光学和光电子产业的主导刊物 www.laserfocusworld.com.cn 2025年9/10月 第5期
ISSN: 1817-6917

激光世界

LaserFocusWorld® China



下一代激光焊接：创新与趋势 34

构建与维护量子实验室的注意事项 12

不可忽视的超快色散 19

紫外纳秒与红外飞秒激光烧蚀SiC的对比 22

激光焊接提升圆柱形锂电池模组互联强度 25

LCOS空间光调制器赋能下一代激光加工 28

扫码浏览更多期刊

ACT INTERNATIONAL
ENDEAVOR BUSINESS MEDIA

助力光电新发展
共享光电新时代

XMIPE 厦门光博会

2025厦门国际光电博览会

2025 Xiamen International Photoelectric Expo

时间：2025年12月10-12日　地点：厦门国际会展中心

800+ 参展企业　50,000+ 专业观众　30,000+ 展示面积　100+ 采购团

- 精密光学展&摄像头技术及应用展
- 激光技术及智能制造展区
- 新型显示技术展
- 智能传感展区
- 光电子创新展
- 红外技术及应用展/紫外技术及应用展
- 信息通信展区
- 半导体技术设备展

电　话:李海菊 13161718173(微信同号)

官　网：http://xm.ipexpo.cn

扫一扫加好友　参观预登记

高端工业大秀 | 制造业全产业链 | 展示先进技术新产品

High-End Industrial Expo | Whole Production Chain of Manufacturing Industry | Showcasing New Products & Technologies

DMP 2025 大湾区工业博览会

GREATER BAY AREA INDUSTRIAL EXPO

2025年11月5-8日

深圳国际会展中心（宝安）

Shenzhen World Exhibition & Convention Center (Baoan)

www.dmpsz.com



覆盖行业 COVERAGE

精密零件加工 | 模具制造 | 3C电子
家电 | 汽车 | 铸造 | 压铸 | 注塑机
械制造及配件 | 自动化解决方案
复合机器人 | 智能制造 | 数字工厂
仓储及物流 | 创新专利发明
新能源 | 汽车工业 | 医疗器械
航空航天 | 半导体 | 低空经济工
业软件 | 人工智能 | 工业互联网

Precision Parts Processing Mould Making | 3C Electronics Electrical Appliances | Automobile Diecasting Foundry | Injection Moulding | Machineries & Parts Automation | Robots | Smart Manufacturing | Digital Factory Warehousing & Logistics | Patented Invention | New Energy | Automobile Medical Instruments | Aerospace Semi-conductor | Low Altitude Economy Industrial Software | Artificial Intelligence Industrial Internet

添加企微客服
获得更多服务

ufi Approved Event

参展查询: 讯通展览公司 Paper Communication Exhibition Services

展会网站: www.dmpsz.com 电邮: info@paper-com.com.hk

客服：136 01866 361

市场观察

9 量子技术



量子网络：通往实用级量子计算的关键桥梁

对于光子学领域而言，量子网络带来了提供关键基础设施的机会，这有望使量子计算成为一项改变世界的技术。

技术中心

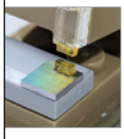
12 量子技术



量子实验室的构建与维护需要注意些什么？

MKS分享了其部分设备在美国三家不同量子研究实验室的应用情况，以及量子专家关于避免一些实验室常见问题的建议。

14 光学材料



热塑性材料赋能共封装光学微透镜阵列

用于共封装光学器件的微透镜阵列，首先需要实现热稳定的微光学元件的大规模生产与组装，热塑性树脂是其中的关键。

16 芯片级激光器



芯片级激光器或将变革光学计量与激光雷达领域

微型铌酸锂激光器可实现快速、精准的光学测量，而这正是光学计量与激光雷达领域提升性能所必需的关键技术。

18 光电共封装



单模光纤阵列降低共封装光学的成本与复杂度

用单模光纤阵列方案替代光电共封装（CPO）中的传统保偏光纤阵列，可以降低成本与技术复杂度。

光学课堂

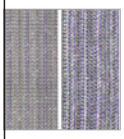
19 不可忽视的超快色散



超快激光受色散影响会导致脉冲展宽，文章分析了其原理并介绍了群延迟色散的测量方法。

工业应用专栏

22 SiC烧蚀



紫外纳秒与红外飞秒激光技术烧蚀碳化硅的效率对比

使用UV ns和IR fs脉冲激光器，探讨了能量密度、脉冲宽度和脉冲串定制如何影响SiC烧蚀效率和去除速率。

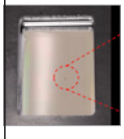
25 激光焊接



激光焊接提升圆柱形锂离子电池模组互联强度

激光焊接技术通过金属间化合物键合控制与先进的监控系统，提高了圆柱形锂离子电池模组连接的强度、安全性与可靠性。

28 光束整形



LCOS空间光调制器赋能下一代激光加工

在激光加工过程中优化光束轮廓，不仅能提高热效率，还能实现更快速的切割、更高精度的焊接和更复杂的微加工。

31 运动控制



微米级精度：高吞吐量激光钻孔系统的误差预算

如何确定并减小系统的总误差，以设计出能够同时实现高质量和高产能的激光钻孔设备？

34 激光焊接



下一代激光焊接：创新与趋势

激光焊接在光源和元器件方面的创新，正在不断提升焊接质量和焊接效率。

5 **编者的话**

6 **前沿简讯**

37 **产品撷英**

40 **广告索引**

关于《激光世界》

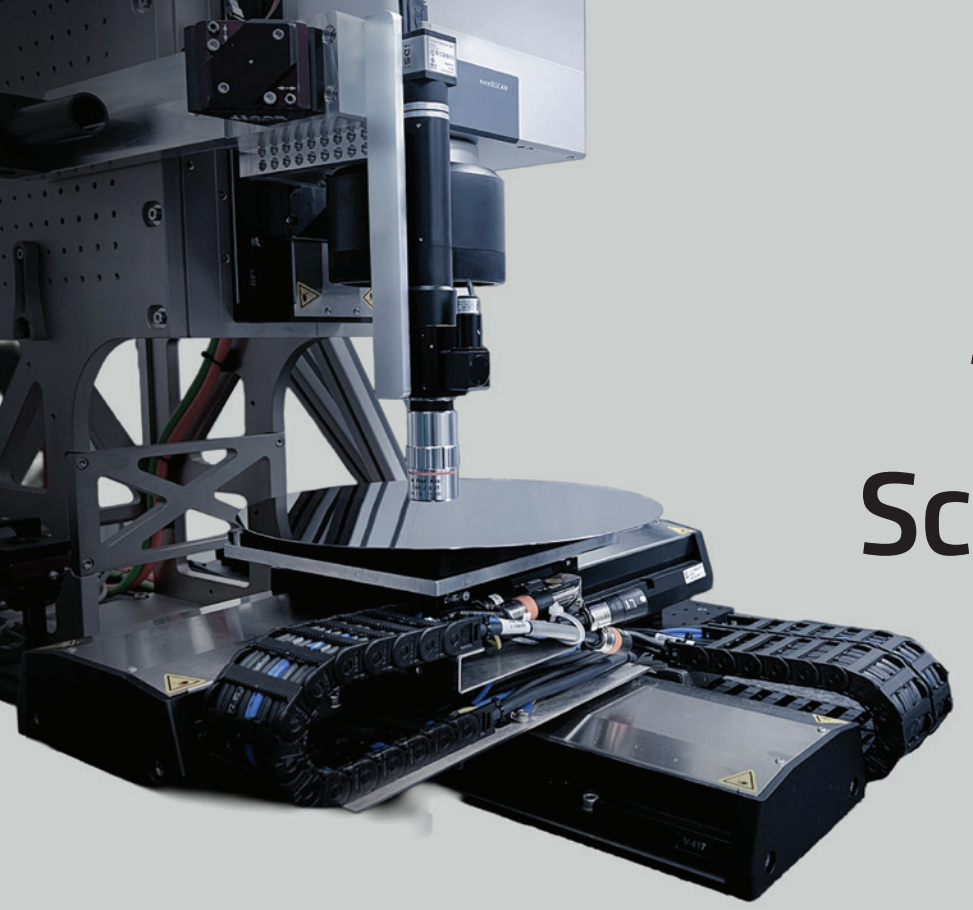
《激光世界》杂志创刊于 2005 年，是世界著名杂志 *Laser FocusWorld* 杂志的中文版本，也是在中国市场为激光与光电子行业的工程师、研究人员、科学家以及专业技术人员提供的专业期刊。《激光世界》的内容涵盖全球激光与光电子技术、工业与科研应用、市场信息以及中国本地市场的相关报道。

《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



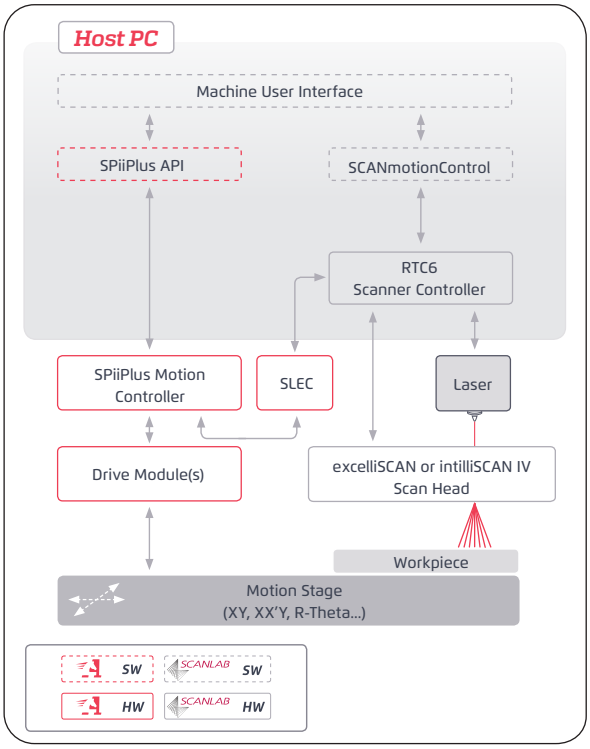
ACS MOTION CONTROL

Think Big Scan Large

XL SCAN

大幅面激光加工方案

- XLSCAN 先进激光加工控制系统解决方案
- 为 TSV 和 TGV 钻孔应用实现终极产量和精度
- 与任何精密运动平台一起使用



ACS官方公众号

ACS 中国代表处

+86 21-54830819
sales-china@acsmotioncontrol.com

ACS 官方网站

acsmotioncontrol.cn

Smarter Motion

MARKET WATCH

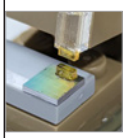
9 Quantum Technology

Quantum Networking: A Critical Bridge to Utility-scale Quantum Computing
For the photonics community, quantum networking is an opportunity to provide the critical infrastructure that transforms quantum computing into a world-changing technology.

TECHNOLOGIES CENTER

12 Quantum Technology

What Does It Take to Build and Maintain a Quantum Lab?
MKS Inc. shares how some of its gear is used by three different quantum research labs within the U.S., and expert advice to avoid lab pitfalls.

14 Optical Material

Advanced Thermoplastics Enable Microlens Arrays for Copackaged Optics
To reach their potential at scale for copackaged optics, microlens arrays require mass production and assembly of thermally resilient micro-optical components. The key? Thermoplastic resins.

16 Chipscale Laser

Chipscale Laser May Be Gamechanger for Optical Metrology and LiDAR
Tiny lithium niobate laser provides fast and accurate optical measurements, which optical metrology and LiDAR both need to take their performance to the next level.

18 Copackaged Optics

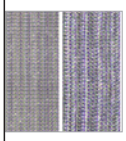
Single-mode Fiber Arrays Drive Down Cost and Complexity of Copackaged Optics
A single-mode fiber array alternative to standard polarization-maintaining fiber arrays can reduce costs and complexity for copackaged optics.

FUNDAMENTAL OPTICS

19 **The Unignorable Ultrafast Dispersion**

Dispersion can cause ultrashort laser pulse broadening. This article analyzes the underlying principle and introduces the measurement methods for group delay dispersion (GDD).

INDUSTRIAL APPLICATIONS COLUMN

22 SiC Ablation

Ablation Efficiency in Silicon Carbide Comparing UV Nanosecond and IR Femtosecond Laser Technologies
Using UV nanosecond pulse lasers and IR femtosecond pulse lasers, exploring how fluence, pulse width, and pulse burst tailoring affect SiC ablation efficiency and removal rate.

25 Laser Welding

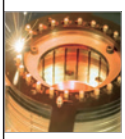
Cylindrical Li-ion Module Interconnect Strength Increases via Laser Welding
Laser welding techniques with intermetallic bond control and advanced monitoring systems improve the strength, safety, and reliability of cylindrical Li-ion battery module interconnects.

28 Beam Shaping

LCOS Spatial Light Modulators Enable Next-gen Laser Processing
The ability to optimize your beam profile during laser processing enhances thermal efficiency, and enables faster cutting, higher-precision welding, and more intricate microfabrication.

31 Motion Control

Micrometer-scale Precision: Error Budgeting for High-throughput Laser Drilling Systems
How can you determine and mitigate total system errors to design a machine that achieves both production throughput and process quality objectives simultaneously for via drilling with lasers?

34 Laser Welding

Next-gen Laser Welding: Innovations and Trends
Laser welding innovations in sources and components are improving welding quality and efficiency.

5 EDITOR'S NOTES
6 LEADING EDGE SNAPSHOTS
37 PRODUCTS HIGHLIGHTS
40 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
© 2025 版权所有 翻印必究

激光焊接技术与商业模式的创新

激光焊接作为先进制造的核心技术之一，正随着全球工业向高精度、高效率、柔性化方向的快速发展而迎来新一轮增长。电动汽车、航空航天、医疗设备及消费电子，是推动该市场增长的主要驱动力，尤其是在电池制造、轻量化结构件和微电子封装中，激光焊接已成为不可替代的工艺。

然而激光焊接仍然面临一系列技术挑战，比如飞溅、气孔、裂纹及热影响区控制等，尤其在焊接高反射材料（如铜、铝）和异种材料时，传统高斯光束容易引发很多工艺缺陷，进而影响焊接质量。

业界正在为了克服这些激光焊接中的挑战不断努力，开发出了很多创新的工艺来优化焊接过程，提升焊接质量，比如采用双光束焊接、实时监控焊接过程以及实时光束整形。双光束焊接通常采用蓝光 + 红外光的组合，既能减少焊接缺陷，又能提升焊接速度。通快公司的 BrightLine Weld 技术，可灵活调节核心光束与周围环形光束的功率分配，特别适用于电动汽车发卡电机的铜绕组焊接。

另外，焊接过程的实时监控技术也在为焊接质量保驾护航。焊接过程实时监控是提升工艺一致性和产品质量的关键环节。目前，多家企业推出了高精度传感与反馈系统，国际厂商如普雷茨特、IPG，国内厂商如德擎光学、大族激光，通过集成多种传感器，焊接头可以实时监测并反馈熔池状态的各种关键参数，并根据反馈信息实现焊接参数的闭环优化。

将实时监测数据与实时光束整形技术结合，进一步推动了激光焊接向智能化方向发展。根据监测反馈信息，实时动态地将光束整形为平顶帽形、环形模式、多光斑等多种适合具体应用的形式，进而实现感知 - 决策 - 控制一体化的闭环智能焊接系统，正在成为高端制造的新标准。

而这种高度灵活、智能化的激光焊接能力，也正在催生一种新型商业模式——激光焊接即服务。该模式依托云平台、数字孪生和分布式制造网络，使中小型企业、初创公司及研究人员能够以“按需使用、按量付费”的方式，获得顶尖激光焊接资源与服务。比如，欧盟的 Lasers4MaaS 项目（p34）正是该模式的代表，它整合 AI 监控、动态光束整形和可持续生产评估，为用户提供从设计到量产的全流程支持，极大降低了先进制造技术的使用门槛。

激光焊接在技术创新与商业模式的双重驱动下，正不断突破工艺极限、拓展应用边界。未来，激光焊接将更智能、更普惠，成为推动全球制造业升级的重要力量。

本期还撷取了量子技术（p9、p12）、光电共封装（p14、p18）、芯片级激光器（p16）、超快色散测量（p20）、SiC 烧蚀（p22）、空间光调制器（p28）、精密运动控制（p31）等内容，供读者参考。❑

本刊编辑部

前沿简讯 Leading Edge Snapshots

4000 片高能激光玻璃助“人造太阳”实现 8.6 MJ 创记录输出

据特种材料公司肖特透露，其为美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）国家点火装置（NIF）提供了多种先进光学玻璃，包括作为 NIF 192 束激光系统核心部件的 4,000 块高性能 LG-770 激光玻璃。NIF 在今年 4 月取得最新突破，创造了 8.6 MJ 的核聚变能量新纪录，较其三年前 3.15 MJ 的初始里程碑提升逾一倍。据 LLNL 数据显示，该装置激光器近期向目标输送了 2.08 MJ 的能量，脉冲峰值功率达 456 TW，实现了 4.13 的目标增益。

NIF 光学与材料科学与技术事业部项目总监 Tayyab Suratwala 表示：“激光玻璃是激光的核心，它使得激光照明



的能量和功率得以提高。在 NIF 大型光学元件中，激光玻璃几乎占了 1/3。”

肖特激光玻璃、其他关键光学玻璃以及特种玻璃元件等先进材料，是 NIF 研究不可或缺的部分。这些元件在美国宾夕法尼亚州杜里亚以及欧洲进行制造和加工。

肖特对 NIF 高能激光系统的贡献还不止于激光玻璃。公司还提供特种玻璃密封件、由 BOROFLOAT® 玻璃制成的碎屑防爆罩、N-BK7 偏振片和反射镜、激光板以及专用滤光玻璃，这些特种材料在 NIF 的开创性研究中发挥着至关重要的作用。

NIF 在核聚变能源领域取得的最新突破，是朝着实现清洁、可持续能源目标迈出的重要一步。在肖特持续赋能和创新玻璃解决方案的助力下，NIF 不断拓展激光核聚变研究，向核聚变能源驱动的未来又近了一步。这一突破不仅成功实现点火，更实现了净能量增益，未来有望通过核聚变技术实现商用级发电。❑

逸飞激光领衔启动大圆柱电池全极耳精密激光焊接重大项目

由逸飞激光领衔的“大圆柱电池全极耳精密激光焊接关键技术及装备研制”项目在武汉启动。该项目旨在突破大圆柱电池量产过程中的核心工艺瓶颈，提升激光焊接质量与效率，推动行业迈向高质量规模化发展。

项目汇聚产业链龙头企业与高校科研力量，逸飞激光作为湖北省新能源电池激光应用产业链链主企业，联合亿纬锂能、国轩高科、云山动力、楚能新能源等电池制造企业，以及华中科技大学、武汉逸智信诚技术检测有限公司等单位，形成“产学研用”一体化攻关团队。

全极耳结构是实现大圆柱电池高性能的核心设计，但对激光焊接工艺提出极高要求。如何实现高速、高良率、全极耳 - 集流盘的高质量连接，成为行业普遍面临的挑战。

此次项目将依托逸飞激光建设的“湖北省精密激光焊接中试平台”，开展激光时空整形技术、焊接工艺优化与装备研发，并由合作高校及检测单位提供理论支持和工艺验证，电池企业则负责产线终端测试与标准化推进。

该项目突出特点是覆盖“加工光源 - 装备制造 - 电池生产 - 整车应用”全产业链条的代表性企业参与：锐科激光提供核心激光光源，逸飞激光负责整线装备，楚能新能源、亿纬锂能、国轩高科等进行电池制造验证，东风岚图等则代表终端应用方向。

通过多方协同，项目不仅追求技术



突破，更致力于构建大圆柱电池从研发到量产的标准体系与公共技术平台，助推行业实现高效、规范、规模化发展。

此次项目的意义不仅在于技术、工艺的系统性提升，更在于大圆柱电池产业“中坚力量”通过政产学研用的深度协同，共建大圆柱电池标准平台，形成“技术工艺研发 - 设备升级 - 规模应用”全链条创新模式，推动产业更快速度、更高质量发展。❑

双光束激光复合焊助镁铝合金焊接告别气孔与裂纹！

镁铝合金焊接难度较大，其化学活性较高，在焊接过程中极易与空气中的氧气发生反应，形成氧化膜，影响焊接质量；而且其热膨胀系数较大，焊接时易产生较大的热应力，导致焊缝出现裂纹等缺陷。

镁铝测试样品厚 6 mm，要求焊接表面无焊渣，铣开 0.5~2 mm 无气孔，拉力 3000 N，熔深大于 2 mm。

柏逸激光采用 915 nm 半导体（外环）和 1070 nm 光纤激光（内环）双波长进行镁铝合金复合焊接研究。使两束激光共同作用于同一熔池，通过调整两束激光的能量热输入，改变光纤激光匙孔的存在模式及熔池的流动方式，提高焊接稳定性以提高镁铝合金焊缝质量。

相比单一光纤激光焊方式，半导体 - 光纤双光束激光复合焊接具有显著优势：

- 具有较好的成品率和密封性，可提高焊接过程可靠性与稳定性；
- 提升焊缝的适应性，降低错边、间隙对焊缝质量的影响，具有足够的焊缝宽度，且焊缝深宽比合适；
- 焊接外观更光滑美观，一致性好，无明显的飞溅、气孔和裂纹等缺陷；
- 熔深均匀一致，焊缝与母材结合紧密，无未熔合等问题；
- 焊接速度快，同时缓冷可以减小内应力，提升焊接强度，实现高效高质量的生产。



柏逸激光的半导体 - 光纤复合焊接（915 nm+1070 nm）技术，解决了镁铝合金在单一波长 1070 nm 焊接中的吸收率低、气孔率高、裂纹敏感等瓶颈问题。在保证焊接质量的前提下，具有较高的焊接效率，能够满足相关行业对高质量、高效率焊接的需求。该技术有望成为高反轻量化材料焊接的主流方向，尤其在新能源汽车电池与航空航天领域应用前景广阔。❑



高精度六轴并联运动定位系统

Newport 六足位移台采用六个经过行业验证的高性能促动器和创新的铰链设计可提供无与伦比的刚性。无论您需要高精度和定位精度、重负载还是真空兼容版本。Newport 六足位移台是您应对复杂运动的有效解决方案。

