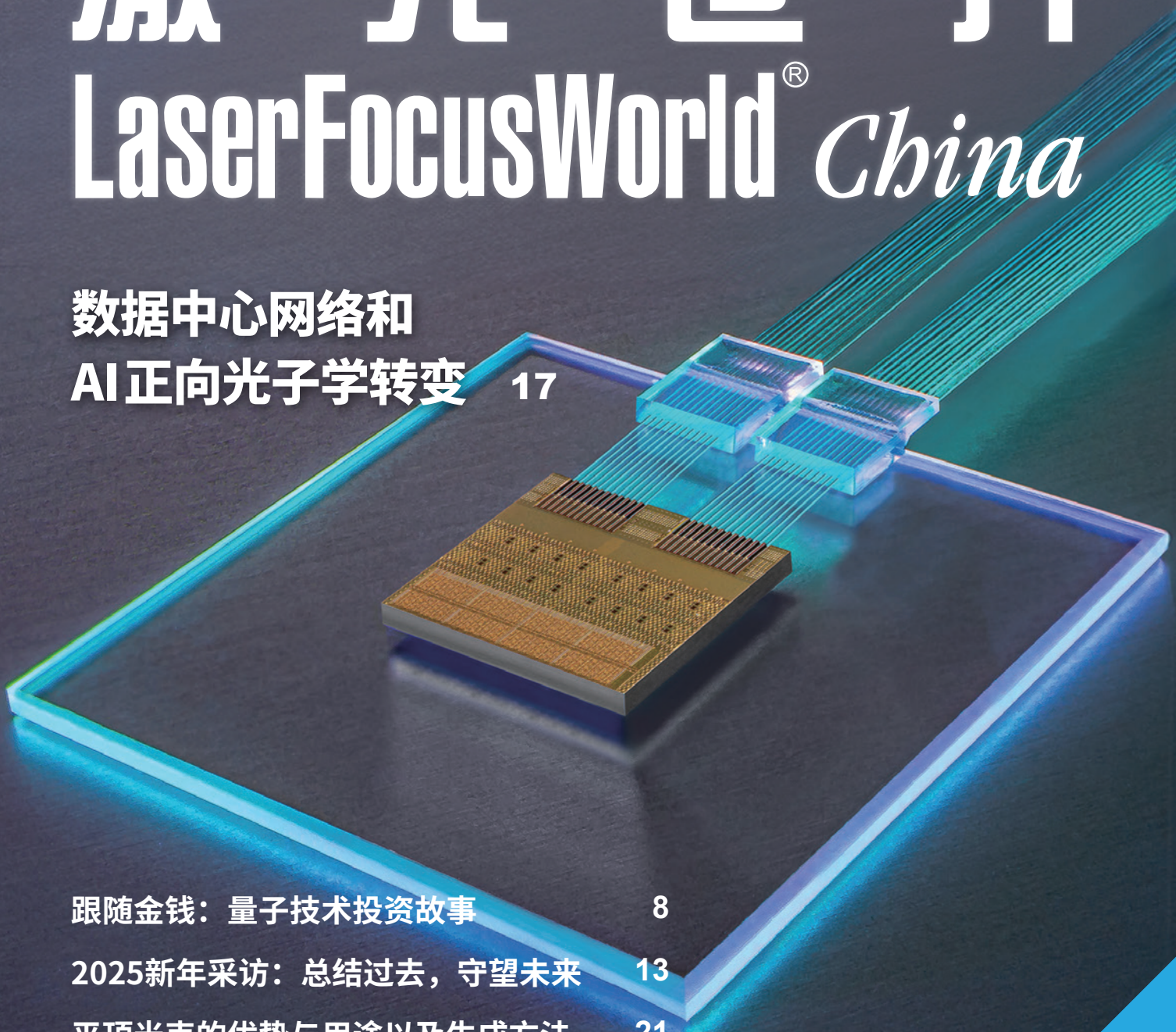
光学和光电子产业的主导刊物 www.laserfocusworld.com.cn 2025年1/2月 第1期
ISSN: 1817-6917

激光世界

LaserFocusWorld® China

数据中心网络和AI正向光子学转变 17



跟随金钱：量子技术投资故事 8
2025新年采访：总结过去，守望未来 13
平顶光束的优势与用途以及生成方法 21
激光在半导体领域的应用与发展 25
纳秒脉冲红外激光用于高质量玻璃加工 28

扫码浏览更多期刊

ACT INTERNATIONAL
ENDEAVOR BUSINESS MEDIA



SCIIF 华南国际工业博览会

LFSZ LASERFAIR SHENZHEN

第十八届深圳国际激光与智能装备、光子技术博览会
LASERFAIR SHENZHEN 2025

2025年6月4～6日
June 4-6, 2025
深圳国际会展中心（宝安新馆）
Shenzhen World Exhibition and Convention Center(New venue in Bao'an)

www.laserfair.cn

光联万物
激荡未来

2025

扫码关注
LASERFAIR深圳激光展
更多详情等您来了解
www.laserfair.cn

Deutsche Messe · FIERA MILANO · XZQ

Deutsche Messe · FIERA MILANO

主办单位：
广东省激光行业协会
Guangdong Laser Industry Association

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

赋能智造 · 光耀未来
Intelligent Laser Manufacturing to Light Up the Future

LMN 2025
世界激光制造大会
LMN World Laser Manufacturing Conference

中国·深圳
深圳国际会展中心（宝安新馆）

2025年6月2-4日

与国际大咖共话世界前沿激光技术

扫码关注
LMN 世界激光制造大会
更多详情等您来了解
www.world-laserconference.com

电话：0755-23207500
E-mail: xin.zeng@hmxzq.com

电话：021-20557021
E-mail: joyce.wang@hmf-china.com

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

8 量子技术



跟随金钱：有关量子技术投资的那些故事

三条脉络、三组数据以及两种相互矛盾的叙述。通过量子技术领域的融资故事，解读量子市场的发展趋势。

11 光芯片



人工智能需求为光芯片提供巨大潜在市场

得益于AI的发展，光学技术正在数据中心、汽车激光雷达、医疗以及先进视觉应用等领域不断拓展其影响力范围。

访谈

13 2025新年采访：总结过去，守望未来



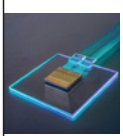
罗悉激光：亦舒亦急，可湍可缓

Amplitude：2024业绩稳健增长，工业飞秒加工表现亮眼

德擎光学：2024业绩增长40%，继续开拓高端熔深监控市场

技术中心

17 集成光子学



数据中心网络和人工智能正在向光子学转变

未来在AI基础设施等任何需要更大通道、更低能耗、更快传输数据的地方，都将为光I/O带来应用商机。

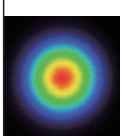
19 激光二极管



激光二极管将在聚变能发展中发挥重要作用

不断增长的能源需求及全球变暖，为清洁聚变能源创造了独特机会。是时候为激光驱动的惯性约束聚变能源制定发展路线图了。

21 光束整形



平顶光束的优势与用途以及生成方法

与高斯光束相比，平顶光束具有许多与应用相关的优势，在此可以了解如何根据需要生成平顶光束。

23 量子计算



光子学突破有望大幅缩小量子计算器件的尺寸

仅微米厚的$NbOCl_2$晶体材料，能高效产生可作为量子比特的纠缠光子对，大幅缩小量子计算器件的尺寸。

工业应用专栏

25 半导体应用



激光技术在半导体领域的应用与发展

激光技术在晶圆隐形切割、TGV通孔加工和Mirco LED芯片剥离等半导体相关应用中，拥有显著加工优势和巨大应用前景。

28 玻璃加工



纳秒脉冲红外激光用于高质量玻璃加工

高单脉冲能量和高峰值功率的纳秒脉冲红外光纤激光器，是玻璃钻孔和玻璃磨砂处理的理想加工工具。

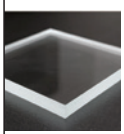
31 增材制造



应用高速相机优化粉末床激光熔融工艺

高分辨率的高速相机，能精准监测粉末床激光熔融工艺过程中的熔池变化，反映零件构建过程中参数变化的影响。

33 玻璃加工



飞秒激光脉冲串实现玻璃的高速高质量加工

可灵活配置的飞秒激光脉冲串（MHz、GHz以及MHz+GHz组合）加工模式，实现玻璃的高质量、高速度加工。

4 编者的话

5 前沿简讯

38 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

MARKET WATCH

8 Quantum



Follow the Money: Stories of Quantum Tech Investment

Three threads, three data sets, and two contradicting narratives that interpret the development trends of the quantum market through investment stories in the field of quantum tech.

11 Optical Chips



AI needs provide a huge potential market for optical chips

Thanks to artificial intelligence (AI) growth, optics is expanding its footprint within data centers, automotive LiDAR, medical, and advanced vision applications.

INTERVIEWS

13 **2025 New Year Interview: Summarize the Past, Anticipate the Future**



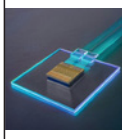
Luxinar: Be Water, My Friend!

Amplitude: Performance Grows Steady with Remarkable Achievements in Industrial Femtosecond Processing

DILIGINE: Performance Increased by 40% in 2024 and Continues to Explore High-end Weld Penetration Monitoring Markets

TECHNOLOGIES CENTER

17 Integrated Photonics



A Shift to Photonics for Data Center Networks and AI Is Underway

Anywhere such as AI infrastructure that can benefit from moving data faster with a bigger pipe for lower energy, will implement optical I/O in the future.

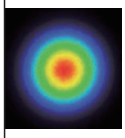
19 Laser Diode



Laser Diodes Will Play an Important Role in The Development of Fusion Energy

Growing energy demand coupled with global warming creates a unique opportunity for clean fusion energy. Now is the time to develop a realistic roadmap for laser-driven inertial confinement fusion energy.

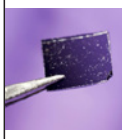
21 Beam Shaping



Flat-top Laser Beams: Their Uses and Benefits and How Best to Generate

Flat-top beams have many application-dependent advantages over Gaussian beams; learn how best to generate a flat-top beam for your needs.

23 Quantum Computing



Photonics Breakthrough Can Drastically Shrink Quantum Computing Parts

$NbOCl_2$ crystalline material with micrometers thickness can efficiently create entangled pairs of photons to be used as quantum bits, drastically shrink quantum computing parts.

INDUSTRIAL APPLICATIONS COLUMN

25 Semiconductor Applications



Applications and Developments of Laser Technology in the Field of Semiconductor

In semiconductor-related applications such as wafer stealth dicing, TGV via processing, and Mirco LED chip stripping, laser technology has significant processing advantages and great application prospects.

28 Glass Processing



Glass Machining Technology with a Nanosecond-pulsed Infrared Laser

The nanosecond-pulsed infrared fiber laser with high single-pulse energy and high peak power is an ideal processing tool for glass drilling and glass sanding treatment.

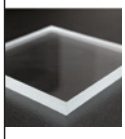
31 Additive Manufacturing



Optimizing the Powder-bed Laser Melting Process with a High-speed Camera

The high resolution and high-speed camera can accurately monitor the changes in the molten pool during the powder-bed laser melting process, reflecting the impact of parameter changes during the part-building process.

33 Glass Processing



High-speed and High-quality Glass Processing with Femtosecond Laser Pulse Modes

The flexibly configurable processing modes of femtosecond laser pulse modes (MHz, GHz, and MHz + GHz combinations) enable high-quality and high-speed glass processing.

4 EDITOR'S NOTES
5 LEADING EDGE SNAPSHOTS
38 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.

寻求新的市场增长点

些放眼未来的企业开始布局一些前瞻性领域，比如量子技术和清洁的核聚变能源等，激光技术在这些前瞻性领域也将发挥至关重要的作用。

量子技术被认为是未来几十年内最具前途的科学领域之一，量子计算、量子通信和量子精密测量是量子技术的三大潜在应用领域，未来它们将大幅提升计算能力、通信的安全性以及测量的精密度，这些功能的实现都少不了激光技术的支持。资本对市场的嗅觉最为灵敏，量子技术市场自然吸引了众多资本的投资和密切关注。当然，通过资本投资的趋势走向，也能从中窥探出量子技术的一些发展动态（p8），总体来看，目前的投资行为更加谨慎，资本更多地锚定具有核心价值的点，在量子硬件和中层解决方案领域加倍投资。

单从量子计算市场来看，政策支持、资本涌入、行业应用需求和技术进步，共同驱动了量子计算市场的蓬勃发展。据市场调研机构 Omdia 预测，量子计算供应商的全球收入，将有望从 2023 年的 11 亿美元增至 2033 年的 282 亿美元，十年间的复合年均增长率高达 37.7%。在技术进展方面，新加坡理工大学的研究团队利用一种微米厚的更薄的晶体材料，将量子计算部件的尺寸缩小了 1000 倍，使量子设备更加简单紧凑。

人工智能（AI）技术的迅猛发展，也为光学技术提供了新的应用市场。AI 模型训练需要的超级算力，使得光芯片成为克服传统电子计算的一种替代方案，在计算速度、能耗和带宽方面都有更好的表现（p11）。未来，AI 系统架构中 GPU 和 CPU 芯片之间的高带宽数据传输，将转向光子技术，任何需要更大通道、更低能耗、更快传输数据的地方，都少不了光 I/O 的支持（p17）。

玻璃加工是激光应用的一个潜在增长市场，具体加工包括玻璃的切割、钻孔、磨砂、内雕等等。具备高单脉冲能量、高峰值功率的纳秒脉冲红外光纤激光器，在玻璃钻孔和砂处理方面都获得了令人满意的加工效果（p28）；另外，通过灵活配置飞秒激光脉冲串的加工模式，在玻璃切割、钻孔、选择性蚀刻、钻高深宽比的通孔（TGV）等方面，都获得了较高的加工质量和加工速度（p33）。

本期还包括了激光二极管在实现清洁聚变能源中的作用（p19）、平顶光束的优势和适用场景（p21）、激光技术在晶圆隐形切割、TGV 通孔加工和 Mirco LED 芯片剥离等半导体相关领域的应用（p25），以及利用高速相机监测来优化粉末床激光熔融工艺（p31）等内容，供读者参考。

另外，本刊还采访了三位资深的激光从业者，请他们分享了对当前激光行业发展的一些建议和市场增长点（p13）。最后，祝愿大家在新的一年都找到新的业绩增长点，赢得开门红！❑

本刊编辑部

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

前沿简讯 Leading Edge Snapshots

780nm 宽条 DFB 激光器功率突破 10W

长光华芯 CTO、四川大学王俊教授研究团队开发的一款基于 InGaAsP/InGaP 材料的 780nm 宽条分布反馈（DFB）激光器，室温连续输出功率超过 10W，谱线宽度（FWHM）小于 0.5nm，可以在宽电流和宽温度范围内有效工作。

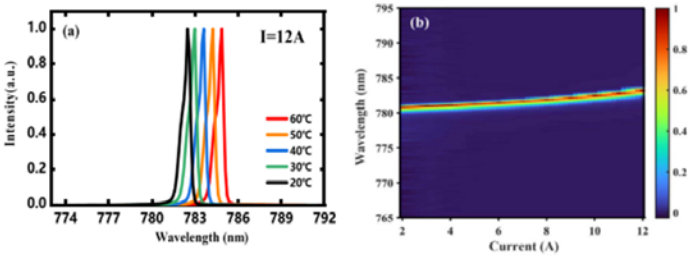


图1：（a）温度范围20~60℃，12A电流时DFB激光器的光谱特性；（b）连续变电流下DFB激光器在20℃时的光谱图，强度用假色图表示。

研究团队基于耦合模理论（CMT）构建光栅分析模型，通过调整光栅耦合强度（κL 控制在 0.4-0.6 之间）和光栅与量子阱的相对位置，提高功率和效率。较远的光栅位置显著降低了光损耗和载流子复合的影响，确保较高的输出功率和低电压。

光栅区域采用低损耗、低应力的三层 InGaP/InGaAsP/InGaP 结构，避免传统材料中因应力导致的光栅吸收和缺陷问题。优化的二次外延工艺进一步减少了界面氧污染，使氧含量降至 1E16 数量级，大幅提升器件的效率和可靠性。

研究人员在 12A 电流和 20℃温控下进行性能测试，激光器实现了连续输出功率超过 10W，FWHM 小于 0.5nm。这一功率水平创下了 780nm 波段 DFB 激光器的最高纪录，同时在宽电流与温度范围内保持了良好的锁波特性。❑

上海光机所在掺钕钪酸钆激光晶体研究方面获新进展

中国科学院上海光学精密机械研究所先进激光与光电功能材料部激光晶体研究中心杭寅研究员团队，在掺钕钪酸钆（$Nd:GdScO_3$）激光晶体研究方面取得进展。

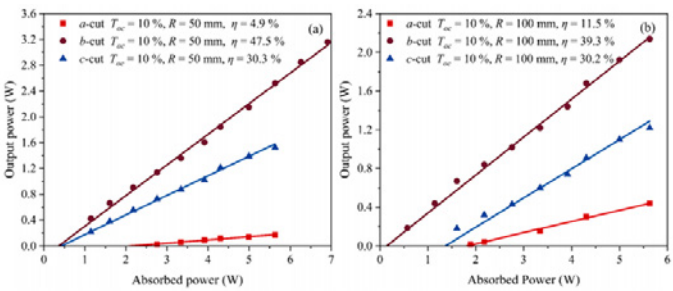


图1：$Nd:GdScO_3$晶体连续激光输出。

$Nd:GdScO_3$ 晶体属于正交晶系，具有声子能量小、对结构畸变耐受性高、可直接产生偏振激光输出等特点，是一种新型激光晶体。然而，该晶体熔点较高（>2100℃），不易获得大尺寸，限制了其研究与应用。

研究团队采用提拉法成功生长出 $Nd:GdScO_3$ 晶体，系统地对晶体的结构、热学、光谱和激光性能进行了研究。$Nd:GdScO_3$ 晶体在 806.5nm 处的吸收截面为 $4.67\times10^{-20}cm^2$，在 ~1.08μm 处的发射截面为 $9.405\times10^{-20}cm^2$，相应的荧光寿命为 147.4μs。通过 JO 光谱理论计算晶体的辐射寿命为 187.36μs，发光量子效率为 78.7%。报道了 $Nd:GdScO_3$ 晶体的激光性能，当晶体吸收 6.91W 的泵浦功率时，获得了 3.16W 连续激光输出，斜效率 47.5%，激光波长为 1085.4nm。

研究结果表明 $Nd:GdScO_3$ 晶体是一种性能优良的激光晶体材料，有望应用于激光加工、激光焊接、激光医疗等领域。❑

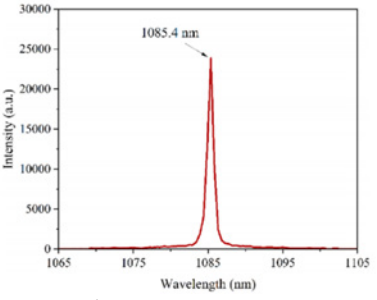


图2：激光光谱。

飞秒激光塑造证卡专属“指纹”，西电石理平团队获防伪技术新突破

近日，杭州研究院先进视觉研究所石理平教授团队与上海冠众光学科技有限公司合作，提出了一种基于飞秒激光诱导的物理不可克隆纳米纹理，并将其应用于高安全等级身份证卡防伪。研究成果以《Femtosecond laser-induced recrystallized nanotexturing for identity document security with physical unclonable functions》为题，在国际顶尖期刊《Advanced Science》上发表。本研究结合飞秒激光与人工智能的双重技术优势，为下一代国家级身份证卡安全提供有力防伪屏障，进一步推动飞秒激光技术在身份安全领域的发展。

