 A：刀片断屑槽 / 刃口强化特征的高产能加工（高路径密度应用）

优先关注点：动态性能、加工效率、拐角还原能力以及先进扫描控制能力

参数	最低要求	最优性能目标
定位精度（Positioning Accuracy）	扫描幅面内 ±5 μm	±2 μm 或更优
重复精度（Repeatability）	±3 μm（3σ）	±1 μm（3σ）
最大扫描速度（Maximum Scan Speed）	2,000 mm/s	10,000 - 15,000 mm/s（适用于高重复频率同步加工）
通光孔径（Aperture）	10 mm 有效通光孔径	14 - 20 mm（支持更大光束直径并避免光束截断）
热漂移（Thermal Drift）	< 10 μm/°C	< 5 μm/°C（对长时间连续生产至关重要）
控制接口（Control Interface）	SL2 - 100（或 XY2-100）	EtherCAT/专有高速数字接口（通信延迟<10 μs）
激光同步（Synchronization with Laser）	基于位置触发（Pulse-on-Position）	完整MOTF（Marking on the Fly），支持编码器输入
反射镜镀膜（Mirror Coating）	适用于1064 nm的镀层	双波段（1064/532nm）高反射镀层，反射率 R > 99.5%
五轴同步（5-Axis Synchronization）	基于CNC的软实时协调控制	硬件级实时多轴插补（时序抖动 < 1 ms）

推荐振镜类别：intelli*SCAN* IV（例如，当通光孔径匹配时可选用 intelli*SCAN* IV 14）

- 面向高动态扫描需求设计，适用于高路径密度、高节拍加工场景，其核心优势在于快速响应能力及优异的轨迹跟随性能。

场景 B：PCD 旋转刀具的高精度再修磨（高公差要求、长时间连续运行）

优先关注点：漂移稳定性、重复精度以及轨迹执行的可预测性

推荐振镜类别：excelli*SCAN*（或者带编码的振镜，比如 intelli*SCAN*$_{se}$ 系列）

- 优异的重复精度与低热漂移特性，为长时间连续生产提供稳定工艺基础。
- 与 RTC6 控制系统及 SCANahead 算法的深度集成，构建完整高性能控制生态，实现扫描性能与加工一致性的全面提升。

总结

激光加工正加速成为 PCD 刀具制造与再修磨领域的关键工艺技术，其核心价值在于能够以高度灵活的方式实现复杂几何结构的直接加工（包括切削刃、断屑槽及功能化微观结构），并在多个工艺环节中有效补充甚至替代传统效率受限的加工方式。

在上述应用场景中，振镜扫描系统已由功能性组件转变为关键性能决定因素，其主要体现在以下三个方面：

- 切削刃几何精度
- 跨批次生产的一致性与可重复性
- 在保证微观结构质量前提下实现高加工效率

从振镜选型的角度来看，可归纳为以下两类典型匹配策略：

- 当应用场景以高动态加工能力与系统稳定性为核心需求时，应优先选择 intelli*SCAN* IV。
- 当应用更强调高精度、低漂移及在复杂扫描路径条件下具备充足性能余量时，应优先选择 excelli*SCAN*，尤其在与高性能控制系统（如 RTC6 与 SCANahead）协同应用时，可充分释放系统综合性能。❑

上接第18页

为构建高效系统，应从杂乱、过时的硬件转向智能、灵活的软件。在原型开发阶段，应将滤波器时间常数设为尽可能短，以平衡响应速度与误差信号稳定性。稳频反馈环路的速度必须快于激光器自身的漂移速度。

良好的锁相测量基于最优的参考信号。在使用外部参考时，须确保频率明确定义且无相位噪声。在前期完成质量保障措施后，系统将承担大部分工作。如需调整，只需改动一行代码即可。