- 结构紧凑，刚性高
- 用户可自定义的工具坐标系旋转中心
- 高负载能力，精度可担保
- 提供真空版本（10-6 hPa）
- HexaViz 仿真软件可帮助您选择满足要求的理想型号

请扫描二维码，
了解更多信息

www.newport.com.cn

mks | Newport

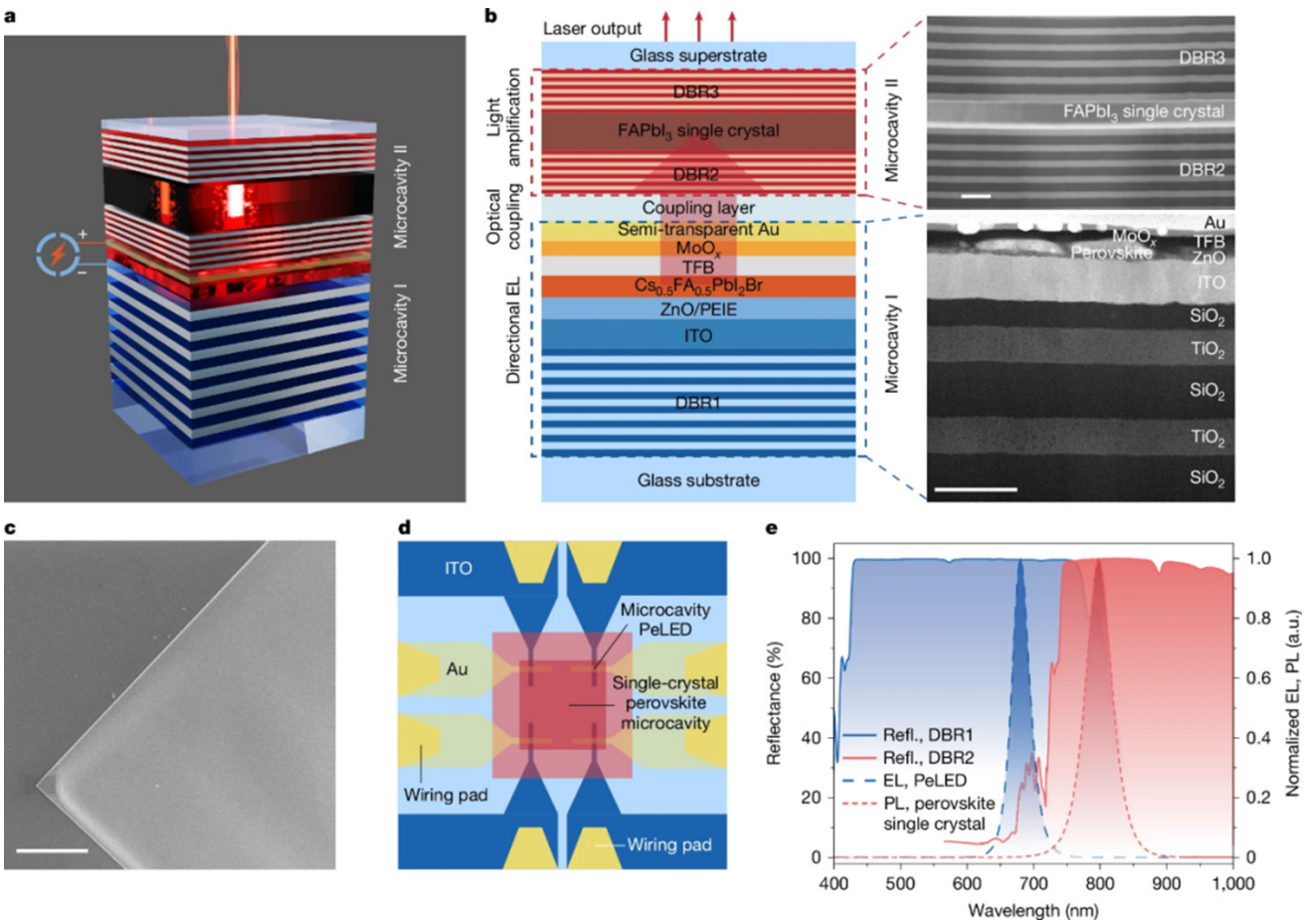
浙江大学研制全球首个电驱动钙钛矿激光器

近日，浙江大学光电科学与工程学院 / 海宁国际联合学院狄大卫教授、邹晨研究员和赵保丹教授团队，研制了世界上第一个电驱动钙钛矿激光器。这是一个包含两个光学微腔的“双腔”激光器，它将低阈值钙钛矿单晶微腔子单元与高功率微腔钙钛矿 LED 子单元集成于同一个器件，形成了一个垂直堆叠的多层结构。

这种新型半导体激光器，其发射激光所需的最小电流（阈值电流）为 92 A/cm²，比最好的有机半导体激光器还低一个数量级，且表现出较好的稳定性，并能在 36.2 MHz 的带宽下实现快速调制，有望应用于片上数据传输、计算和生物医学等领域。

研发电驱动钙钛矿激光器，是钙钛矿光电子学领域一直以来的最大挑战，也是全球众多科研团队共同追寻的目标。“为了实现电驱动激光发射，我们发明了一种集成式的双腔结构。我们将高功率微腔钙钛矿 LED 子单元与高质量单晶钙钛矿微腔子单元紧凑地集成在同一器件中，”狄大卫介绍。该器件将微腔钙钛矿 LED 在电激励下产生的大量光子高效地耦合到第二个微腔中，并激发单晶钙钛矿增益介质，产生激光。

电驱动钙钛矿激光器可用于光学数据传输等多种应用场景，还可用作集成光子芯片和可穿戴设备中的相干光源。团队发现，该器件能在 36.2 MHz 带宽下通过电脉冲进行快速调制。这种调制速率是通过减小器件有效面积以实现最小电阻电容（RC）常数，并使用硅衬底改善散热实现的。赵保丹说：“在未来，我们还需要克服微腔钙钛矿 LED 子单元纳秒级的自发辐射寿命限制，以实现器件的 GHz 级高速运行。”“从当前的‘集成式泵浦’架构过渡到更为简洁的激光二极管结构，将是下一步研究工作的关键，因为这能实现更紧凑且可规模化的光电应用”，狄大卫说。❑



量子网络

通往实用级量子计算的关键桥梁

对于光子学领域而言，量子网络带来了提供关键基础设施的机会，这有望使量子计算成为一项改变世界的技术。

文/Michael Baczyk，Global Quantum Intelligence投资咨询总监

量子计算行业的扩展瓶颈

量子计算行业面临着一个根本性的扩展瓶颈，它有可能使我们长期停留在嘈杂中等规模量子（NISQ）器件时代。尽管当前领先的量子系统已经拥有数百个量子比特（qubit），但是我们追求的变革性应用，如药物发现、材料科学和密码分析等，都需要具备容错能力、且包含数百万个物理量子比特的机器。然而残酷的现实是：没有任何一个量子处理单元（QPU）能够实际容纳如此多的量子比特。

以下是当今各量子平台的物理限制：

- 超导电路受限于稀释制冷机在 20 毫开尔文（mK）下的冷却能力，每个模块的量子比特上限约为 3000 个（见图 1）；
- 离子阱系统在线性链结构中面临稳定性限制（100 个量子比特），或在量子电荷耦合器件（QCCD）架构中面临未经测试的扩展挑战；
- 中性原子阵列尽管具有高达 10,000 个量子比特的潜力，但仍然面临着光学孔径和激光功率的天花板；
- 硅自旋量子比特在理论上承诺“数百万级”量子比特，但在 1 K 温度下的热管理仍未得到验证。



不同量子比特平台可行的模块规模
Viable module scale varies by qubit platform

GQI target module size assessments (first generation architectures)

Manhattan Project dynamics?

Platform	Type	Dim. um	Key Factor	Unit cell mm2	Die mm2	Unit cell per chiplet	Qubits per module	Notes
SC Circuits	Transmon	600	Circuitry	0.36	800	2,222	3,000	Ass. 100uW @ 20mK (super firdge)
Trapped Ion	Linear Trap	5	Ion spacing	n/a	n/a	100	100	Limited by ion crystal stability
	QCCD	100	Ion height	1	800	800	un-tested	
		40	Ion height	0.16	800	5,000	un-tested	Low ion height may impact fidelity
Neutral Atom	2D lattice	6	Atom spacing	3.60E-05	n/a	10,000	10,000	Limited by optical aperture & laser power
Photonics	Dual rail	150	SiN bend	2.25E-02	800	200	200	Ass. NxN interferometer
Silicon Spin	Exchange interaction	12	Control electronics	1.44E-04	800	5,000,000	1,000,000	Ass. 100mW @ 1K
Colour Center	Barrett-Kok	250	Fiber array pitch	6.25E-02	800	13,000	2,000	Yield
Topological	MZM	10	Nanowire array	1.00E-04	800	8,000,000	100,000 + *	Cooling power @ 50-100mK?

* Microsoft marketing claims 1million

Source: Global Quantum Intelligence (GQI) | All rights reserved | © 2024

图1：物理约束限制了各量子计算平台可行的模块规模。冷却能力、光学孔径和控制复杂性，构成了量子网络必须克服的硬性上限。

解决方案：模块化网络架构

解决方案反映了经典计算的演进历程：模块化、网络化的架构（见图 2）。正如数据中心连接数千个处理器一样，量子计算必须采用分布式架构，通过量子网络实现多个 QPU 模块的协同工作。这不仅仅是设备互联，更需要保持量子纠缠 ——这种脆弱的量子关联正是量子计算能力的核心。而这正是光子学作为天然桥梁的用

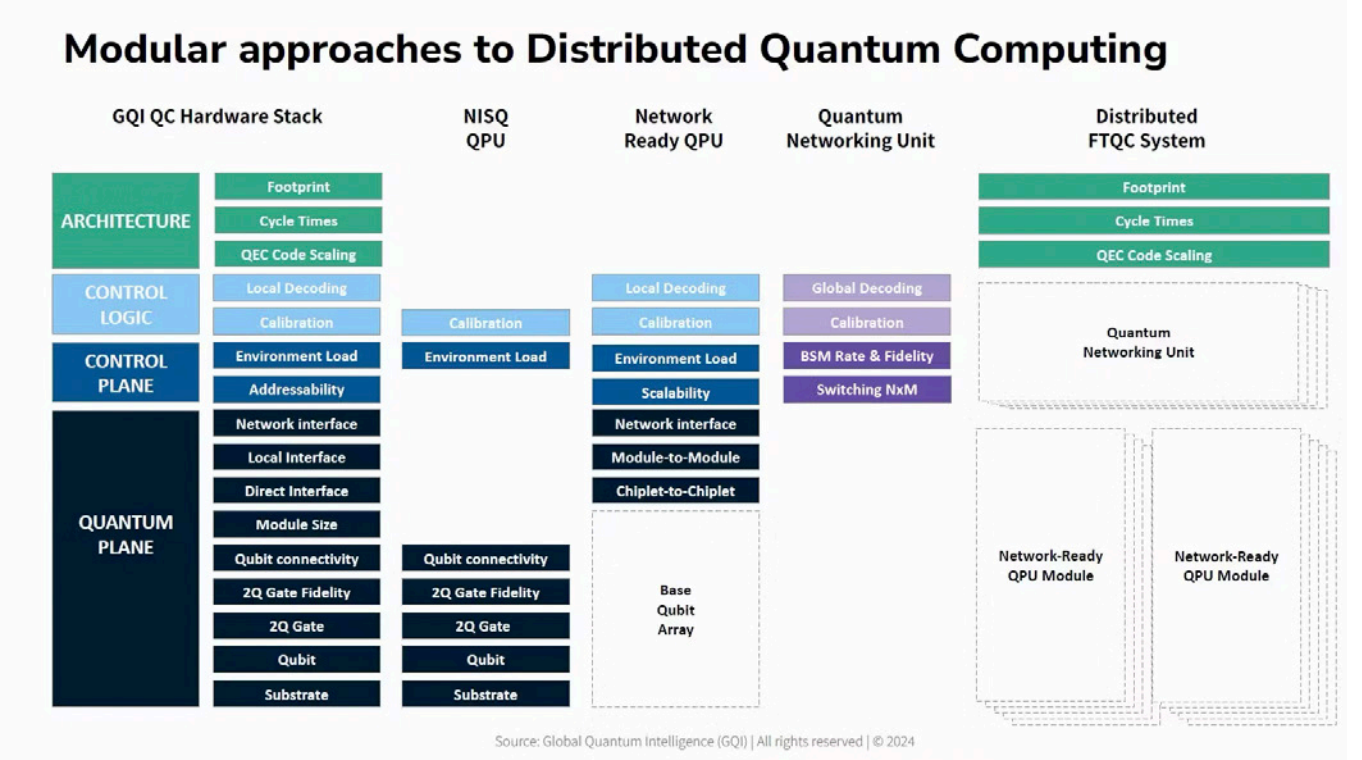


图2：分布式量子计算架构，通过量子网络单元（QNU）在连接多个QPU模块的同时保持纠缠，从而突破单模块的限制实现扩展。

武之地，它能通过光纤低损耗传输量子态，并能通过光子介导的相互作用，在远距离量子比特之间产生纠缠。

从愿景到风险投资：模块化路线的验证

Global Quantum Intelligence（GQI）公司早在三年前就认识到模块化的必然性，并在行业仍然追逐“巨无霸”单体设计时，就开始倡导分布式架构。GQI 在 2024 年 5 月发布的《可扩展量子硬件》报告中，描绘了量子网络单元（QNU）的技术要求：既要能桥接 QPU 模块，同时又要能维持容错运行。

随后 12 个月的发展充分验证了这一愿景。量子网络领域吸引了大量资金，并涌现出以下一些关键进展：

- Xanadu Aurora（2025 年 1 月）：在 4 个模块化服务器机架间通过 13 km 光纤互连，实现了 12 量子比特的通用光子量子计算机，合成了 864 亿模式的簇态；
- PsiQuantum Omega（2025 年 2 月）：发布了将 35 个光子芯片联网的芯片组，在长达 250 m 的距离内实现了 99.72% 的芯片间量子互连保真度；
- Nu Quantum QNU（2025 年 6 月）：推出全球首款机架式 QNU，具有 99.7% 的纠缠保真度和亚微秒级的电路切换速度；
- Welinq（2025 年 3 月）：推出商用量子存储器，实现了世界纪录的 90% 存储 - 检索效率以及 200 μs 的存储时长；
- Sparrow Quantum（2025 年 4 月）：其确定性单光子源项目获得 2150 万欧元（2510 万美元）的 A 轮融资，巩固了丹麦在量子光子学领域的领导地位；
- Lightsynq（2024 年 11 月）：为其基于金刚石的光学量子互连技术筹集了 1800 万美元，随后于 2025 年 5 月被 IonQ 收购；
- SilQ Connect（2025 年 5 月）：在加拿大舍布鲁克成立，获种子轮融资开发微波 - 光量子互联，助力量子局域网（QLAN）；
- 思科量子芯片（2025 年 5 月）：室温运行下每秒生成 2 亿对纠缠光子。

即使采用传统单体架构的厂商也开始拥抱模块化：

- IBM 的 2025 路线图提出，在稀释制冷机间建立“1 型”米级量子链路；
- IonQ 通过收购 Oxford Ionics、Lightsynq、ID Quantique，将其从单纯的计算厂商转型为全栈量子网络公司；
- 由 Nu Quantum 牵头的量子数据中心联盟，联合思

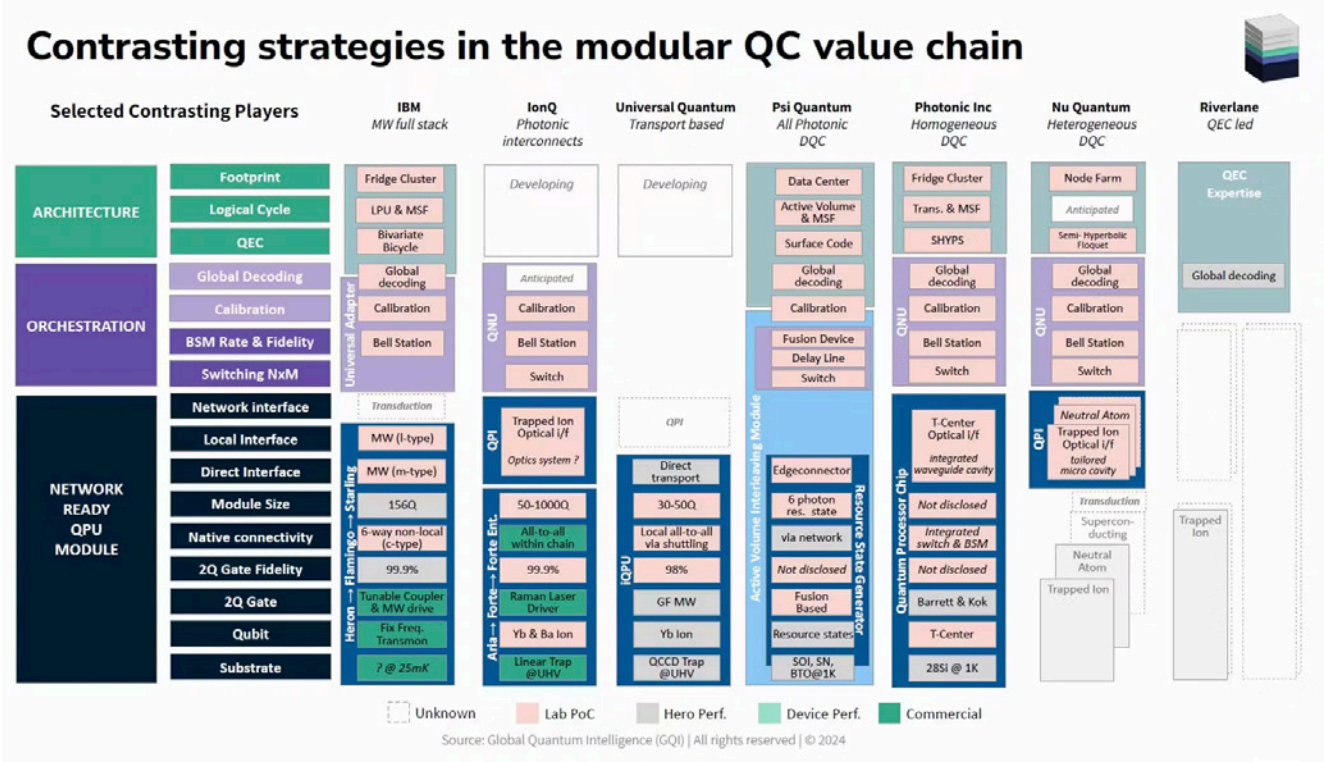


图3：模块化量子计算价值链中的对比策略，显示了光子技术如何实现不同的可扩展性路径。

科、QphoX、牛津量子电路等机构，致力于为建筑规模的量子网络制定标准化接口。

光子价值链：谁将主宰量子高速公路？

构建量子网络的竞赛，已经在光子学价值链上催生出了截然不同的策略（见图 3）。每种方案都押注于光如何赋能百万量子比特机器：

- 同质集成：Photonic 公司致力于开发硅基 T 中心（碳基色心），在同一材料平台内原生地结合自旋量子比特和光学接口。其集成波导腔有望实现高效的量子比特 - 光子接口，无需异质组装；
- 异质赋能：Nu Quantum 开发与多种量子比特平台（离子阱、中性原子、色心）兼容的高性能光子腔。其 QNU 的模块化架构允许更换光学模块以支持不同的量子比特类型，使其成为重要的中间件供应商；
- 全光子计算：PsiQuantum 和 Xanadu 不需要量子比特 - 光子接口；光子本身既是量子比特又是互连载体。PsiQuantum 的 Active Volume 架构和 Xanadu 的压缩光方案，利用光学开关和延迟线，将联网的光子芯片构建成数据中心规模的量子计算机。

关键的支撑技术覆盖了整个光子领域：

- 单光子源（Sparrow Quantum、Qunnect）：确定性生成高保真纠缠——Sparrow 的片上光源设定了行业基准；
- 量子存储器（Welinq、MemQ）：存储并同步纠缠——Welinq 的室温工作模式消除了低温需求；
- 转换器（QphoX、SilQ Connect）：在微波和光学领域之间进行转换；
- 单光子探测器（ID Quantique、Single Quantum、Quantum Opus）：支持高效贝尔态测量。

生态系统远不止这些专业组件，Aegiq、ORCA Computing、Quandela、QuiX Quantum、Quantum Source 等众多光子学参与者，都在推动该领域的发展，为光子量子计算与网络提供独特方案。

量子网络的时代机遇

结论清晰可见：量子网络并不是未来的考量，而是当下决定量子计算领导者的战场。对光子学领域而言，这代表着一个时代性的机遇，即提供“将量子计算从实验室里的新奇事物，转变为一项改变世界的技术的”关键基础设施。通往百万量子比特的道路可以铺设在光纤之中，而那些掌握量子网络技术的人，将定义计算的下一个时代。❑

量子技术

量子实验室的构建与维护需要注意些什么？

MKS分享了其部分设备在美国三家不同量子研究实验室的应用情况，以及量子专家关于避免一些实验室常见问题的建议。

文/Vincent Issier，MKS Instruments战略营销高级总监

量子技术在计算、传感和通信领域的巨大潜力，不断吸引着学术界和商业领域的新研究者们投身相关研究。尽管探索量子科学的方法多种多样，但几乎所有方法都在某种程度上依赖光子学和激光技术。这些光子工具的具体使用方式因实验方法而异，包括原子与分子系统、离子与中性原子、模拟与数字计算架构等。对于刚进入该领域的研究者来说，实验室设备和基础设施的初期选择，可能会直接影响实验室最终的研究成果。因此，从一开始就做出正确选择至关重要。