当前，伪造身份证、护照等高价值身份识别证件，成为个人信息安全乃至国家安全面临的严峻挑战。为应对这一风险，传统的防伪技术构建起了复杂的“制证工艺长城”，意在打造工艺壁垒，提高仿造的技术难度和成本。然而，这一方法存在一个致命缺陷：证件本身没有独一无二的物理防伪标识，缺少“证卡载体”与“识别个人”之间的唯一性绑定防伪元素。一旦关键工艺被破解，证件即可轻松复制，带来难以估量的风险。

针对防伪领域的这一问题，物理不可克隆（PUF，Physical Unclonable Function）技术出现，成为极具潜力的解决方案。这项技术能够为每个证卡打造专属的“生物指纹”，在物理层面上实现了真正的不可复制性。但是，目前大部分 PUF 标签仍通过缓慢的化学合成实现，存在性质不稳定、制造效率低等问题，难以进行大规模批量生产。

为解决影响 PUF 实际应用中的瓶颈问题，石理平教授研究团队创新利用飞秒激光技术，在硅与金属多层纳米膜前驱体上激发表面等离子体波的干涉效应，生成独特的 PUF 纳米纹理。该纳米纹理在飞秒激光照射的 0.1s 内即可形成，无需依赖缓慢化学反应过程，也不使用有毒有害原料，微观防伪图案得以高质量、快速打印，显著提升生产效率。



图2：具有PUF防伪图案的模拟身份证卡。

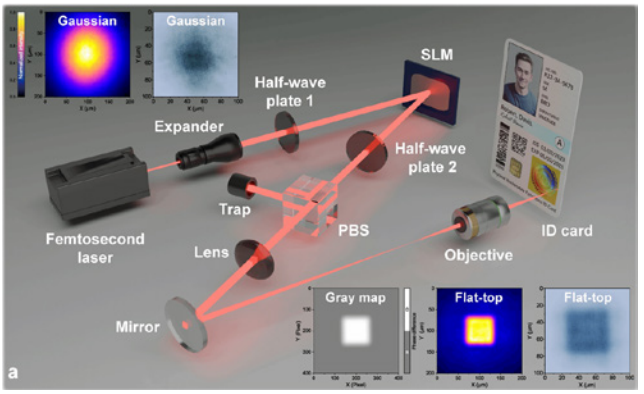


图1：飞秒光场空间整形打印。

此外，飞秒激光“冷加工”的特性，使其能够兼容常用的聚合物证卡材料。考虑到身份证卡的使用场景及用户心理，PUF 纳米纹理的防伪图案在宏观上呈现可变结构色，兼顾高安全等级防伪特性的同时，也提高了证卡防伪元素的美观性。

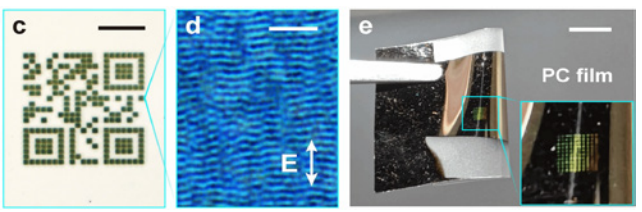


图3：（c）PUF微型二维码；（d）PUF随机纳米纹理；（e）具有阵列防伪标记的聚碳酸脂薄膜。

相关研究还表明，这种 PUF 纳米纹理在飞秒激光作用下，硅的晶态从非晶态转变到多晶态，并在纹理表面形成氧化层保护膜，极大地增强了其防复制性。这一独特的飞秒激光诱导重结晶 PUF 纳米纹理具备生物指纹般的独特性，在光学显微镜、扫描电镜和原子力显微镜等检测设备下显示出极高的防伪特性，克服了传统浮雕结构 PUF 可能被扫描光刻或纳米压印复制的技术难题。

为使这项防伪技术在实际应用中更具便利性和普适性，研究团队进一步将轻量化神经网络 MobileViT 应用到 PUF 纳米纹理的识别认证，构建了身份证卡从生产制造到终端认证的完整防伪体系。❑



图4：微型防伪二维码的可变结构色。

拍瓦级激光技术有望大幅提升芯片制造效率

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）正在研发一种基于铥元素的拍瓦级激光技术，该技术有望取代当前极紫外光刻（EUV）工具中使用的 CO_2 激光器，并将光源效率提升约 10 倍。这一突破可能为新一代“超越 EUV”的光刻系统铺平道路，从而以更快的速度和更低的能耗制造芯片。

当前的 EUV 光刻系统，不仅体积庞大，而且能耗巨大，而且需要真空环境以避免 EUV 光被空气吸收。此外，EUV 工具中的先进反射镜只能反射部分 EUV 光，因此需要更强大的激光来提高产能。

LLNL 主导的“大口径铥激光”（BAT）技术旨在解决上述问题。与波长约为 10μm 的 CO_2 激光器不同，BAT 激光器的工作波长为 2μm，理论上能够提高锡滴与激光相互作用时的等离子体到 EUV 光的转换效率。此外，BAT 系统采用二极管泵浦固态技术，相较于气体 CO_2 激光器，具有更高的整体电效率和更好的热管理能力。

最初，LLNL 的研究团队计划将这种紧凑且高重复率的 BAT 激光器与 EUV 光源系统结合，测试其在



2μm 波长下与锡滴的相互作用效果。然而，将 BAT 技术应用于半导体生产仍需克服重大基础设施改造的挑战。当前的 EUV 系统经过数十年才得以成熟，因此 BAT 技术的实际应用可能需要较长时间。

行业分析公司 TechInsights 预测，到 2030 年，半导体制造厂的年耗电量将达到 54,000GW，超过新加坡或希腊的年用电量。如果下一代超数值孔径（Hyper-NA）EUV 光刻技术投入市场，能耗问题可能进一步加剧。因此，行业对更高效、更节能的 EUV 机器技术的需求将持续增长，而 LLNL 的 BAT 激光技术无疑为这一目标提供了新的可能性。❑

光学引领未来™
有激光光学元件定制需求吗?

激光光学元件
EDMUND 自主生产
• 镀膜、元件和组件
• 先进的计量
• 内部专家全程支持
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) 2967 5435 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/015-8611

量子技术

跟随金钱：有关量子技术投资的那些故事

三条脉络、三组数据以及两种相互矛盾的叙述。通过量子技术领域的融资故事，解读量子市场的发展趋势。

文/Michael Baczyk

在孤立的情况下，即使是最可靠的市场数据也可能传达出相互矛盾的情况。在量子技术领域尤其如此，在该领域，政府投入数十亿美元的巨额资金，而风险投资（VC）却保持谨慎态度；市场整合既可能意味着行业走向成熟，也可能预示着令人担忧的状况。全球量子情报（GQI）可以帮助理清这些线索，并将复杂的市场信号转化为可为战略决策所用的有效情报。

资金时间线：从NISQ淘金热潮到战略耐心期

纵观视 2020 年至 2024 年 11 月期间量子技术领域的资本投资模式（见图 1，不包括各国量子战略以及诸如欧洲创新委员会（EIC）、“欧洲地平线”计划（Horizon Europe）和美国国防高级研究计划局（DARPA）等重大政府项目），其数据呈现出一种耐人寻味的二分态势。我们追踪了 296 轮融资中总计 70.6 亿美元的总投资，投资图表显示出了显著的韧性，尽管整个科技市场处于下行态势，但 2024 年的投资总额仍有可能创下历史新高。

不过，这种表面上的强劲表现值得更深入的审视。PsiQuantum 公司为其澳大利亚工厂投入的 6.2 亿美元资金附带了特定的部署条件和时间安排——仅将这项投资单独

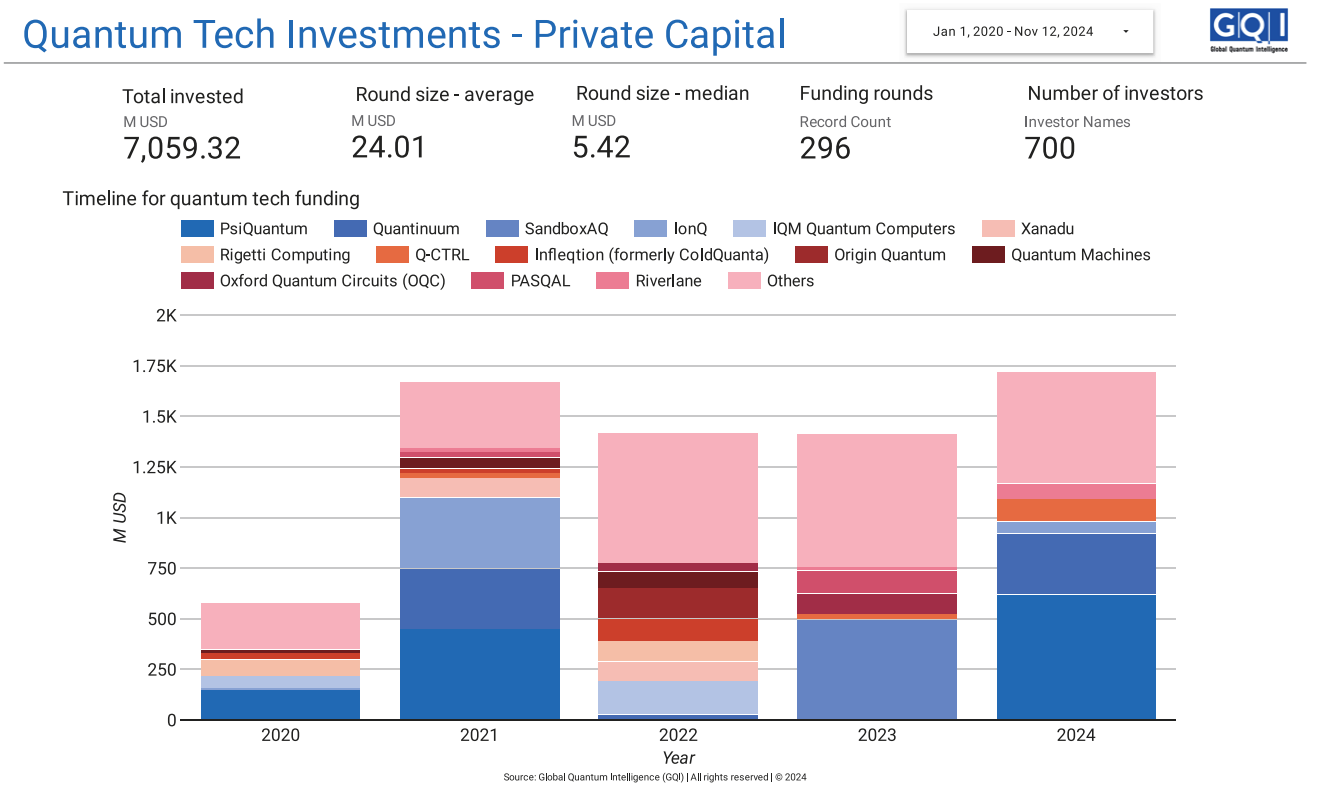


图1：量子技术投资时间表（2020-2024年）。296轮融资中总共70.6亿美元的投资，显示了主要量子参与者和较小交易的投资年度分布情况（不包括国家量子战略和政府计划）。

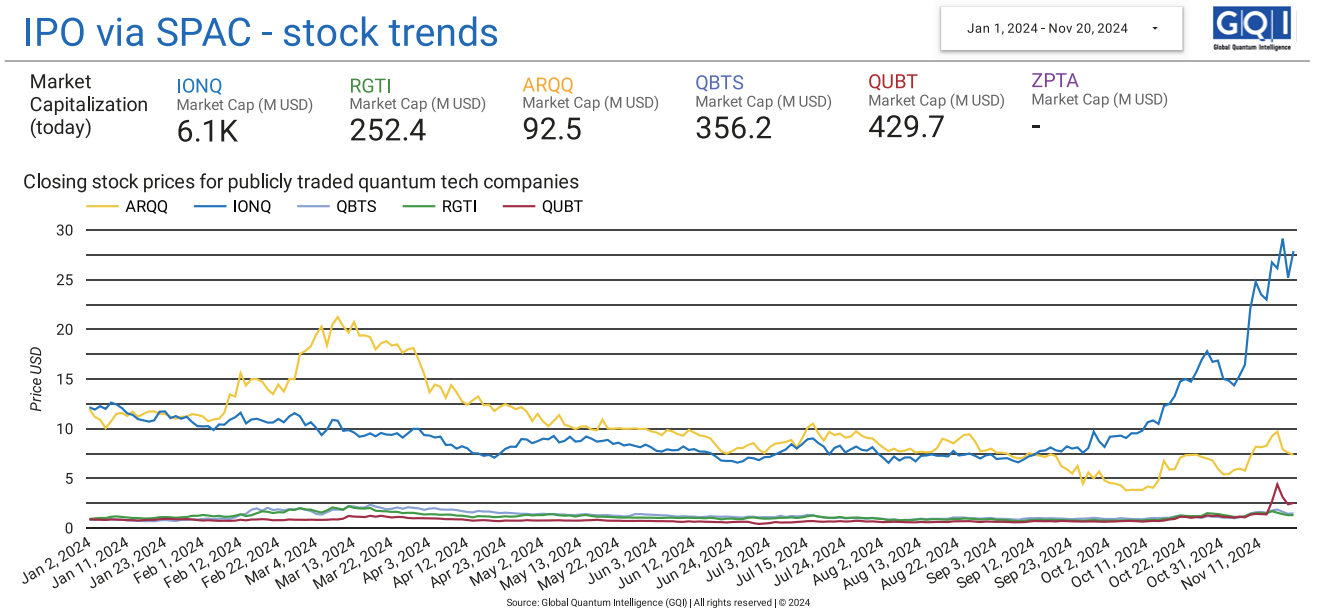


图2：2024年量子公司在公开市场的表现。通过特殊目的收购公司（SPAC）合并上市的量子技术公司的股价走势，展示了2024年1-11月的当前市值以及每日收盘价。

拎出来看，它会完全改变对 2024 年投资情况的看法。这一年的投资总额柱状图是由几笔大额投资构成的，而与前些年相比，小额投资以及多元化投资的占比明显缩水。

各轮融资需要更长的时间才能完成，但投资者正在他们认为具有核心价值的地方——量子硬件和中层解决方案领域加倍投资。2024 年的投资风格，开始从早前那种“广撒网碰运气”的做法转向重点押注；与此同时，量子传感及通信领域的投资水平保持稳定，而对纯软件类项目的兴趣则在下降。融资中，中等规模的投资金额为 542 万美元，平均金额为 2401 万美元，这一数据凸显了一种杠铃式策略——在持续支持早期创新的同时，集中押注于处于规模扩张阶段的领军企业。

自然选择：市场退出、并购以及行业巨头

量子技术行业正在经历其首轮自然选择，市场退出与战略整合之间形成了鲜明对比。据全球量子情报（GQI）追踪，通过特殊目的收购公司（SPAC）合并上市的量子公司，呈现出令人担忧的景象（见图 2）。

尽管量子计算行业波动性较高，但 IonQ 公司的股价仍保持相对稳定（市值 57 亿美元），而其他公司的股价却常常徘徊在 1 美元的退市门槛附近。Zapata 公司在 2024 年的关闭，是该行业首个备受瞩目的市场退出案例。

然而与此同时，该行业正在通过战略性并购呈现出明显的成熟迹象，IonQ 公司收购 Qubitekk、Kipu Quantum 收购 Anaqor、SandboxAQ 收购 Good Chemistry，这些都预示着市场整合的开始。

真正的行业发展势头在一些企业的制造规模扩大举措中体现得很明显：IQM 公司的法国制造工厂、Diraq 公司与格芯（GlobalFoundries）公司的合作、Quandela 公司的光子量子比特制造试点生产线、PsiQuantum 公司在澳大利亚和美国的公用事业规模设施计划，以及 Equal1 公司在加拿大的新中心，所有这些公司的扩产举措都显示出了量子行业蓬勃向前的发展势头。随着 57 套本地部署的量子计算机投入使用，总支出达 12.2 亿美元，该行业正果断地从科学探索阶段转向工程实施阶段。量子领域正进入其“跨越鸿沟”阶段——在这个阶段，通过市场表现和制造能力，而非仅凭技术承诺，能够更清晰地界定出赢家和输家。

价值链视角：2025-2035年，当资金遭遇市场现实

量子技术领域的市场动态，给那些常常出现在初创企业商业计划书里的万亿美元预期，提供了一次发人深省的现实检验。来自 GQI 的潜在总量子市场模型（QMM）预测（见图 3）显示，当下的价值获取正受到量子安全密码学转型的推动——这是一种基于担忧但切实存在的市场催化剂，该模型表明它将在未来 5-7 年占据主导地位，并在可实现的市场价值中占据最大份额。

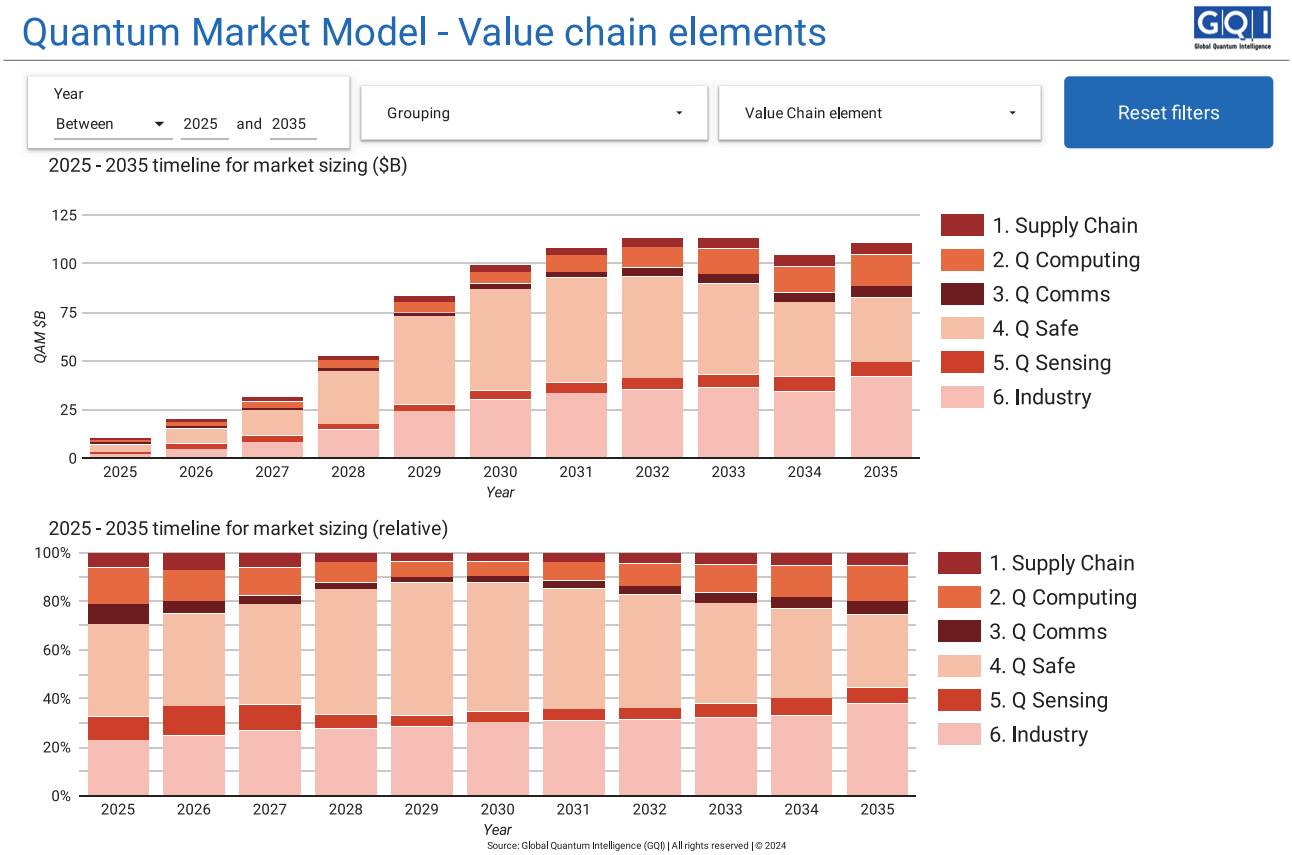


图3：GQI 2025-2035年量子市场模型价值链预测。GQI的量子市场模型（QMM）对量子技术价值链各细分领域的潜在市场总量（TAM）进行了剖析，并揭示了相对市场规模随时间推移发生的变化。