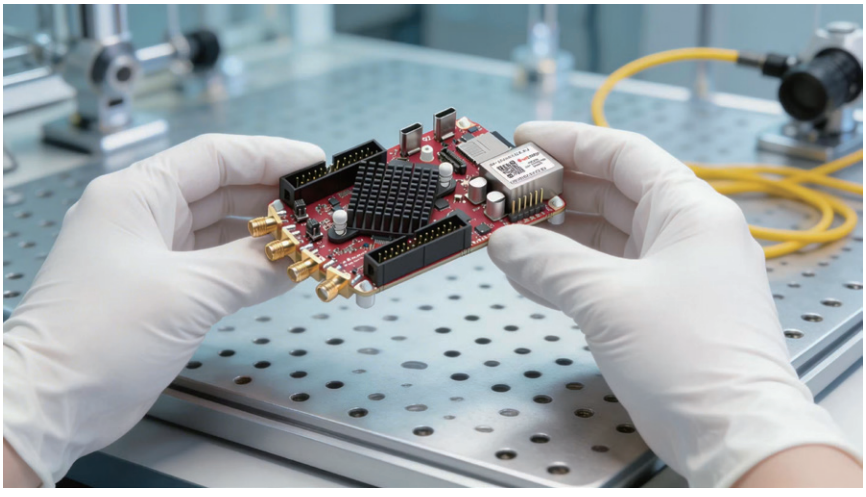


图 2：紧凑型软件定义仪器平台可通过实时数字信号处理取代传统模拟锁相硬件

向数字实现演进

稳定激光需要在强噪声环境中检测极其微弱的误差信号。锁相放大器擅长提取此类信号，但性能参差不齐。基于数字技术的软件定义平台取代了庞大昂贵的硬件，使原型开发和系统实施更快、更便宜、更灵活（见图 2）。

在追求精度的道路上，曾一度占据主导地位的模拟锁相放大器如今已显陈旧。尽管仍可使用，但其现代数字同类产品明显更胜一筹。无论您仍在继续使用上世纪 70 年代的模拟锁相放大器，还是正在着手第一个数字信号处理项目，升级换代都是明智之选。❑

激光微加工

五轴激光微加工的新型控制方法

作者: Bryan Germann　Aerotech产品经理

五轴扫描振镜提供快速灵活的解决方案，用于加工精确的孔、轮廓槽以及其他具有完整横截面的几何形状。借助合适的系统，可以控制整个微加工过程——激光器、扫描振镜和工件定位——从而生产尺寸公差达到亚微米级的部件。

本文概述了 Aerotech 的 AGV5D 五轴激光扫描振镜的工作原理，该扫描振镜与精密线性运动轴和控制系统相结合。文中解释了该系统的工作原理，包括基于 G 代码的强大编程方法，该方法能够使标准 CAM 软件和内置运动功能执行微米级的复杂钻孔和铣削操作。



图 1：本文引用的 5 轴激光运动系统采用 AGV5D 5 轴激光扫描振镜。

五轴激光运动系统：工作原理

要充分理解使用 5 轴激光运动系统进行微钻孔和铣削的优势（如图 1 所示），以及如何在这些过程中量化其精度，需要充分了解示例系统的工作原理及其编程方式。



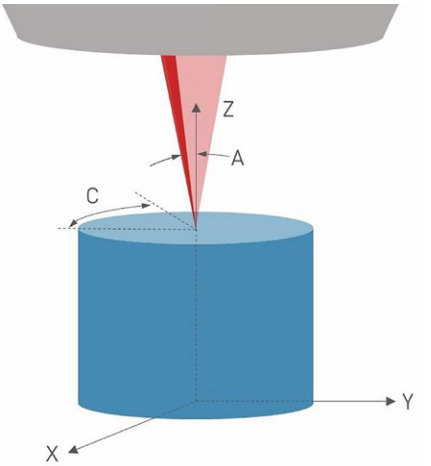


图 2：该图描绘了 Aerotech AGV5D 5 轴激光扫描振镜的五个自由度。

本文引用的示例系统使用 Aerotech 的 AGV5D 5 轴激光扫描振镜来操纵五个自由度（DOF）的激光束，如图 2 所示：

- X 和 Y- 光斑在视场内任意 Z 轴高度的定位（双自由度）
- Z- 光斑焦距控制在任意位置（单自由度）
- A- 光束锥角或偏离 Z 轴的倾斜角（单自由度）
- C- 光束时钟角或绕 Z 轴旋转（单自由度）

AGV5D 扫描振镜的最大工作范围为直径 2 毫米（X 轴和 Y 轴）且高度 2 毫米（Z 轴）的圆形区域。光束锥角（A）为 +/-9°，光束时钟角（C）为 360° 连续旋转。