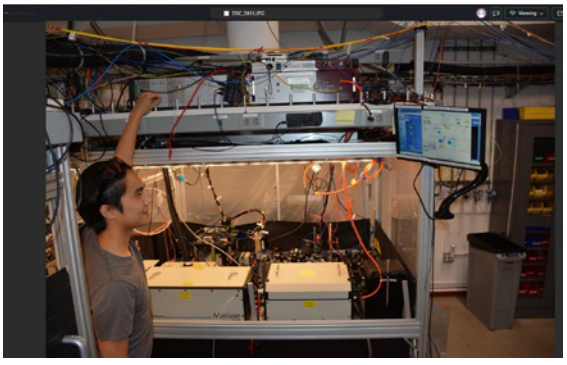


图1：在加州理工学院Hutzler实验室里，Matisse 钛蓝宝石激光器与MixTrain SFG 系统相结合，用于对冷原子和分子进行光谱分析和激光控制，以探索新的基本粒子和相互作用力。图中一名研究生正在调试红外钛蓝宝石种子光源的锁定电子设备，以激发中性镭-226原子跃迁到亚稳定三重态，从而加速含镭新分子的形成。（图片来源：Hutzler实验室）

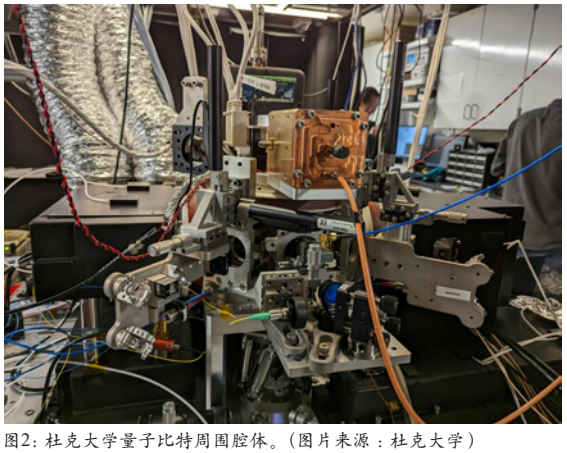


图2：杜克大学量子比特周围腔体。（图片来源：杜克大学）

为了给刚刚涉足量子科学研究并且正在寻求指导的从业者提供一些帮助，我们采访了三位在量子科学领域颇有建树的专家：

- Christopher Monroe：杜克大学教授、IonQ 联合创始人，致力于开发离子阱量子计算系统；
- Wes Campbell：加州大学洛杉矶分校物理学教授，利用超冷原子和分子研究传感与模拟涉及的各种物理过程；
- Nick Hutzler：加州理工学院助理教授，使用激光控制原子和分子，开展核物理、基础化学和量子信息领域的实验。

对于“如何构建和维护一个量子实验室？”这一问题，这三位量子技术领域的专家分别分享了各自的见解。

暖通空调系统（HVAC）是经常被忽视的关键设施

尽管三位研究者的实验方法各不相同，但他们都强调了实验室基础设施中容易被忽视的一个方面：环境控制。Hutzler 表示，如果不能直接控制环境中的温度、湿度和气流，那么获得环境稳定的成功率将为零。

量子实验室对环境稳定性的要求要达到什么程度呢？ Monroe 发现，绝对温度精度其实并不重要，但必须保持 0.1°F（华氏度）的相对稳定性，同时还要控制好气流和湿度。好消息是，只需要在实验周围的几立方米范围内实现这种环境稳定性即可。Monroe 强调，尽管测量过程通常只需要几秒钟，但从初始设置到数据采集的整个过程中都必须维持这种稳定性，以避免滞后效应。

三位专家都表示，标准的楼宇环境控制系统通常难以满足这些要求，因此他们必须部署定制系统来补充实验室现有的暖通空调，通常包括在实验室的进风冷空气管道中安装加热器。加热器根据实验附近的恒温器反馈信息来运行，从而将局部温度维持在所需范围内。定制系统还能控制风

扇转速以减少湍流，并过滤灰尘，实验区域则保持正压封闭状态。

量子实验的基础保障

消除热漂移非常重要，控制机械振动也同样关键。“就我们工作而言，聚焦激光束相对于离子保持静止至关重要，”Monroe 说，“我们的激光器通常放置在距离量子比特约一米远的地方，因此即使是微小的振动也可能导致相互作用区内出现严重的光学对准偏差。为了将振动降到最低，我们将实验室设在一楼，并在光学平台、面包板和隔振支架上搭建实验装置。这些设备可以过滤掉环境振动，并抑制或隔离实验内部产生的任何机械干扰源。对于这种高精度、高灵敏度的研究来说，稳定的基础环境至关重要。”

起初，Monroe 还有所担忧，因为他们的实验室位于北卡罗来纳州达勒姆市中心，距离一条铁路主干线仅几百英尺。“幸运的是，我使用 Newport 光学平台已经有数十年的良好经验，我们实验室配备了大约 15 张 Newport RS4000 系列光学平台和 S-2000A 系列稳定器，”他说，“这些平台安装好后，我就再也不用担心振动问题了。我们能感觉到火车驶过带来的地面振动，但光学平台发挥了作用，这些振动并没有影响我们的实验。”

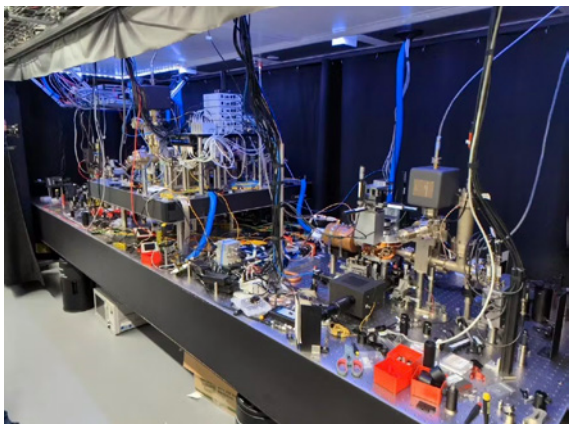


图3：杜克大学的一张光学平台，上面放置了用于容纳三个量子纠缠比特设备。（图片来源：杜克大学）

Hutzler 认为，量子实验室不一定非要设在一楼或地下室。加州理工学院使用大量的机械泵和真空设备，“其实并不用花大力气去避免环境振动，”他说，“只要把整个实验装置放在 Newport 光学平台上，让它过滤掉所有噪声，不管噪声来自哪里，这种方法更简单。”❑



光学材料

热塑性材料赋能共封装光学微透镜阵列

用于共封装光学器件的微透镜阵列，首先需要实现热稳定的微光学元件的大规模生产与组装，热塑性树脂是其中的关键。

文/Gabrie Hoogland，荷兰SABIC公司首席科学家
Kamil Gradkowski，爱尔兰Tyndall National Institute高级研究员

人工智能（AI）、物联网（IoT）、5G 网络及相关数字技术的快速发展，正推动数据流量以前所未有的速度激增，这对更快的传输速率和更大的带宽容量提出了新的需求。传统的电子互连技术已经难以满足当前所需要的数据速率与密度要求。对此，电信行业正在加速研发高性能、高能效且具备可持续性的光数据通信系统。

共封装光学器件（CPO）是一种极具前景的解决方案，它可以替代可插拔光模块，将光学元件集成到印刷电路板（PCB）上，使其靠近或直接毗邻专用集成电路（ASIC）交换器或其他电子集成电路（IC）。通过将光电数据转换环节尽可能靠近数据中心内的 ASIC 交换器，CPO 能显著提升带宽，并大幅提高数据中心的能源效率。

然而，将光学接口集成到芯片或光子集成电路（PIC）中，也会面临新的挑战。最关键的一点是：任何光学元件都必须要承受 PCB 组装过程中回流焊环节的高温，该温度可达 260°C。这极大地限制了可用于制造这些光学元件（尤其是透镜）的材料选择。

如何高效地将光耦合进出 PIC、光纤和传感器，已经成为一项核心挑战。解决方案之一是采用微透镜阵列（MLA），它由排列在基板上网格内的多个小型透镜（微透镜单元）组成。微透镜阵列不仅能够支持非接触式自由空间光学接口，同时还能实现高效光耦合。但要发挥其大规模应用的潜力，必须要实现具有热稳定性的微光学元件的大规模生产与组装。

为微透镜阵列选择最适合的材料

目前，绝大多数微透镜阵列是通过刻蚀熔融石英或硅晶圆制造的。这种晶圆级制造工艺能够被严格控制，可以实现高质量的批量复制。然而，从透镜设计到成品的整个流程，成本高昂且耗时较长，这阻碍了其大规模量产，特别是在设计复杂的情况下更是如此。

当透镜形状相对简单时，可以使用环氧树脂等热固性树脂，但这类材料存在固化时间长、固化后耐热性有限的问题。尽管已经开发了双光子聚合等技术用于打印基于有机聚合物的高分辨率微光学元件，但这些方案在规模化生产、热稳定性和 / 或折射率范围方面，仍然存在局限性。

微注塑成型已经成为微透镜阵列制造的一种革命性的替代方案，该技术能够实现复杂、精密微光学元件的量产，并且在产品一致性、生产速度、可扩展性和成本效益方面，都表现出色。

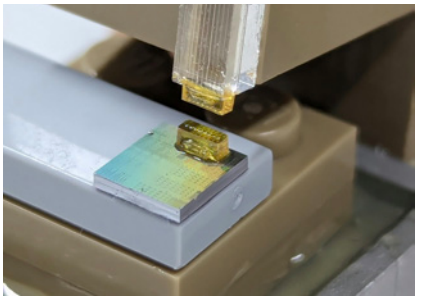


图1：SABIC公司和Tyndall National Institute联合开发的表面光栅耦合器演示装置。（图片来源：SABIC与Tyndall National Institute）

微注塑成型技术还可以小批量生产透镜用于原型制作，无需利用整片晶圆制造透镜。该技术可以注塑任意厚度的透镜，从而使设计师摆脱了标准晶圆厚度的限制。此外，该技术更容易集成一些其他微光学特征，如基准标记、定位销等。与主动对准方法相比，这些有助于实现被动光学对准的集成特征，还能缩短组装时间，降低成本。

聚醚酰亚胺（PEI）、聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）、环烯烃共聚物（COC）和聚碳酸酯（PC），是注塑成型大批量复杂形状的透镜及透镜阵列的常用热塑性树脂。其中，ULTEM 树脂（一种 PEI 材料）是制造用于可插拔收发器、扩展光束连接器等器件中的微透镜阵列的首选材料。

制造商在这些热塑性树脂中进行选择时，必须要考虑组装工艺的影响。

例如，光学元件在回流焊工艺过程中可能会暴露于高温下，因此这类光学元件所选用的材料，必须能够在这些热环境下保持尺寸精度。如果光学透镜阵列要在 PCB 最终组装前完成装配，那么在回流焊过程中，光学元件将要承受 260°C 的高温，此时制造光学元件所用的热塑性树脂，其热变形温度至少要高达 260°C。

当前面临的一个挑战是：许多热塑性塑料在 260°C 高温下会发生变形或熔化，无法满足使用回流焊工艺组装 CPO 系统的新要求。为此，SABIC 公司研发出了一种热塑性 PI 材料——EXTEM RH1017UCL 树脂，来应对上述挑战。这种近红外（NIR）透明树脂的玻璃化转变温度远高于 260°C，从而为业界提供了一种切实可行的材料，可用于大规模生产适用于回流焊组装的微光学元件。

热塑性微透镜阵列实现稳定的光耦合

SABIC 公司研发的 PI 材料，为光子系统集成提供了可能：它提供了一个高效光耦合平台，即便在湿热老化、热冲击等严苛的行业测试中，该平台仍能保持优异的性能。尽管微透镜阵列本身属于被动光学元件，但它们却发挥着至关重要的作用。通过支持光纤、波导、传感器与光子芯片之间精准且稳定的光耦合（即使是经过表面贴装技术（SMT）的回流焊工艺后），这些微透镜阵列突破了 CPO 系统实际部署的一个关键障碍，因为它们通过扩展光束，提高了封装过程中的对准容差。

此外，与直接物理光纤接触系统相比，这些微透镜阵列实现的自由空间光学接口，能降低机械应力，从而简化组装过程并提高可靠性。

案例研究 1：用于CPO的光学互连

为了展示注塑成型 PI 树脂材料在 CPO 光学互连中的可行性与优势，SABIC 公司与 Tyndall National Institute（一个专注于集成 ICT 材料、器件及系统的欧洲研究中心）合作，构建了表面耦合器和边缘耦合器。在该设计中，微透镜阵列被封装在带有波导环路的 PIC 上（分别见图 1 和图 2）。在这个设计中，单模光束在光纤阵列单元和 PIC 之间进行了扩束。

SABIC 的新型树脂用于制造兼容单模的微透镜阵列，该阵列包含 8 个透镜组，间距为 250 μm。这些尺寸与光接口中常见的标准 8 光纤连接器阵列相匹配。通过注塑成型技术以严格的公差制造这些高精度小型元件，既保证了精度，又兼具大批量成型技术的可扩展性，实现了微透镜阵列制造领域的一项重大技术突破。

为验证其实用性，研究人员利用这些微透镜阵列创建扩束光学元件。使用光学透明粘合剂，将这些扩束光学元件粘在光连接器接口的两侧，以通过更大的自由空间光束将光纤阵列耦合到 PIC。这种方法放宽了对横向对准容差的要求，并降低了灰尘颗粒等污染物造成的阻塞风险。

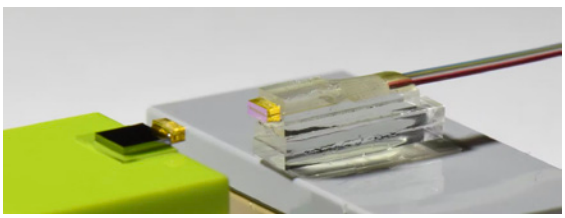


图2：SABIC公司和Tyndall National Institute联合开发的边缘耦合器演示装置。（图片来源：SABIC与Tyndall National Institute）

即便经过多次 260°C 的回流焊循环，这些微透镜阵列仍能保持尺寸稳定和光学性能完好。这种稳定性对于集成到基于 SMT 的电子组装生产线中至关重要。

高效的光纤耦合结构，对于极高密度的光学输入和输出必不可少。通常存在两种耦合结构：光栅耦合器和边缘耦合器。这两种结构各有其独特的优缺点，因此，研究团队构建了两种类型的演示器件。通过将光纤阵列和 PIC 分别键合到不同的基座上，对两种演示器件进行了 50 次插拔循环测试。

两种器件均在 25 gigabaud 的信号速率下，实现了稳定的眼图。在 50 次插拔循环中，每个耦合器的平均耦合损耗均为 2.2 dB。这些结果达到或超过了许多高速光子互连的实际应用要求。

案例研究 2：微透镜阵列的自动对准

在大多数 CPO 封装 / 对准过程中，会使用环氧树脂等光学胶粘剂。SABIC 与芯片集成技术中心（Chip Integration Technology Center，CITC）合作开发了一种新工艺，其采用一种替代的互连技术用于微透镜阵列的光学对准。该工艺需要对微透镜阵列上与 PIC 上柔性金属焊盘接触的特定区域，进行金属化处理。在 SAC305（一种锡 - 银 - 铜无铅焊料）回流焊过程中，微透镜阵列与 PIC 基板会自动对准。这种新型光学封装方法可以替代传统的环氧树脂胶粘剂，后者存在长期稳定性不足、热膨胀系数（CTE）失配等缺点。

扩大光学阵列的生产规模

采用微成型技术和耐高温的特种热塑性塑料，来扩大光学阵列的生产

下转第17页

芯片级激光器

芯片级激光器或将变革光学计量与激光雷达领域

微型铌酸锂激光器可实现快速、精准的光学测量，而这正是光学计量与激光雷达领域提升性能所必需的关键技术。

文/Sally Cole Johnson

罗切斯特大学和加州大学圣塔芭芭拉分校的研究团队，利用铌酸锂精心研制了一款新型芯片级（宽 2 mm，长约 2 cm）激光器，其有望为光学计量精度和激光雷达（LiDAR）技术的发展带来新的变革。据悉，该激光器能以每秒约 10 千万亿（quintillion）次的频率，在广泛的光谱范围内改变光的颜色，从而实现极高精度的测量。

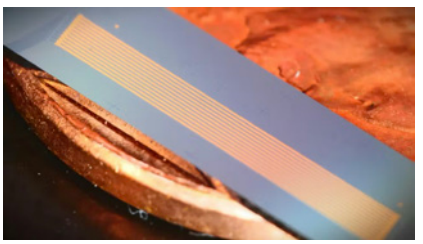


图1：硬币上的薄膜铌酸锂（TFLN）外腔芯片。

研究团队选择铌酸锂而非硅光子材料来制造激光器，是因为铌酸锂可以利用泡克尔斯效应（Pockels effect），即在有电场作用的情况下，材料的折射率会发生改变。

“我们的灵感来自于让光学测量系统变得更小、更简单、更高效的挑战，”罗切斯特大学电气与化学工程及光学教授 Qiang Lin 指导的研究生 Shixin Xue 说，“传统的系统严重依赖于庞大的外部组件，这限制了它们的实际应用，而且也难以集成到紧凑的便携设备中。我们希望突破这些局限，让精密光学测量技术得到更广泛的应用。”

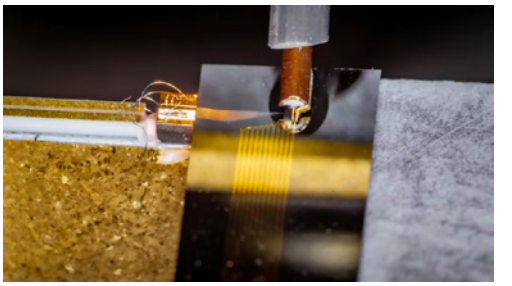


图2：完整的激光器装置：左侧为增益芯片，与右侧的薄膜铌酸锂芯片耦合；射频探头向薄膜铌酸锂芯片发送电信号。

该团队研发的激光器将薄膜铌酸锂（TFLN）与半导体激光技术（III-V 族增益芯片）相结合。“其核心在于电光泡克尔斯效应，它允许在激光腔内直接实现非常快速的频率调制。”Shixin Xue 解释说，“此外，我们还在二氧化硅包层上设计了一个扩展的分布式布拉格反射器（DBR），以实现良好的边模抑制和窄激光线宽。这种简化的结构显著增强了调谐能力，并降低了传统设计的复杂性。”

研究团队的技术方法是将电极直接集成到铌酸锂结构中，从而能够通过电信号实现对激光频率的快速精准调谐。“我们的方法不再需要外部调制器，使系统更加紧凑可靠，”Shixin Xue 说，“它充分利用了铌酸锂强大的电光特性，实现了极高的调制速度和频率调谐能力。”

光学计量与激光雷达的应用前景

这款芯片级激光器能够为光学计量与激光雷达领域带来哪些突破呢？它将显著提升激光雷达系统的速度，并实现高精度的距离与速度测量。“例如，它可以测量高达每秒数十米的速度，同时实现厘米级的距离分辨率。”Shixin Xue 说，“它还通过消除复杂的外部控制装置，简化了高精度应用（如光学原子钟、量子传感器和量子计算）中的频率稳定过程。”

对于该团队而言，研究过程中最令人振奋的时刻之一，是实现了远超过初始预期的频率啁啾率。“我们最初预计的频率啁啾率大约在每秒数拍赫兹（10^{15}~10^{16} Hz/s），但实际实现的频率啁啾率高达约 2×10^{19} Hz/s，这比我们最初的预期快了 100 多倍。”Shixin Xue 说道。这一成果拓展了他们对高频率啁啾率潜在应用场景的设想。

在快速频率调谐过程中，既要实现极窄的激光线宽，同时又要保持稳定的单模运行，是一项尤为艰巨的挑战。这需要对激光器的结构设计进行细致优化，对制造过程进行精密控制，

并对集成电极结构进行精准设计。克服这些挑战，对于激光器实现卓越性能至关重要。

这款芯片级激光器的其他关键性能包括：

- 低至 167 Hz 的固有线宽；
- 高达 24 GHz 的无模跳变（mode-hop-free）调谐范围；
- 调制频率可达 GHz 级别；
- 采用气室（gas-cell）参考进行直接反馈锁定的情况下，1 小时内的长期频率稳定性可达 ±6.5 MHz。

虽然激光雷达技术已经在自动驾驶汽车中得到应用，但下一代调频连续波（FMCW）激光雷达，将要求激光器具备更大的频率调谐范围，而这正是该团队研发的激光器的核心优势所在。在一项小型演示实验中，研究人员展示了他们的激光器可以驱动旋转圆盘上的激光雷达系统，并识别出由乐高积木拼出的字母 U 和 R。研究人员认为，未来该技术还可以进一步扩展，在满足高速公路上的行驶速度和探测距离的要求下，探测高速公路上的车辆与障碍物。

接下来的研发计划

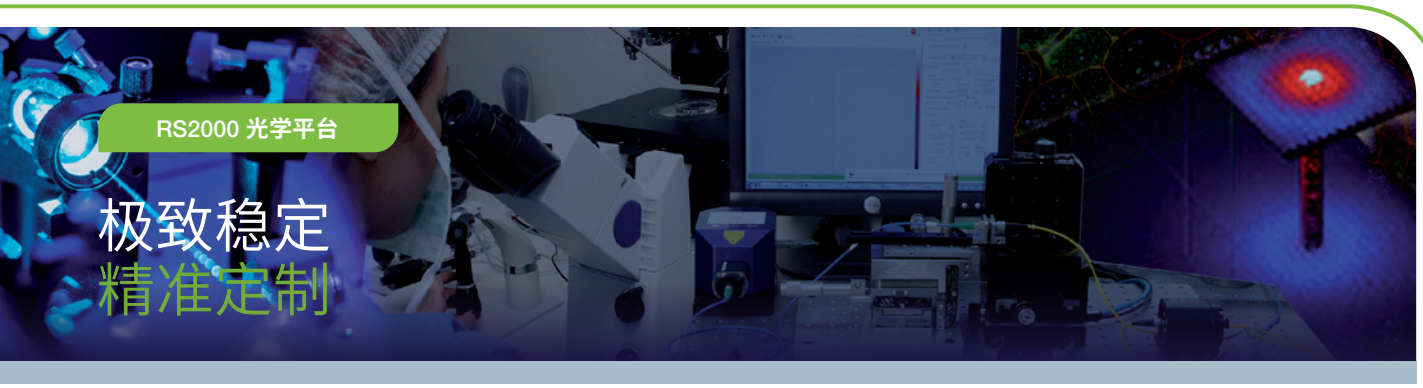
关于技术落地时间，研究团队预计将在未来 1-2 年内完成全封装系统的实际演示。若演示成功，预计该技术将得到更广泛的应用，并推动更多特定应用的发展。