这种防御性支出造成了一个有意思的矛盾现象：尽管更广泛意义上的量子计算前景仍充满不确定性，但如今防范其威胁的紧迫性正在创造实实在在的收益。与此同时，从低温技术到光子学等量子使能技术，在 GQI 的预测中保持着 7% 的稳定市场份额，这表明无论最终哪种量子计算架构胜出，“掘金工具”式的业务依然具有韧性。

量子传感技术的目标是到 2027 年占据 10% 的市场份额，这为近期商业化提供了另一条途径。对投资者而言，关键的洞见不在于量子市场的绝对规模，而在于了解在不同时间段内自己可触及的那部分市场份额。我们的模型显示，量子计算在 2028 年的转折点将需要前期的基础设施投资，尤其是在能实现模块化架构的量子通信网络方面的投资。在量子技术领域取得成功，需要将企业自身的能力与特定的价值链机遇相匹配，而不是一味追逐引人瞩目的市场规模。

长远视角：公共资本与私人抱负的交汇

量子技术投资格局呈现出一种极具吸引力的反差研究——衡量成功的标准必须同时从多个角度来看待。私募市场的谨慎与技术发展势头之间明显的二分对立局面，或许可以通过战略性的公共资金投入来弥合，从历史经验来看，公共资金投入向来是新兴技术跨越“死亡谷”的关键推动因素。

虽然私人资本变得越来越有选择性和集中，这可以从杠铃投资策略和通过并购进行的市场整合中得到证明，但是量子行业的基本轨迹仍然强劲，这得益于 12.2 亿美元的量子计算内部部署和积极的制造规模扩大计划。

GQI 的市场模型显示，在各类量子技术领域，均存在着短期和长期的价值获取机会。出于对技术主权的担忧、安全影响以及其日益受到认可的双重用途潜力等因素的推动，量子技术在各国议程中的地位不断提升，这进一步强化了它的战略重要性。

驾驭这一复杂局面的关键在于，要明白公共资金投入并非只是权宜之计，它是一种至关重要的催化剂，能够将当下的技术愿景转化为未来的市场现实，同时保障国家的战略利益。❑

光芯片

人工智能需求为光芯片提供巨大潜在市场

得益于AI的发展，光学技术正在数据中心、汽车激光雷达、医疗以及先进视觉应用等领域不断拓展其影响力范围。

文/Todd Haugen，Enablence Technologies公司CEO

成熟的光学制造能力的积累、摩尔定律遭遇瓶颈、人工智能（AI）的迅猛发展以及真正的光学计算能力的发展，所有这些因素共同促成了整个光学产业新一轮的增长浪潮。

如今，随着领先的芯片制造商推出 4nm 制程技术，电子行业已经达到了电子技术进步的操作极限。展望未来，该行业将会越来越多地转向光学领域，以寻求在吞吐量方面继续取得进展并解决延迟问题。

AI 光学技术的变革性作用，为以下三个关键光学细分领域的增长带来了巨大驱动力：

光通信领域。光通信通常涉及光纤（互联网、电信），而且该市场正趋于成熟。但该市场仍在增长，并且在未来几年里，AI 将继续助力其增长。

光传感领域。这一细分领域聚焦于将光学技术应用于传感技术。光学最初是为通信而研发的，但在 20 世纪 80 年代和 90 年代扩展到了包括医疗设备、汽车激光雷达（LiDAR）以及制造业等传感应用领域。该市场已经显著增长，尤其是在过去几年里，因为数字化转型和 AI 加速了其应用。

光计算领域。这是一个迅速崛起的领域，21 世纪初的研究揭示了光学突破摩尔定律极限的潜力。由于电子电路面临物理极限，光计算通过实现更快、更高效的处理提供了一种潜在解决方案。英伟达（NVIDIA）和 AMD 等公司正在大力投资光计算研发，尤其是针对 AI 应用领域。

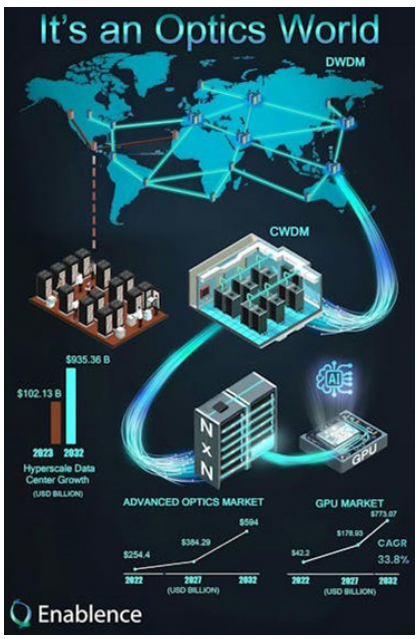


图1：AI正在推动用于数据中心的光学市场的增长。

光芯片的前景

光芯片在计算及其他功能方面的应用前景，正逐渐成为克服传统电子技术局限的一种可行技术解决方案。例如，光学器件在速度、能耗和带宽方面表现优异，且产生的热量极少。光学处理器在室温下就能高效运行，这就最大限度地减少了使用传统中央处理器（CPU）和图形处理器（GPU）的数据中心对专用冷却系统的需求。

随着传统半导体技术（电子芯片）达到极限，特别是随着 4 nm 晶体管的推出，凭借其在速度、能效和带宽方面的优势，光学技术正日益受到关注。随着对 AI 需求的激增，尤其是对大型语言模型（LLM）和其他 AI 应用的需求增长，人们对光学技术的关注会继续增强，并将推动光通信和光计算细分领域的重大发展。

AI在四个关键领域需要光学技术

整体网络容量方面。训练 AI 模型将需要大量的数据和计算能力，这会增加对高带宽、低延迟光网络的需求。

高带宽、低延迟连接方面。用于 AI 计算的数据中心（如大型 GPU 集群）需要高速、低延迟的互连。这推动了共封装光学（CPO）和先进的 N×N 路由器的发展。

机箱内 AI 计算方面。Enablence、Lightmatter、Lumentum 等公司正在将光学技术直接集成到 AI 计算硬件中，以提高吞吐量，同时降低功耗和减少热量产生。这一趋势将会持续下去。

先进视觉系统方面。随着 AI 的成熟，AI 光学技术对于先进视觉系统（如用于自动驾驶汽车、无人机、机器人以及医学成像的激光雷达）的重要性日益凸显，并且将推动这些市场的发展。AI 已经在汽车激光雷达、航空航天、国防以及医疗等行业加速了这些先进视觉系统的应用。光学技术正在助力提升诸如疾病诊断、实现自动驾驶汽车以及推动机器人和无人机发展等方面的能力。

三个关键光学平台

为了把握 AI 领域的这些机遇，需要依赖三个主要的光学平台：平面光波导（planar lightwave circuits，PLC）、氮化硅（SiN）以及硅光子学（SiPH）（见表 1）。

表1：三个关键光学平台

Characteristic	Planar lightwave circuits (PLCs)	Silicon nitride (SiN)	Silicon photonics (SiPH)
材料	二氧化硅 SiO_2	氮化硅 Silicon Nitride	硅 Si
成本	低	中-高	高
成熟度	高	发展中	新兴
速度	中等	高 (在一定限度内)	高 (采用有源电光开关)
功率处理能力	非常高	中等	低
能源效率	高	中等	中等-低
尺寸	大	中	小

平面光波导（PLC）：这是一种经过验证且具有成本效益的技术，在功率处理和能效方面有着显著优势。

氮化硅（SiN）：这是一种处于发展中的技术，成本适中到较高。

硅光子学（SiPH）：这是一个新兴平台，特别适用于高速和低延迟应用，但成本较高。

混合光学平台助力发展

没有一种平台策略会占据主导地位，因为每种平台都根据应用和需求有着特定的优势。采用混合式方法对于满足客户和行业需求来说非常必要。

Enablence Technologies 公司将继续专注于利用经过市场验证的平面光波导（PLC）技术制造光学元件，以提供高功率处理、低损耗的器件，这些器件能高效利用空间，尤其适用于 AI 数据中心内的互连以及电信领域。

增长是市场和投资

为了充分利用光学技术的能力，该行业需要继续在研发方面进行大量投资。预计在接下来的五年中，该行业将会经历一场大规模变革，这主要是由 AI、摩尔定律的局限以及光计算技术的进步所推动的。

光学技术正处在向半导体领域大举扩张的边缘，这主要得益于 AI 的进步以及传统电子技术日益凸显的局限性。近期的情况表明，传统电子技术遭遇了物理方面的极限，这制约了创新，尤其是在 AI 领域的创新。

但光学技术能够克服这些限制——它能以 1% 的功耗和热量产生实现 10 倍的内存和网络吞吐量。精密传感模块能够提供其他媒介无法提供的额外维度的数据。这些优势正在推动所有光学细分领域的快速增长，并且证实了光学技术正是当今市场所需要的解决方案。❑

百瓦级大能量纳秒脉冲紫外固体激光器样机研制成功

中科院理化所先进激光技术与应用课题组，一直致力于高功率固体激光及其频率变换技术研究。近期，该课题组基于 Nd:YAG 激光三倍频产生紫外激光的技术路线，突破了高功率纳秒调 Q 脉冲振荡、低波前畸变行波放大、紫外强激光薄膜制备、高抗损伤高稳定性紫外变频等系列关键技术，研制出百瓦级大能量纳秒脉冲紫外固体激光器样机。

该样机通过了专家组现场测试，获得 355nm 激光平均功率 138.8W、单脉冲能量达 180mJ、脉冲宽度 26.6ns、重复频率 800Hz，连续工作 8 小时功率不稳定度 <1.8%，综合指标达到国内领先、国际先进。

该百瓦级大能量纳秒脉冲紫外固体激光器，在超精密冷加工、激光退火、激光镀膜、激光掺杂等领域具有重要应用。

2025 新年采访：总结过去，守望未来



【编者按】

又至岁末年初，《激光世界》（Laser Focus World China，LFWC）特别采访了三家激光公司的高级企业代表，对于刚刚过去的2024年的市场状况和发展业绩进行回顾总结，并对当前不断加剧的行业内卷给出了各自的看法，同时也对整个激光行业的良性可持续健康发展，给出了非常中肯的建议。现将采访内容精华整理成文，与读者分享，让我们共同总结过去，守望未来，为激光行业的健康可持续发展献计献策。

罗悉激光：亦舒亦急，可湍可缓

LFWC：2024 年罗悉激光的企业发展和经营状态如何？


罗悉激光技术（上海）有限公司董事总经理丁元东

丁元东：罗悉激光自 2018 年成立并独立运营以来，经过 6 年的持续成长，经营面积和设施功能逐步成为公司发展壮大的瓶颈。2024 年 8 月，我们成功迁入了位于上海浦东森兰湾的全新办公场地，经营面积扩充至 1000 平方米，公司拥有了完备的产品展示、样品陈列、技术培训、售后服务和应用测试功能，办公条件得以极大改善，测试设备和覆盖机型得以全面扩充。此次搬迁和功能升级，使我们能够更加全面、高效地提供所有在售产品的本地化技术支持与服务，为罗悉激光在中国的持续发展奠定了坚实的基础。

2024 年我们在中国的销售额和新增发货数量，实现了约 15% 的增长。我们在中国的成长，得益于与近百家系统集成商的紧密合作，得益于同众多线体集成商、终端用户对于新材料、新工艺要求的共同探索，得益于在弱势的经济与市场环境下，依然坚持创新、攻坚克难的中国制造业精神！

LFWC：您如何看待当前国内激光行业的发展现状？

丁元东：我们以一个器件供应商的视角，从商业模式、市场需求和资本推手三个方面，来解析 2024 年国内激光行业发生的变化。

第一，传统的“器件供应商—系统集成商—最终用户”的供应模式，正在被更多的供应链模式所解构和重构。最终用户、关键材料供应商出于成本控制和核心生产工艺的品质管控，将采购的决策前置，器件供应商突前参与价格决策和工艺评价。更多市场主体平行参与，且更加透明、高效的供应链模式正在冉冉升起。

第二，市场对于通用型产品的需求下降，但对于场景优化型的产品需求上升。当存量安装的通用系统所能够释放的加工能力，大于市场需求时，必然导致新增需求下降。根据应用的痛点，针对性开发或者优化的场景化产品，需要与行业用户更近距离的沟通、更柔性且高效的组织生产，是可持续的有效需求。

第三，资本作为激光产业发展的重要推手，正逐步从追求规模效应的重复性产品品类抽离，转而追逐构建激光产业未来发展的底层器件、底层材料和更具有前瞻性的应用工艺。资本的运动方向对于产业的发展具备一定的导向性，激光材料加工市场将随着作为基础的优质器件和新应用的发展，而不断拓宽。

LFWC：您对激光行业的健康良性发展有哪些建议?

丁元东：当前国内激光行业存在内卷的态势，也就是过度且无效的竞争，其结果不会带来产业的发展和社会进步，犹如池塘里的漩涡，即使表现得水流湍急，但只会导致沉渣泛起、浑浊不堪，从而破坏整个生态。

内卷的本质是缺乏创新，而创新就是突破旧的思维定势，创造新的企业价值。我们的建议是：

1) 基于企业自身的资源禀赋，在产业的价值链和价值网络中定义自身创造价值、且有别于或优于其他同业者的核心要素。根据这些核心要素，评估企业的价值实现方式，并匹配对应的企业规模；
2) 准确确定自身的产品属性和目标行业属性，以差异化的产品满足差异化的需求，不在同质化产品上为争取规模而耗费企业资源；
3) 健康的企业、健康的产业，都基础于健康的管理。调适自身，以适应企业面临的复杂多变的外部环境，是企业长期稳健运营的核心。

罗悉激光一直致力于客户之间的良性竞争，引导不同的产品需求和具备不同 资源禀赋的客户之间结伴而行。客户的健康发展是我们的持续成长的源泉。

LFWC:2025 年罗悉激光重点关注的应用领域有哪些？

丁元东：2025 年，罗悉激光将着重关注以下行业及应用领域：

1) 新能源汽车电机扁线与 Busbar 的高效清洗；
2) 新能源汽车轻量化及内饰加工；
3) 激光加热；
4) 图文产品的印后加工；
5) 科技纺织物料的高效柔性生产。

激光作为一种材料加工手段，我们关注的重点一直是材料、工艺以及行业附着性。新的材料必然带来新的加工工艺，不同的行业和应用场景，会进一步验证这种工艺实现方式是否具备经济性和可持续性。唯有不断的探索材料、工艺和行业附着性，才能不断的拓展激光技术的应用边界。

LFWC：对于国内激光企业出海谋求更好的发展，您有什么看法?

丁元东：开拓海外市场，既有扩大市场容量、参与国际竞争的积极因素驱动，也有国内市场趋近饱和、竞争加剧以及追随目标客户转移制造场地的被动因素。不管受何种因素的影响而选择“出海”，都是中国的制造业和激光产业发展到一定阶段后的必然选择。

国际市场的开拓需要一个中长期的规划。如同包括罗悉激光在内的众多国际激光公司在中国开展业务一样，都是基于中国市场存在一个持续发展机遇的判断，投入较大的人力物力，深入了解中国市场的政策环境和商业文化，同市场深度互动并不断调适自身产品和服务，方可沉淀成为市场的持续参与者。回望一下，至今活跃在中国激光产业的国际激光公司，基本上都在中国有 2 0 年甚至更长的经营历史。同理，当国内激光公司去开拓一个新的地域市场，一样需要有耐心和长远规划，这个过程没有捷径。

LFWC：您对 2025 年的激光市场有怎样的预期?

丁元东：我们想用“涤荡与沉淀”来对 2025 年的激光市场做出预期。

中国的激光行业已经历经了 10 年的高速成长与扩张，激光产业的从业人员规模、销售规模，吸引了众多资源的积聚。在市场处于一个弱势格局时，一些低水平、重复且未得到市场认可的产品，必然优先被市场淘汰出局。我们将这个过程称之为“涤荡”。

我们同时也看到，一些优秀的公司和产品，其市场接受度、产业嵌入度以及行业占位在持续上升。如大族粤铭激光在汽车内饰与安全部件领域、东莞光博士在制鞋行业、武汉金运激光在标签模切行业、杭州爱科科技在图文印后领域等，销售规模都获得了较大的成长，且客户基础得到进一步的夯实。我们将这个过程称之为“沉淀”。

从无序、无利润、无可持续性的产品和行业抽离出来，将有限的资源要素聚焦在存在有效需求，有应用痛点，有成长性的领域，这个过程可能是痛苦的，但也必将是更多有前瞻性和创新性的企业，在 2025 年的必然选择。

涤荡的过程是混沌的，但是沉淀下来的一定会继续熠熠生辉!

LFWC：请用一句话表达您对于激光人的新年祝福?