AGV5D 的工作原理与五轴 CNC 加工中心非常相似，它利用符合 RS-274 标准的 G 代码指令，沿二维和 /

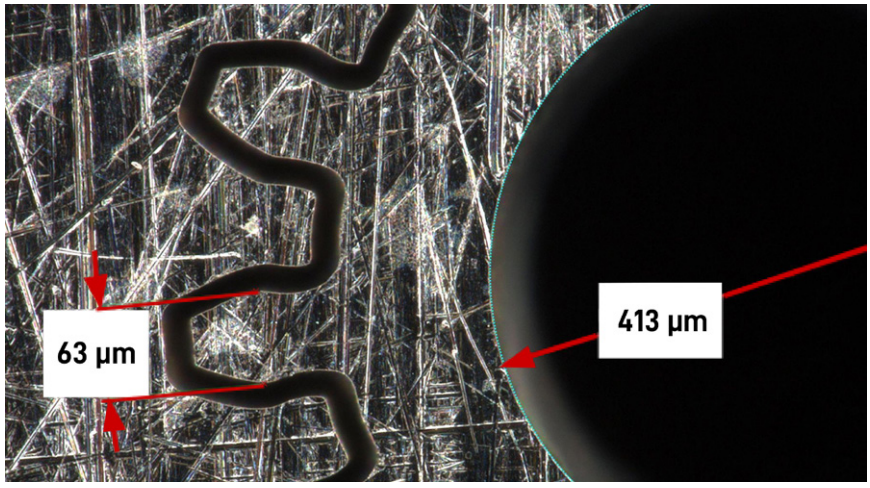


图 3：渐开线齿轮轮廓，齿宽 63 µm，圆形特征直径 413 µm

或三维路径（直线和圆弧）移动光束。光束从扫描振镜最低点的硬件喷嘴射出，因此进行激光加工的工作空间延伸至喷嘴尖端以下。所有为 AGV5D 的 X-Y-Z-A-C 轴编程的指令轨迹，都会使聚焦点在工作空间内移动。

除了五自由度光束操控外，该系统还支持由同一控制器和 G 代码指令控制的附加轴。外部 X、Y 和 Z 轴可将工件移动到扫描振镜下方，以扩展视野并与光束路径运动协调。由于 Aerotech 的 Automation1 软件机器控制器（iSMC）可监控整个系统，因此 G 代码轨迹可以与强大的 Aeroscript 编程工具进行协调。

在示例系统中，AGV5D 各轴（X-Y-Z-A-C）的激光定位运动由 200 kHz 驱动器驱动，而用于移动基板和扫描振镜（外部 X-Y-Z）的伺服频率则为 20 kHz。所有驱动器均属于同一网络，由 Automation1 协调。因此，在生成控制八个轴的轨迹时，所有驱动器均使用同一控制器实时执行。这种实现方式是 AGV5D 独有的，因为它采用单控制器架构来控制物理伺服和激光扫描振镜的运动，从而实现更灵活的部署和零件加工。

灵活的编程功能

对于本文示例中使用的系统，有多种编程工具可供选择。如果用户拥有适合系统运动学的后处理器，则可以从标准 CAM 软件生成 G 代码。这可能涉及在铣削模式下直接编程特征，该功能允许用户定义切削直径、路径和速度，以达到目标切削质量。图 3 显示了使用铣削模式的渐开线齿轮特征示例。

然而，对于常见的钻孔轮廓和形状（例如圆形孔），这种方法会非常繁琐。因此，AGV5D 可以使用参数化代码块生成各种预置的钻孔函数。其中包括针对圆形、方形和圆角的预置函数。以下是一些圆形和方形钻孔阵列的示例，这些阵列的侧壁几乎垂直，顶部和底部尺寸的间距在 1 微米以内。