“我们当前的核心工作是将所有组件封装在一起，因为这将增强激光器的机械稳定性和集成度。”Shixin Xue 表示，“同时，我们也希望找到能够充分利用这种超高速频率啁啾率的应用场景。”❑

上接第15页

规模，可以在可接受的成本范围内，实现大批量、可扩展的生产。此外，注塑成型技术还能集成有助于实现被动光对准的特征，与主动对准方法相比，能够缩短组装时间并降低成本。

微成型光学元件的其他优势包括：可加速设计创新的快速原型制作；依托成熟的材料特性和成型技术，有望实现光学设计与性能的标准化。总体而言，这些技术进步将帮助光通信和传感行业，更快地向共封装和板载光学器件转型。❑



信赖传承 创新体验

当研究对稳定性要求严苛，RS2000 光学平台是您的理想之选。其核心的调谐质量阻尼 (TMD) 技术，能精准锁定最具破坏性的共振频率，在关键位置提供卓越的振动抑制效果。



- TMD 提供被动减振方案中的最高阻尼性能
- 针对复杂系统实现定制化阻尼调谐
- 轻量化阻尼器兼具高刚性与快速响应能力
- 适用于医学成像、干涉测量及光纤对准等应用

扫描二维码
查阅更多信息

www.newport.com.cn

mks | Newport

光电共封装

单模光纤阵列降低共封装光学的成本与复杂度

用单模光纤阵列方案替代光电共封装（CPO）中的传统保偏光纤阵列，可以降低成本与技术复杂度。

文/Sally Cole Johnson

随着先进半导体封装、光学、光子学与网络技术的不断融合，以满足高性能计算、AI数据中心以及量子计算的性能需求，将光学功能与电气功能集成到同一个封装内（即光电共封装，copackaged optics，以下简称CPO）已成为一种发展趋势。

为什么选择基于硅光子学的CPO作为解决方案呢？因为该方案能应对带宽密度与能源效率这两大核心挑战。CPO通常包含光电小芯片（chiplet），这些小芯片将CMOS芯片与硅光子芯片集成在一起，外部激光源则通过一个连接到小芯片的光纤来传输信号。

当前，外部激光源与小芯片之间的信号传输，普遍采用保偏光纤（PMF）阵列，以确保硅光子器件的光学性能所需要的稳定偏振态。尽管保偏光纤具备偏振控制能力强等优势，但其对于对准精度的要求极高，这不仅增加了制造复杂性，还大幅拉高了封装成本。

简化设计：单模光纤阵列方案

在2025年5月27日至30日于美国得克萨斯州举办的IEEE电子元件与技术会议（ECTC）上，英伟达高级研究科学家Nandish Mehta及其团队，介绍了一种创新的替代方案：用单模光纤（SMF）阵列取代保偏光纤阵列，目标是在不影响系统性能的前提下，降低成本与技术复杂性。

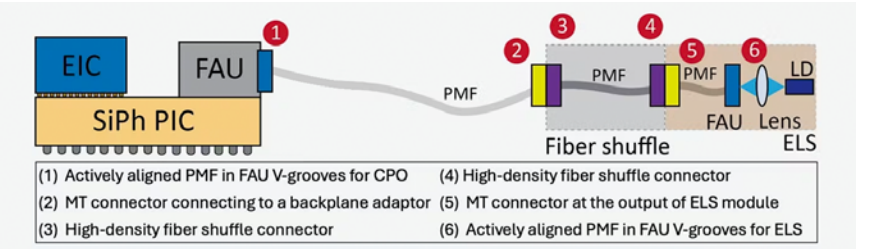


图1：从外部激光源（ELS）模块内的激光二极管（LD）到CPO系统输入端的光路示意图。（图片来源：Mehta/Nvidia）

该单模光纤设计中最关键的部分是什么？“如果非常要选一个最关键的部分，那就是两级偏振跟踪电路，”Mehta表示，“本研究的核心结论是：并不需要复杂或奇特的光子电路，只需要一个简单的设计就能省去保偏光纤，并实现封装成本的大幅降低。”

不过，这种新方法也面临挑战。“虽然用单模光纤替代保偏光纤能降低连接器组装的成本，但却会在发射器输入端引入偏振不确定性。”Mehta解释说，“我们通过偏振跟踪光子电路解决了这一问题，但核心难点在于最大限度地降低该电路的功耗开销。此外，单模光纤还需要特定类型的光输入/输出（I/O）接口，这类接口的插入损耗通常高于传统接口，这也会进一步增加光子链路的预算。因此将总开销保持在最低水平至关重要；否则，使用单模光纤所带来的成本与性能优势将被抵消。”

在本次ECTC会议中，Mehta团队分享了测试芯片的实验结果（以验证方案可行性），并详细对比了保偏光纤与单模光纤两种方案的成本-性能表现。

其中一款实验测试芯片“展示了一种光子电路，它是专门针对‘在光发射器输入端用标准单模光纤取代保偏光纤时，所引入的偏振不确定性问题’的。”Mehta说，“通过利用光纤部署所处的受控屏蔽环境，该电路可以将功耗开销降至最低。”

使用高效的热光移相器将进一步降低功耗开销，从而能充分发挥单模光纤的全部优势，包括更低的连接器成本和显著缩短的连接器组装时间。这两大因素都是降低CPO整体成本与生产周期的关键。

Mehta补充道：“目前原型已制备完成，一旦我们完成热光移相器的优化，它就可以投入生产了。”❑



不可忽视的超快色散

文/爱特蒙特光学（深圳）有限公司

虽然许多激光系统类型的散射效应极小，但是在超快激光应用中，散射效应是非常严重的问题。超快激光的特点是脉冲持续时间短，只有皮秒、飞秒或阿托秒数量级。由于遵循海森堡不确定性原理，因此变换受限的超快脉冲在到达其脉冲持续时间下限时，具有很宽的波长带宽（见图 1）。

由于带宽很宽的这些脉冲通过光学介质传输，因此色散会延长脉冲持续时间，这在超快应用中会产生不利影响。

色散概述

对于激光脉冲通过光学介质的方式，使用群速度（vg）来描述，群速度是指光在介质中相对于其波数（k）的相位速度的变化（公式 1）：

$$v_g = \left(\frac{\delta k}{\delta \omega}\right)^{-1} = c\left[\frac{\delta}{\delta \omega}(\omega n(\omega))\right]^{-1} = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{\delta n}{\delta \omega}} \qquad (1)$$

其中，ω 是光的角频率，c 是真空中的光速，n 是介质的折射率。波数 k 是 2π/λ ，有时将此概念称为波的空间频率。相位速度与群速度之间的差异如图 2 所示。

当多个波长的光通过一种材料时，由于频率（或波长）与群速度的关系，较长的波长（低频）的传播速度通常略快于较短的波长。[1] 这会造成波前相位的光谱变化，就像光通过棱镜时，由于材料光谱色散被分解成其组分颜色一样。由于群速度是相速度对频率的一阶导数，群速度色散（GVD）为逆群速度对频率的导数（公式 2）：

$$GVD = \frac{\delta}{\delta \omega}\left(\frac{1}{v_g}\right) = \frac{\delta}{\delta \omega}\left(\frac{\delta k}{\delta \omega}\right) = \frac{\delta^2 k}{\delta \omega^2} \qquad (2)$$

群速度的倒数称为一阶色散，而 GVD 称为二阶色散。正如群速度类似于光谱色散一样，它们都对应于折射率随波长或频率的一阶导数，GVD 的用法与部分色散类似，因为它们都是波长或频率的二阶导数。设计低 GVD 的光学器件与设计具有优秀消色性能的光学元件类似，只是它的重点在于群速度和 GVD 上，而不是相关色散系数和部

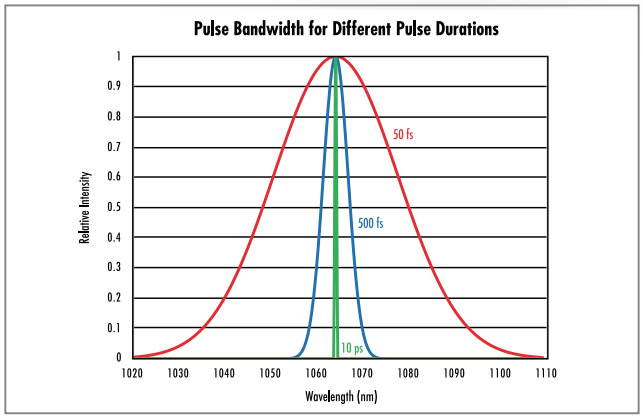


图1：随着超快激光的脉冲持续时间缩短，波长带宽将增大。

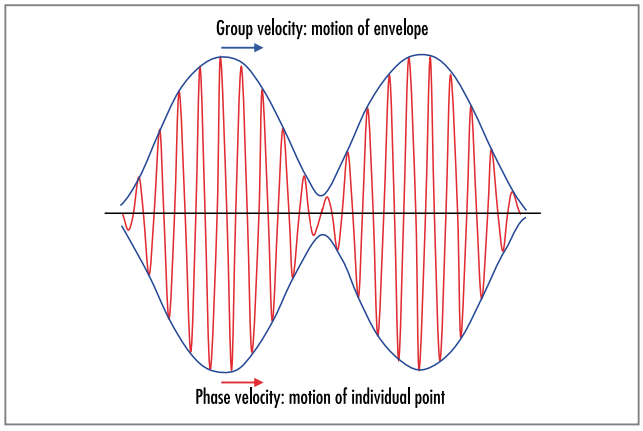


图2：群速度定义的是包络（或波包）的运动，以蓝色突出显示；相位速度定义的是波本身每个点的较高频率运动，以红色突出显示。

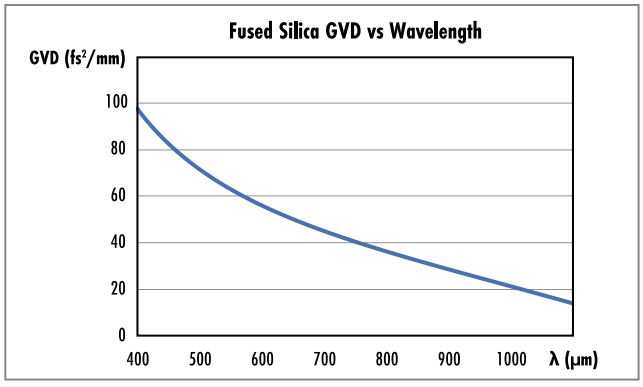


图3：零色散波长约为1.3 µm的熔融石英的GVD与波长。

分色散。

GVD 与指定光学介质的长度无关。群延迟色散（GDD）将介质的长度考虑在内，可以将 GVD 与长度相乘算出 GDD（公式 3）。

$$GDD = GVD \times Length \quad (3)$$

GVD 高度依赖波长，典型单位为 fs^2/mm。例如，熔融石英在 589.3 nm 波长下的 GVD 为 +57 fs^2/mm，在 1500 nm 波长下为 -26 fs^2/mm。这两个波长之间（约 1.3 μm）有一个零色散波长，它的 GVD 是零。图 3 展示了熔融石英的 GVD 随波长的显著变化。对于光纤通信，色散通常定义为相对于波长的导数，而不是频率，并且通常以 ps/(nm · km) 为单位进行指定。

超快激光器

超快激光凭借脉冲持续时间短、峰值功率高的特点，在包括精密生物医学应用、材料加工、微加工、非线性显微镜与成像以及通讯等多种应用领域，具有很大的优越性。在材料加工和微加工领域，超快激光带来了更优的尺寸公差，同时消除了通常会执行的后加工步骤，并最大限度减轻了对周围区域的损伤。[2] 同样，在激光手术和其他医疗应用中，超快激光产生的创伤更少，同时也减少了对麻醉剂和消毒的需求。[3]

若光波中包含大量的模或光波半波长的整数倍，则通过同相叠加以相干方式发出光波时，将产生超短激光脉冲（见图 4），这也称为锁模。

对于转换受限的高斯脉冲，光谱脉宽由公式（4）给出：

$$\text{Spectral Width (FWHM)} = \Delta\tau \times \Delta\nu \approx 0.441 \quad (4)$$

其中，Δτ 是脉冲持续时间，以秒为单位；Δν 是频谱带宽，以赫兹为单位。

GVD 对波长的依赖性将严重影响超快脉冲，因为超快脉冲的带宽很宽，在通过光学系统时将延长脉冲持续时间（见图 5）。脉冲从入射脉冲持续时间（τ_{in}）到出射脉冲持续时间（τ_{out}）的展宽量与 GDD 有关（见图 6、公式 5）。

$$\tau_{Out} = \tau_{In}\sqrt{1 + \left(4ln2\,\frac{GDD}{\tau_{In}^2}\right)^2} \quad (5)$$

多数光学介质会呈现正色散，因此波长较长的光在这些光学介质中传输时，其相位速度将高于波长较短的光，从而延长脉冲持续时间（见图 5），这称为正啁啾。超快激光由于带宽很宽，因此与其他类型的激光相比，受散射的影响更严重。

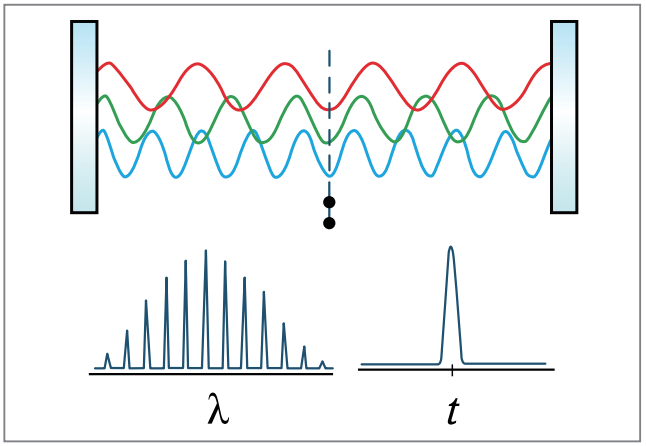


图4：在锁模期间，多模相干波的干涉会产生时序宽度超短、但波长带宽很宽的脉冲。

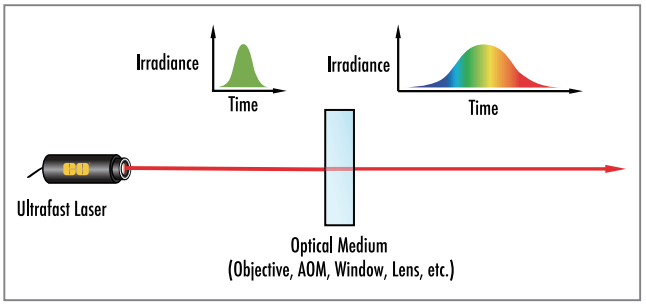


图5：散射导致超快激光脉冲变宽。AOM表示声光调制器，该组件能使激光发出脉冲式输出。

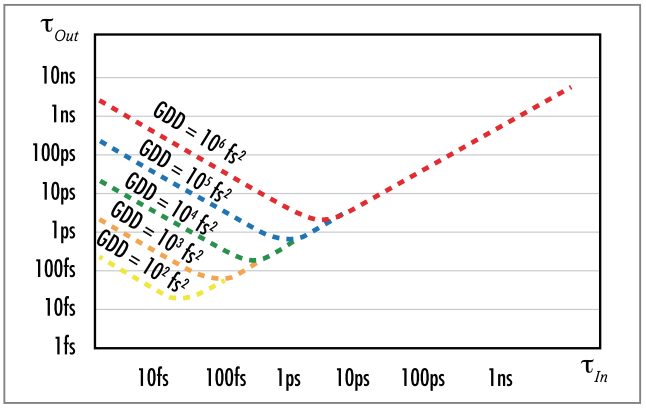


图6：对飞秒超快脉冲通过不同的光学介质后，进行时序展宽（即延长脉冲持续时间）的展示。

群延迟色散测量

GDD 对于超快激光光学的性能至关重要，因为超快激光的短脉冲持续时间，会在光学介质中导致明显的色散。白光干涉测量，是对超快光学组件的 GDD 进行测量的常用计量技术。

用白光干涉仪测量反射和透射光学元件的 GDD。当两臂光程相等时，干涉图显示信号，该位置取决于波长。

这样允许不同波长之间的光路长度差被精确确定，从而显示测试光 GDD（见图 7）。

信号要么由光电探测器检测，要么由光谱仪检测。随着时间的推移，光电探测器将不同波长的信号集成在一起，对捕获的干涉图应用傅里叶变换算法，可以揭示波长相关的 GDD 和色散。使用光谱仪而不是光电探测器，无需对捕获的数据进行傅里叶变换。

基于光电探测器的白光干涉仪，其灵敏度取决于用于平移参考光的工作台的阶跃尺寸，该阶跃尺寸是控制参考光程调整精度的核心参数；而这种‘灵敏度依赖工作台阶跃尺寸’的特性，与基于光谱仪的干涉系统无关。❑

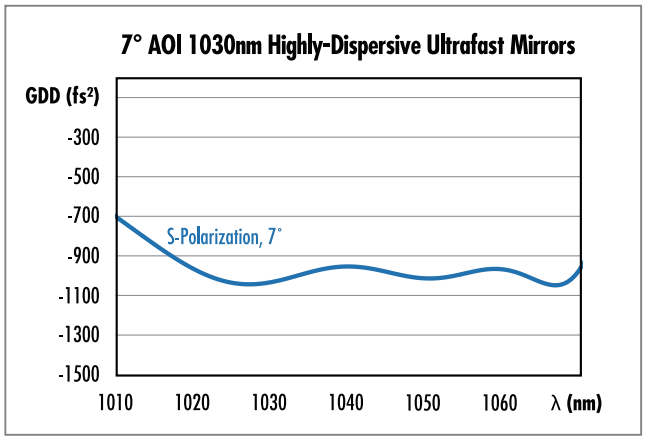
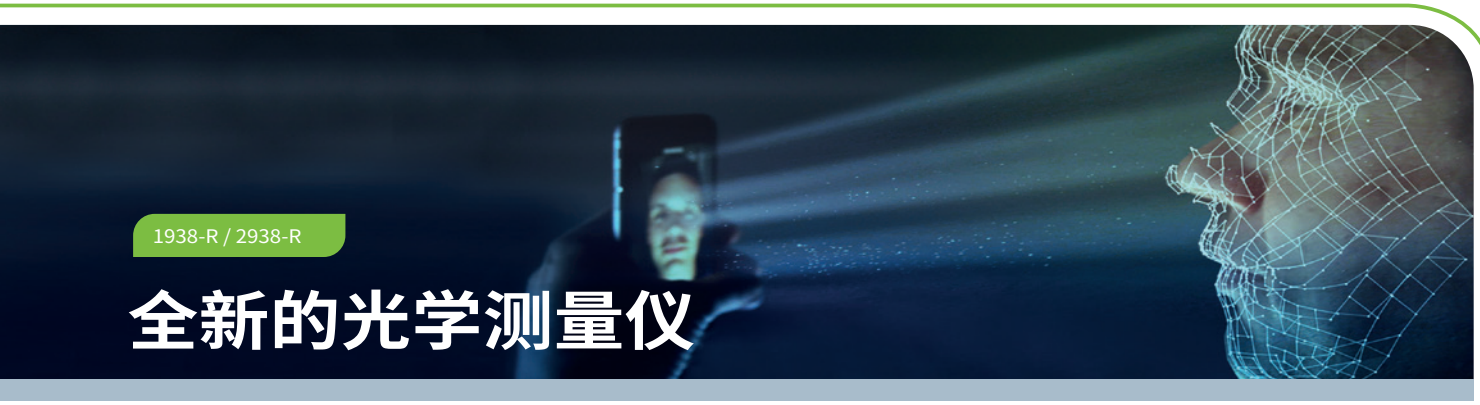


图7：白光干涉法获得高色散超快反射镜的GDD与波长的关系图。

参考文献

1. Ghatak, Ajoy, and K. Thyagarajan. “Optical Waveguides and Fibers.” University of Connecticut, 2000.
2. Mielke, Michael. “Ultrafast Lasers: Ultrashort Pulse Lasers Bring Cost- Efficient Precision to Micromanufacturing.” Laser Focus World, 8 Apr. 2015.
3. “The Benefits of Femtosecond Lasers and Why We Use Them.” Spindel Eye Associates, 16 May 2017, www.spindeleye.com/blog/2017/05/the- benefits-of-femtosecond-lasers-and-why-we-use-them/.