丁元东: Be Water,My friend！（上善若水,可湍可缓。）

Amplitude：2024业绩稳健增长，工业飞秒加工表现亮眼

“2024 年，Amplitude 业绩继续保持稳健增长，这得益于我们在飞秒激光器技术上的持续创新和市场的深度开拓。”Amplitude 激光器解决方案事业部销售总监阮夏说道，“高功率飞秒激光器在精密微加工和半导体等工业制造领域的应用表现尤其亮眼。另外，科研激光器领域的市场需求也持续增长，进一步巩固了我们的市场地位。”



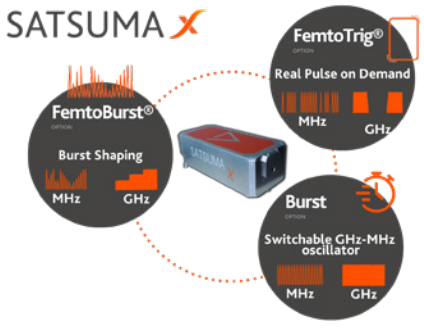
Amplitude激光器解决方案事业部销售总监阮夏

对于当前国内激光行业的“卷”，阮夏表示，“国内激光行业面临较大竞争压力，尤其在中低端市场，产品同质化和价格战明显。从全球视角看，这是行业快速发展的必经阶段。她认为，企业应注重技术创新和质量提升，而非单纯追求市场份额。同时，政府和行业协会应鼓励技术研发，完善专利保护，推动行业向更高附加值发展。

为了避免低质量的“卷”，Amplitude 一直将技术研发和客户需求放在核心位置。“企业应明确自身核心竞争力，通过技术创新和产品差异化立足市场。此外，深耕重点行业并打造完善的服务体系，也是保持竞争优势的重要手段。”阮夏建议，“企业应避免短期利益驱动，更多关注长期战略布局，打造稳固的品牌价值和客户信任。”

Amplitude 看好飞秒激光技术在半导体、光电器件制造和生物医学领域的潜力，尤其在高精度和无热影响加工需求增长的背景下，飞秒激光器将发挥更重要作用。此外，Amplitude 还在积极探索飞秒激光器在新能源领域的应用，如先进电池制造和绿色能源技术。

针对玻璃基板封装关键技术的核心应用 TGV（玻璃通孔技术）市场，Amplitude 专门研发并推出最新产品 Satsuma X，该系列拥有两个功率和能量等级（28W/280μJ 和 50W/500μJ），具备优异的能量、脉冲稳定性和 >90% 的光斑圆度，从而保证加工出的通孔的圆度和均匀一致性。Satsuma X 可同时兼容独家研发并获专利的 Femtotrig（real POD）功能、burst 波形可编辑功能 Femtoburst 以及高达 3200 子脉冲的 GHz 功能，Amplitude 推出的高子脉冲 GHz burst 功能，在 TGV 量产后的孔型修复（孔径不达标或者没有通孔）方面有良好的应用场景。



关于外资企业如何在中国市场谋求更好的发展，阮夏说：“Amplitude 作为法国企业，深知本土化对全球化发展的重要性。进入新市场时，注重与当地合作伙伴建立合作关系，深入理解目标市场的文化和商业环境。Amplitude 还在苏州建立了服务和生产工厂（安普激光），通过优化产品和服务满足客户需求，与客户建立长期稳定的信任关系。

对于 2025 年激光市场的发展预期，Amplitude 持乐观态度。阮夏表示，这种市场信心基于以下几个因素：首先，工业 4.0 的持续推进会带来对高端激光器需求增长；其次，半导体、新能源和生物医学等新兴领域的快速发展，为激光技术提供了更多应用场景。当然，也要关注宏观经济波动和地缘政治对供应链的影响，企业要保持灵活的应对能力。

最后，阮夏还分享了她给激光从业者的一些建议。从个人角度看，激光行业的核心在于创新与坚持，每一位从业者都应以终身学习的态度迎接技术挑战。专注于某一领域，深耕细作，才能在自己的职业道路上发光发热。始终怀抱对技术的热爱和对未来的信心，让自己成为推动行业发展的重要一环。

从企业的角度来看，Amplitude 的理念是“Sparking a brighter future with our laser solutions: excellence, innovation, purpose”，这不仅是对技术发展的追求，也是对行业健康发展的承诺。Amplitude 鼓励企业深度挖掘核心竞争力，聚焦高附加值市场，同时通过打造开放、包容的企业文化，吸引并留住优秀人才，共同为激光行业的繁荣贡献力量。

无论是个人还是企业，只要怀揣对未来的信念，坚持技术创新，必将在行业的浪潮中创造属于自己的“A laser bright future”。

德擎光学DILIGINE：2024年业绩增长40%，继续开拓熔深监控市场

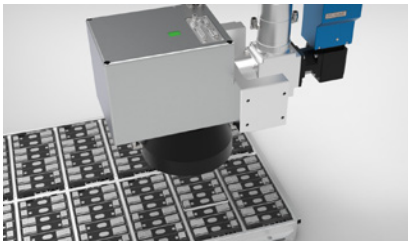
尽管 2024 年整体大环境并不好，但是 2024 年德擎的业绩依然保持了稳定增长，比上一年整体上升了 40%。德擎光学科技有限公司技术总监白天翔表示，其中的主要业务增长点来自德擎的新产品——激光焦点测量仪（Laser Focus Sensor，LFS）。



德擎光学科技有限公司技术总监白天翔

据白天翔介绍，这款产品融合了卓越的光学结构和先进的信息处理技术，能够实现快速、精确的激光焦距测量及自校正功能，有效确保激光焊接的焦点精度，从而防止因焦距偏移引发的焊接缺陷。此外，LFS 采用测量仪与加工激光光路同轴方案，在应对传统方案难以测量的复杂场景时表现尤为出色，在激光焊接领域拥有更广阔的应用前景，能为整个行业实现更高的效率和可靠性。

LFS 能广泛应用于多种复杂场景和生产环境，如智能 3C、汽车制造和动力电池生产等行业。例如在动力电池 BUSBAR 焊接环节，通过 LFS 同轴测量，可以杜绝检测与焊接分离的情况，减少虚焊情况发生；从而使得每个工件能够节约 60s 的处理时间、减少 60 次机械移动，每个 PACK 焊接可以节省 16% 的时间，从而实现更短的周期时间（CT）。此外，激光焦点测量仪 LFS 还能与激光焊接过程诊断系统 WDD 搭配使用，全方位保证产品的质量和制程的稳定。



对于当前让很多激光从业者苦不堪言的“卷”，白天翔也分享了自己的观点。首先，从积极的角度看，近年来激光行业经过激烈的内部竞争，行业上下游的生产和销售价格逐步下探，这一趋势推动了激光技术在更多行业和应用场景中的普及，并逐步取代了一些传统加工技术。整体来看，行业发展依然充满活力，前景持续向好。

但从另一方面来看，日益激烈的市场竞争促使部分企业采取低价销售策略，导致毛利率不断下降。这种情况限制了对新技术研发的投入，加剧了产品的同质化趋势，不利于行业的长远发展。

从行业良性可持续发展的角度出发，建议上下游企业明确自身在行业生态中的定位，充分发挥自身优势和特点，走差异化发展路线，以此避免恶性价格竞争，共同推动行业技术进步，形成健康发展的生态体系。

德擎光学 2024 年取得不俗的业绩增长，正是秉持差异化发展路线的最好佐证。对于企业而言，在当前的市场环境下，更要避免行业内的盲目竞争和低质量内卷，“深入理解客户的真实需求，聚焦为客户创造切实的核心价值，通过提供高质量的产品与服务，实现与客户的共赢与共同发展，是推动行业健康长远发展的关键所在。”白天翔说道，“2025 年，德擎将重点发展 OCT 技术，大力在对熔深监控要求很高的新能源和汽车行业拓展业务，满足高端焊接市场的应用需求。”

这几年，出海谋求新的发展已经是企业普遍考虑或实施的发展策略之一。白天翔认为，出海寻求新的客户和业务增长点，获得持续增长，不失为避免内卷的长远发展战略。同时，对于在海外市场发展，他也给出了如下建议：

1）与已经在海外开拓业务的链主企业协同出海，发挥中国组团的优势，这样不仅能为客户降低技术支持的成本，也能为自身在海外市场站稳脚跟夯实基础。

2）持续强化自身的技术研发能力，逐步实现从追随者到领跑者的转变，在未来直接争取海外企业的订单，进一步提升国际竞争力。

展望 2025 年，白天翔对激光市场的发展预期给出了审慎乐观的态度。随着国内激光产业链的不断完善，激光技术的应用范围将进一步拓展，替代传统加工方式的趋势也会持续增速。当然，由于前几年新能源行业的超常规发展，行业增长曲线一度偏离正常轨迹；目前，新能源行业正处于调整期，未来将会逐步回归理性发展。因此，短期内国内激光市场整体增长速度可能有所放缓，但长期发展前景依然值得期待。

最后，白天翔向激光从业者中肯地表示，希望大家苦修内功，错位发展。❑

集成光子学

数据中心网络和人工智能正在向光子学转变

未来在AI基础设施等任何需要更大通道、更低能耗、更快传输数据的地方，都将为光I/O带来应用商机。

文/Sally Cole Johnson

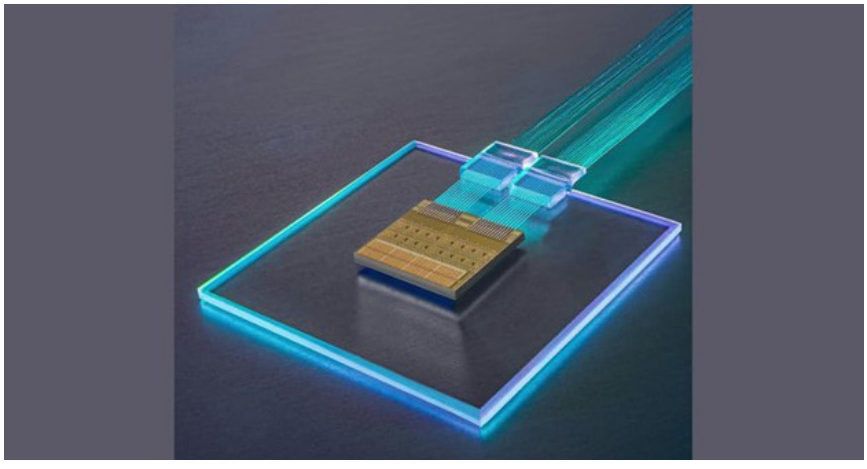


图1：传输速度为 4TB/s双向带宽的 TeraPHY 光 I/O 芯片。

Ayar Labs 正在率先为人工智能（AI）系统架构中的最大瓶颈提供解决方案：主要是在图形处理器（GPU）或中央处理器（CPU）等计算芯片之间进行高带宽数据传输。

如今，GPU 和 CPU 之间的通信是通过铜线进行电路传输的。然而电子架构的路线即将走向终点，而光信号则提供了一条更复杂的前进道路。未来的芯片到芯片之间的通信，将需要光子技术。

“我们的 TeraPHY 系列封装光芯片可以与计算芯片封装在一起，将光的数据流量转换为电子的数据流量，从而使电子能够‘与芯片上的系统对话’。然后，光离开封装并传播到另一个芯片上的另一个 TeraPHY，”Ayar Labs 商业运营副总裁 Terry Thorn 说，“它允许 TeraPHY 用它能理解的语言（即电子）与片上系统（SoC）对话，同时用光子实现封装之间的通信。”与目前最先进的技术相比，这种技术大大改善了延迟、带宽和能效。

“我们用 SuperNova 远程多波长光源为芯片提供光源，”Thorn 补充道，“对于芯片组（chiplet）中的每个传输组件，都必须有一个光源来传输数据，因此每个 chiplet 都有一个从 SuperNova 发出的光源。”

SuperNova 采用分布式反馈 (DFB) 激光阵列。第一代产品有“8 个端口，与芯片上的 8 个端口 1:1 配对，”Thorn 解释说，“每个端口或者 SuperNova 中的光纤分别携带 8 个波长。每个波长都是一个数据传输切片（transport slice）。8 个端口乘以 8 个波长意味着 64 条数据路径。”

目前正在设计的下一代 SuperNova，预计将于 2025 年推出样品，Ayar Labs 将保留其 8 端口配置，但将波长数增加一倍，达到 16 波长，实现了数据路径的加倍。Thorn 说，“这就是我们的 SuperNova 所使用的激光阵列。”

在光子集成芯片方面，第二代 TeraPHY（将于 2025 年推出）的核心技术将保持不变。但一个重要的变化是转向电子接口——通用芯片快速互连（UCIe）标准封装。

“从采用的角度来看，符合行业标准对我们来说很重要。”Thorn 说，“UCIe 规范将极大助力第二代芯片的市场应用。”

UCIe 规范由计算芯片制造商使用，因此可以说，它为 Ayar Labs 提供了一个电气着陆区。Thorn 解释说，“由于我们的芯片组和他们的计算芯片是按照相同的规范制造的，并且可以相互交流，这就为我们在市场上提供了更广泛的应用——有可能将相同 SKU（库存单位）的芯片组应用到许多不同类型的计算和数据流量架构中。

从芯片的光子学角度来看，激光能力的增强也提高了芯片的能力。“目前的芯片速度是 4TB/s，而即将于 2025 年推出的采用 UCIe 结构的芯片

速度将达到 8TB/s。”Thorn 说。Ayar Labs 的芯片是由 GlobalFoundries 在其 Fotonix 工艺（300mm 硅晶圆；见图 2) 上制造的，而 SuperNova 则来自多个供应商。

硅片上的集成光子学

将光子技术集成到多芯片封装中时（见图 3），会遇到一些挑战。

“我们正在将光子技术融入到电气封装中，”Thorn 说，“制造过程中有几件事是不同的：首先，需要测试封装中的电路，以确保其‘良好’并达到预期性能，但现在还需要测试封装中的光子学，这是在封装测试线上实施的新行为。我们和合作伙伴花费了大量时间和精力，来确保我们在封装和测试方面具有大批量生产能力。”

光子学封装中涉及的光纤（不仅仅是光纤的连接，还包括光纤束在系统中的路由）需要以大批量的方式完成。

另一个挑战是热管理。Ayar Labs 创建 SuperNova 的原因之一是，“激光在温度动力学上的表现与硅不同，”Thorn 说，“我们的芯片采用 CMOS 工艺制造，因此它能承受的温度范围和表现与 CPU 和 GPU 所用的硅片相同。但是，当激光器开始变热或在硅所达到的温度下工作时，它们的表现就开始不同了。它们的寿命会受到影响，波长的产生、跟踪和移动方式也会受到影响。”

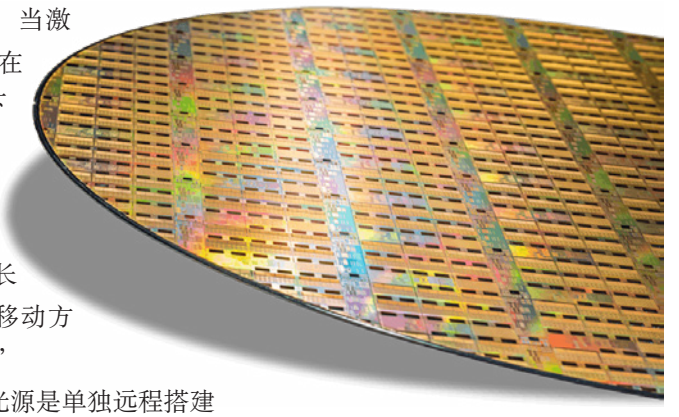


图2：基于 GlobalFoundries Fotonix 单片射频 (RF) 互补金属氧化物半导体 (CMOS) 的 TeraPHY 光学 I/O 晶圆。

因此，激光光源是单独远程搭建的，并且设计成可以放置在服务器机架的不同部分，甚至远离服务器机架，为激光器的寿命提供更有利的环境，而芯片则可以放在硅片旁边。

发展计划

Ayar Labs 已经生产了数千个芯片的工程样品，以供市场来检验其制造、封装和测试过程。

“根据我们的客户在解决数据中心内部问题方面的需求，以及他们在生态系统支持方面取得的进展，预计到 2026-2028 年期间，光 I/O 的商业产品将会大量涌现。”Thorn 说，“大家首先会看到它被那些需要它并能带来最大利益的领域所采用——人工智能基础设施领域。未来在任何需要更大通道、更低能耗、更快传输数据的地方，都将会采用光 I/O。”

除了人工智能基础设施，Ayar Labs 还与 Lockheed Martin 等公司合作，探索飞机上的雷达系统如何从光学芯片中受益。“雷达系统的计算芯片与铜线相连，所以雷达系统之间的通信都是通过铜线进行。”Thorn 解释说，“如果用光纤取代铜线，用光互连取代电互连，不仅可以获得更快的数据传输速率，让你以不同的方式思考如何使用雷达系统，而且还可以减轻飞机的重量。只要能减轻飞机或轮船的重量，就能将其转移到其他可能需要携带的有效载荷上，从而从中获益。”

Ayar Labs 正在研究的另一个很有意思的应用领域是与爱立信合作开发的基站塔——探索在基站塔顶如何采用光学芯片实现更多的计算结构，而不是将计算送到更中央的计算中心。

预计在 2026-2028 年人工智能基础设施和数据中心应用窗口之后，许多其他市场也可能会跟进。

“参与到这项工作中真的很酷，”Thorn 说，“在行业内，很少有机会参与到真正彻底改变数据中心和计算引擎工作方式的事情中。这项工作就是其中的一个时刻，能够参与其中真的令人非常兴奋。”❑

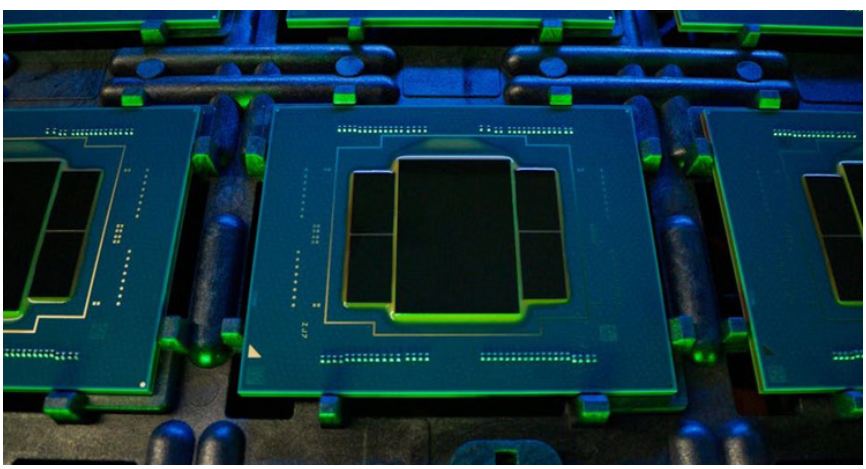


图3：一个包含四个TeraPHY光I/O芯片和客户专用集成电路的多芯片封装。

激光二极管

激光二极管将在聚变能发展中发挥重要作用

不断增长的能源需求及全球变暖，为清洁聚变能源创造了独特机会。是时候为激光驱动的惯性约束聚变能源制定发展路线图了。

文/Hagen Zimer

自 20 世纪中叶以来，科学家们观察到全球变暖趋势，并将其归因于人类。大气温室气体捕获地球向太空辐射的热能所造成的气候变暖，是不可否认的事实。众所周知，人类对温室气体排放的主要贡献，来自燃烧化石燃料发电和供热。全球变暖和日益增长的能源需求，加上世界人口不断增长和电力需求的增加，预计将在 2050 年造成约 40 太瓦（TW）的能源缺口，从今天的角度来看，仅靠目前的清洁或可再生能源是无法填补这一缺口的。

清洁核能的挑战

从铀或其他重金属元素裂变中获得的核能，通常是一种清洁能源；但是作为一种解决方案，裂变核能受到长期放射性废物的安全储存以及因故障导致的潜在核灾难和不受控制的连锁反应等影响。由于这些考虑，聚变能研究的最新进展，引起了公众和经济界的广泛关注。聚变能源技术有望提供安全、无温室气体的清洁能源，并且不会像可再生能源那样存在不稳定的可用性或威胁人类安全。

自 2021 年以来，人们已经在聚变能领域开展了广泛的研究，其中美国加利福尼亚州劳伦斯利弗莫尔国家实验室的美国国家点火装置（NIF），在激光驱动惯性约束聚变（ICF）方面，取得了颠覆性和革命性的进展。研究人员首次在激光预压缩的氘氚燃料中演示了 α 粒子自热，类似于我们太阳的聚变条件，并获得了比提供给靶子的激光能量更多的输出聚变能量。激光能量输入约为 2mJ，这需要一个初始和运行成本巨大的大型激光设施。

尽管 ICF 已经被成功证明，但是现在最大的问题是：它能商业化吗？它是否足够可靠和便宜，以满足未来的能源需求并且在价格上可接受？虽然初创公司蒸在寻求投资合作，但我们观察到投资者犹豫不决，因为尚未解决的技术挑战导致发展路线图不确定，实用性尚不明朗，而前期投入却高达数十亿美元。如果成功的话，供应链行业普遍认为 ICF 发电厂将是一个颇具吸引力的未来商机。