图 4 显示了使用预先设定的钻孔功能创建满足以下标准的圆孔阵列的可视化效果和结果：

- 圆孔
- 直壁（无锥度）
- 直径 100 µm
- 基底：厚度 320 µm 的氮化硅

图 5 显示了使用预先设定的钻孔功能创建符合以下标准的方孔阵列的

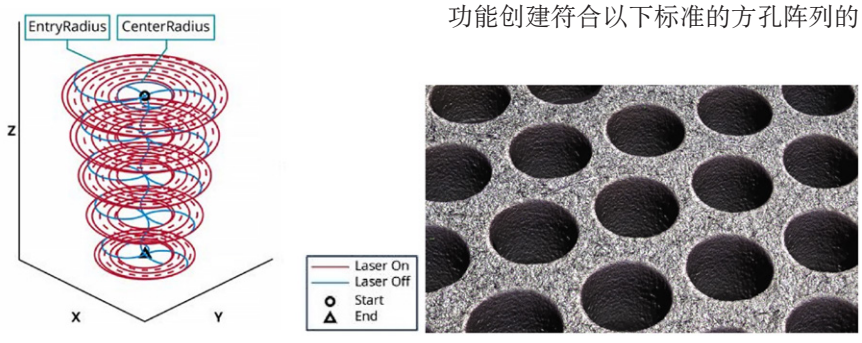


图 4：左图：堆叠圆柱体预置函数调用过程中激光器开启和关闭运动的可视化。右图：堆叠圆柱体预置函数产生的钻孔质量。

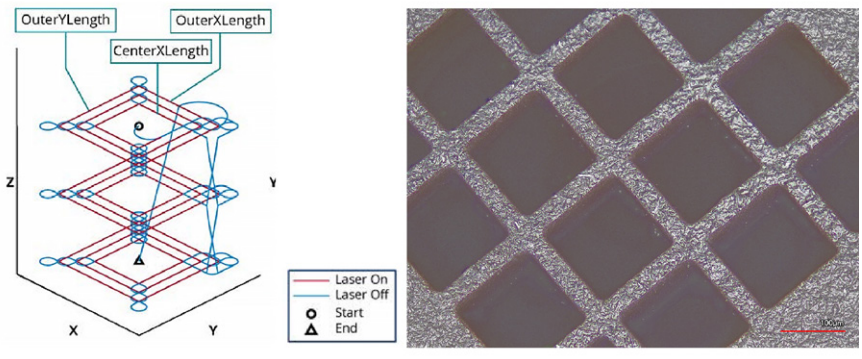


图 5：左图：调用 Stacked Square 预置函数期间激光开启和关闭运动的可视化效果。右图：使用 Stacked Square 预置函数后获得的钻孔质量。

可视化效果和结果：

- 方孔
- 直壁（无锥度）
- 直径 100 μm
- 基底：厚度 320 μm 的氮化硅

函数在 Aeroscript 程序内部调用，其中函数的参数可以是数值，也可以是其他函数中计算出的变量。以下代码块显示了一个用于创建单向堆叠圆柱体钻孔操作的示例函数，该操作用于钻孔形成圆孔。

```
UniStackedCyliner (EntryRadius,
CenterRadius, Speed, BeamStartTaper,
BeamEndTaper, HoleTaper, Depth,
NumLayers, PercentOverlap,
PathDirection, NumRepeats)
```

定义这些参数类似于定义 CNC 加工中心钻孔程序的主轴速度、进给速度和切削深度。

AGV5D 还利用位置同步输出（PSO）实现基于距离的触发和能量密度控制。PSO 是一项强大的控制功能，它允许根据运动系统中每个轴的位置反馈定义输出触发器。可以使用 MHz 范围内的编码器反馈，在路径上的特定位置触发激光脉冲。因此，用户可以避免基于速度或加速度变化的触发误差，从而确保一致的光斑间距。

由于激光触发基于行进距离，而非激光脉冲的速度或固定频率，因此用户可以在微加工操作过程中控制特定位置的具体能量密度。图 6 显示了直径 300 μm 的螺旋线示例，其激光点间距为 6 μm。粒子群优化算法（PSO）用于创建等距触发。

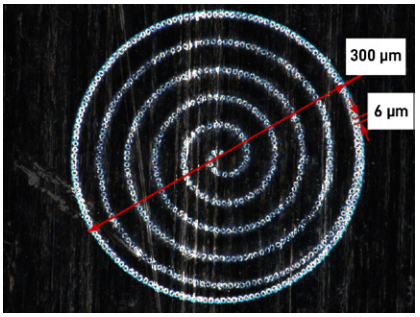


图 6：针对堆叠圆柱体单层预编程特征的粒子群优化算法示例。请注意，随着指令速度和加速度的变化，激光点之间的距离始终保持控制一致。

功能强大的数据可视化和流程优化工具包

Automation1 不仅仅是一个编程软件工具，它还是一个全自动控制器，具备数据可视化和流程调整功能，这些功能在伺服平台的运动控制平台中非常常见。由于用户可以在虚拟控制器上优化参数并运行运动控制，并且硬件可以物理连接到控制器，因此示例系统可以深入了解（如图 7 所示）指令运动和激光触发的运行情况。

该示例系统采用了 Automation1 的一维、二维和三维数据可视化技术，使用户能够将实时位置误差可视化，以便进行工艺评估。该工具允许用户绘制变量，例如激光点的位置指令和所有五个自由度的位置误差。在激光工艺开发过程中，用户可以查看计划轨迹上是否存在大量位置误差（这些误差可能会在工艺质量问题中明显体现）。此外，还可以绘制沿路径的激光触发图，以评估光点定位精度。该工具无需切割零件即可优化工艺。