1938-R/2938-R 触摸屏台式光功率计

全新的光功率计：7英寸彩色触摸屏，支持各种高级数学功能，如多种图形和数据显示，以及全面的日志记录选项。非常适合高速调制光测量，例如 3D 传感、电信应用等。

- 高达 10 kHz 的带时间戳的数据采集
- 用于同步测量的触发器输入和 TTL 输出
- 与所有 Newport 电源和功率计兼容
- 可自行配置的用于数据分析和 TTL 输出的接通/断开标准
- 支持 RS232、USB 通信接口
- 与 PMManager 控制软件兼容



欲了解更多信息，请致电 400 799 8000 或访问 WWW.newport.com.cn

www.newport.com.cn

mks | Newport™

SiC烧蚀

紫外纳秒与红外飞秒激光技术烧蚀碳化硅的效率对比

使用UV ns和IR fs脉冲激光器，探讨了能量密度、脉冲宽度和脉冲串定制如何影响SiC烧蚀效率和去除速率。

文/MKS Instrumnets

碳化硅（SiC）在电动汽车（EV）系统、电力电子和清洁能源领域的应用持续增长。这主要归功于 SiC 材料卓越的导热性和宽禁带特性，使得由该材料制成的器件能够承受更高的温度、提供更快的开关速度并以更高的效率运行。

SiC 的另一个特性是高机械硬度，这对于传统的机械加工方法构成了一项挑战。

激光加工能够为 SiC 加工提供可行的解决方案。与任何材料的激光加工一样，激光加工 SiC 必须仔细考虑 SiC 的独特性质以及其对划线、切割和一般烧蚀等激光工艺所带来的挑战。因此，需要仔细且深得要领的工艺优化以获得最佳加工效果。

关键的第一步，是研究材料在不同能量密度下的烧蚀速率和效率。这些参数代表了特定激光技术对给定材料的基本去除能力。因此，比较不同激光器之间的这些参数，将有助于为特定的工艺和应用确定最佳激光类型。

本篇应用笔记介绍了使用两种不同的激光平台——紫外（UV）纳秒脉冲（ns）激光器和红外（IR）飞秒脉冲（fs）激光器，对 SiC 进行烧蚀的效率对比。我们探讨了能量密度、脉冲宽度和脉冲串定制如何影响烧蚀效率和去除速率，为选择最适合精密 SiC 加工的激光器提供了有价值的指导。

UV纳秒激光烧蚀

测试了使用两种不同的 ns UV 激光器烧蚀 4H 晶体 SiC。一种激光器是 MKS Spectra-Physics® Talon® UV15，这是一款传统的二极管泵浦固体（DPSS）调 Q 激光器，输出约 20 ns 的脉冲。另一种是 MKS Spectra-Physics Talon Ace™ UV100，这是一款具有 TimeShift™ 脉冲定制功能的混合光纤激光器，可以编程输出持续时间从 2~50 ns 的单脉冲以及脉冲串。

在所有情况下，均采用使用二维扫描振镜的凹槽铣削方法。扫描速度保持在 2~ 4 m/s 之间，光斑重叠率约为 60%，所有实验均在 50 kHz 重复频率下进行。测试了三种不同的脉冲配置：20 ns 单脉冲（Talon）、2 ns 单脉冲（Talon Ace）和 5×2 ns 脉冲串（Talon Ace）。

图 1 总结了 UV 激光测试的结果，显示了烧蚀效率（单位时间、每瓦激光功率去除的材料量）与峰值能量密度之间的函数关系。该数据在本质上揭示了激光能量消耗有效去除材料的能力，通常称为比烧蚀速率。

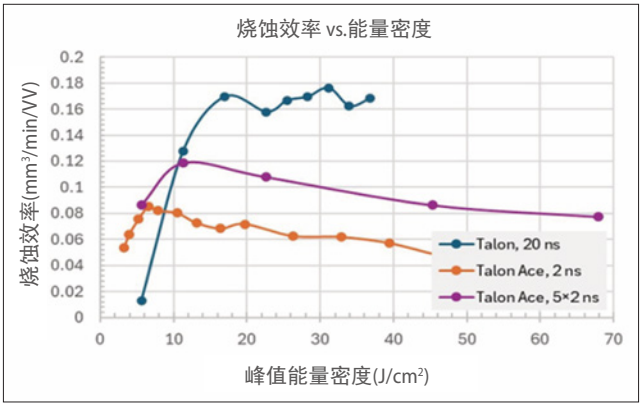


图1：使用不同的ns UV脉冲对SiC进行烧蚀，烧蚀效率和最佳能量密度存在明显差异。

最长的脉冲（在本例中为 20 ns）提供了最高的烧蚀效率，并且能在较高的能量密度水平下保持该效率。这一结果可能反映了激光与材料之间更长的相互作用时间，而这会产生一些有利于材料去除的热量。

2 ns 脉冲表现出较低的峰值烧蚀效率，其所需要的能

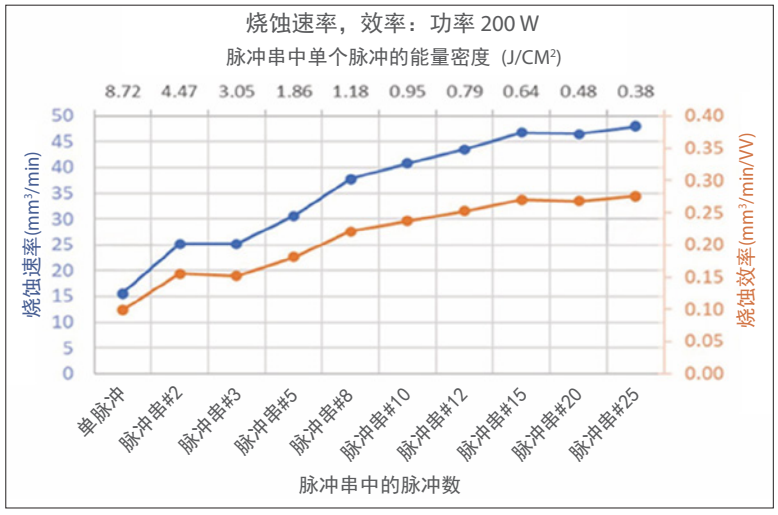


图2：使用越来越大的脉冲串可以优化烧蚀效率，这会降低施加到材料上的单个脉冲的能量密度。

量密度也明显更低。这在热管理至关重要的应用中，应该能提供一定的性能（质量）优势，因为它不太可能引起材料的整体加热。

使用 5×2 ns 脉冲串模式烧蚀，在最大烧蚀效率和相应的能量密度这两个极端之间，取得了平衡。这表明，在需要的情况下，使用（可变的）脉冲串和单脉冲输出，可以调节烧蚀吞吐量和热负荷。

红外飞秒激光烧蚀

使用 MKS Spectra-Physics IceFyre® FS IR200 激光器进行超短脉冲（USP）烧蚀加工。该激光器输出小于 500 fs 的脉冲，输出功率超过 200 W，重复频率范围从单脉冲到 50 MHz。该激光器具备 Spectra Physics TimeShift 可编程脉冲功能，可以实现高度灵活的脉冲串操作模式。

激光束以 5 m/s 的速度扫描，略快于 UV 实验中使用的速度。然而，IceFyre FS IR200 激光器更高的脉冲重复频率（1 MHz）导致了更大的光斑重叠率——约为 90%，而 ns 测试中的重叠率为 60%。

这种高重叠率是有意而为的。由于超短脉冲的能量沉积非常快，它们不会在材料中产生明显的热量积聚。因此，可以使用高重叠率而不会引入熔化或其他热损伤；更高的重叠意味着去除一定量的材料所需要的扫描次数更少，从而能够减少在加速 / 减速周期中所浪费的时间。

图 2 显示了 IR USP 激光器的烧蚀效率（橙色曲线）和烧蚀速率（蓝色曲线），它们随着脉冲串中脉冲数量的增加而变化。在所有测试中，平均激光功率约为 200 W。为了确定最佳能量密度，只需增加脉冲串中的脉冲数量（从而降低每个脉冲的能量），而不是调节整体平均功率。

图 2 中的数据显示了脉冲串操作的明显优势。从单脉冲操作开始，直到脉冲串中的子脉冲数量增加到 15 个，烧蚀效率呈现出稳步提高，然后基本趋于平稳。此时，该工艺在子脉冲能量密度仅为 0.4~0.6 J/cm² 时，达到约 0.27 mm³/min/W 的最大烧蚀效率。

值得注意的是，单脉冲烧蚀效率在大约 9 J/cm² 的能量密度下，约为 0.1 mm³/min/W。在先前调整平均功率的单脉冲烧蚀速率研究中，在 1~2 J/cm² 的能量密度下，获得了 0.12mm³/min/W 的最大烧蚀效率。这仍然远高于脉冲串模式下发现的大约 0.5 J/cm² 的最佳能量密度。

因此，脉冲串模式将烧蚀效率提高了一倍以上，并且每个脉冲使用的能量要少得多。这支持了这样的观点：USP 脉冲串加工通过将高能量脉冲分成更小、更易于管理的子脉冲，实现了更可控、更高效的能量利用。从更广泛的角度来看，该数据也证明了脉冲串能量密度优化技术的优势，它提供了一种简单直接的快速工艺优化方法。

质量

对于本研究中的所有激光器，加工质量都非常出色。所加工的大型凹槽铣削特征均显示出光滑的加工底面，没有熔化、裂纹或其他不规则现象。在重叠率较低的 ns 特征组中，单个烧蚀坑清晰可辨；而对于重叠率较高的 USP 特征中，光滑连续的烧蚀线条显而易见。

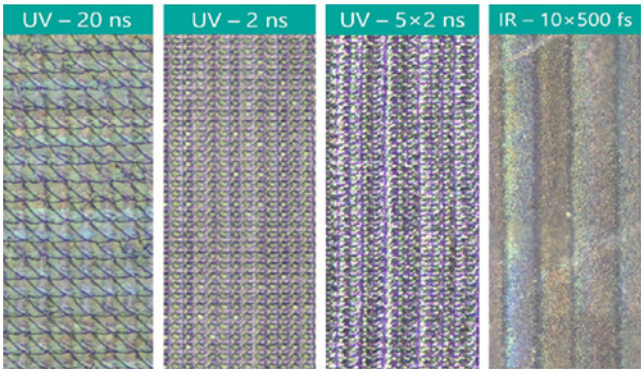


图3：测试的所有激光输出类型在各自最佳能量密度下加工的工件表面，均展现出优异的表面质量。

比较和结论

这里展示的烧蚀效率结果提供了有价值的见解，但

它们只说明了部分情况。这是因为实际的材料去除速率，是（烧蚀效率）×（平均功率）的乘积，这意味着使用效率较低、但功率更高的激光器，可以实现更高的材料去除速率。因此，在为特定应用选择光源时，必须考虑每种激光器类型可用的最大功率。表 1 基于输出功率，总结了 MKS Spectra-Physics 提供的部分激光器实际能够实现的真实最大去除速率。这些产品是当前市售的纳秒 UV 激光器和飞秒 IR 激光器的代表产品。

表 1 揭示了这些实际激光源在整体工艺效率方面的排名。例如，虽然 Talon UV15（20 ns）在 UV 激光测试中表现出最高的烧蚀效率，但该平台可用的相对较低的最大功率（45 W，Talon UV45），将去除速率限制在约 7.65 mm^3/min。然而，Talon Ace 在 100 W 功率下运行时，去除速率可以达到约 12 mm^3/min——尽管其效率较低。同时，IR 飞秒 IceFyre 系统在约 200 W 功率下运行，可提供高达 56 mm^3/min 的去除速率，这反映了其高功率和卓越的脉冲串模式下的烧蚀效率。

表1：各激光平台在使用最大可用平均功率时，能够实现的真实烧蚀速率

激光器	脉冲输出	最大功率（W）	最大效率 (mm^3/min/w)	最大烧蚀速率 (mm^3/min)
Talon UV45	20 ns	45	0.17	7.65
Talon Ace UV100	2 ns	100	0.085	8.5
Talon Ace UV100	5×2 ns burst	100	0.12	12
IceFyre FS IR200	500 fs	200	0.12	24
IceFyre FS IR200	25×500 fs burst	200	0.28	56

然而，表 1 中并未详细说明另一个实际的工艺因素——热影响区（HAZ）。虽然所有激光器都表现良好（具有优异的加工表面质量、无边缘崩缺、碎屑生成最少），但使用较低的能量密度以及较短的脉冲宽度，通常会产生较小的热影响区。因此，本研究中具有较高整体烧蚀速率的激光器，由于其较短的脉冲宽度，也应该能够提供最佳的整体加工质量。

基于所有这些信息，我们可以从这项针对 SiC 烧蚀的 UV ns 和 IR fs 激光器研究中，得出以下结论：

- UV ns 激光器是可行且具有成本效益的工具，可以为许多应用提供高表面质量和足够的吞吐量。20 ns 脉冲在高能量密度下提供最佳效率。更短的脉冲（2 ns, 5×2 ns）成本更高，但减少了热量输入，因此在芯片级加工或相邻电路存在风险时具有优势。
- IR fs 激光器，尤其是脉冲串模式，能提供最高的效率、吞吐量和质量，但系统更复杂且成本更高。
- 脉冲串控制（在任何激光器中）提供了一个有价值的调谐参数，让用户无需降低平均功率或改变光斑尺寸，即可优化效率。

产品

紫外纳秒和红外飞秒激光器

Talon® 紫外和绿光激光器

Talon 激光器平台是一个 UV 和绿光二极管泵浦固体（DPSS）调 Q 激光器系列，可提供前所未有的性能、可靠性和成本组合。Talon 基于 Spectra-Physics 的“It's in the Box™”设计，激光器和控制器组合在一个紧凑的封装中。Talon 在数万小时的工作时间内表现出高脉冲 - 脉冲的稳定性和出色的 TEM_{00} 模式质量。Talon 激光器专为 24/7 制造环境中的微加工应用而设计，其中系统正常运行时间至关重要。

Talon® Ace™ UV100 激光器

Talon Ace UV100 是一款强大的纳秒脉冲激光器，在小尺寸封装中提供业界领先的 >100 W 的 UV 功率，具有极具吸引力的性价比。这款新型激光器提供了前所未有的灵活性，包括 TimeShift™ 可编程脉冲能力和宽脉冲重复频率范围，可实现微加工工艺优化。Talon Ace UV100 是先进电子封装、印刷电路板、光伏、陶瓷、半导体以及其他材料和组件微加工中高速、高质量制造的理想选择。

IceFyre® FS UV 和 IR 飞秒激光器

IceFyre FS 系列是工业飞秒激光技术的一次超凡飞跃，提供业界领先的性能、多功能性、可靠性和拥有成本。IceFyre FS 飞秒激光器是以高吞吐量、最高质量微加工关键材料（包括玻璃、聚合物、金属、半导体、薄膜和复合材料）的理想选择，适用于要求严苛的消费电子、清洁能源、医疗设备和工业应用。基于 Spectra-Physics 的“It's in the Box”设计，IceFyre FS 将激光器和控制电子设备集成在一个易于安装的封装中。❑

	Talon UV45	Talon Ace UV100	IceFyre FS IR200
波长	355 nm	343 nm	343 ±2 nm
功率	>45 W @ 150 kHz	>100 W	>200 W @ 1–50 MHz
重复频率范围	0–500 kHz	0–5.0 MHz	Single shot to 50 MHz
脉冲能量	>300 µJ	>500 µJ	>200 µJ
脉冲宽度	<35 ns @ 150 kHz	<2 to >50 ns	<500 fs
脉冲-脉冲间的能量稳定性	<2% rms @150 kHz <3% rms up to 300 kHz <5% rms above 300 kHz	<3%, 1 σ	<2% rms

激光焊接

激光焊接提升圆柱形锂离子电池模组互联强度

激光焊接技术通过金属间化合物键合控制与先进的监控系统，提高了圆柱形锂离子电池模组连接的强度、安全性与可靠性。

文/Najah George，William A. Huffman Jr.；Photon Automation
Sebastian Moser；Precitec

圆柱形锂离子电池（如18650、21700以及更大的4680型号）因其高能量密度、标准化设计和成熟的可靠性，被广泛应用于便携式电子设备、电动工具、储能系统，尤其是电动汽车领域。这些电池通常采用镀镍钢（Hilumin）作为壳体材料，因为镍镀层能提供耐腐蚀性，钢基底则能保证结构强度，可以承受内部压力与机械应力。

为了满足特定的设计和性能需求，一些直径46 mm的圆柱形电池会采用铝和镀镍钢等不同材料作为壳体。在模组或电池包制造过程中，一项最为关键的挑战是：将铝和钢焊接在一起，因为这两种材料的热性能和焊接时的材料行为存在很大差异。

圆柱形电池模组或电池包的构建，需要将电芯（即电池单元）按规律排列，并根据应用的电压和电流需求进行串联或并联连接。这种配置方式使得制造商能够定制电池包的整体能量容量和功率输出，以满足电动汽车或固定储能系统等特定场景的应用需求。电芯通常通过厚度为0.3~0.6 mm的铝制汇流排实现互联，汇流排再通过激光焊接实现可靠的电连接（见图1）。电池壳体所使用的镀镍钢的厚度通常为0.4~0.6 mm，具体取决于电芯设计和制造商品牌。

在电动汽车应用中，连接铝制汇流排与电池电芯的焊缝，必须能够在严苛的动态环境（包括冲击、振动和热循环）下保持高度的结构完整性和导电性，因此精确可靠的激光焊接对电池的长期性能和安全性至关重要。激光焊接非常适合这类装配场景，因为激光焊接能够形成强度高、洁净度好的接头，并且热输入量低、变形小。这些特性对于应对铝-镀镍钢焊接所面临的挑战至关重要。

脆性金属间化合物（IMC）的形成

焊接过程的首要挑战是脆性金属间化合物（IMC）的形成，这会显著降低接头的强度和导电性。该问题源于铝与钢的性能差异，尤其是它们对热量的不同响应：铝的熔化和膨胀速度快于钢，这会产生热应力并促进焊接过程中IMC的生长。这些IMC（如铁铝化合物 $FeAl_3$ 和 Fe_2Al_5）通常质地脆弱，会削弱接头强度，导致裂纹产生、强度下降和腐蚀性增加。

焊接过程中IMC的形成及其总体积，对焊缝质量和焊缝的长期性

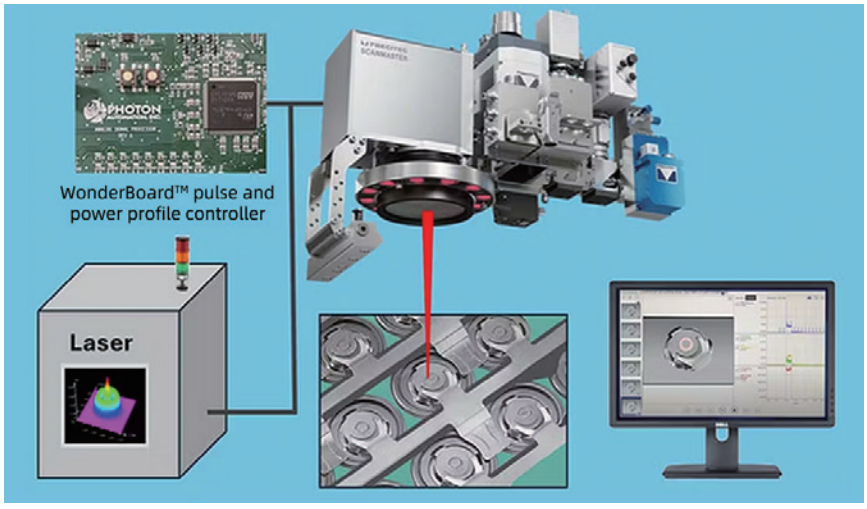


图1：圆柱形锂离子电池模组的激光焊接装置。（图片来源：Photon Automation）

能至关重要。随着 IMC 体积的增加，接头的脆性增强，机械强度下降，在应力作用下失效的可能性增大。更深的焊缝熔深通常会增加 IMC 的总体积，这凸显了精确控制焊接参数以确保接头强度高、可靠性好且耐用性强的必要性。

大量研究表明，保持薄而均匀的 IMC 层（通常为 2 ~10 μm）可以获得更高的拉伸剪切强度。这些薄层能够实现有效的冶金结合，同时能够最大限度地减少接头的脆性。但是当 IMC 层的厚度超过 15 μm 时，其脆性往往会导致拉伸强度下降，因为在载荷作用下容易引发裂纹和扩展（见图 2）。

为解决这一问题，更有效的方法是扩大焊接界面的面积，而不是仅仅依赖增加熔深。增大界面面积可以增强冶金键合，同时限制 IMC 的总体积，从而降低脆性并使应力在接头处更均匀地分布，提高可靠性。上述这种效果可以通过激光脉冲与光束扫描技术相结合来实现，以精确地控制热量输入和界面的形成，最大限度地减少 IMC 的生长。

Photon Automation 公司研发了先进的脉冲和功率控制器，能以微秒级精度控制激光器，实现定制化脉冲整形。通过微调脉冲形状，可以降低局部热应力，保留材料理想的机械特性，减小热影响区（HAZ），延长零件寿命。该公司的 WonderBOARD 还与振镜控制器相连，使激光能量能够在工件上均匀分布，从而避免因为光束快速移动而导致的热点和加热不均匀。

激光脉冲与光束振荡控制 IMC 形成

脉冲激光能更好地控制热输入，降低过度熔化或飞溅的风险。它在脉冲间形成的冷却时间，可以减少热积累，有助于避免烧穿或变形等缺陷。对于薄材料焊接或铝与钢等异种金属材料的焊接，脉冲技术还能提高熔池的稳定性。

通过振镜使激光束在焊接区域动态扫描，可以实现能量的均匀分布。这样能够避免边缘效应（激光束在焊接路径的起点或终点停留过久，导致过度熔深、缺口或热点）。振荡技术还能形成定制化的焊缝形状（如圆形、螺旋形或锯齿形），以增强接头的机械强度和均匀性。

脉冲与振荡技术的结合，创造了一种高度可控的焊接环境，可以最小化热梯度，优化冶金键合，并使应力分布更均匀。在电池制造中，这种方法尤为重要，它有助于实现精密的能量控制，以避免损坏敏感组件或绝缘区域。

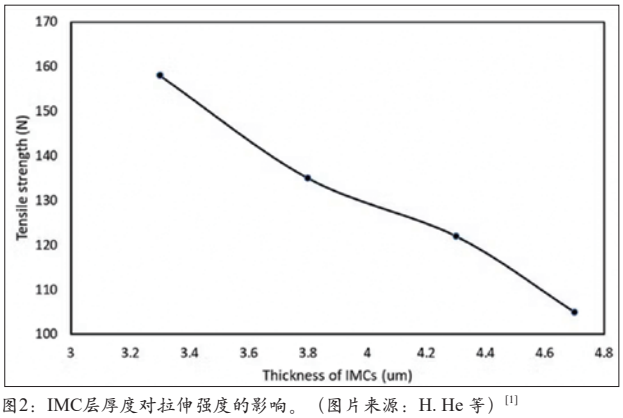


图2：IMC层厚度对拉伸强度的影响。（图片来源：H. He 等）[1]

第二个挑战是：实现精确的焊缝定位和一致的焊接质量。

对于圆柱形电芯设计，正负极均位于顶面——中心电极帽为正极，周围的环形区域为负极。这种布局限制了可用的焊接区域，要求激光定位要极其精准，因为即使是轻微的激光对准偏差都可能导致焊缝强度不够、内部损坏或短路，这些都会增加电芯失效风险，严重时甚至能引发热失控。