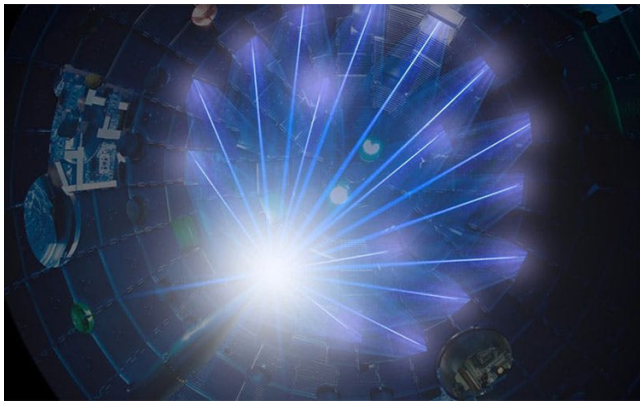


图1：NIF的高能激光束会聚在靶室中心的靶上。（图片来源：LLNL）

现在是时候为 ICF 制定一个更现实的发展路线图了，在合理的时间表上设定明确的里程碑，不仅要应对技术挑战，还要建立 / 协调国际合作网络。

聚变知识

自 20 世纪中叶以来，人们已经了解了核聚变物理学，并对其进行了描述，以进一步了解像太阳这样的恒星的驱动能源。

简言之，核聚变是两个轻氢原子核——氘和氚，聚变成较重的氦元素，也称为 α 粒子。在极端压力和数千万度温度的条件下的，轻氢原子彼此靠近，它们之间的短程吸引原子力大于远距离电磁力。这是在原子之间的相对动能约为 10keV 时发生的。一旦这两个氢原子融合在一起形成一个氦原子，并释放出约 17.6MeV 的能量。与化学反应相比，这种能量释放大约是化学反应的一百万倍。大部分能量（约 14MeV）被发射的中子带走，而 3.5MeV 的能量则留在产生的氦原子中。

在地球上，没有像太阳那样的自然温度和压力条件。

在磁约束聚变中，研究人员将低密度等离子体封闭在磁性容器内，但困难的是，温度可能在几秒钟到几分钟的时间尺度上达到 2 亿开尔文。相比之下，在激光驱动的 ICF 中，研究人员用类似于太阳条件的超高压和超高温，压缩一个含有微克量级氘氚燃料的小塑料颗粒，整个过程仅在短暂的纳秒时间尺度内进行。如果成功，这两种方法都代表了安全和清洁的聚变能源。但无论采用何种技术方法，在我们看到真正的聚变发电厂之前，每种方法都还有很长的路要走。在我们看到第一个类似发电厂的演示之前，肯定还需要至少 10-15 年的大规模财政投资和进一步的技术突破。

激光诱导聚变面临的最大挑战之一，将是利用政府和私募资金建造一个示范设施，该设施旨在纯粹研究和开发可使用的能源技术。如今，像 NIF 或葡萄牙 MEGAJOULE 项目这样的激光驱动聚变设施，主要是在军事研究等项目中进行核武器的聚变研究。显然，此类工作的进展、知识和发现只能在一定的限制条件下公开共享。

目前，需要一个大规模的民用激光聚变设施来获得牵引力，并将研究重点放在与未来建造真正的发电厂相关的主题上。目标必须是了解此类反应堆中的聚变过程，以最低的成本优化这些过程，以实现最高的能量提取效率（具有经济竞争力），进行材料研究，并开发可能的发电厂概念。在研究中获得的知识将被纳入示范发电厂，以测试电网的连续运行。只有到那时，第一座商用聚变发电厂才能正式建成。

可行的激光聚变

人类使用聚变能是一项独特的技术努力，它将需要巨大的财政和技术支持。在开发用于聚变发电厂的激光器之前，相关公司必须齐心协力，建立一个功能生态系统。没有一家公司能够独自实现聚变能源的工业应用。

激光器是 ICF 的关键技术之一，激光聚变需要大量的激光二极管。即使是最初的聚变演示设施，也需要数十个同类的二极管泵浦高能千焦激光器。因此，即使在早期阶段，这些激光器的工业化和标准化也非常有意义，并产生实际业务。

然而，如前所述，缺乏明确和一致的路线图、以及对第一个示范设施的财务长期承诺最终证明 ICF 的稳健性和经济性，导致目前我们尚且看不到任何有可能的商业案例。因此，通快目前还没有开始大规模、昂贵的研发计划，以便在五到七年内市场需要时提供这些激光器。

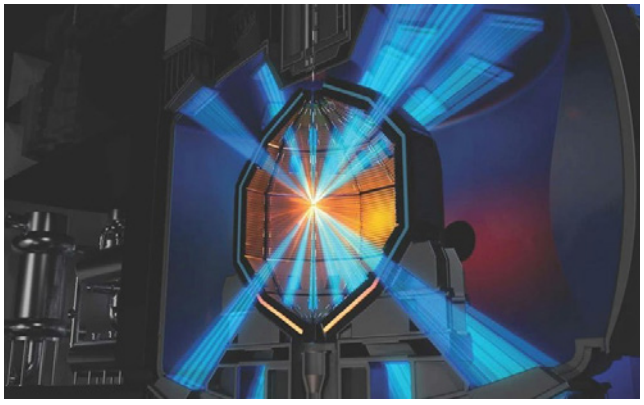


图2：惯性聚变能源发电厂概念中的靶室横截面，靶将以10x/s的速度点燃，以产生丰富的清洁能源。（图片来源：Eric Smith/LLNL）

作为一家激光器供应商，通快拥有制造 ICF 所需的高度复杂激光器的技术能力和内部供应链，并拥有将此类激光器工业化、并将成本尽可能降到最低的能力和技术，通快已经通过为新兴的 EUV 光刻领域提供高功率激光器成功地证明了这一点。

在有重大和明确的路线图承诺之前，通快正在参与德国和美国较小的政府聚变研究项目，包括聚变创新和反应堆工程科学技术加速研究（STARFIRE）。STARFIRE 研究中心是美国能源部的一个项目，该部门已批准 4200 万美元用于三个新的激光聚变中心。这笔资金旨在帮助研究人员将技术发展成为子孙后代造福的环保能源。与学术机构、实验室和其他工业公司一起，通快的激光专业知识可以帮助推进聚变能源作为一种经济可行的低碳能源的生产方法的研究工作。

这些研究项目的共同目标是制定一个可行的计划来建造惯性聚变发电厂。为了使惯性约束聚变发电厂产生比运行激光器所需更多的能量，需要用现代高效二极管泵浦激光器取代低效的闪光灯泵浦激光源。通快有信心与合作伙伴一起解决二极管泵浦源的规模、成本降低和标准化等关键问题。

聚变能的发展正处于决定性时刻。有了促进工业、研究和政治之间合作的明确路线图，我们可以释放这种清洁且几乎取之不尽的能源的巨大潜力。下一个重要步骤——使用二极管泵浦激光器和多光束线科学演示器开发工作光束线——必须很快到来，以推动大规模的聚变能研究。通快已准备好以其技术专长和创新实力，为聚变能的发展做出自己的贡献，使聚变能源成为未来可行且具有经济竞争力的能源。是时候为可持续和安全的能源未来设定发展线路图了。❑

光束整形

平顶光束的优势与用途以及生成方法

与高斯光束相比，平顶光束具有许多与应用相关的优势，在此可以了解如何根据需要生成平顶光束。

文/Cory Boone，Kristina Kaszei

大多数激光束具有高斯强度分布，然而，在某些应用中，使用非高斯光束可能更有益。高斯光束的强度分布横截面，会随着与中心距离的增加而对称地减小。相比之下，平顶光束在横截面上保持恒定的强度分布，从而在加工时能够在靶材上实现一致的辐照强度（见图 1）。因此，在半导体晶圆加工、其他材料加工及大功率激光的非线性频率转换等应用中，可获得更精确、更可预测的结果。

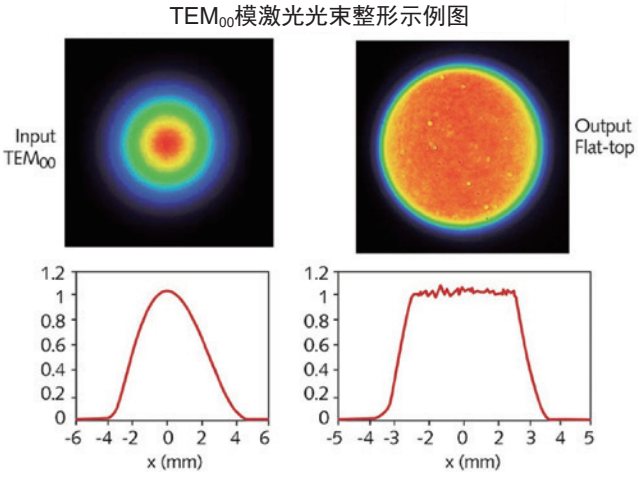


图1：实验测得的高斯光束（左）和平顶光束（右）的强度分布图。[1]

与高斯光束相比，平顶光束可以产生更干净的切口和更锐利的边缘，但产生平顶光束会增加额外的系统成本和复杂性。了解平顶光束的优点及产生平顶光束的不同方法，有助于激光系统集成商根据其应用种类，选择合适类型的激光光束。

高斯光束的特性

与其他光束类型的激光源相比，高斯激光更为常见，成本效益也更高。大多数高质量的单模激光器，发出的光束都遵循低阶高斯辐照度曲线，这也被称为 TEM_{00} 模式。质量较差的光源也会有一定程度的其他激光模式存在，但通常会假定激光具有理想的高斯轮廓，以简化系统建模。

如果高斯光束和平顶光束具有相同的平均光功率，则高斯光束的峰值辐照度将是平顶光束的两倍。高斯光束在光学系统中传播时，即使峰值强度或光束尺寸发生变化，它也会保持高斯辐照度曲线分布。这意味着高斯光束在传播过程中保持不变。

高斯光束有什么问题?

高斯光束也有其缺点，在应用中，通常采用的是光束中心区域高强度部分，而两侧的低强度部分（即所谓的“翼”）往往就被浪费了，因为无论是材料加工、激光手术，还是其他应用，都需要激光强度高于应用所需的阈值（见图 2）。

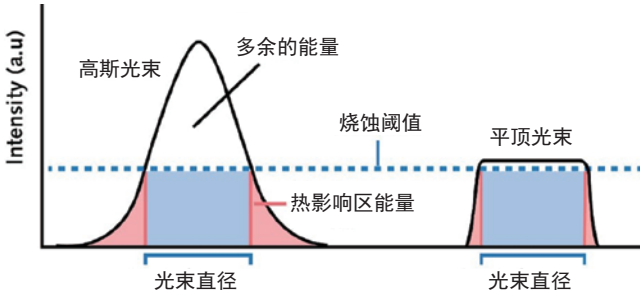


图2：在众多应用中，平顶光束比高斯光束的能量利用率更高。对于高斯光束，高于应用阈值的多余能量和低于阈值的光束边缘（或翼形区域）的能量，都被浪费了。

此外，高斯光束的两翼也可能损伤目标区以外的区域，从而扩大热影响区。这对激光手术和精密材料加工等是不利的，因为这些应用优先考虑的是高精度和最小的热影响区。因此，高斯光束加工材料不会有特别光滑的边缘，从而降低了系统的精度。

为什么使用平顶光束?

与高斯光束相比，平顶光束剖面没有翼形部分，边缘

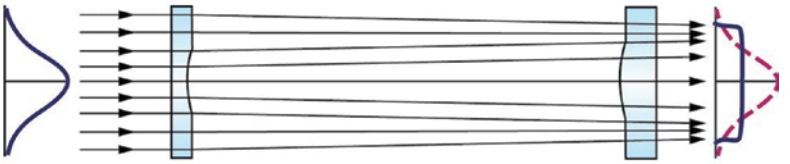


图3：基于波前畸变和能量守恒条件等工作原理，利用Edmund Optics的AdlOptica π Shaper平顶光束整形器，将高斯光束整形为平顶光束。[1]

过渡更陡，因此强度传输效率更高，热影响区更小。[2] 使用平顶光束进行蚀刻、焊接或切割都会更加精确，对周围区域的损伤也会更小。

平顶光束的这一主要优势使其适用于多种不同情况。在激光诱导损伤阈值（LIDT）测试和其他计量系统中，平顶光束均匀的强度分布可以最大限度地减少测量不确定性和统计方差。平顶光束在荧光显微、全息术和干涉测量系统中也很有优势。[3]

评估实际激光光束是否接近完美平顶光束的一种方法，是分析其平整度系数 (Fη)，其计算方法是用平均辐照度值除以光束的最大辐照度值，如 ISO 13694 标准所述。[2]

$$\text{Flatness Factor} = F\eta = \frac{(\text{Average Irradiance } (W/m^2))}{(\text{Maximum Irradiance } (W/m^2))}$$

平顶光束的缺点是什么？

平顶光束并非适用于所有应用场景。它不像高斯光束那样具有成本效益，因为需要额外的光束整形组件，才能将高斯光束整形为平顶光束。该组件既可以直接内置在激光源中，也可以在激光器之外的系统中使用。这些光束整形组件取决于输入光束的尺寸，并对 X-Y 平面对准比较敏感。此外，与高斯光束不同，平顶光束在传播过程中不会保持不变。这意味着入射的平顶光束在系统中传输时不会保持平顶形状，最终会演变为类似于艾里斑分布。

如何实现平顶光束？

如果需要平顶光束，但是系统成本非常有限且性能不需要非常高时，可以使用小孔对高斯光束进行物理截断，以形成伪平顶轮廓。这种方法切断并浪费了高斯光束两翼的能量，并不会使光束的中心强度分布变均匀。如果维持低成本是一个主要因素，这种方法可能会很有用。

而对于需要高效利用激光能量的高性能系统，可以采用光束整形组件将高斯光束整形为平顶光束。光束整形组件有多种不同类型，包括折射、反射、全息和衍射器件。折射型光束整形器件使用场映射非球面或自由曲面透镜和其他折射组件来调控光束的相位（见图 3）。其优点是强度分布均匀，相位前沿平坦。入射光束的振幅和相位，通过伽利略透镜或开普勒透镜组件中的光学元件进行调控。这一过程通常效率很高（大于96%），并且在器件设计范围内与波长无关。折射型光束整形器产生的准直平顶光束，特别适用于长距离工作的应用，如全息成像和显微系统。

其他类型的折射型光束整形器，将高斯光束整形为准直的艾里斑。这样做的好处在于，艾里斑通过衍射极限透镜组聚焦后，会形成具有平顶轮廓的聚焦点（见图 4）。在微加工、光刻和微焊接等许多应用中，聚焦点都需要平顶轮廓。[4,5]

另一方面，衍射型光束整形器利用衍射而不是折射，来改变入射激光束的强度分布。利用蚀刻工艺在基板上制备特定的微纳米结构，从而形成衍射元件。衍射元件的效果和波长范围通常取决于结构的高度和区域间距。因此，衍射光学元件必须在设计波长范围内使用，以免出现性能误差。

与折射型光束整形器相比，衍射型光束整形器对发散角、对准和光束位置更敏感。不过，衍射型光束整形器在空间受限的激光系统中有其特殊优势，因为其通常由单个衍射元件取代多个折射透镜，既能形成平顶光束，也能形成艾里斑。

下转第36页

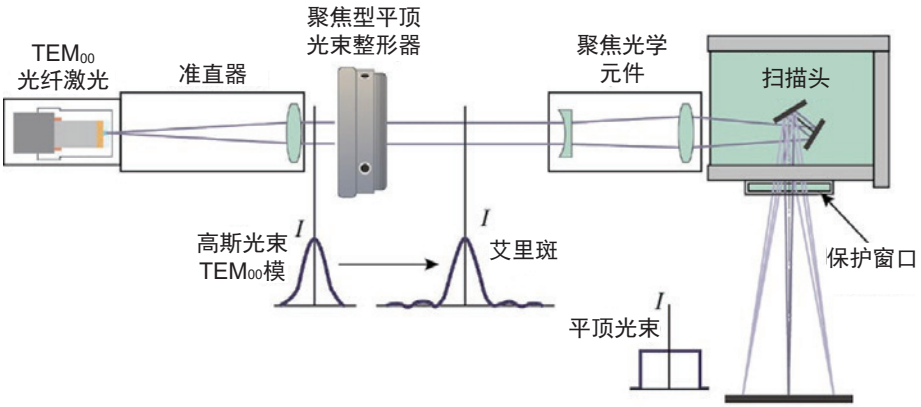


图 4：折射型光束整形器，如 AdlOptica Focal-π Shaper Q 平顶光束整形器，可将高斯光束整形为艾里斑，以便在聚焦点形成平顶轮廓。

量子计算

光子学突破有望大幅缩小量子计算器件的尺寸

仅微米厚的$NbOCl_2$晶体材料，能高效产生可作为量子比特的纠缠光子对，大幅缩小量子计算器件的尺寸。

文/Leevi Kallioniemi，Xiaodan Lyu

许多量子计算机使用电子作为被称为量子比特（qubit）的小型开关，以便同时进行大量计算。借助量子计算机，我们可以在几分钟内解决复杂的计算问题，而利用如今的超级计算机完成相同的计算任务，则可能需要数百万年时间。

这种高速计算带来的好处是惊人的。例如，我们能够更快地研发新药；通过利用量子计算机快速进行计算以及在大型数据集中发现规律的能力，更好地理解气候变化的复杂性。

但存在的一个挑战是：要使量子计算中的电子量子比特发挥作用，它们需要接近外太空寒冷程度的超低温环境。

应对这项挑战的一种替代方案是使用光粒子（即光子），光子在室温下就能充当量子比特——相较于使用电子，光子方案可能更廉价、更简便且更实用。要使光子成为量子比特，光粒子必须以相互关联或相互纠缠的成对形式产生，这样，无论它们相隔多远，其中一个光子发生的情况都会立即影响到另一个光子。

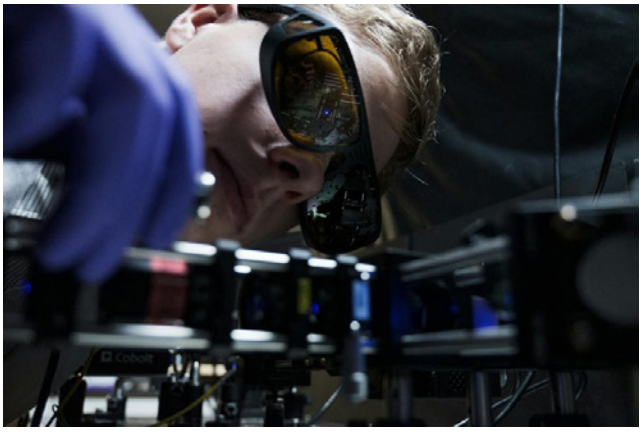


图2：新加坡南洋理工大学物理与数学科学学院的博士生Leevi Kallioniemi，正在操作用于产生纠缠光子对的蓝光激光装置。（图片来源：新加坡南洋理工大学）

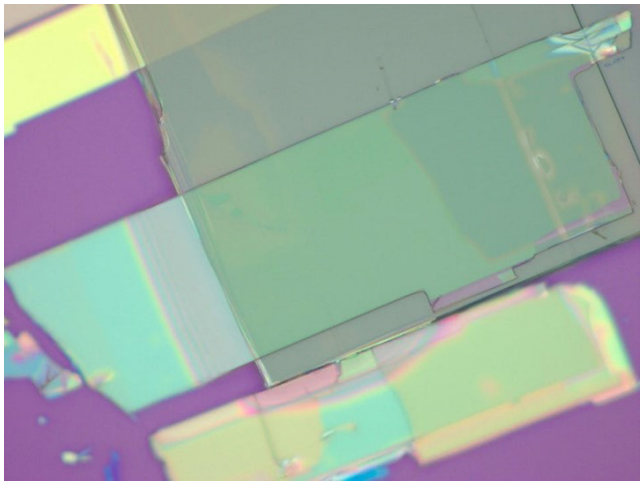


图1：在光学显微镜下拍摄的两片相互堆叠的二氯氧化铌薄片的照片。其中一片的晶粒（灰色薄片）与另一片的晶粒（绿色薄片）相互垂直排列。（图片来源：新加坡南洋理工大学）

实现光子纠缠的一个关键要求是光子对必须同步振动。实现光子对同步振动的一种方法是将激光照射在毫米厚的晶体上，并使用光学设备来维持光子之间的关联。但这样的装置太大，无法集成到计算机芯片中，因而限制了这种方法的实用性。