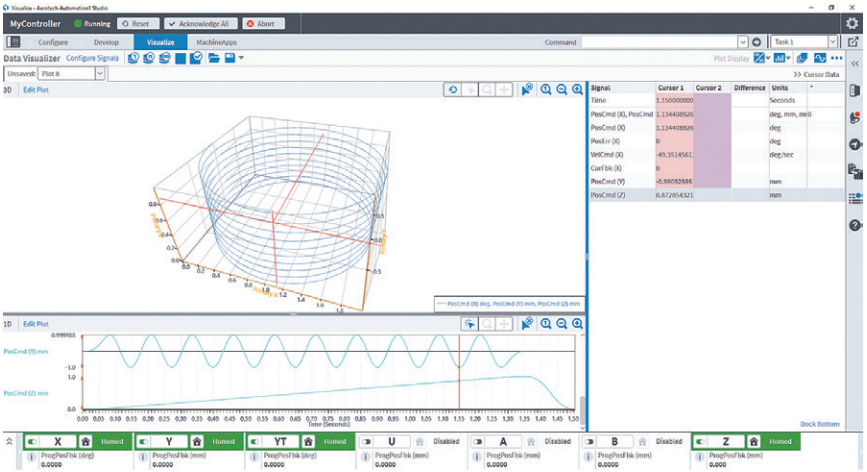


图 7：Aerotech Automation1 可视化工具的屏幕截图，显示了 AGV5D 的 3D 轮廓

处理速度

任何给定特征的加工时间取决于多种参数，包括激光器类型、激光加工配方、材料、零件公差和运动性能。例如，图 4 所示的 100 μm 孔，在 320 μm 厚的氮化硅上加工 10 次，耗时不到 1 秒。AGV5D 为 100 μm 孔提供 800 Hz 的峰值工作频率。

然而，需要注意的是，任何伺服控制系统的动态极限完全取决于指令的几何形状。Automation1 控制平台中的数据可视化功能允许用户优化轨迹，同时保持适当的零件公差和处理速度。

额定功率和热稳定性

在使用高功率脉冲激光器开发工艺时，必须了解激光能量对 AGV5D 内部光学元件的影响。AGV5D 的光学元件在 1030-1064nm 和 515-530nm 波长范围内均可处理 400 μJ 的最大额定功率。这一能量水平与许多用于微加工的激光工艺相符，使 AGV5D 能够充分利用其高动态运动设计，实现更高的产能。

由于保持热稳定性同样重要，AGV5D 扫描振镜内未配备控制器或驱动电子设备。这种设计最大限度地减少了扫描振镜内部的热传递，避免

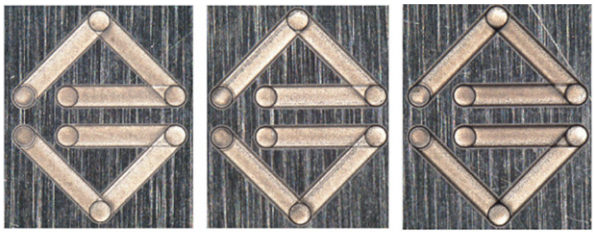


图 8：从左到右：上述过程的第 1、2 和 5 次流程。

了热漂移。此外，所有电机均采用主动水冷，确保在长时间加工过程中保持热稳定性。扫描振镜还采用主动空气吹扫，以最大限度地减少灰尘进入，并对反射镜和光学元件进行直接气冷。总而言之，这些标准功能显著提高了加工的长期重复性和不同机器之间的重复性，从而生产出更高质量的零件。

应用示例：激光微铣削

使用单层激光铣削功能，保持相同的 Z 轴高度，并应用进给速率移动 X 轴和 Y 轴，可实现一致的切削深度。单层铣削功能具有直径和套料速度的参数值，这些参数值定义了特定的材料去除率。铣削功能可以通过简单的 G 代码命令开启和关闭，并且是参数定义的，这意味着切削宽度、切削速度、停留时间等都由变量定义。这使得在定义和执行粗加工和精加工切削轮廓时具有灵活性。

图 8 展示了单层铣削操作的示例，该操作在 100 μm 厚的不锈钢板上以 3 mm/s 的进给速度铣削出 200 μm 宽的铣削路径，每次铣削深度为 10 μm。执行 10 次铣削将导致下图所示的特征贯穿整个板材厚度，从而形成完全垂直的侧壁，并且入口 / 出口尺寸彼此之间的间距在 1 μm 以内。

由于铣削功能灵活，改变单层铣刀直径对切割深度几乎没有影响。例如，即使从 200 μm 到 35 μm 的较大变化，由于工艺操作的激光速度相同，切割深度也保持不变。此外，由于 PSO 算法，光斑间距的重叠也相同。图 9 显示了 35 μm 特征的完整切割深度，在整个 1mm 宽度的图案上，顶部和底部尺寸的误差在 1 μm 以内。

总结

五轴激光扫描振镜是激光微加工不可或缺的一部分。它们能够在高纵横比特征上创建垂直侧壁，这对于一系列精密应用而言至关重要。这项技术进步有助于生产具有复杂几何形状和严格公差的组件，服务于对精度和细节要求极高的各行各业。