在组装过程中，这些电池模组中通常包含数百个紧密排列的电芯。制造公差或操作导致的电芯之间高度的微小差异，都可能会造成汇流排或焊接工具与电芯的接触不均匀。如果不妥善处理，这种接触的不一致会导致焊接质量波动、电连接不良和长期性能问题。

为了克服这些挑战，制造商依赖两类核心系统：视觉系统和光学相干断层扫描（OCT）。

视觉系统用于探测和定位每个圆柱形电芯的正极（中心帽）和负极（外环 / 边缘）。另外，视觉系统还能补偿电芯之间的差异 / 公差和夹具对准偏差，并将激光束引导到正确的焊接位置，避免激光束接触绝缘层或边缘区域。这使得包含数百个电芯的模组能实现一致的高精度焊接。

OCT 在焊接前测量每个电芯的高度，以检测最细微的高度差异。它通过电动准直透镜动态地调整激光焦点位置，确保激光始终聚焦在精确的焊接面上，从而提高焊接质量，并增强自动化生产环境（电池模组中每个电芯的高度可能存在微小差异）的可靠性。

焊接过程监控与数据采集：AI 的基础

实施激光焊接监控（LWM）系统，是实现 AI 过程控制的关键一步。在激光与材料相互作用的过程中，能量会以多种形式释放，包括：等离子体辐射（紫外波长）、热辐射（红外波长）、背反射（激光实际波长）以及通过光学元件的

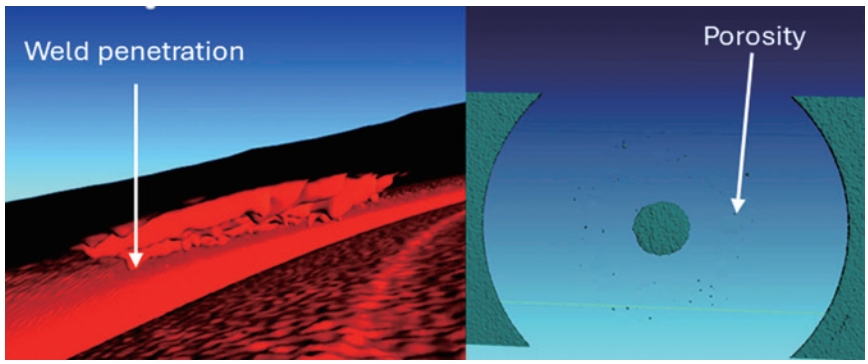


图3：3D-CT 图像显示焊缝熔深细节。（图片来源：Photon Automation）

激光功率。所有这些信号中，都会包含关于焊接过程参数的宝贵信息。

基于光电二极管的传感器实时捕获这些辐射信息，并与优质焊缝的参考数据进行比对。这种持续的数据采集有助于识别未熔合、漏焊或熔深不一致等缺陷。随着时间的推移，高分辨率过程数据的积累，为 AI 模型训练提供了基础。AI 模型能检测模式、预测故障，并实现闭环焊接过程优化。

焊接质量的工艺开发验证

在圆柱形锂离子电池的激光焊接中，确保内部的焊缝完整性对保障电池的安全性和性能至关重要。在焊接过程中，需要特别注意顶面下方的任何塑料或橡胶材料的安全：过度的热量输入、不当的激光参数或过深的熔深，都可能损坏下方的绝缘层或塑料 / 橡胶结构部件，导致短路、泄漏、机械故障或热失控。

计算机断层扫描（CT）可以对焊接接头进行无损高分辨率检测，提供 2D 和 3D 数据，揭示出气孔、焊缝界面熔深不均或熔深不足等焊缝内部的缺陷（见图 3）。这些 3D CT 数据通过验证焊接质量和识别熔深是否触及密封或绝缘材料，来为工艺开发提供支持，从而更好地在焊接过程中预防上述问题。❑

参考文献

1. H. He 等人，《涂料》，第 14 卷，第 10 期，1262 页（2024 年）；https://doi.org/10.3390/coatings14101262.

819-WL Series

简化您的光学测量



819-WL 光功率和波长传感器

Newport 819-WL 传感器系列可以灵活地测量从蓝光到近红外光谱的激光功率和波长。

- 测量功率和波长，适用于 400 至 1650 nm 的广泛应用
- 基于积分球的设计消除了与对准、光束轮廓、偏振和背向反射相关的问题
- NIST 可追溯测量，确保准确性
- 温控光电探测器，具有无与伦比的稳定性
- 灵活的输入，适用于自由空间和光纤耦合测量

有关更多信息，请访问 www.newport.com.cn

www.newport.com.cn

mks | Newport

光束整形

LCOS 空间光调制器赋能下一代激光加工

在激光加工过程中优化光束轮廓，不仅能提高热效率，还能实现更快速的切割、更高精度的焊接和更复杂的微加工。

文/Yuya Suzuki，Santec

近年来，硅基液晶（Liquid Crystal on Silicon，LCOS）技术取得了重大突破，基于该技术的空间光调制器（Spatial Light Modulators，SLM）已经实现了 1 kW 的功率承载能力，这意味着现在 SLM 已经可以用于高功率激光应用。由此，基于 LCOS 的 SLM（以下简称 LCOS SLM）正在成为金属加工等激光加工应用的一个新选择。

什么是LCOS SLM?

LCOS 技术最初是为投影仪、背投电视等显示设备开发的一种微显示技术，后被改造用于 SLM。这类器件广泛应用于可见光至近红外（NIR）波段的应用场景，包括光通信、[1] 激光加工、[2] 自适应光学、光学操控 [3] 以及脉冲 / 光谱整形等。

LCOS 器件由一个包含数百万像素的二维（2D）矩阵组成。每个像素均包含一个由氧化铟锡（ITO）制成的公共透明电极和一个位于 CMOS 衬底上的像素电极—— 这两层电极之间夹着一层液晶材料（见图 1）。通过对每个像素独立施加电压，SLM 器件可以在空间上调制入射光的相位。大多数 LCOS 器件采用反射式工作模式，其像素电极同时兼具反射镜功能。

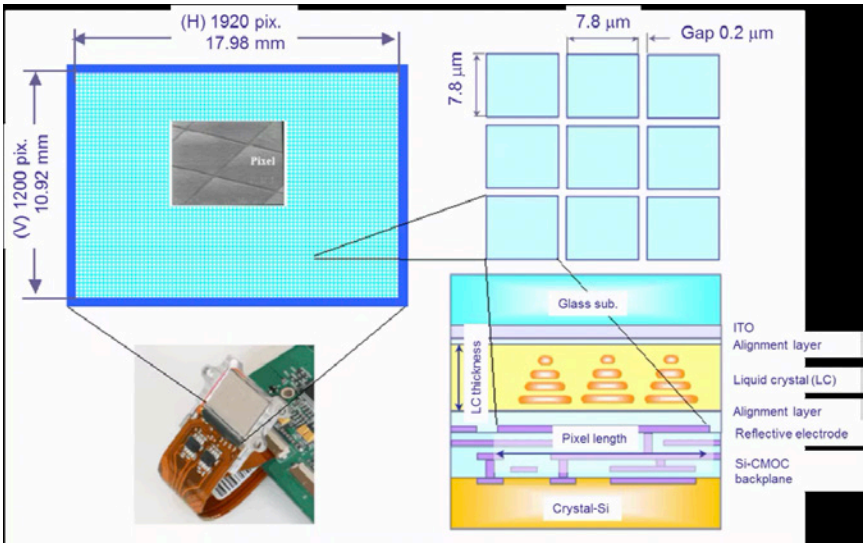


图 1：硅基液晶（LCOS）结构示意图。

Santec 公司开发了一款 LCOS SLM，其分辨率达 1920 × 1200 像素，像素间距 8.0 µm，支持 60 Hz 和 120 Hz 的帧率。与标准的 8 位显示器（256 灰度级）相比，该 SLM 可提供更高的相位分辨率，具有 10 位（1024 级）灰度（见图 2a）和出色的相位稳定性（<0.002 π 弧度）（见图 2b）。这使其能够实现高精度相位调制，可用于高对比度显示场景，同时也是激光加工、光通信、自适应光学等“相位敏感型”应用的理想选择。

LCOS 器件由交流（AC）电压驱动，这可能导致液晶分子振动，进而产生“闪烁”（flickering）现象。在视觉应用中，这种闪烁可能影响甚微；但在高精度光学系统中，闪烁却会造成严重影响。Santec 的这款 SLM 通过将驱动频率提升至 1 kHz 以上来减少闪烁。此外，它还支持通过数字视频接口（DVI）输入视频信号，并允许通过通用串行总线（USB）存储相位图案（最多 128 种），以便使用触发输入 / 输出功能实现与外部系统的快速切换。同时，Santec 还提供软件开发工具包（SDK），用户可以通过定制程序实现自主控制。

LCOS SLM的应用场景

虽然 LCOS SLM 本质上是相位调制器件，但其应用场景极为广泛—— 从 AR/VR 显示，到显微镜与

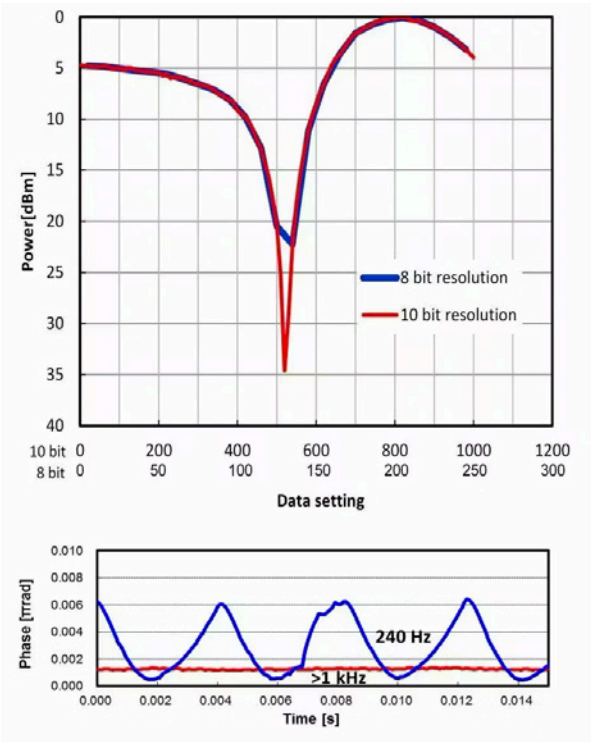


图2：LCOS 调制强度（上）与 LCOS 闪烁特性（下）的性能对比图。

天文学领域的自适应光学，再到光通信中的模式转换，都活跃着 SLM 的身影。

传统上，这些应用所涉及的激光功率都相对较低。尽管 LCOS SLM 能够用于激光加工领域的光束整形，但其较低的损伤阈值始终是一个限制因素。如今，SLM 对激光承受能力的提升，为其打开了高功率激光应用的大门（如金属加工）。与需要为每个加工任务重新配置硬件的传统系统不同，SLM 可以实现动态、实时的光束整形——这为精密微加工及复杂几何形状的焊接 / 切割带来了显著优势。

突破新边界：可承受1 kW功率的LCOS SLM

金属材料的切割与焊接，所需要的激光功率通常超过 1 kW。合理的光束整形可减少飞溅、提升加工质量。若要使用 LCOS SLM 实现这一目标，SLM 器件必须能够承受高激光功率。Santec 的 SLM-310 真正实现了 1 kW 的功率承载能力，可以直接应用于严苛的激光加工环境。

在加工过程中优化光束轮廓，不仅能提升热效率，还能实现更快速的切割、更高精度的焊接和更复杂的微细加

70KW 高功率探头

耐用可靠，
轻松实现超高功率测量

专为特定能量和工业应用中的超高功率激光测量而设计

该探头能够实现高达 70 KW的精确功率测量，在高功率系统测量中具备良好的可靠性。适用于高功率光纤激光器的研发、工业切割与钻孔以及特定能量系统等领域。

- 可测量 2 KW 到 70 KW的功率范围
- 全波段覆盖范围从 900 nm到 1100 nm以及 10.6 µm
- 极低的背反射率，小于 0.5%
- 多样化的通信接口：包含以太网和 RS232
- 灵活的光束抓取：适用于垂直和水平激光照射



更多信息，请浏览
www.ophiropt.com

www.ophiropt.com

mks | Ophir

工。以往难以加工的复杂形状，如今可以快速且高精度地实现，这为航空航天、汽车、医疗和半导体领域开辟了新的可能性。

1 kW LCOS SLM 的核心优势

振镜（Galvo Mirrors）应用广泛于激光加工领域，其通过改变 x 轴与 y 轴方向的角度来实现光束扫描，但扫描过程耗时较长。相比之下，LCOS SLM 可以通过计算机生成全息图（CGHs）[4] 执行一次性（one-shot）加工，从而大幅缩短加工时间。

与 DLP（数字光处理）相比，LCOS SLM 能提供更高的相位稳定性，这使其更适合基于 CGH 的加工场景。虽然衍射光学元件（DOE）也能实现光束整形，但需要为不同的图案更换物理元件，这增加了设备的调试时间。LCOS SLM 可以实现可编程式的光束整形，不需要机械调整，为制造应用带来了更大的灵活性和更高的效率。

适用于NIR激光加工的LCOS技术演进

传统的 LCOS 器件是为人类可视显示而设计的，并不是为了承受数百或数千瓦的激光功率。暴露在高功率激光下，器件内部的各种组件——包括盖板玻璃、取向层、电极、反射镜及液晶材料等，可能会遭受不可逆转的损坏（见图 3）。

为了解决这个问题，高功率应用场景通常会选择基于 MEMS 技术的 DLP 器件与振镜。但 Santec SLM-310 内部的 LCOS 结构，是专门为高抗损伤能力而设计的，其采用蓝宝石盖板玻璃增强热导率，并采用高性能水冷散热器实现高效冷却。以无机氧化硅（SiOx）取向层替代传统的有机聚酰亚胺，由二氧化硅（SiO_2）和五氧化二钽（Ta_2O_5）制成的介电多层反射镜，最大限度地降低了光吸收。液晶材料则选用低反应性含氟化合物的混合物，以确保热稳定性与光学稳定性。

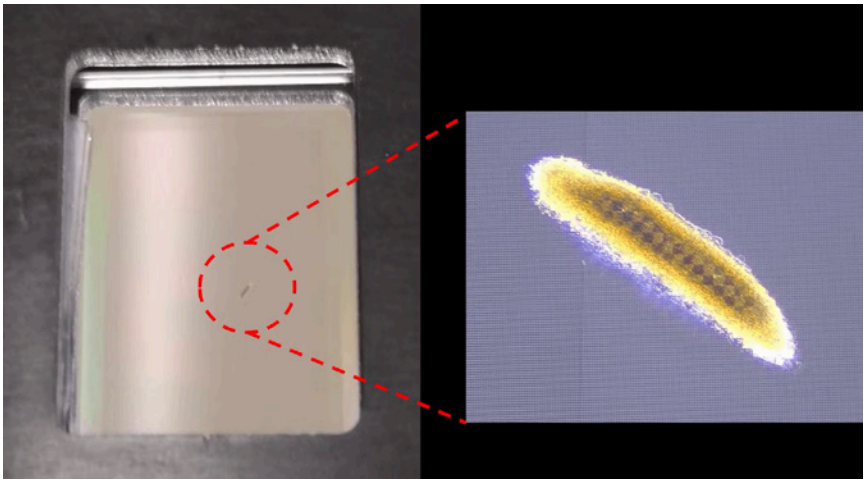


图3：入射光造成的LCOS损伤。

LCOS SLM重塑激光加工的未来

到目前为止，LCOS SLM 的应用仅局限于一些低功率应用，如晶圆切割、激光打标等。Santec SLM-310 的问世，将 LCOS SLM 的应用范围拓展到了数千瓦级的激光金属加工领域，并为加工速度与效率的大幅提升奠定了基础。

传统的光束形状是静态的，每切换一项新的加工任务都需重新调试设备；而 LCOS SLM 能够在加工过程中实现实时、动态的光束整形，这不仅能够实现复杂图案的高精度微加工，还能够通过非对称光束优化切割 / 焊接效果，同时支持多点照射来提高加工吞吐量。

Santec SLM-310 的潜在应用场景包括：中厚度不锈钢或铝合金的高速切割、航空航天零部件的精密加工，以及金属 3D 打印中的工艺控制。此外，该器件还能最大限度地减少热效应，避免材料变形或性能退化。

展望未来，将 LCOS SLM 与人工智能和传感器技术相结合，有望实现“能够根据目标条件实时优化光束图案的”全自动化系统。这将加速制造业的自动化与效率提升进程，与工业 4.0 的核心目标完美契合。

将 LCOS SLM 和高功率激光器相结合，不仅是光学控制技术的一次发展演进，它更重新定义了激光加工所能实现的成就。这场静悄悄的技术革命，将有望重塑下一代制造业的发展格局。❑

参考文献

1. Y. Sakurai 等，《IEEE 光子技术快报》，第 23 卷第 14 期，989-991 页（2011 年）。
2. Hotta 等，《日本应用物理学会第 77 届春季会议论文集》，14a-C31-2（2016 年）。
3. Otowa 等，《日本应用物理学会第 77 届春季会议论文集》，14p-B3-10（2016 年）。
4. Y. Hayasaki 等，《应用物理快报》，第 87 卷第 031101 期（2005 年）。

运动控制

微米级精度：高吞吐量激光钻孔系统的误差预算

如何确定并减小系统的总误差，以设计出能够同时实现高质量和高产能的激光钻孔设备？

文/Bryan Germann，Eric Belski；Aerotech 公司

在高速激光钻孔应用中，既要实现微米级的光斑定位精度，同时又要满足终端用户的产量和质量要求，这为设备制造商带来了严苛的设计挑战。电子和半导体封装等领域对更小、更复杂的通孔（vias）的需求正在日益增长，而要在加工中实现更小的通孔公差，需要深入理解钻孔过程中累积的误差来源。

系统的整体加工精度受多种误差源的共同影响，因此必须要分析各种误差源之间的相互作用是如何影响大型基板（带有数千至数百万个孔）上的通孔位置精度和几何公差的。这些误差源可归因于工件处理的机械设计，以及用于执行钻孔操作的激光源、光学元件和光束转向系统。

误差预算解析：误差源与相互作用

误差预算是一个系统化过程，通过识别、量化和跟踪设备的所有误差源，来预测激光与工件接触的功能点处的累积误差。对于多轴激光钻孔系统而言，这些误差主要来自两个领域：一是移动工件和光学元件的机械平台，另一个是移动激光束的扫描振镜。另外，由运动轮廓的动态特性（见图 1）和激光定位触发产生的二级误差，也会纳入整体误差预算。

机械运动误差。移动工件或光学元件的伺服平台是设备的基础，其固有的几何误差是误差预算的主要来源。设备中的任何运动轴都存在六个自由度的误差。对于沿 X 轴运动的单个线性平台（见图 2），这些误差包括三个线性误差（定位精度、水平直线度、垂直直线度）和三个角度误差（滚转角、俯仰角、偏摆角）。这些寄生运动（尤其是角度分量）会产生显著的阿贝误差（Abbé errors），导致激光束在工件表面发生偏移，而且这种偏移会随着运动轴到工件的距离增加而放大。

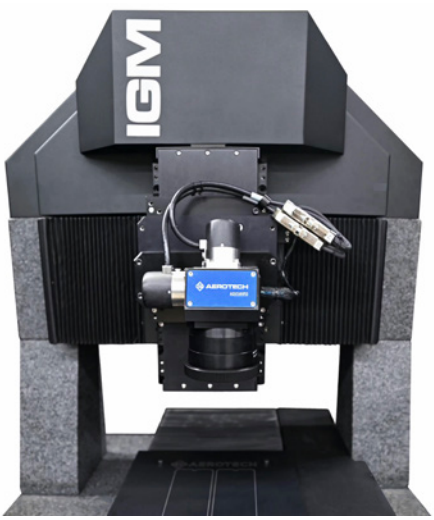


图1：高动态运动系统示例，由直接集成在花岗岩上的一个分轴线性运动系统和一个高动态两轴扫描振镜组成。

扫描振镜与光学误差。扫描振镜虽然速度极快且灵活性高，但也存在自身误差。用于将扫描振镜的角运动转换为平坦焦平面的 F-theta 透镜，并非完美无缺，它会引入称为枕形或桶形畸变的空间非线性（见图 3）。此外，激光束本身也可能是不稳定性的来源。激光源内部或光路中的热漂移，可能导致长时间生产过程中的焦点偏移或光束漂移。即使是光学元件污染等环境因素，也会通过增大焦斑尺寸或改变光束能量分布而降低性能，直接影响孔的质量和一致性。

误差测量与补偿

在任何运动开始前，都需要对系统组件进行测量和校准。这些被视为一阶误差源，若不进行校正，会导致激光无法在正确的位置被触发，因为运动组件的反馈设备无法识别这些误差。

1D/2D 平台校准。使用激光干涉仪，在所需的功能工作点处测量每个平台在全行程范围内的定位误差。这些数据用于生成各个轴的校准表，并实时参考以校正线性定位误差、直

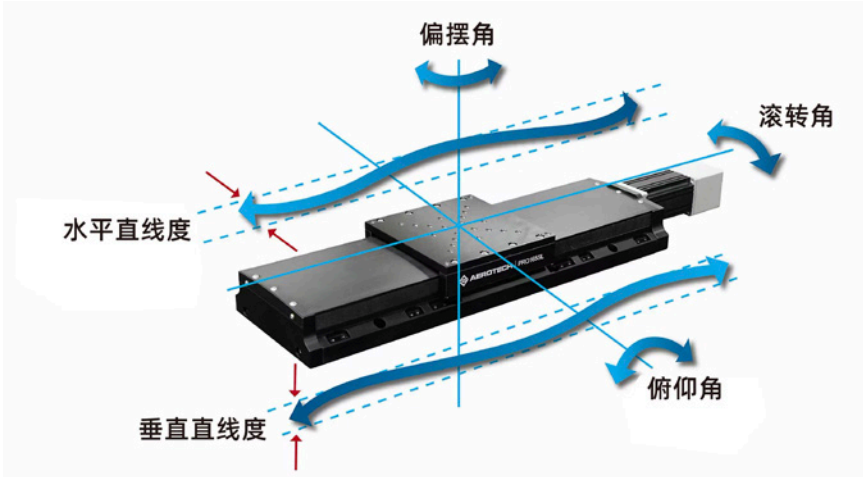


图2：线性运动平台的误差源，包括垂直和水平直线度误差，以及平面度误差源（滚转角、俯仰角、偏摆角）。

线度、俯仰角、偏摆角以及非正交性等轴间误差。这使得物理平台的性能接近理想的理论状态，并在平台全行程运动中自动校正测量点处的阿贝误差。

扫描振镜校准。执行“标记 - 测量”校准，可以精确测量与 F-theta 物镜相关的光学误差。控制扫描振镜标记已知位置的一个精确网格，随后利用系统内置的高分辨率相机测量这些标记的实际位置，测量得到的偏差会作为位置补偿值，收集到存储在运动控制器内的校准表中。这种扫描振镜校准可补偿 F-theta 透镜畸变和整个视场（FOV）内的其他非线性误差。