由 Weibo Gao 教授领导的新加坡南洋理工大学（NTU Singapore）团队，找到了一种利用微米厚的更薄材料来解决这一问题的方法。

这种方法能够将量子计算部件缩小 1000 倍，并且通过省去对笨重光学设备的需求，使诸如量子信息和光子量子计算等量子应用设备变得更紧凑、更简单。

对更薄材料的探索

科学家们一直在寻找更薄的材料来产生作为量子比特的光子，但这很困难，因为材料变薄时，其光子产生率



图3：新加坡南洋理工大学实验中用于产生纠缠光子对的蓝光激光装置。（图片来源：新加坡南洋理工大学）

会下降，这导致它们在量子计算中并不实用。

不过近年来的科学进展发现了一种名为二氯氧化铌（$NbOCl_2$）的晶体材料，它为人们带来了希望。这种材料具有独特的光学和电子特性，即便仅有微米厚，也能高效地产生光子对。但一个主要问题是：它所产生的光子仍然没有处于纠缠状态，无法用作量子比特。现在，Weibo Gao 教授领导的团队找到了一种解决这个问题的办法。

来自过往的灵感

来自新加坡南洋理工大学电气与电子工程学院以及物理与数学科学学院的 Weibo Gao 教授推测，一种利用较大晶体材料产生关联光子对的既有方法，可以应用于更薄的二氯氧化铌材料上。这种现行方法于 1999 年发表，它将两片厚晶体薄片堆叠在一起，在向晶体照射激光之前，每片薄片的晶粒彼此相互垂直排列。

但以这种方式产生的光子对由于在笨重晶体内部传播的方式问题，可能仍然不会同步振动。因此，需要光学设备来使光粒子同步，以确保它们能够相互纠缠。校准光学设备来实现这一点也可能会非常麻烦。

Weibo Gao 教授认为，如果改用二氯氧化铌薄片，由于它们比以往研究中更厚重的晶体要薄得多，那么所产生的光子在薄片内部传播的距离会更短。这将使得在薄片内产生的光子能够同步并相互纠缠，并且无需使用额外的光学设备来确保光子相互关联。



图5：二氯氧化铌薄片样品。（图片来源：新加坡南洋理工大学）

该团队与新加坡南洋理工大学材料科学与工程学院的 Liu Zheng 教授合作，通过实验来验证这一点。实验中使用的二氯氧化铌薄片总厚度为 1.2μm，大约比一根头发丝还要细 80 倍。

实验结果支持了 Weibo Gao 教授的假设，所产生的光子对与理想纠缠光子的相似度达到了 86%。这表明该方法是一种为量子计算产生量子比特的可靠途径。

芬兰阿尔托大学专门从事光子学研究、但并未参与此项研究的 Zhipei Sun 教授表示，这种新方法“是一项重大进展，它将有望助力实现量子技术的小型化和集成化”。Zhipei Sun 教授是芬兰研究委员会量子技术卓越中心的联合首席研究员，他还补充说：“这一进展有可能推动量子计算和安全通信的发展，因为它能实现更紧凑、可扩展且高效的量子系统。”

目前，南洋理工大学研究团队正计划优化这套装置，以提高其光子产生量，这将涉及研究在二氯氧化铌薄片表面引入微小图案和凹槽是否能够促进关联光子对的产生。与此同时，这些研究人员也在探索通过将其他材料与二氯氧化铌薄片堆叠在一起，能否提高光子产量。❑

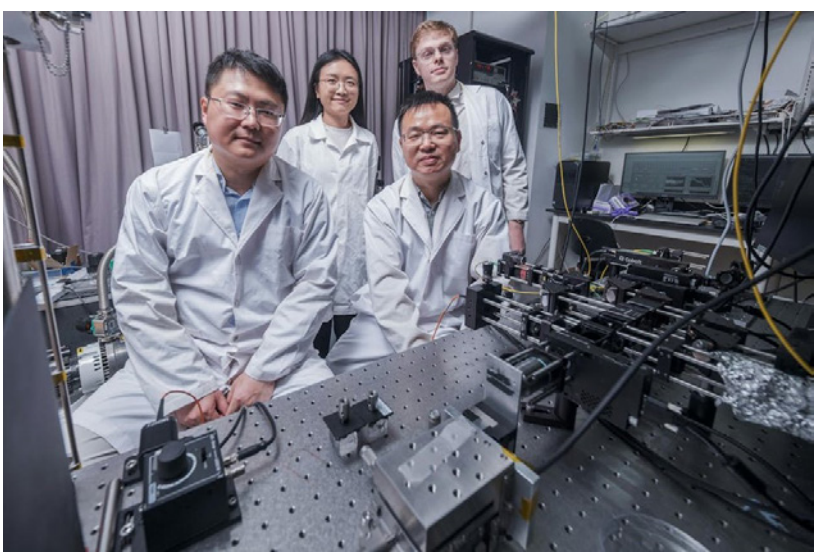


图4：（从左至右）Weibo Gao教授、Xiaodan Lyu博士、Liu Zheng教授以及博士生Leevi Kallioniemi是新加坡南洋理工大学团队的成员，该团队发现了一种利用极薄材料产生纠缠光子对的新方法。（图片来源：新加坡南洋理工大学）

半导体应用

激光技术在半导体领域的应用与发展

激光技术在晶圆隐形切割、TGV通孔加工和Mirco LED芯片剥离等半导体相关应用中，拥有显著加工优势和巨大应用前景。

文/英谷激光

近年来随着国内半导体产业的持续发展，对半导体产业中材料加工的工艺升级、半导体生产制造环节的质量及特性控制等方向的要求越来越高，同时随着超快光学、光子光纤、固体激光器的迅速发展，激光技术在输出功率、光束质量、加工精度和长期可靠性等方面，都得到了完善和提升，进一步加深了激光技术在半导体多个分支领域的发展，促进了半导体行业的技术革新和产业升级。

激光技术的优势

激光技术在半导体领域的应用颇为广泛，在材料加工领域应用的工业激光器主要为超快固体激光器和深紫外激光器。由于激光的脉宽窄、聚焦光斑小、能量密度大，因此激光在材料上可以进行高效、高质、高水平的加工，且加工过程中对材料周边区域的损伤程度低。

激光加工技术具有以下几点优势：①工艺集成性强、加工步骤简单，激光加工技术可实现在同一台设备完成多种加工工艺，从而大大提升工作效率，提升经济效益；②材料适用范围广，激光加工技术可以加工半导体行业中的多种材料，既可以加工单晶硅、碳化硅、金刚石等硬脆性材料，也可以加工超薄玻璃等非晶材料；同时激光加工技术对工作环境要求比较低，可以在大气、真空甚至个别特殊极端工作环境下工作；③加工精度及效率高，由于激光的能量密度高，可瞬时完成加工任务，因此热影响区小，同时加工方式为非接触式，工件变形小，能够极大保证加工质量，降低加工成本。[1] 常规应用场景有晶圆隐切、TGV、LED 芯片剥离等。

激光技术在半导体领域的典型应用

（1）晶圆隐切

与传统激光烧蚀切割相比，隐形切割不会在晶圆表面产生切割碎屑和烧熔残渣，且切缝宽度在 1μm 以内，切缝损失可以忽略。

隐形切割的原理是将激光聚焦到晶圆表面以下，在晶圆内部的不同深度处进行逐层扫描，生成单道或者多道改质层，之后在外张力作用下，改质层裂纹沿垂直于晶圆表面方向扩展，使晶圆由内向外劈裂。[2]

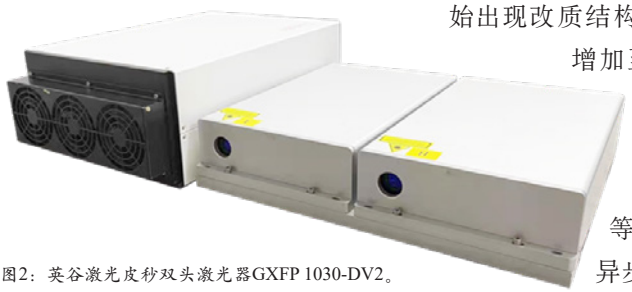
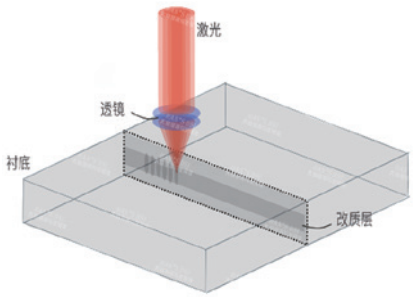
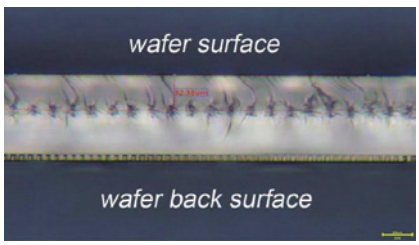


图2：英谷激光皮秒双头激光器GXFP 1030-DV2。



(a) 激光隐形切割晶圆示意图



(b) 晶圆切割后的横截面图

图1：激光技术在晶圆切割中的应用，a为隐形切割晶圆示意图；b为晶圆切割后的横截面图。

在飞秒隐切研究方面，2017 年，Kim 等 [3] 使用中心波长 780nm、重复频率 1kHz、单脉冲能量 10μJ、脉冲宽度从 220fs~6ps 可选的激光，隐形切割厚度 420μm 的 4H-SiC 晶圆，探究了脉冲宽度对改质结构的影响。实验发现，当激光扫描速度为 2mm/s，脉冲宽度超过 750fs 时，晶圆内部开始出现改质结构，随着脉宽从 750fs 增加至 6ps，改质结构逐渐变长且出现分段现象。

2021 年，Zhang 等 [4] 使用双光束激光异步切割了厚度 200μm

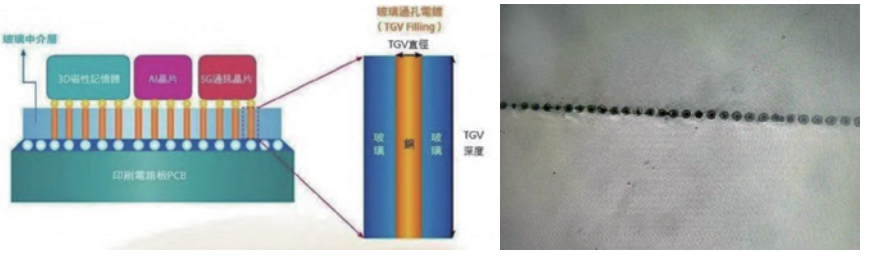
的 4HSiC 晶圆：首先使用一束中心波长 532nm、重复频率 20 ~ 200kHz、最大输出功率 5W、脉冲宽度 750fs 的激光在晶圆内部生成一道改质层，扫描速度为 3mm/s；再使用一束中心波长 1040nm、输出功率 8W 的连续激光加热改质层。该束激光产生的热应力，促使改质层裂纹沿垂直于晶圆表面方向扩展，扫描速度为 1000mm/s。

与飞秒脉冲不同的是，在皮秒脉冲的作用下，电子有足够的时间将吸收的能量转移到晶格中，诱导晶圆发生雪崩电离，导致晶格熔化甚至破裂，加大了脉冲的改质范围。2022 年宋燕国等 [5] 使用中心波长为 1030nm、重复频率为 100kHz、单脉冲能量为 20μJ、脉冲宽度约 100ps 的皮秒脉冲，能够高质量、高速度地切割厚度 360μm 的 SiC 晶圆，激光扫描速度可达 400mm/s，相应的切割速度为 44.44mm/s。

英谷激光皮秒双头激光器 GXFP 1030-DV2，接口简洁，采用全光纤设计，结构简单，性能可靠。脉宽窄，峰值功率高，采用双激光头同时工作，可实现双倍加工效率，在晶圆隐切领域具备切割速度快、切割质量高（无碎屑残渣）、低切口缺失等优势。

（2）TGV 通孔加工

激光诱导变性制造 TGV 通孔，主要机理是通过脉冲激光诱导玻璃产生连续的变性区，相比未变性区域的玻璃，变性玻璃在氢氟酸中刻蚀速率较快，基于这一现象可以在玻璃上制作通孔。在半导体封装领域，TGV 被半导体行业普遍认为是下一代三维集成的关键技术，主要是其应用范围广，TGV 可应用于光通讯、射频前端、光学系统、MEMS 先进封装、消费类电子、医疗器械等领域；不论硅基还是玻璃基，通孔金属化技术都是一种应用于晶圆级真空封装领域的新兴纵向互连技术，为实现芯片 - 芯片间距最小的互联提供了一种新型技术途径，具有优良的电学、热学、力学性能。



(a) TGV技术示意图。（图片来源：台湾工研院官网）　(b) 激光改性后的玻璃表面形貌

图3：激光技术在TGV通孔加工中的应用。a为TGV技术示意图；b为激光改性后的玻璃表面形貌。

当前火热的 AI+Chiplet 发展趋势，需要利用 2.5D/3D 封装来满足市场需求，对 TGV 技术的各项工艺研究也在逐步增多。2021 年陈亮 [6] 利用波长 1040nm&520nm 的双波长激光集成，脉宽 <400fs，激光频率 100kHz~1MHz，双波长最大输出功率 8.5W/17.5W，制备出深宽比为 5.4 的微槽；2024 年 7 月叶刚等 [7] 利用波长 1030nm、脉宽 6ps、激光频率 100kHz、激光最大最大输出功率 20W 的输出，对厚度 320μm 的康宁 7980 石英玻璃进行改性实验，最终获得了最大径深比 12：1、多种孔径尺寸的石英玻璃通孔。

英谷激光飞秒激光器适用于 TGV 通孔加工，加工时几乎不产生热量，保证了玻璃通孔边缘的光滑度和完整性。兼具高效率和高精度，钻出的微孔深宽比高，成孔质量均匀、一致性好。材料适用性广，能有效处理多种材质的基板。

（3）LED 芯片剥离

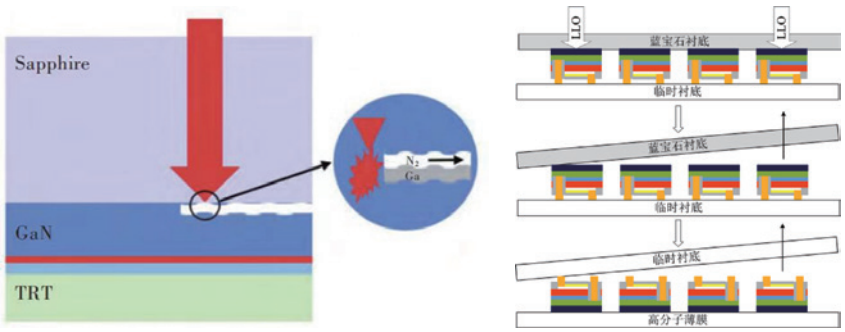
微型发光二极管（Micro LED）芯片，相对于传统的液晶显示（LCD）、有机发光二极管（OLED）芯片，具有分辨率更高、发光效率更高、能耗更低、响应速度更快、可靠性更好、寿命更长等优势。在 AR/VR 眼镜、高分辨率显示、可穿戴电子、光通信等领域具有广泛的应用前景，GaN 基 Micro LED 芯片正在引领新一代显示技术。

目前由于同质衬底的匮乏，大部分传统的 Micro LED 是在蓝宝石衬底上制备的。在蓝宝石衬底上制备 Micro LED 芯片成本低，工艺成熟，但也存在着诸多问题，例如由于蓝宝石的导热性、导电性差，影响器件的发光效率，并且蓝宝石衬底的脆性不利于 Micro LED 在柔性方面的运用，限制了 Micro LED 走向商业化。随着柔性可穿戴设备的快速发展，对高性能微型显示器件的需求不断增加，为了实现高质量 Micro LED 芯片制备，激光剥离（LLO）Micro LED 工艺至关重要。[8]



图4：英谷激光适用于TGV通孔加工的飞秒激光器。

2023 年 2 月岳龙等 [8] 利用波长 248nm、脉冲宽度 25ns、最高频率 50Hz 的准分子深紫外激光器，对 GaN 基 Micro LED 芯片进行了激光剥离。通过分析光镜图和 SEM 照片，研究了 GaN 在



(a) 激光剥离时的热分解示意图　　(b) 激光剥离与芯片转移流程示意图

图5：激光技术在LED芯片剥离中的应用。a为激光剥离时的热分解示意图；b为激光剥离与芯片转移流程示意图。

不同激光能量密度下分解情况的变化趋势。由于 GaN 被刻蚀成芯片结构，GaN 分解产生的 N_2 被成功释放，实现了对约 20164 个 Micro LED 芯片的激光剥离，平均剥离良率约 96.43%，剥离后得到了表面均方根粗糙度仅为 0.597nm 的高质量 Micro LED 芯片。

2024 年 1 月项文辞等 [9] 使用波长为 1064nm、脉冲宽度为 15ps、重复频率为 100kHz、聚焦光斑直径为 40μm 的 Nd^{3+}:YAG 皮秒激光器，将 GaN 外延层从蓝宝石衬底剥离，当皮秒激光能量密度达到 1.3J/cm^2 时可实现有效剥离。SEM 表征结果显示，清洗后的剥离外延层表面，具有良好的平整度。拉曼测试结果发现，剥离后的 GaN 层参与应力从 1.42GPa 降低为 0.29GPa。电学测试结果发现，5V 电压下正向电流由 0.164mA 增大到 0.759mA，PL 和 EL 强度都得到增强。

这些结果都证实了超快激光剥离技术可以有效降低剥离过程中对半极性面 GaN 基 LED 产生的损伤。超快激光剥离技术是一种将 GaN 基 LED 从蓝宝石衬底剥离的有效策略，在未来 GaN 基 LED 器件制备加工中具有巨大的应用潜力。

英谷激光深紫外激光器（GXP 266-5）在 LED 芯片剥离有如下优势：光束质量好，功率稳定；加工效率高，加工性能优越；稳定周期长，维护成本低。

激光技术在半导体领域的展望

激光技术在半导体加工领域有着传统加工技术无法比拟的应用优势，同时其符合当前生态文明建设，满足绿色与可持续发展的要求，具有巨大的发展潜力和广阔的应用市场。随着激光技术应用领域的不断拓展，在半导体行业中，激光应用的广度和深度仍在持续拓展。



图6：英谷激光深紫外激光器GXP 266-5，适用于LED芯片剥离。

在半导体前道量检各工序中，激光由于其非破坏性、高检测速度、高分辨率、高自动化和计算机化等优点，正发挥着不可代替的作用；随着大规模集成电路集成度不断提升，pn 结、栅极、源漏极等制造工艺所需的退火热预算不断减少，精细的激光退火技术在离子激活、可控离子扩散、结晶质量和缺陷修复等方面优势显著，可以减少退火时间，并能达到更高温度，可以更好地控制热预算和提高材料性能，近年来相关的研究与产业都在持续发展。❑

参考文献

1. 王占海．浅析激光技术在材料加工产业中的应用 [J]. 信息记录材料 ,2019,20(5):48—49.
2. 宋燕国，郭旭，王嫣鸾，郝强．皮秒脉冲隐形切割碳化硅晶圆实验研究 [J]. 光学仪器 2022,44(3):89-89
3. KIM E，SHIMOTSUMA Y,SAKAKURA M,et al.4H-SiC wafer slicing by using femosecond laser double-pulses[J].Optical Materials Express,2017,7(7):2450-2460.
4. ZHANG Z, WEN Z D, SHI H Y, et al.Dual laser beam asynchronous dicing of 4H-SiC wafer[J].Micromachines, 2021,12(11):1331–1340.
5. 宋燕国，郭旭，王嫣鸾，郝强．皮秒脉冲隐形切割碳化硅晶圆实验研究 [J]. 光学仪器 2022,44(3):93-94
6. 陈亮．飞秒激光刻蚀石英玻璃微加工技术研究 [D]. 武汉，中南民族大学 2021:32-32
7. 叶刚，柯峥，夏晨辉，张志模．基于激光诱导改性法制备多孔径石英玻璃通孔的工艺研究 [J]. 中国集成电路 2024,(302)：66-69
8. 岳龙，徐俞，王建锋，徐科．高成品率和平整度的 GaN 基 Micro LED 芯片激光剥离工艺的研究 [J]. 人工晶体学报 2023,52(5):805-806 809-810
9. 项文辞，孙浩，王思博，周慧莲，帅凌霄，叶云霞，张韵．蓝宝石衬底上的半极性面 GaN 基 LED 超快激光剥离 [J]. 发光学报 2024,45(4):685-686