该技术支持的应用包括：

- 医疗器械制造，例如心血管支架和机械加工皮下注射管等组件
- 微电子加工，对于高密度互连（HDI）基板和印刷电路板（PCB）的探针卡和微砖孔的制作至关重要
- 汽车零部件制造，特别是燃油喷射器喷嘴等精密零件

AGV5D 系统以其独特的设计和编程方法脱颖而出。其架构显著降低了加工过程中的热漂移，这对于在长时间操作中保持精度至关重要。此外，AGV5D 与 G 代码编程的兼容性，使其能够充分利用商用 CAM 软件，弥补传统 CNC 加工实践与先进激光微加工功能之间的差距。这种集成增强了系统的灵活性，并简化了已熟悉 CNC 加工的行业的工艺，使其成为应对高精度制造挑战的关键解决方案。❑

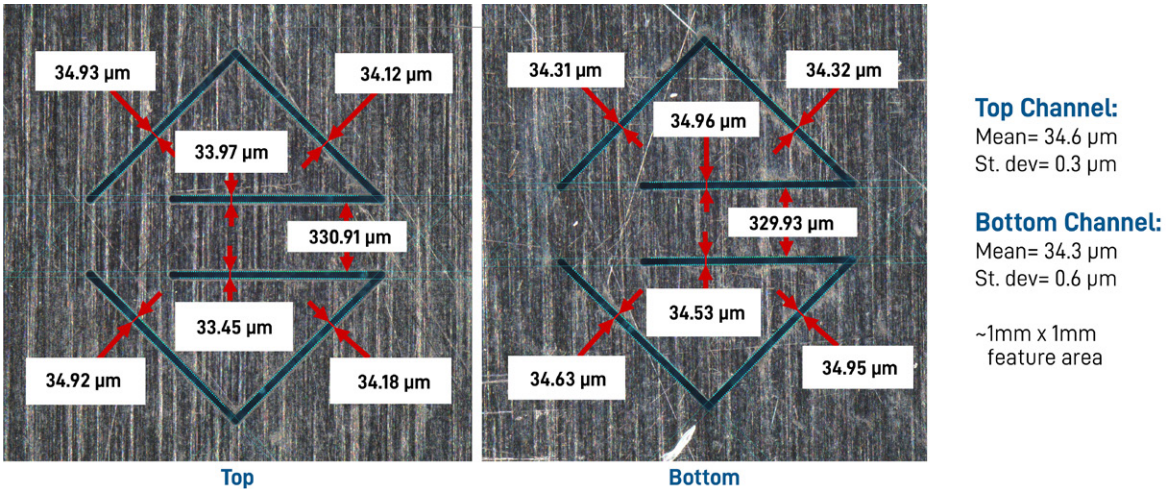
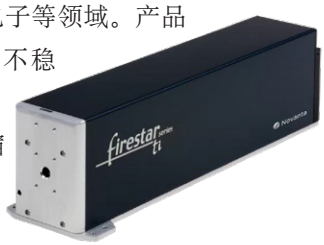


图 9：此示例展示了用户如何轻松开发高质量的激光工艺并进行优化，以达到目标切割质量。使用输出标准 G 代码的 CAM 软件包，可以实现更复杂、更精密的运动控制功能。

高性能CO_2激光器助力新能源电池制造

Novanta 的 Ti 系列 60-100W CO_2 激光器，主要应用于电池隔离膜切割、极耳胶等各种非金属清洗、高速飞行打标、汽车内饰切割、3C 电子等领域。产品采用 Novanta 专利的混合型不稳定谐振器设计，高性能射频电路，光学质量优异，可缩小光斑直径，在工件表面输出最大功率密度。



Ti 系列中受欢迎的是性价比极高的 Ti60，波长 9.3μm、10.2μm、10.6μm 可选，其优势如下：

- 高功率输出，典型值超过额定功率 50% 左右
- 卓越光学质量，快速脉冲，性能稳定，久经考验
- Ti 系列有 60-100W 可选，三种波长选项功率输出接近
- 适合需要高速扫描的应用