对于用于聚焦激光束的特定 F-theta 透镜，表征激光光斑尺寸和形状在视场内如何变化也非常重要，因为这会影响工艺参数。这些光斑尺寸误差也可以作为“标记 - 测量”过程的一部分进行测量，并通过动态改变透镜的工作距离以保持光斑聚焦，以及改变激光功率以保持一致的激光能量密度来进行校准。

静态校准至关重要，但无法校正高速运动期间产生的二阶动态误差，此时激光光斑可能会因为机械系统惯性引起的跟踪误差而发生偏移。在平台运动期间尤其如此，因为这些平台的质量较大。在这种情况下，最好利用激光扫描振镜的高动态性能来实现更高的吞吐量。传统的钻孔方法（平台移动到位置、稳定后扫描振镜再工作）速度慢，并且扫描振镜在视场边界移动时，会引入质量缺陷。

无限视场（IFOV）技术消除了这一限制。它基于统一的控制架构运行，同步管理扫描振镜的高频控制回路（如 200 kHz）和平台的伺服回路（如 20 kHz）。由于 IFOV 将来自平台的实时编码器反馈作为扫描振镜控制回路的直接输入，因此，扫描振镜可以动态、持续地调整其轨迹，以跟踪并补偿平台的实际位置，从而有效地实时抵消平台跟踪误差。其结果是形成单一无缝的扫描路径，从而能在整个工件上实现连续的“飞行”加工，消除拼接误差。

在高动态 IFOV 系统中，速度不断变化。若基于固定时间间隔触发激光，会导致通孔间距不均匀。位置同步输出（PSO）技术通过使用编码器的实时、组合的 IFOV 位置，在精确的空间间隔处触发激光，从而解决了这个问题。这确保了每个激光脉冲或脉冲串都能精确地落在工件上，而不受运动速度变化的影响，这对于保持精确的通孔间距至关重要。

经验证的误差预算方法

理解这些独立的误差源如何组合至关重要。简单的峰值误差累加会得到“最坏情况”值，这种方法过于保守，会导致不必要的昂贵设计。一个更实用且统计上有效的方法是：使用平方和根（RSS）方法来组合不相关的误差。

Aerotech 公司的 William Land II 和 Scott Schmidt，在一项详细研究中证实了这种方法的有效性。[1] 他们进行了一系列高精度测量，以细致地量化系统性能。首先，使用二维（2D）激光干涉仪系统校准底层线性电机伺服平台，该过程生成校正图消除静态误差，包括由平台偏摆和非正交对准引起的误差；然后，使用迭代的“标记 - 测量”技术独立校准扫描振镜组件，以校正其误差量。

该测试的量化结果提供了一个清晰的基准：

- 校准后的伺服平台，其残余矢量和误差为 5.26 μm；
- 校准后的振镜系统，其矢量误差为 2.06 μm。

使用RSS方法，预测的组合误差为

$$\sqrt{5.26^2\,\mu m + 2.06^2\,\mu m} = 5.65\,\mu m$$

（组合系统的 RSS 误差）。为验证这一点，执行了一个随机组合运动网格测试，其中平台和扫描振镜同时反向运动，在基板上生成标记。该动态测试的实测组合误差为 5.44 μm。预测值与测量值之间的高度相关性，使我们有充分信心认为：精心构建的误差

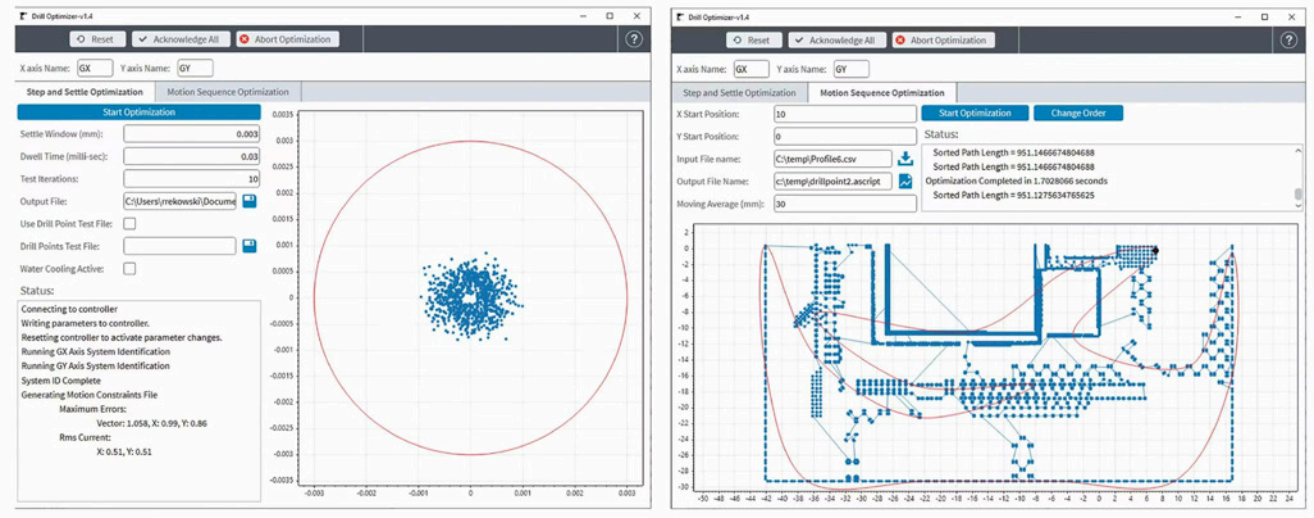


图 3：Aerotech 的 DrillOptimizer 软件工具可以实现钻孔点之间的最短路径优化（右），以及针对特定扫描振镜硬件进行参数优化（左），以最大限度地提高钻孔性能并最小化误差。

预算，能够准确预测设备的基线准静态性能，这是构建成功系统的非常关键的第一步。

先进的控制回路优化

即使使用基于 IFOV 和 PSO 的全校准系统，最终性能也可能受到控制系统本身响应能力的限制。标准的比例 - 积分 - 微分（PID）控制回路，即使增加了前馈增益，通常也是针对通用的“平均”运动曲线进行调整的。这实际上是一种折衷方案。

短促、快速的扫描振镜运动的最佳控制回路增益，与更长、更平滑运动的最佳增益存在根本不同。为了实现最大吞吐量，系统必须在尽可能最短的时间内完成加速、移动并在每个目标位置稳定下来。

先进的运动优化软件，如 Aerotech 的 DrillOptimizer（见图 3），采用迭代机器学习和强化学习算法实现了这一目标。该过程包括：表征振镜系统在视场内对不同长度和方向运动的动态响应；为所有可能的运动建立一个包含最优 PID 和前馈调制参数的综合库；在实时运行中，对于每个通孔到通孔之间的运动，控制器立即调用并应用针对该特定运动矢量的理想控制参数组合。

这种针对特定运动的优化，确保每次运动都能在最短的时间内、在所需要的稳定窗口（例如 ±2 μm）内稳定下来。这使得激光能够在零移动延迟的情况下触发，并将物理硬件推向其绝对性能极限，实现传统调节系统所无法达到的吞吐量。Aerotech 已经将实现该功能的工具组合成一款名为 DrillOptimizer 的软件包，该软件包是 AeroscriptPlus 库的一部分。借助这些库，设备商可以将这种强大的运动和稳定优化直接集成到设备的人机界面（HMI）中，并为每个客户添加这种复杂的优化。

给激光钻孔系统设计者的要点总结

从头开始设计出能够进行激光钻孔的设备，是一个多层次的过程。首先，要精心构建基础误差预算，并通过经验数据对其进行细致验证，以了解系统的基线精度。然后，使用一套全面的补偿方法工具包对此进行优化，从平台的静态 2D 校准，到使用 IFOV 进行动态实时误差校正，以及使用 PSO 实现精确脉冲定位。最后，关键的一步是通过先进的、针对特定运动的控制回路优化，来释放硬件的终极潜能。

这种集成策略，使得满足现代激光钻孔的极端要求成为可能。通过理解、考虑并主动补偿过程中每个阶段的每个误差源，每秒能够在数千个位置保持微米级的稳定窗口，从而能够克服大规模钻孔挑战，实现高吞吐量的精密钻孔。❑

参考文献

1. S. Schmidt 和 W. Land II，《估算伺服与振镜组合运动精度》，Aerotech 白皮书（2021 年 12 月）；详见 www.aerotech.com/estimating-combined-servo-and-galvo-motion-accuracy。

激光焊接

下一代激光焊接：创新与趋势

激光焊接在光源和元器件方面的创新，正在不断提升焊接质量和焊接效率。

文/Antonio Castelo，欧洲光子学产业联盟（EPIC）生物医学与激光技术经理

在过去的十年间，在激光光源、控制系统和自动化技术快速发展的推动下，激光焊接经历了显著变革。曾经仅限于特殊应用的激光焊接，如今已成为汽车、航空航天、电子和医疗设备领域的主流制造技术。激光焊接的优势显而易见：局部能量输入，并且能够对多种不同厚度、不同焊缝几何形状要求的多种金属进行非接触式加工。

多项技术进展推动了激光焊接技术的发展演变。高亮度光纤激光器和用于微焊接的超快激光器的出现，大幅提升了激光焊接的质量、速度和精度，同时减少了热变形和后处理需求。如今，这些激光源（尤其是光纤激光器）的成本正在显著降低，从而使得激光工艺能够被更广泛的行业所采用。此外，激光焊接可以使用的波长也更加丰富，这能让特定材料在室温下获得更好的激光吸收率。

激光焊接系统中其他元器件的性能也在不断改进。加工头（尤其是内置光学元件的加工头）的可靠性和透光性日益提升。在激光焊接常用的功率水平下，热焦点偏移已经不再是问题，这在一定程度上得益于光学涂层质量的显著提高。与此同时，机器人技术、人工智能（AI）和数字孪生技术的融合，实现了更智能、更灵活的生产线。这些创新不仅扩大了激光能够可靠焊接的材料种类和几何形状范围，而且还降低了成本并提高了工艺可扩展性，使激光焊接成为现代高性能制造中的一种核心技术。

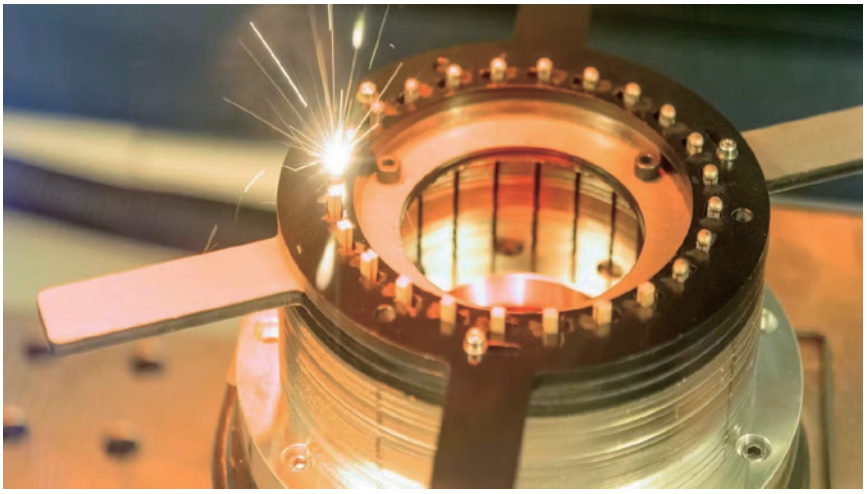


图1：电动汽车电机的发卡焊接。（图片来源：Trumpf）

电动汽车领域的激光焊接策略

向电动化出行的转变，极大地改变了动力总成组件和部件的设计。一个典型案例是发卡电机，这是一种使用发卡式定子绕组而非圆线绕组的电动机。与圆线相比，发卡线呈矩形且尺寸更大，其矩形结构能实现更高的填充率，从而能将铜绕组的效率提升大约20%。目前，大多数汽车原始设备制造商（OEM）和供应商都采用了发卡式电机设计，而这需要对绕组的开口端进行激光焊接。

在发卡焊接中，典型的焊接流程为：先依次熔化发卡引脚，再通过更长的连接轨迹在引脚顶部形成熔融焊珠。为了提高最终的焊接质量，通快公司（Trumpf）开发了BrightLine Weld焊接技术（见图1）。

与标准的激光设计相比，BrightLine Weld技术的光束传输光纤由一根空心环形光纤和一根内置核心光纤组成，可以向工件提供叠加的光束轮廓。通过在光纤输入端使用光学光束楔，可以自由调整分配到每根光纤的激光功率。这为焊接工艺（尤其是铜焊接）带来的好处是：显著减少了飞溅和气孔的形成。调节核心光纤（40%）与环形光纤（60%）之间的功率分配比例，能够实现最低的焊接飞溅和气孔形成。这不但优化了焊接质量，而且激光功率可以充分利用到额定功率水平。

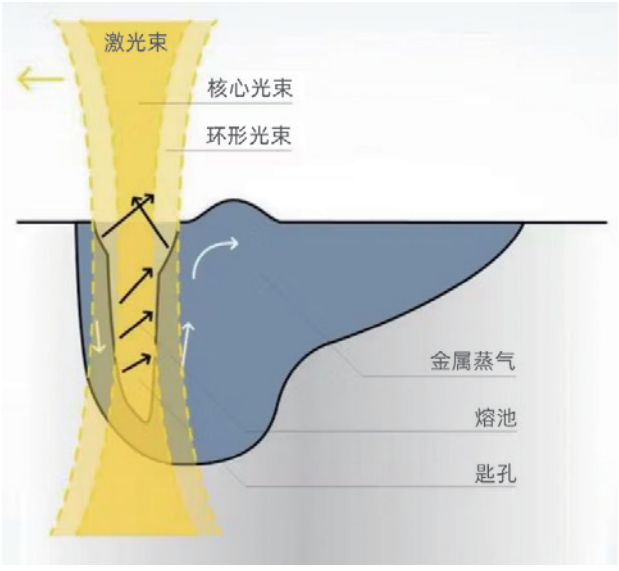


图2：BrightLine Weld 技术性能：附加的环形光束扩大了匙孔开口，使金属蒸气更容易逸出；向表面加速流动的熔体被环形光束导流回熔池，从而避免了飞溅。（图片来源：Trumpf）

发卡焊接通常使用 6 kW 或 8 kW 的碟片激光器，以实现深熔焊模式，确保在微秒级的加工时间内形成所需要的熔池体积。加工时间主要取决于所用导线的横截面，常见发卡线的单个引脚对的焊接时间从 25 ms 到 200 ms 不等（见图 2）。

光束整形的优势

光束整形目前正带来真正颠覆性的变革，并且这一趋势将会在未来持续下去。光束整形能够定制激光能量的空间和时间分布，以满足特定材料和接头的需求。传统的高斯光束并非总能提供理想的能量分布以实现稳定无缺陷的焊接，尤其是在处理复杂几何形状、高反射材料或异种金属组合时。

调整光束形状可以带来诸多优势，例如减少飞溅、提高焊接速度、更好地控制连接件中的能量耗散以及稳定匙孔。未来，必须从分布“锐度”、景深、尺寸精度、效率等方面，精确描述特定应用强度分布的质量。光束整形无疑是激光材料加工的未来方向。

对于激光焊接应用，有多种方法可以实现光束整形。Cailabs 公司提供了一种多平面光转换（MPLC）解决方案。该方案能够将标准高斯光束转换为复杂的特定应用轮廓，如平顶帽形、环形模式、多光斑图案，并且不会损失光束质量或功率。先进的光束控制显著提高了焊接一致性，减少了热变形，并最大限度地减少了飞溅、气孔和裂纹等缺陷，尤其适用于高难度材料的焊接。

Cailabs 公司的光束整形模块结构紧凑，采用无源设计，并且与工业激光系统（包括 Precitec 的激光头）完全兼容。Cailabs 和 Precitec 两家公司合作，将 Cailabs 的光束整形技术集成到 Precitec 的激光焊接头中，以满足不断增长的电动汽车市场的需求（见图 3）。

Robust AO 公司提供的另一种解决方案，称为 Zwobbel 技术，它能够实现 z 方向的光束摆动，摆动频率高达 2000 Hz，用于动态光束整形。在光束摆动中，激光束在沿主焊接路径行进的同时，也会以受控的振荡模式移动。这种移动与激光的线性运动叠加，形成了一种动态能量分布，可以精确调整以适应材料和接头的几何形状。该技术被用作 90° 偏转镜，并且能在动态调整形状的同时，保持光斑聚焦在扫描平面内。

研究人员分析了采用 Zwobbel 技术的轴向动态光束成形，在铝合金激光焊接中减少气孔和飞溅的效果。与无光束振荡的参考测试组（静态焦点位置工艺）相比，Zwobbel 技术显著降低了气孔率（尤其是根部区域），还实现了更均匀的焊接熔深，焊接熔深的波动范围减少了约 45%。结果表明，轴向动态光束整形工艺降低了根部区域的强度峰值，并实现了材料蒸发的局部控制。

一系列补充测试探索了飞溅行为

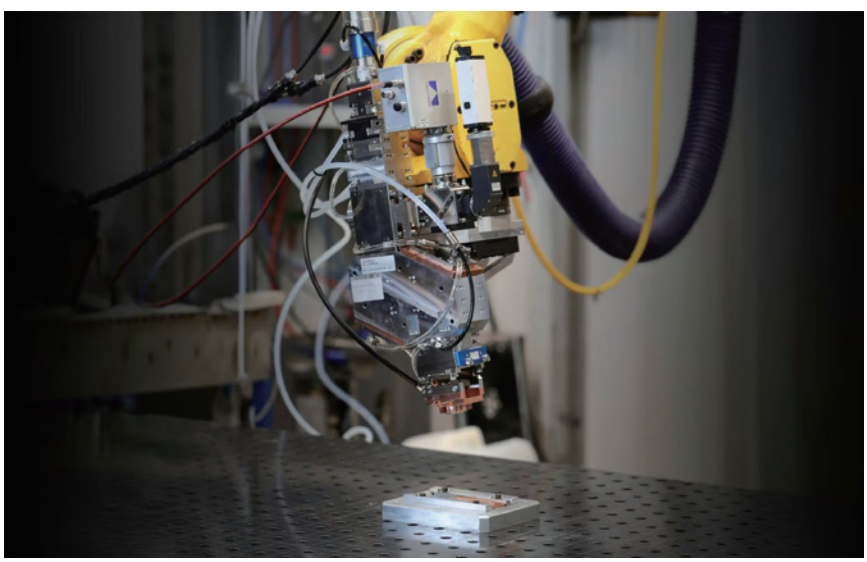


图3：集成到Precitec 激光焊接头中的 Cailabs 光束整形技术。（图片来源：Cailabs）

以及对焊缝几何形状的定向影响，结果发现：高振荡频率与飞溅形成的显著减少相关，这表明匙孔有所扩大。横截面分析显示了熔池内的变化及由此导致的焊缝几何形状改变：与无振荡光束的焊接工艺相比，在保持焊接熔深的同时，覆盖层区域的焊缝宽度增加了 25%，根部区域的焊缝宽度增幅高达 34%。通过这些测试，Robust AO 证明了轴向动态光束整形在提高焊缝质量方面的有效性（见图 4）。

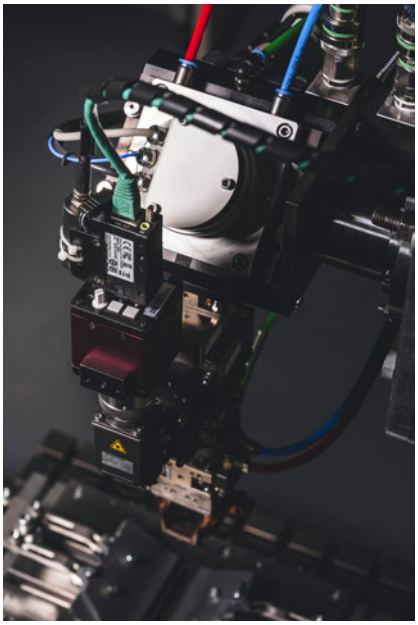


图 4：安装在焊接激光头上的 Robust AO Zwobbel 装置。（图片来源：Robust AO）

工艺监控的新解决方案

随着激光加工对精度和效率的需求不断提高，制造商难以通过过时的方法来保证质量。人工检测和传统监控系统往往导致高误差率、更多废品、生产停机时间延长和工作流程效率低下。常见的生产挑战包括：工艺不稳定、废品率高、未检测到的工艺偏差或缺乏可追溯性。自动化、智能化的实时监控系统，对于提高工艺可靠性、减少浪费以及确保可追溯的高质量生产，至关重要。

基于光子学的工艺监控传感器领域取得了显著进展，这些传感器正变得更加灵敏，并且采样率也在不断提高。例如，4D Photonics 公司开发的 4D.TWO 传感器，这是一种高效、软件可调的激光工艺监控解决方案，现场设置极其简便。该传感器能够捕获可见光（VIS）和近红外光（NIR）的整个光谱范围，各包含 16 个通道，此外还有 3 个用于可见光、近红外和背反射的宽带通道。这些通道的采样率高达 100 kHz，能够对激光加工过程进行详细的实时分析，并检测裂纹、气孔和飞溅等异常情况。