玻璃加工

纳秒脉冲红外激光用于高质量玻璃加工

高单脉冲能量和高峰值功率的纳秒脉冲红外光纤激光器，是玻璃钻孔和玻璃磨砂处理的理想加工工具。

文/Mason Zhang，Yaron He，Hanan Huang；深圳市杰普特光电股份有限公司

人们利用玻璃已有上千年的历史，玻璃材料因为具有透光性、表面洁净度高、硬度大、耐腐蚀等特性，被广泛应用于工业基板、显示面板、民用玻璃及电子行业的显示盖板等众多领域。然而，玻璃产品的生产通常是冷却成型，玻璃生产出来后还需要钻孔、磨砂等加工步骤，才能满足各种应用需求。

传统的玻璃钻孔工艺采用机械刀具、砂轮或化学腐蚀等接触式加工，表面易产生微裂纹，加工质量不佳，且容易造成环境污染等；玻璃磨砂处理采用传统喷砂工艺，需要经过喷砂和 UV 固化，步骤复杂。相比于上述传统加工方式，激光加工玻璃更高效、环保、可靠，有效避免了传统加工方式的不足。纳秒级脉冲红外激光器能够产生更高的单脉冲能量和更高的峰值功率，在效率、成本和体积方面更具优势，正逐渐成为玻璃加工领域的一种强大工具。

激光加工技术是将激光光束聚焦在物体表面，利用聚焦光斑的高能量密度气化或融化待加工材料的一种加工方式。激光加工相比传统的加工方式具有以下优点：(1) 激光加工为非接触加工，不会造成二次污染或破坏；(2) 有着更高的加工精度；(3) 加工灵活性更强，可做异型设计加工。随着近年来高峰值功率激光技术的发展，纳秒级高峰值红外光纤激光加工技术，已经在玻璃加工领域等方面展现出极大的发展潜力。本文将从纳秒级高峰值功率红外光纤激光玻璃钻孔和玻璃磨砂处理两个应用，展示激光在玻璃加工领域的应用潜力。

玻璃特性与激光加工的关系

激光加工与玻璃材料的特性息息相关，例如，激光气化材料的速度与材料的热胀系数有关。普通钙钠玻璃、超白玻璃、K9 玻璃等是比较容易使用激光进行钻孔的；它们的主要成分是 70% 含量的 SiO_2，含有碱性氧化物，热胀系数在 80~100×10^{-7}℃ /m，非常适合使用激光做钻孔加工。而高硼硅玻璃和石英玻璃由于热胀系数只有 5.8×10^{-7}℃ /m，目前激光加工此类玻璃仅能钻微小的孔。需要注意的是，钢化玻璃由于存在内部应力，任何破坏都会导致碎裂，因此不适合用激光加工。

激光钻孔

激光钻孔的主要方式如图 1a 所示：激光透过玻璃聚焦于玻璃的下表面，由底部开始一层一层地将材料气化，螺旋上升，逐层扫描直至玻璃上表面。

激光对玻璃采取由下往上的方式进行钻孔时，玻璃气化成细小的粉末从下方掉落，相比不透明材料从上向下的加工方式，这种加工方式几乎不会有锥度，通孔的一致性高。

激光钻孔通常采用填充方式，方向上有向内填充、向外填充两种（见图 1a、1b），这两种填充方式均可，通常按照加工的内外径需求来选择具体的填充方式。实验机型为 YDFLP-200-M8-S-W-V2，采用 4mm 厚度的普通白玻璃进行测试，激光聚焦在下表面向



图1：（a）向内填充；（b）向外填充；（c）下表面。

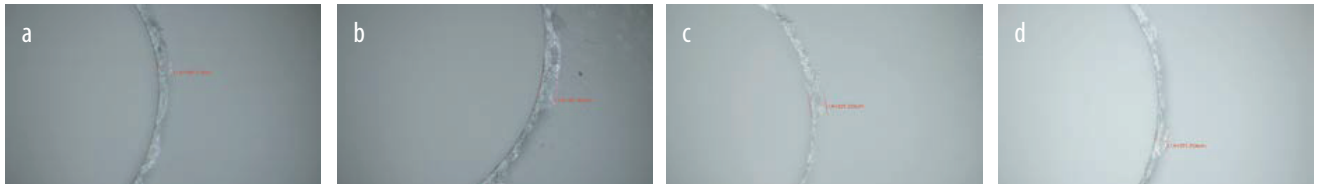


图2：四种脉冲钻孔情况下的玻璃上表面崩边情况：（a）9ns，（b）12ns，（c）16ns，（d）20ns。

下的 1~2mm，随着 2.5D 振镜向上移动，激光与玻璃下表面接触。激光玻璃钻孔效果的评价主要是崩边值，下表面的加工效果比较好，崩边通常会在 150μm 以内，如图 1 所示，下表面崩边仅有 136μm。

上表面的崩边影响因素很多，材料种类、热量积累、工艺参数对成型上表面的崩边值，有着很大影响。合适的脉宽对于玻璃钻孔至关重要，图 2 分别是 9ns、12ns、14ns 和 20ns 四个脉宽用于玻璃钻孔的崩边效果，在显微镜下观察如图 2（a）（b）（c）（d）所示。

从图 2 中可以看出，在相同的功率下，12ns 脉宽的崩边最小，此时激光的单脉冲能量为 0.95mJ，重复频率为 160kHz，崩边值为 291μm。

激光磨砂处理

磨砂玻璃是一种具有模糊效果的玻璃，具有透光不透明、保护隐私、美观等特点，在办公、浴室、玻璃工艺品等领域有着广泛的应用。目前，玻璃磨砂主要有三种实现方式：机械研磨、喷砂与 UV 固化、化学处理（如氢氟酸溶蚀）。这些加工方式的优点是适用范围广泛，缺点是步骤复杂不够环保。

激光加工磨砂玻璃弥补了这些缺点，不但更加高效环保，还能降低加工成本。镜面玻璃是在普通平板玻璃上镀上反光膜制成，利用激光加工技术可以方便地在镜面玻璃上再加工，图 3 是镜面磨砂处理的效果（图 3a），激光处理后的磨砂效果细腻，边缘笔直，搭配灯光呈现出磨砂面透光、镜面反光的复合效果（图 3b）。



图3：（a）磨砂处理效果图；（b）透光磨砂面。

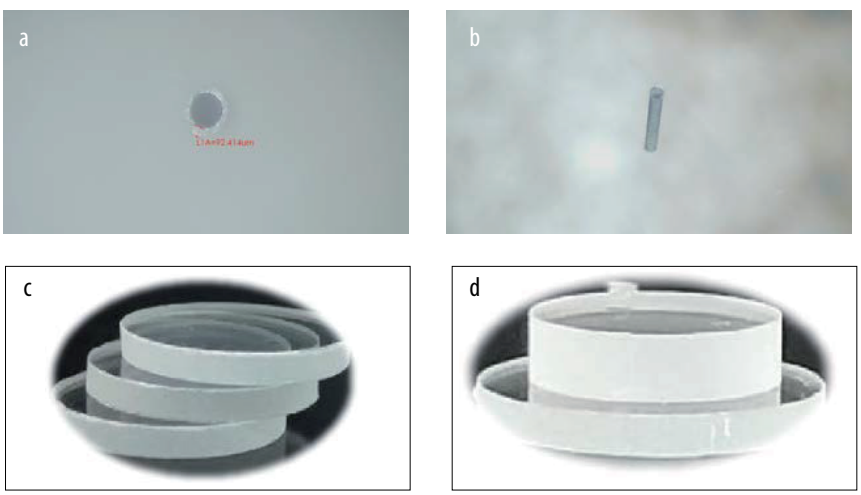


图4：（a）0.5mm孔径崩边；（b）侧面效果；（c）5mm厚度钻孔效果；（d）10mm厚度钻孔效果。

激光加工的优势

激光玻璃钻孔的一大优势是能够满足复杂的加工要求，比如钻微孔和钻超厚的玻璃和加工异形孔。图 4 是在厚度 5mm 的普通白玻璃上，钻直径 0.5mm 孔径的效果图（见图 4a），其崩边小于 100μm，仅有 92μm。从侧面观察钻孔效果可以发现（见图 4b），孔径整体笔直无任何锥度。

激光能够在厚度达 20mm 的玻璃上，钻出直径 0.3~150mm 的孔。图 4c、4d 是厚度 5mm 和 10mm 玻璃的钻孔效果，整体崩边控制在 0.3mm 内，属于较好水平。在不同厚度的玻璃上，钻大小不同的孔，所需要的时间也不同，通过实际测试得出的具体加工效率如表 1 所示。

激光在加工异形孔方面也有着非常大的优势，通过软件设计可以实

表1：在不同厚度的玻璃上钻大小不同的孔所需的时间参考

玻璃厚度 [mm] / 钻孔直径 [mm]	钻孔时间 [s]		
	2	5	10
0.3	0.8	1.1	3.4
10	1.0	1.6	3.3
20	1.8	2.4	6.7
30	2.8	4.8	11.5
40	4.7	6.8	15.9
50	5.5	8.6	20.0
60	9.1	13.3	23.0
70	14	16.0	29.0
80	17	27.0	40.0
100	24	43.0	81.0
120	47	80.0	/
150	63	/	/

现多边形钻孔（图 5a）。消费电子 3C 如手机玻璃盖板（图 5b）、汽车中控玻璃面板（图 5c），日常生活中的玻璃制品如眼镜、钟表（图 5d）均可通过激光进行钻孔成型。而光伏背板玻璃必须在特定的地方打孔，才能把光伏电池组件的电流导线引出到接线盒，激光玻璃钻孔（图 5e）由于高效环保、方便自动化集成而成为了该行业的理想选择。



图5：（a）异形孔钻孔效果；
（b）消费电子；
（c）汽车中控；
（d）眼镜钟表；
（e）光伏玻璃背板。

总结

杰普特 M8 系列激光器（图 6）采用主振荡功率放大的 MOPA（Master Oscillator PowerAmplifier）结构，其中主振荡利用半导体激光器作为种子源，功率放大则通过行波光纤放大器实现。该系列自 2021 年推出以来，经过多次迭代升级和优化，针对不同应用开发了多种功率等级的激光器。中低功率激光器（如 20W、50W）适用于对热量敏感材料的表面处理和刻蚀；中高功率激光器（100~300W）在玻璃钻孔、深度雕刻和玻璃磨砂处理等应用中表现出色。



图6：YDFLP-200-M8-S-W-V2激光器。

在保持杰普特 M7 系列脉冲频率独立可调功能的基础上，M8 系列对脉冲峰值功率和光束质量进行了重点优化。该系列在高功率工作条件下仍能保持优异的光束质量，峰值功率可 >100kW。

杰普特 M8 系列激光器凭借其更高的单脉冲能量和更大的峰值功率，在玻璃钻孔和玻璃磨砂处理等领域表现出色。它为工业自动化加工领域带来了高效加工方式，并有望成为玻璃加工领域的重要工具。❑

表2：YDFLP-200-M8-S-W-V2激光器的性能指标

光学特性		
参数	规格	备注
M^2	<1.5	/
平均输出功率 [W]	>200	/
脉冲能量 [mJ]	0.95 mJ @ 12 ns	/
脉冲宽度 [ns]	6 – 200	可调
最大峰值功率 [kW]	>100	/
重复频率 [kHz]	1 – 4,000	可调
输出功率不稳定度 [%]	<5	24h
中心波长 [nm]	1064	/
光束直径 [mm]	3 ± 0.5 or 10.5 ± 1	/
功率调节范围 [%]	0 – 100	/
谱光 @ 3dB [nm]	<20	3 dB 线宽
偏振方向	任意	/
是否抗高反射	是	/

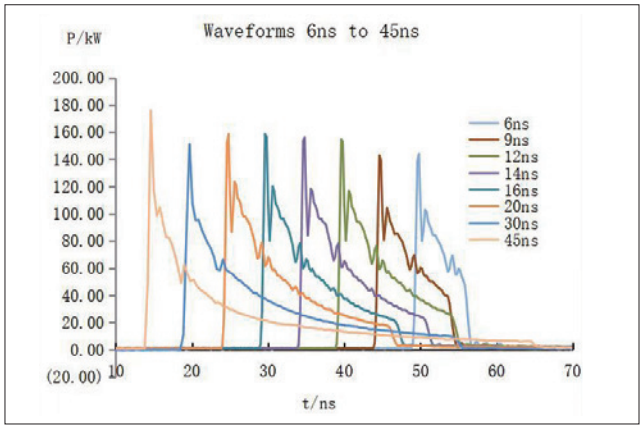


图7：6~45ns的峰值功率曲线。

增材制造

应用高速相机优化粉末床激光熔融工艺

高分辨率的高速相机，能精准监测粉末床激光熔融工艺过程中的熔池变化，反映零件构建过程中参数变化的影响。

文/Allied Vision

Aconity3D 公司是德国一家专门从事金属粉末床 3D 激光打印模块化实验室系统的设计和销售的公司，该公司希望优化一种名为粉末床激光熔融（Powder Bed Laser Melting，PBLM）的创新制造工艺的稳定性，进而能将该工艺广泛应用于各行各业。Aconity3D 采用 SVS-Vistek 公司的高速工业相机，正在向着既定目标迈进。

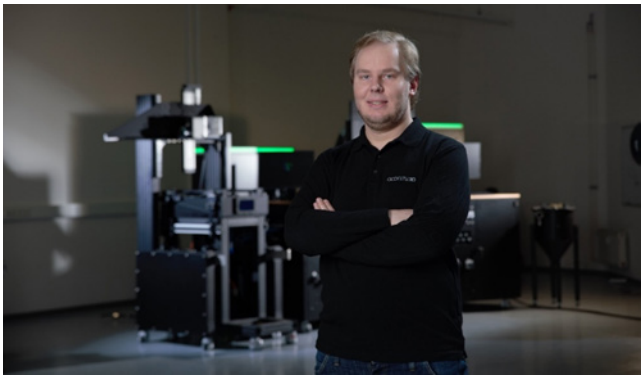


图1：Aconity3D 公司机器开发项目经理 Lutz Lübbert。

粉末床激光熔融工艺

相比于其他成熟的生产技术，增材制造正处于发展时期。一方面，增材制造带来了众多前所未有的创新路径；另一方面，在某些领域人们对增材制造的研究还不够充分，比如粉末床激光熔融工艺，尚且面临着重重挑战，具有巨大的优化潜力。

在粉末床激光熔融工艺中，待加工材料以粉末床形式，逐层选择性熔融，并依据 3D 模型数据制造出目标工件。通过激光束源选择性地引入加工区域，提供能量，熔化相应零件区域的粉末材料。随后进行冷却，材料凝固形成目标零件。

粉末床激光熔融工艺被广泛应用于汽车、医疗和航空航天等行业，其在这些行业批量生产中的重要性日益凸显。相比于众多的传统制造工艺，粉末床激光熔融工艺取得显著发展的主要原因在于：该技术在零件设计上展现出了前所未有的灵活性与惊人的扩展潜力。



图2：SVS-Vistek 的 Mikrotron EoSens3.0MCX5高速相机。

技术挑战

粉末床激光熔融工艺的核心挑战在于工艺稳定性。与传统的工艺相比，PBLM 的主要问题在于：只有在工艺结束、以及将制成件从粉末材料中取出后，才能进行缺陷检查。此时若发现了缺陷，通常已为时已晚，无法修复。因此，需要对 PBLM 工艺过程进行在线监控。

PBLM 工艺在线过程监控的主要难点在于其瞬态属性。该属性受熔池湍流、焊接烟雾形成、飞溅或其他粉末床异常现象等因素的影响。工艺过程中的这些潜在干扰现象，增大了测量误差，削弱了直接从熔池中获取信息的精确度。

Aconity3D 公司机器开发项目经理 Lutz Lübbert 表示：“受限于现有的技术水平，PBLM 的工艺监控尚未发展成熟。为了改变现状，我们开发了一种新工艺，其利用高速机器视觉系统收集的数据，记录特定工艺参数对零件制造过程的影响，进而归纳出这些工艺参数的具体效应。”

机器视觉增强视觉洞察能力

为了达到任务所需的最佳高速机器视觉效果，同时满足日常制造需求，Aconity3D 选择了 SVS-Vistek 公司的 Mikrotron EoSens3.0MCX5 高速相机和必要的外围设备。据 Lübbert 介绍，之所以选择与 SVS-Vistek 公司合作的原因非常简单：“大约六年前，我们着手为这项应用挑选一款具备合适的速度和精度的相机时，市场上尚无可

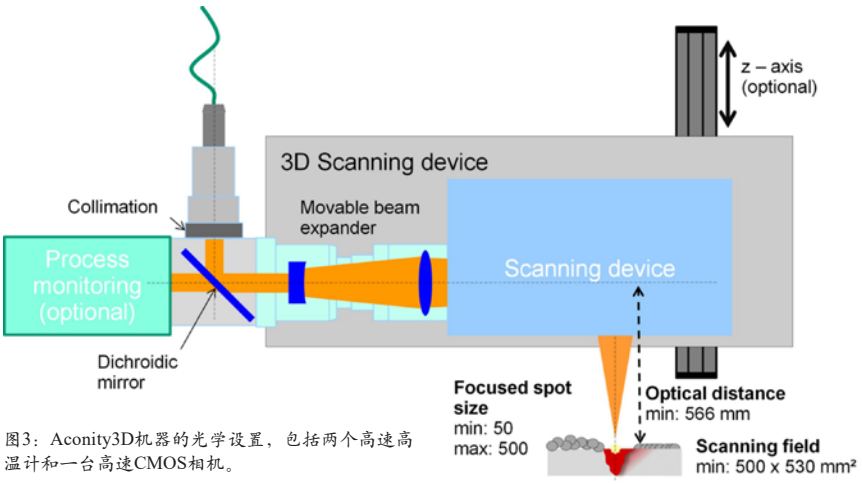


图3：Aconity3D机器的光学设置，包括两个高速高温计和一台高速CMOS相机。

与之媲美的产品。我们从未后悔选择 EoSens3.0MCX5 高速相机。自引入以来，它始终表现稳定，为我们揭示了传感器数据、应用工艺参数与成品零件性能之间深刻的关联性。”

Mikrotron EoSens3.0MCX5 高速相机提供的图像数据，使得 Aconity3D 公司的专家们对 PBLM 工艺有了更深入的了解，Lübbert 解释道：“借助这些高速相机，我们可以在整个构建过程中对比材料层的轮廓扫描，并观察关键部件区域的熔池行为。通过这种方式，我们可以可靠地识别出熔池断裂或不均匀表面等缺陷。若其他激光参数保持不变，则可以通过改变调制频率和调制长度等激光参数，测试其对熔池大小的影响。所得数据扩展了我们对 PBLM 工艺的认知，并找出潜在的影响因素。由此获得的认知，再结合高温测量等其他测量方法，使得 3D 金属打印的材料研究工作更加高效。”