Ti 系列多种型号可选

- Ti60/Ti80/Ti100 为紧凑型 CO_2 激光器，平均功率均超过 60/80/100W。适用于高速打标、切割和 3D 打印等应用，并提供多种波长选项，可以处理广泛的材料类型。
- Ti100 脉冲 CO_2 激光器也是紧凑型设计，峰值功率超过 300W，适用于热敏材料的精密切割、钻孔、打孔打码等应用。
- Ti 系列还有一款为 OEM 和系统集成商提供的 100W 风冷型号，可根据系统需要来配置风扇。这是在市场上非常独特的一款产品，常见的这类设计在工作时会产生巨大的噪音，而 Novanta 的这款 Ti100W 风冷型号，拥有非常高效的冷却系统，可安装相对静音的风扇。并且防护级别达到 IP65，防尘防水性能绝佳，在灰尘较多的工作环境中或者需要定期清洗的设备中也能长期保持良好的性能。

诺万特公司 Novanta，www.novanta.com

Santec高性能可调谐激光器TSL-580正式发布

Santec 全新推出第八代高性能可调谐激光器 TSL-580，产品具备宽波长调谐范围、稳定输出功率与良好信噪比表现。产品采用重新设计的激光谐振腔与升级控制电子系统，面向自动化光学测试系统提供可靠光源支撑。

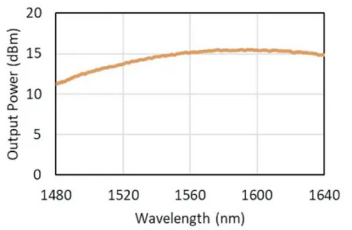
全新谐振腔设计在提升可用输出功率的同时，优化波长扫描线性度，为扫描式波长测量提供功率与稳定性更均衡的光源。升级后的控制电子系统可实现更窄线宽，在对频率稳定性与波长控制要求较高的光学测试应用中，保持精准的测量表现。



TSL-580 可搭配 Santec 光功率计与偏振控制器，支持插入损耗（IL）与偏振相关损耗（PDL）测量，适用于光器件测试、光子集成电路（PIC）表征、光谱分析、传感及量子光子学等应用场景。

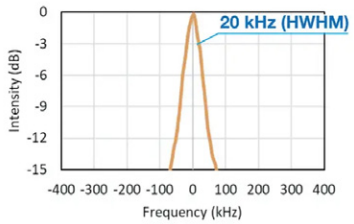
高输出功率支持多样测试场景

通过优化谐振腔设计，TSL-580 在连续波（CW）工作模式下峰值输出功率可达 15 dBm 以上，在高插入损耗器件测试、硅光子学表面光栅耦合表征等功率需求较高的场景中，可维持稳定测量条件。



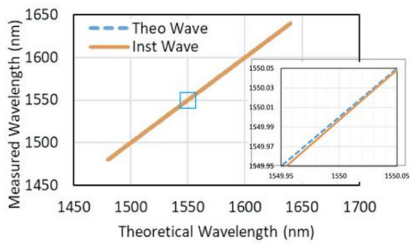
窄线宽支持高精度测量

全新的控制电路设计，TSL-580 Q 型在相干控制开启时窄线宽典型值可达 20 kHz，可显著降低极窄光谱区间测量中的噪声影响，为量子光学、高精度传感等应用提供更高分辨率的测量基础。



优异的波长扫描线性度

通过优化驱动系统，波长扫描线性度典型值控制 5% 以内，在光谱分析、传感等依赖连续波长扫描的应用中，可实现更稳定的扫描过程与更可靠的数据输出。



圣德科Santec，www.santec.com.cn

锐科激光全新近基模万瓦光纤激光器

锐科激光推出全新近基模万瓦光纤激光器。这款激光器是万瓦级近基模输出的产品，光束质量达到 1.13。

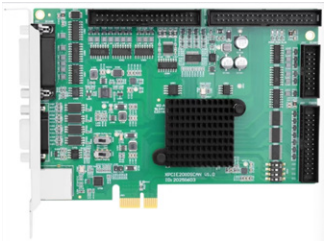
高功率激光传输中普遍存在“拉曼效应”，如同光路出现“堵车”，容易造成能量堆积、损伤设备。为此，锐科激光历时五年攻关，自研出新型改性光纤，一改国外传统八边形结构，为激光传输搭建起低损耗、高通畅的“高速通道”。配合锁波长半导体直接泵浦技术，从根本上解决能量淤积难题，让高功率激光稳定高效输出。



这款新品在高端制造领域，可用于航空航天核心器件 3D 打印、汽车车身及新能源电池精密焊接。尤其在动力电池焊接中，能有效抑制焊接飞溅，成品率可达 99.9% 以上，安全与工艺精度大幅提升。此外，产品还可用于高压线路激光清障，替代人工高空作业，规避登高风险；在低空经济、高端装备制造等国家战略领域，同样具备广阔应用空间。