4D Photonics 的“无损技术”通过两个交替工作的评估单元，实现了无缝、连续的数据采集。这种设计消除了死区时间，确保即使在高焊接速度下（如双极板焊接，速度 ≥1 m/s）也没有监控盲点。尽管采样率较低，但该系统仍然能够精确检测微小的偏差，并且在不影响准确性的前提下大幅减少数据量。4D.TWO 传感器配备了一个 9 轴运动跟踪器，用于检测机器人系统的路径偏差，同时还能记录温度、湿度和气压。结合 4D.watcher 软件，用户可以通过创建与不同根本原因相关联的多个“组合通道”，对故障类型进行分类。这简化了故障识别，并缩短了出现生产问题后的恢复时间。

激光焊接即服务

“制造即服务（MaaS）”的概念，使企业能够按需使用先进的制造能力。MaaS 平台利用基于云的系统、数字孪生和分布式生产网络，提供灵活、可扩展且不受地理位置限制的制造解决方案。激光焊接凭借其高精度、自动化兼容性和材料通用性，完美地与 MaaS 模式相契合。服务提供商可通过数字接口提供激光焊接操作的远程编程、实时监控和质量控制，从而能以按使用付费的高效方式，部署复杂的焊接工艺。这种对激光焊接等尖端制造技术的普及化使用，支持快速原型制作、定制化生产和准时制生产，完美契合了灵活的现代供应链需求。

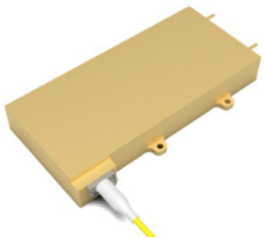
欧盟的 Lasers4MaaS 项目（https://lasers4maas.eu）正走在变革现代制造业的前沿。通过利用动态激光光束整形和 AI 驱动的制造技术，其尖端数字制造平台能够实现按需、可持续且经济高效的生产。工作流程开始后，先通过数字平台无缝集成设计和生产数据，确保所有系统协同一致。数据交换完成后，动态光束整形技术实时定制激光操作，提供针对特定应用的精确、高效的材料加工。在生产过程中，AI 持续监控关键参数，提供即时反馈并优化工艺性能；数字孪生和预测分析确保产品满足严格的质量标准；同时生命周期评估对环境影响进行评估。来自生产数据的不同见解将被反馈到系统中，用于持续改进和提升未来运营的效率。

Lasers4MaaS 有望为多个行业带来彻底性变革，例如：在汽车领域，其灵活性和生产力推动着激光焊接的创新；航空航天领域，将受益于高精度定制制造；在食品包装行业，产品质量至关重要；在氢能源和聚变能源等可再生能源领域，先进的激光解决方案支持向更清洁、更绿色的未来转型。通过应对各个行业的独特挑战，Lasers4MaaS 将加速智能、可持续和去中心化制造实践的采用。其按需提供先进激光系统的模式，无需大量前期投资即可实现灵活且可扩展的制造解决方案。❑

锐科激光
320 W 888 nm 200 μm半导体激光器

锐科激光在原高功率锁波系列半导体激光器基础上，推出了全新的 888 nm 锁波 200 μm 芯径半导体激光器。

性能指标(水冷25℃)如下：(1)输出功率＞320 W；(2)中心波长：888±1 nm；(3) 光谱宽度 FWHM ＜ 1 nm；(4)光电转换效率：50%；(5) 光纤芯径：200 μm；(6) 输出方式：SMA905。

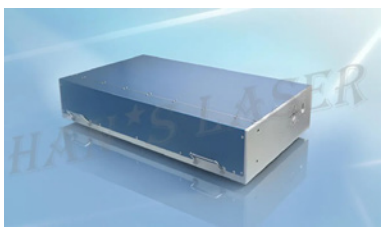


产品亮点：(1) 优化光路和结构设计，产品体积小、重量轻、结构紧凑，散热良好；(2)全电流锁波，线宽窄，光谱稳定性高；(3)产品输出功率稳定，可靠性高，寿命长；(4) 光斑均匀性好。

锐科激光，www.raycuslaser.com

大族激光
50 W红外飞秒激光器

大族激光紫外及超快激光器中心推出 50 W 红外飞秒激光器，采用全光纤放大方案，搭配自主开发的飞秒种子源，通过精确控制色散参数，实现更窄可压缩脉冲。



主要特点：(1) 优异的光束质量：通过精密设计的预放大级、功率放大级组合，保持优异光束质量（$M^2 \leq 1.3$）；在加工过程中，可获得更佳聚焦效果，对玻璃等材料加工效率的提升、加工崩边的控制有明显改善。(2) 脉冲宽度窄：脉冲宽度窄，宽度动态可调（300 fs~10 ps 连续可调）。(3) 操作方便，适配性强：控制系统及软件的人机界面设计及操作简单，能够实时监控激光器状态；可根据加工需求选择内控、外控模式。(4) 光束指向性稳定：光束指向稳定性闭环校正（≤ ±20 μrad）。

适用于半导体材料加工，PCB 材料切割、划线，消费类电子行业的玻璃、陶瓷材料的钻孔、开槽、倒角，光伏太阳能背板玻璃钻孔，双光子微纳加工，心血管支架切割等应用领域。

大族激光，www.hanslaser.com

通快集团
全新一代高效光纤激光器

通快集团推出全新一代高效光纤激光器，通过与可编程光学器件及传感技术的深度协同，用户可同步提升制造效率与零部件质量。



用户可选配功率覆盖 500W~50kW 的 TruFiber 系列光纤激光器，并可配套全系列激光系统解决方案，包含扫描振镜、固定聚焦镜等精密聚焦光学组件，以及实时监测系统运行状态的智能解决方案。通快将激光器、控制系统、光路传输系统、加工光学模组、传感器及冷却装置进行深度集成优化，其动态功率调控技术可实现毫米级精度的可控焊缝成型，尤其在铜材焊接及中厚板焊接领域展现显著优势，也非常适用于刹车盘高速熔覆等高要求表面处理应用。

激光器搭载集成传感器系统，可远程监控设备运行状态，有效预防焊接过程中的潜在故障。当需要现场维护时，模块化设计使技术人员能够快速更换所有组件。控制系统配备直观的用户界面 TruControl 2.0，操作逻辑接近智能手机体验。

通快集团，www.trumpf.cn

IPG
LDD–1000–DS实时闭环自动对焦系统

IPG 推出 LDD-1000-DS 实时闭环自动对焦系统，是一种通过光学系统直接传输的实时测距系统，由核心单元和 1DM 模块组成，可直接连接到 IPG 光束传输装置，帮助用户在焊接过程中同步、实时地精确测量工件表面高度变化。

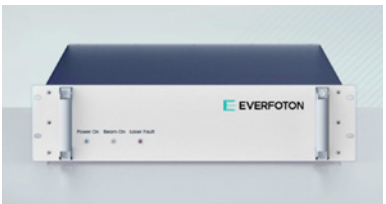


在激光焊接过程中，工件表面起伏或装配公差会导致焦点偏移。传统机械调焦响应慢（≥200 ms），无法适应高速产线节奏；旁轴测距存在视差误差。LDD-1000-DS 通过同轴光路设计，使测量点与加工点完全重合，实现零视差实时测距。该系统具有以下功能：(1) 预校准后用来定位焊接头焦点；(2) 配合振镜视觉系统进行 3D 增强；(3) 智能装配检查；(4) 实时距离探测和自动聚焦；(5) 与振镜头完全集成。

IPG，www.ipgphotonics.com

长飞光坊
新一代6 kW单模组连续光纤激光器

长飞光坊推出新一代 6 kW 单模组连续光纤激光器，以 MPCS 泵浦协同方案与自研特种光纤两大核心技术，实现功率与光束质量的理想平衡。



其采用创新研发的 MPCS 泵浦协同方案，具有以下三大技术：（1）热管理革命：创新热均匀性设计，将温控精度提升至新高度；（2）光学系统优化：精准调控增益带宽，有效抑制光学系统的非线性效应；（3）性能跃升：在高功率输出下，仍保持卓越光束质量。

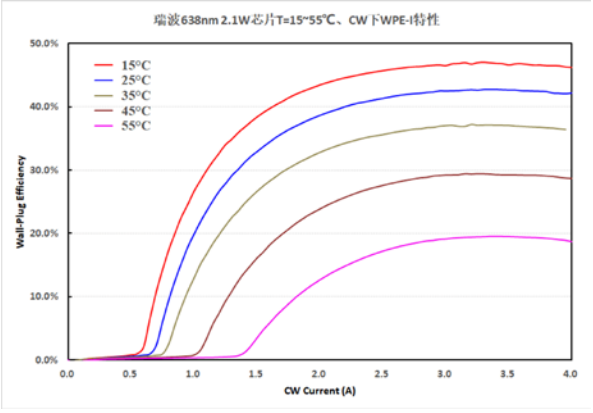
长飞光坊 6 kW 单模组光纤激光器基于全球领先的光纤制备技术，全面采用自主研发的特种光纤，其中超高功率掺镱光纤及无源匹配光纤可有效提升泵浦光的吸收效率，减少匹配损耗，提升光学系统的稳定性；传能光纤通过特殊定制化纤芯 / 包层比例及折射率分布，输出光束质量进一步提升，且一致性更高。产品最小可实现 34 μm 芯径输出，BPP ＜ 0.65（mm × mard），为激光加工实现更充足的能量注入，实现更快的加工效率与更高的质量，为精密焊接、超厚板切割等高端应用提供了全新可能。

长飞光坊，www.everfoton.com

瑞波光电
新一代638 nm半导体激光芯片

瑞波光电推出新一代 638 nm 半导体激光芯片，包含 0.5 W、0.7 W 及 2.1 W 三款型号。

瑞波光电新一代 638 nm 激光器件具备高功率、高效率和高温特性好的优势，在关键性能参数上提升显著，具有以下两大技术创新：（1）材料和工艺的优化：通过改善 AlGaInP/GaInP 材料能带结构的固有缺陷，结合优化的芯片工艺和封装工艺，大幅提升光电转换效率。其中商业化 638 nm 0.5 W TO-56（条宽 20 μm）在 T=25℃工作功率 @0.7 A 达到 0.71 W，光电转换效率达到 44.6%。（2）量子阱混杂技术突破：开发出工艺可靠的量子阱混杂技术，实现高可靠性无吸收腔面的低成本制作，从根本上解决红光 LD 芯片可靠性差的难题。



该技术使芯片在高温环境下仍保持出色稳定性，寿命超过 20000 h，满足工业级应用需求。

适用于激光显示、工业与传感、医疗美容等应用领域。

瑞波光电，www.raybowlaser.com

强远激光
新型拉杆箱激光清洗设备

强远激光推出新型拉杆箱激光清洗设备，在保持高性能的同时，实现了体积、重量和能效的全面优化，控制器体积较上一代缩小了约 30%；产品整体结构体积缩减至原来的 45%；设备重量从原来的 58 kg 降低至 19 kg 左右，减重幅度高达 67%。



具有以下高性能：（1）电气架构方面：采用先进的模块化设计，通过智能布线算法优化，系统线缆总长度减少 40%，连接节点数量下降 35%，使系统走线更加简洁有序。（2）信号质量方面：优化后的布局设计使电磁兼容性性能提升 20%，信号干扰风险显著降低，系统运行稳定性提高 15% 以上。（3）散热性能方面：紧凑的结构设计配合创新的风道优化，使散热效率提升 25%，确保设备在长时间高负荷运行下仍能保持优异的工作状态。（4）可靠性方面：通过关键部件的冗余设计和环境适应性优化，产品平均无故障时间延长 20%，为设备的长期稳定运行提供了坚实保障。

适用于清洗叉车轮、轮毂焊前清洗、焊缝清洗、表面树脂清洗。

强远激光，www.sdqylaser.com

海目星激光
超宽料带激光切焊一体机

海目星自主研发并推出新款超宽料带激光切焊一体机，可兼容 100~500 mm 宽、0.1~1 mm 厚不锈钢、铜合金、铝合金料带切割拼焊，为金属卷料精密加工领域带来全新的解决方案。



产品优势：集激光切割 + 焊接于一体，自动化程度高，一键启动；简洁高效，对比现有工艺 CT 减少一半以上；拼焊头尾错位 < 0.05 mm，焊缝余高 < 0.05 mm；支持快速换型，一键切换配方；体积紧凑，机动性强，可单人推动部署；适配最大料带宽度 500 mm，最大厚度：不锈钢 1 mm，铝合金 0.75 mm，铜合金 0.5 mm。

适用于 3C 电子、汽车制造、家电等行业宽厚金属料带的精密加工。

海目星激光，www.hymson.com

芯光光电
HCW激光焊接清洗一体机

浪潮集团旗下山东芯光光电科技有限公司联合浪潮云洲隆重推出新一代模块化激光智能装备——HCW 激光焊接清洗一体机，采用专业焊接枪头与专业清洗枪头可直接相互更换的创新设计，清洗宽度最大范围由 120 mm 提升至 300 mm，在进行大面积工件清洗时，无需多次重复作业，极大减少清洗时间，提高整体工作效率。

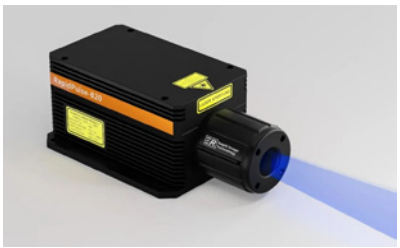


该设备搭载了芯光光电与浪潮云洲协同合作开发的操作系统和云端监控系统，操作系统能够完美适配设备硬件，确保设备运行的稳定性和流畅性，有效减少了因系统兼容问题导致的故障；云端监控系统支持实时数据上传，用户可通过云端平台，实时远程查看设备的运行状态、作业数据等信息。一旦设备出现异常，云端监控系统会及时发出预警，便于相关人员快速响应并进行维护，减少了设备停机时间，保障了生产的连续性。

芯光光电，www.hwleic.net

RapidImage
第二代蓝光激光器与片光源

RapidImage 公司推出全新设计的第二代蓝光激光器与片光源，通过与全新片光源的联合设计，不仅大幅缩减了机身尺寸，更优化了产品的光学与电学性能。



在外观设计与操作体验上，新机型采用先进散热结构，确保在室温条件下，可连续工作 20 min 以上而毫无过热迹象。在最舒适的旋转角度范围内，实现片光聚焦从最近 100 mm 至无穷远的连续可调。新片光不仅提升了输出孔径，还增强了能量分布的均匀性以及聚焦调节范围。在电学性能方面，进一步提高了电流的打开及关闭斜率，并优化了长脉宽下的峰值功率稳定性，从而显著提升了整体发光效率。在电子散热设计上，新产品优化了散热逻辑，结合精准的电流控制，大幅提高了整机的可用占空比，进而增强了在低速测量时的单脉冲能量。另外，相较于高斯分布的激光光束，大幅提升了可用片光面积。

适用于新能源汽车、3C 电子等制造行业。

RapidImage，www.rapidimage.com.cn

邦德激光
Eco系列自冷却手持激光焊

邦德激光推出全新 Eco 系列自冷却手持激光焊，凭借“真正足熔深”实现真正的焊接高品质，可以解决以下痛点与市场难题：焊接质量不稳定，高温下性能衰减，返工率高；设备功能单一，购机成本高；焊接操作复杂，培养熟练工人成本高；高端激光焊接设备价格昂贵，小微客户难以承受；售后服务响应慢，影响生产进度。



适用于市面绝大多数的焊接类应用场景。

邦德激光，www.bodor.cn

Advertiser	广告客户	网址	页码
ACS Motion Control (China)		https://acsmotioncontrol.cn/	3
Edmund Optics China	爱特蒙特光学 (深圳) 有限公司	www.edmundoptics.cn/095-8619	13
Newport Corp		www.newport.com.cn	7, 17, 21, 27
Ophir Optronics Ltd.		www.ophiropt.com	29
第五届航空航天增材制造大会			IBC
2025 大湾区工业博览会/DMP第二十六届国际模具及金属加工、橡塑及包装展		www.dmpsz.com	1
2025 厦门国际半导体及集成电路博览会		http://xm.sicexpo.net/	IFC

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

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

第五届航空航天增材制造大会

Aerospace Additive Manufacturing Conference

2025年10月23-24日　　上海

组织架构

联合主办：中国航天科技集团商业火箭有限公司
中国航发商用航空发动机有限责任公司
中国航天科技集团增材制造工艺技术中心
中国航天科工集团有限公司增材制造工艺中心
中国航空制造技术研究院
中国航发增材制造技术创新中心
中国商飞增材制造技术应用研究中心
中国兵器装备集团增材制造研究应用中心
上海航天设备制造总厂有限公司
上海航天精密机械研究所
上海市增材制造协会

协办单位：《中国航天》编辑部
《航天制造技术》编辑部
上海市宇航学会
《上海航天（中英文）》杂志
上海复杂金属构件增材制造工程技术研究中心
航天八院增材制造技术中心
上海市增材制造制造业创新中心
上海市3D打印产业联盟
长三角增材制造产业联盟
四川省增材制造技术协会
长三角钢铁产业发展协会

承办单位：上海市增材制造协会航空航天专业委员会
上海翱蒲商务咨询有限公司

大会学术支持期刊

本次大会学术支持期刊包括:《激光世界》、《中国航天》、《军民两用技术与产品》、《航天制造技术》、《上海航天(中英文)》、《中国空间科学技术(中英文)》、《航空材料学报》、《航空精密制造技术》、《热加工工艺》、《机械工程材料》、《金属加工(热加工)》、《航空工程进展》、《Journal of AdvancedManufacturing Science and Technology》,《Materials Sciencein Additive Manufacturing》,《Advanced Materi-als & Sustain-able Manufacturing》。

报名注册通道

大会官方公众号

联系人:章老师
135 0190 2160

往届部分议题

※ 激光粉末熔融与超快激光冲击复合一锻打印
※ 航空航天多功能结构极限轻量化设计制造技术
※ 电子束-激光复合增材制造
※ 镁合金构件在航天领域应用及增材制造技术
※ 航空发动机增材制造应用进展与需求
※ 航空金属粉末床激光增材制造技术
※ 耐热高强铝合金增材制造技术
※ 增材制造在航天结构设计中的应用探索
※ 激光微增材制造在立体电路领域的应用
※ 连续纤维增强复合材料增材制造技术
※ 增材制造技术在航空航天行业应用的瓶颈与展望
※ 基于增材制造的轻质点阵结构力学行为分析及优化设计技术
※ 高性能大型航天复杂构件的多激光增材制造形性调控技术
※ 搅拌摩擦固相增材技术突破与装备研发进展
※ 太空制造技术
※ 高效热控结构一体化设计与先进制造
※ 航天器结构轻量化设计及其增材制造
※ 增材制造技术在空间推进领域的应用
※ 异质金属材料增材制造技术
※ 几何驱动的结构优化设计方法及应用
※ 4D打印技术在固体动力领域的应用展望
※ 增材制造TC4合金抗疲劳设计与制备
※ 光固化增材制精细陶瓷的力、热、电、光学性能及其应用
※ 航空装备智能增材备件保障与敏捷抢修
※ 结构拓扑优化的一些思考与实践
※ 3D/4D打印及可变体飞行器新进展
※ 金属3D打印的应用和认证
※ 航空航天增材产品鉴定与认证工作难点及应对思路
※ 增材制造技术在大型民用飞机上的应用现状与前景
※ 航空发动机热端部件对3D打印的需求与挑战
※ 增材制造技术在运载火箭中的应用
※ 增材制造技术在航天液体动力领域的研究与应用
※ 面向空间应用的4D打印技术
※ 基于产品链条的激光增材制造及典型应用
※ 电弧增材航天复杂大型铝合金构件技术
※ 面向新一代航空航天产业的先进陶瓷增材制造
※ 多功能融合复合材料结构创新设计与增材制造
※ 金属增材制造技术在飞航装备领域的应用及展望
※ 航天大型复杂金属构件增材制造及在线监测技术
※ 我国空间飞行器结构增材制造技术及应用发展动态
※ 发展大型高效激光金属熔化装备助推我国航天航空制造发展
※ 高端复杂构件微铸锻铣合一超短流程绿色制造技术与装备
※ 连续碳纤维增强热塑性复合材料3D打印技术
※ 数据驱动下增材制造用航空航天金属材料的高通量设计与制备
※ 航空材料增材制造研究进展
※ 基于不规则3D表面的直写增材技术及航空航天应用
※ 增材制造高性能合金材料研发与应用
※ 航空级增材制造专用材料及制备工艺
※ 高性能聚合物直接增材制造技术与航空航天领域应用探讨
※ 基于相图计算的高性能增材制造合金设计与制备

VisionCon 2025
视觉系统设计技术会议

慧眼赋能 提质增效

当前制造业正经历着向高端智能化的转型升级，同时面临着行业内卷加剧、经济大环境持续不振以及出海谋生的憧憬与挑战等多重现实问题。在此处境下，企业纷纷寻求部署各种高科技工具来降本增效，提升自身竞争实力。面对半导体、光伏、汽车、电子制造等众多行业在当前复杂多变的市场环境下的发展诉求，机器视觉技术作为帮助企业实现先进智能制造、改善工艺、提升产品质量的一种关键工具，从图像的采集、处理到传输，始终不曾停止创新的步伐，不断推陈出新，为工业自动化的发展不断赋能，帮助企业在创新的道路上一路向前，实现提质增效。

雅时国际商讯将于 2025 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，针对机器视觉细分领域应用，推出两场网络研讨会，继续为机器视觉厂商和行业用户搭建现场面对面交流互动的平台！

合肥 2月27日
泛半导体

武汉 4月17日
光电子
新能源
高端装备制造

苏州 5月21-22日
3C电子制造
集成电路
光器件
人工智能

深圳 7月23日
3C电子制造
PCB
高端装备制造
人工智能

webinar 9月 专题会议
半导体制造

上海 9月16日
泛半导体

成都 10月
先进制造
集成电路
工业机器人

西安 11月
电子制造
电子元件
汽车
光伏

厦门 12月
泛半导体
新型显示

webinar 2026年1月 专题会议
3C电子

主办单位 ACT INTERNATIONAL

大会媒体 视觉系统设计 VisionSystems China DESIGN

会议咨询

扫码预登记