锐科激光 Raycus，www.raycuslaser.com

激光振镜运动控制卡 XPCIE2000SCAN



正运动公司出品的 XPCIE2000SCAN 激光振镜运动控制卡集成机器视觉、激光控制、振镜控制和总线轴 / 脉冲轴控制，专为工业视觉 + 激光 + 振镜 + 运动控制应用而设计。结合 MotionRT750 运动控制实时内核使用，可实现 125us 超高速控制周期的 EtherCAT 总线运动控制 + 激光振镜 + 机器视觉解决方案。

- 高度集成化：将机器视觉、激光控制、振镜控制与总线轴 / 脉冲轴控制功能集成于一体；
- 降本增效：大幅降低系统复杂度，节省多套硬件成本，同时提升系统稳定性与响应速度；
- 广泛兼容：可适配光纤、紫外、二氧化碳等多种不同功能的激光器；
- 多场景应用：可应用于金属或非金属的大幅面拼接打标及切割、普通振镜打标、焊接及切割、运动轴 + 振镜轴联动打标及切割、激光打孔成型等场合。

正运动技术 Zmotion，www.zmotion.com.cn

Aerotech 扩展双轴激光扫描振镜产品线

Aerotech Inc. 推出 AGV-CPO 高性能双轴激光扫描振镜。AGV-CPO 旨在适应广泛的激光应用，兼具动态性能、精度与高性价比。由于 AGV-CPO 与 Aerotech 其他高端双轴激光扫描振镜共享核心性能及控制硬件，用户不仅能获得 Aerotech 标志性的精度，还可以在不牺牲性能或增加额外控制硬件成本的情况下，轻松扩展应用。

AGV-CPO 的核心性能包括：

- 单一控制器架构 – 借助 Aerotech 统一编程环境 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）– 通过 IFOV 技术，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，确保在切割、焊接和增材制造等应用中达到一致的能量输出。
- 超低热漂移与高工艺稳定性 – 集成的电机水冷和振镜反射镜气冷有效降低热漂移，最大限度地减少工艺随时间的偏移。

AGV-CPO 适用于一系列激光微加工应用，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。

艾罗德克运动Aerotech ，www.aerotech.com

Advertiser	广告客户	网址	页码
Edmund Optics China	爱特蒙特光学 (深圳) 有限公司	www.edmundoptics.cn/026-8613	11
LFSZ 2026	第十九届深圳国际激光与智能装备、光子技术博览会	www.laserfair.cn	IBC
MWCS 2026	2026数控机床与金属加工展	www.metalworkingchina.com	23
Newport Corp		www.newport.com.cn	9
Ophir Optronics Ltd.		www.ophiropt.com	13

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)
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

LASERFAIR SHENZHEN 2026

2026年6月10-12日

深圳国际会展中心（宝安）

LFSZ LASERFAIR SHENZHEN

LMN 世界激光制造大会 LMN WORLD LASER MANUFACTURING CONFERENCE

第十九届深圳激光展
LASERFAIR SHENZHEN 2026

激光智能制造 | 激光器 | 激光组件 | 光学材料

100,000 m²	1,200+	100,000+
同期展会规模	展商	专业观众

联系方式：

Deutsche Messe | FIERA MILANO | XZQ

汉诺威米兰星之球展览（深圳）有限公司

邵如华 136 6009 6668　郑　悦 137 6466 3437

谢健宇 134 8069 8290　孔令国 137 0188 8775

同期展会/Concurrent Exhibitions

TNE 测试测量展 | IIES INDUSTRIAL INTERNET EXPERIENCING SHOW 工业互联网体验展 | IAS INDUSTRIAL AUTOMATION SHOW / IAMD SHENZHEN 工业自动化展 | MVSZ MACHINE VISION SHENZHEN 机器视觉展 | MWCS METALWORKING AND CNC MACHINE TOOL SHOW 数控机床与金属加工展 | RS ROBOTICS SHOW 机器人展 | CMM CMM电子制造自动化&资源展 电子制造自动化&资源展

即刻注册

“码”上关注 获取更多展会资讯

激 光 世 界
LaserFocusWorld® China

《激光世界》致力于报道激光领域的最新技术、解决方案及发展趋势，为激光领域的专业人士提供解决问题的参考信息。多年来，《激光世界》杂志一直是激光行业专业人士获取行业新闻和技术信息的重要来源之一。我们依托《激光世界》专业杂志，拓展出电子快讯（eFocus）、网站、微信公众号、网络研讨会、LaserFocusCon交流会和展示活动，从而构建起媒体宣传的全方位矩阵。

全方位信息平台



激 光 世 界
LaserFocusWorld® China

www.laserfocusworld.com.cn

添加客服

关注公众号

浏览电子书