灵活适配，不二之选

DACH 负责 Mikrotron 产品系列销售的区域销售经理 Karl Laderer，解释了为何 Mikrotron EoSens3.0MCX5 高速相机是监控 PBLM 工艺过程的最佳选择。他说：“这款高速相机使用的传感器，允许在 X 和 Y 方向上自由缩放感兴趣区域（ROI）。此传感器的特点在于，通过减少 X 方向上的像素数量，可以提高帧率。基于此，可得到高帧率的小范围感兴趣区域图像。这为相机精准适配不同应用领域的用户需求，提供了极大的灵活性。

据 Laderer 介绍，该相机 3MP 传感器的 8μm×8μm 的像素尺寸，和易于集成的无风扇设计，也是确保在监控 PBLM 过程时获得可靠结果的重要特性。Aconity3D 公司选择了更具性价比的 CXP6 接口型号，该型号相机比同系列的 CXP12 相机更实惠，且同样能轻松处理数据流。

先进技术助力未来发展

Aconity3D 公司研发的在线过程监控工具具备高度兼容性，能够适配该公司旗下的几乎所有系统，包括但不限于入门级系统 AconityMINI，以及目前市场上可选配多激光设置的 AconityTWO 系统。Lübbert 表示，这些系统的目标客户是德国境内和境外的研究机构以及使用 PBLM 工艺的大型公司的研发部门。

他表示：“我们坚信，采用高速视觉系统进行 PBLM 工艺过程的实时监控，是深入理解工艺运行机制、并直接在制造过程中提升零件质量的高效手段，而非依赖于通过制成件后期分析来调整。我们的目标是研发一种检测算法，能够迅速且准确地识别出熔池过大的异常情况，从而立即触发相应的纠正措施。鉴于迄今为止我们在使用相关产品中积累的正面体验，加之我们的机器视觉合作伙伴所提供的宝贵协助，包括在解决编程问题上给予的支持，我们深信 SVS-Vistek 的高速相机将是我们未来系统中不可或缺的核心组件。”❑

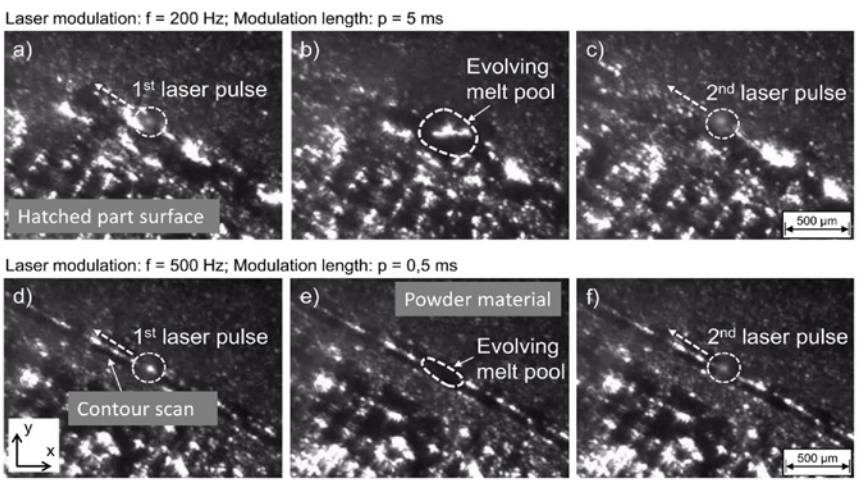


图4：SVS-Vistek 的 Mikrotron EoSens3.0MCX5高速相机，凭借其高分辨率和高速性能，能够精确监测熔池的动态变化以及零件制造过程中参数变化的影响。

玻璃加工

飞秒激光脉冲串实现玻璃的高速高质量加工

可灵活配置的飞秒激光脉冲串（MHz、GHz以及MHz+GHz组合）加工模式，实现玻璃的高质量、高速度加工。

文/LFWC

玻璃是一种关键的工业材料，全球玻璃市场总体规模不断扩大，预计到 2025 年将达到约 700 亿美元，这主要得益于手机 / 电脑、显示、光伏、汽车、建筑等多个行业的持续发展，对玻璃产品的需求不断增长。

市场对玻璃产品需求增长的同时，必然伴随着对玻璃加工需求的增长，包括玻璃的切割、钻孔、打标甚至焊接，而这些加工恰恰为飞秒激光技术提供了大显身手的广阔舞台。

飞秒激光的脉冲持续时间极短（10^{-15}s 量级），在与材料相互作用中几乎不产生明显的热效应，从而获得质量卓越的“冷加工”。飞秒激光可以加工各种材料，特别是对于玻璃等传统的加工方法难以加工的硬脆性材料，飞秒激光技术的不断创新，为这类材料加工提供了一种高精度、高质量的解决方案。

创新的飞秒脉冲串加工模式

飞秒激光虽然能够通过超短脉冲的冷加工方式，实现无与伦比的加工质量，但是飞秒激光加工的最大挑战之一是加工速度慢，无法满足工业化大生产的加工吞吐量要求。

为了实现高质量、高速度加工，业界研究出了“脉冲串加工模式”（burst mode），即将高能脉冲分成多个较小的脉冲，这些小脉冲以 MHz 和 GHz 范围内的脉冲串重复运行。大量实践已经验证，这种方法非常适用于玻璃等材料的微加工应用，在保证高加工质量的同时，还能大幅提升加工吞吐量。

EKSPLA 的 FemtoLux 30 飞秒激光系统使用有源光纤环路(AFL) 技术，能够产生 MHz、GHz 以及 MHz+GHz 模式的脉冲串，并且每个脉冲串中的脉冲数量可调范围为 2-1100 个。此外，AFL 技术还能对脉冲串幅度精确控制，具备极高的应用灵活性。

玻璃铣削（milling）

为了克服飞秒激光加工玻璃在吞吐量方面的限制，可以采用 GHz 脉冲串模式，将高能脉冲分割成多个子脉冲，来提高加工过程的吞吐量。

要充分利用可用的激光功率，是一项具有挑战性的工作，因为非常高的单脉冲能量和高重复频率很可能导致加工缺陷，从而影响工艺质量。为了充分利用可用功率又保证加工质量，可以使用 FemtoLux 30 的 GHz 脉冲串模式，每个脉冲串中包含 70 个子脉冲，

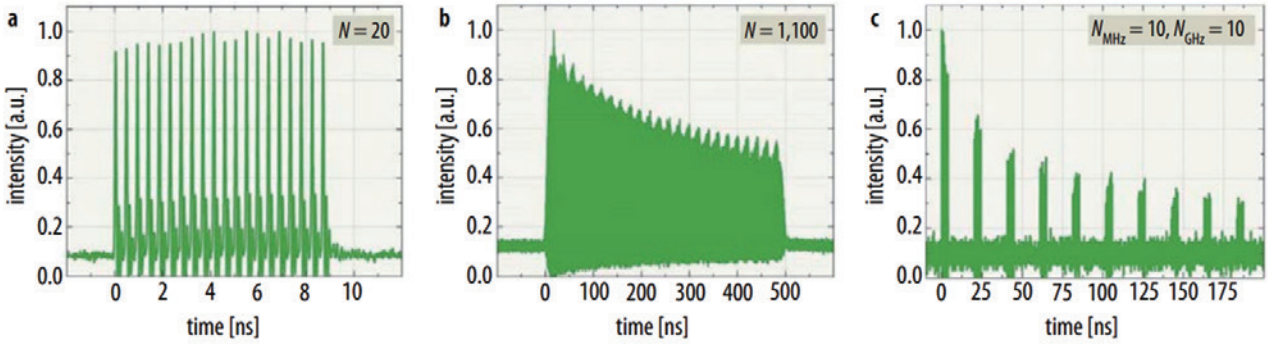
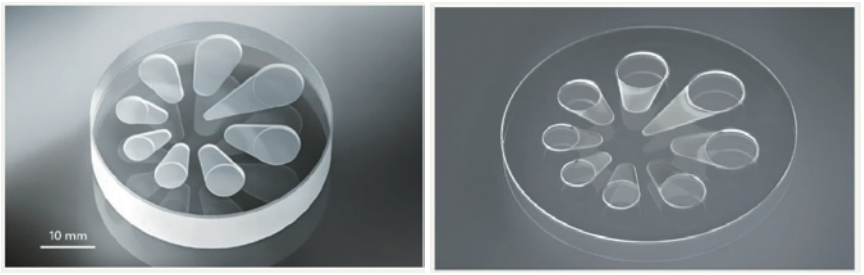


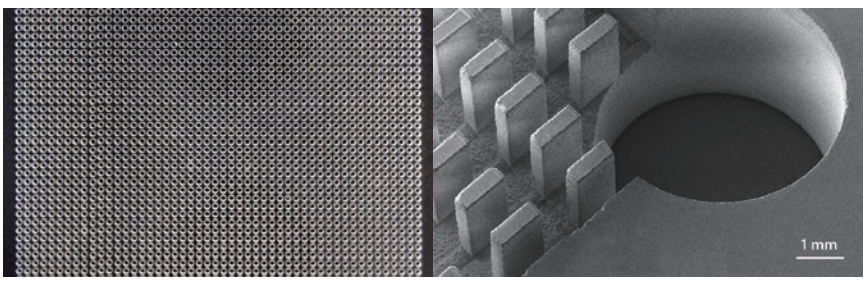
图1：FemtoLux 30不同的GHz脉冲串操作模式：（a）短GHz脉冲串，（b）长GHz脉冲串，（c）MHz+GHz混合脉冲串。（图片来源：EKSPLA）



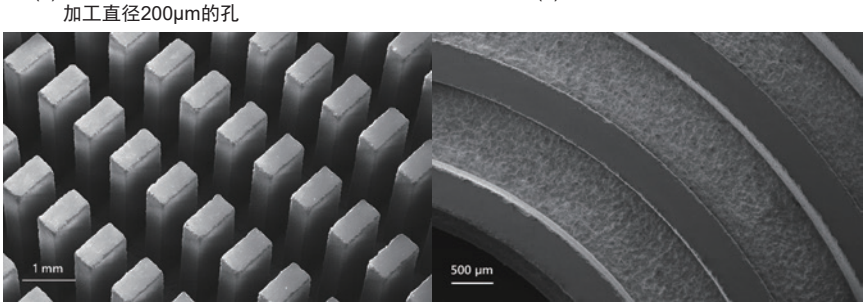
(a) UVFS　(b) 蓝宝石

(c) 石英玻璃　(d) Soda-lime玻璃

图2：利用飞秒激光的GHz 脉冲串模式对各种玻璃进行铣削加工。（图片来源：FTMC）



(a) 自下而上在SCHOTT BF33/D263玻璃上加工直径200μm的孔　(b) 自下而上铣削石英玻璃



(c) 自下而上铣削石英玻璃　(d) 自下而上铣削石英玻璃

图3：在玻璃上进行自下而上的钻孔/铣削加工。（图片来源：FTMC）

子脉冲的重复频率为 2GHz。与单脉冲模式相比，该加工过程的吞吐量增加了 7 倍。玻璃铣削的加工示例如图 2 所示。

自下而上的玻璃钻孔

传统的激光钻孔方法难以实现高深宽比的几何钻孔形状，因为烧蚀的碎屑会在烧蚀区域内积聚，阻碍了进一步的材料去除，导致烧蚀深度饱和。采用自下而上钻孔的方式，将激光束聚焦在样品的底部，这样可以从样品背面去除所有烧蚀产生的碎屑，不会在加工区形成碎屑积聚，从而在玻璃中实现高深宽比的几何形状。

将 FemtoLux 30 的 GHz 脉冲串功能与自下而上的钻孔工艺相结合，可以实现高工艺吞吐量。通过精确灵活地控制脉冲串中的脉冲能量和脉冲数量，可以精确控制玻璃中产生的热应力。利用正确的参数，材料去除过程将转换到激光诱导材料断裂，玻璃以颗粒形式被去除。

在该案例中，在 FemtoLux 30 的 GHz 脉冲串中使用 25 个脉冲，可以实现 600mm^3/min 的材料去除率。这种自下而上的钻孔方式不仅在高生产率方面表现出色，而且提供了形成深度达到数十毫米的各种零锥度孔和通道的能力。加工示例如图 3 所示。

薄玻璃基板加工

加工厚度小于 0.5mm 的薄玻璃基板，由于其易碎性以及在过度热负荷下易开裂等原因，加工过程中面临重大挑战。飞秒激光器是加工薄玻璃基板的理想选择，因为它的超短脉冲持续时间可以最大限度地减少热积累，从而产生卓越的加工质量。

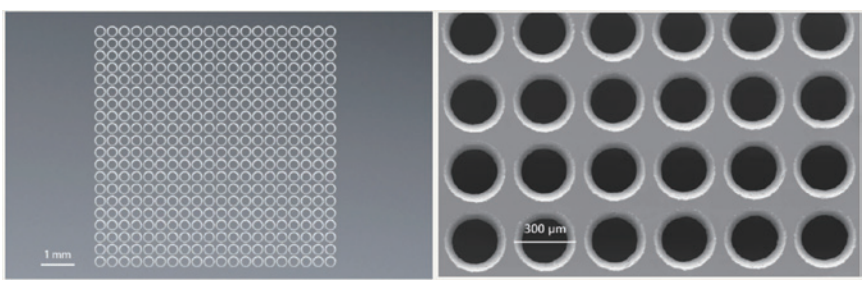
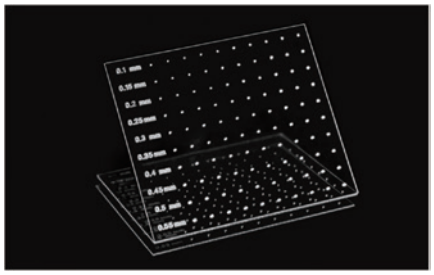
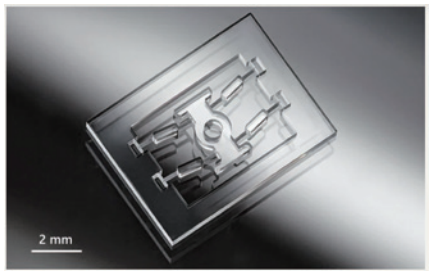


图4：在薄硼硅玻璃上钻300μm孔（左）及其扫描电镜图（右）。



(a) 利用飞秒激光诱导选择性刻蚀，在石英玻璃上实现不同直径的孔。(图片来源: WOP)



(b) 双稳态开关的激光诱导选择性蚀刻。(图片来源: Femtika)

图5：FemtoLux系列激光器用于玻璃的飞秒激光诱导选择性刻蚀。

EKSPLA 的 FemtoLux 30 激光器在加工薄玻璃方面具有很强得优势。它可以灵活的选择加工参数，可以对各种玻璃类型进行工艺优化，得到最优加工参数，最终实现最小碎裂和无裂纹的薄玻璃基板加工。加工示例如图 4 所示。

飞秒激光诱导选择性蚀刻

飞秒激光诱导选择性蚀刻需要两个加工步骤，首先利用聚焦的飞秒激光脉冲进行材料结构改性，然后再进行化学蚀刻，选择性地去除激光改性过的区域。该加工技术能够在透明材料中实现精确的无锥度 3D 微加工，可以实现数百纳米范围内的表面粗糙度，并具有在晶圆级尺度上的操控能力。

FemtoLux 系列激光器非常适合这一加工过程。例如，用熔融石英制造了一种可移动的双稳开关，其臂宽为 20μm。此外，在熔融石英玻璃衬底上制备了各种直径的零锥度玻璃通孔。这些样品证明了飞秒激光诱导选择性蚀刻技术的灵活性，其应用范围包括微机械、半导体等领域。加工示例如图 5 所示。

加工玻璃通孔（TGV）

在玻璃基板上形成高深宽比的通孔（TGV），正成为一个越来越重要的课题，特别是在半导体领域。在飞秒激光器的帮助下，可以在玻璃中形成低锥度和高深宽比的通孔，并且具有低碎裂、无裂纹的光滑孔内壁。

FemtoLux 30 以 GHz 脉冲串模式运行，能以冲击钻孔的方式在玻璃基板上实现高深宽比的通孔。通过将单个脉冲的高能量细分到 50 个小脉冲串中，可以实现深宽比达 80：1 甚至更高的通孔，通过精细控制脉冲串中的脉冲数量和能量等参数，孔深的控制精度可达 0.1μm。这种工艺适用于 AN100、BK7、BF33、D263、EXG 和 soda-lime 等不同 玻璃材料。加工示例如图 6 所示。

另外，也可以利用 FemtoLux 30 的 MHz+GHz 脉冲串模式，结合自下而上的铣削工艺制造通孔。这种方式能形成零锥孔，并且能提高工艺吞吐量，已经证明能在 BF33 和 D263 玻璃中形成直径 200μm 的通孔（见图 3a）。

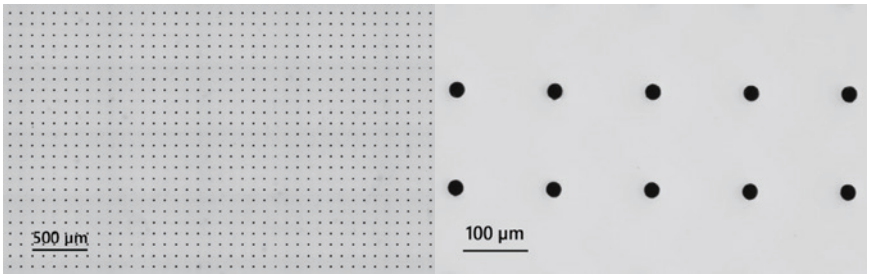
贝塞尔光束玻璃切割

贝塞尔激光光束是实现无切口玻璃切割的有效方法之一。通过贝塞尔光束产生高峰值功率密度的光束，在玻璃内部聚焦，瞬间气化该区域材料形成一个气化带，迅速向上下表面扩散形成裂孔，随后通过机械或热分离等方法进行玻璃分离，从而产生光滑的侧壁，并且只需要一次激光扫描，因此可以实现非常高的切割速度。

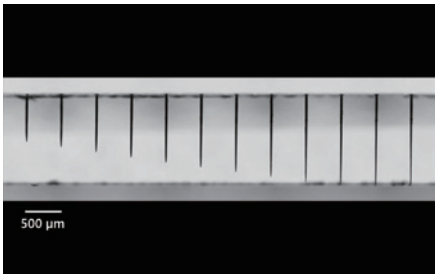
FemtoLux 30 在 MHz 脉冲串模式下工作，与贝塞尔光束相结合，已经证明能够非常有效地切割厚度为 1~4.8mm 的钠钙玻璃。该方法以最小的表面碎屑产生实现了高质量切割。对于 4.8mm 厚的玻璃，切割速度为 80mm/s 时，切割后的侧壁粗糙度低于 0.5μm。另外，也对蓝宝石进行了切割，切割速度达 300mm/s，侧壁光滑。加工示例如图 7 所示。

小结

EKSPLA 的 FemtoLux 30 飞秒激

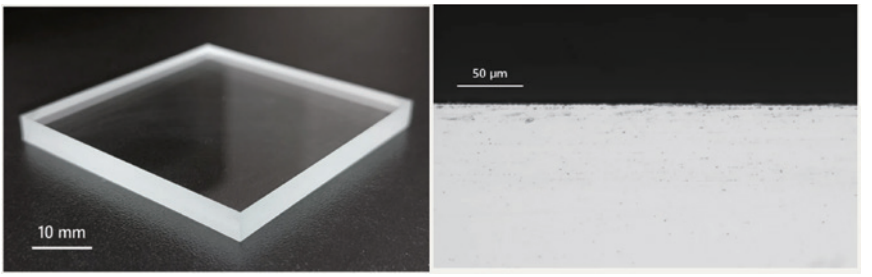


(a) 在EXG玻璃中利用GHz脉冲串加工高深宽比的通孔，右图为放大图。(图片来源: Akoneer)

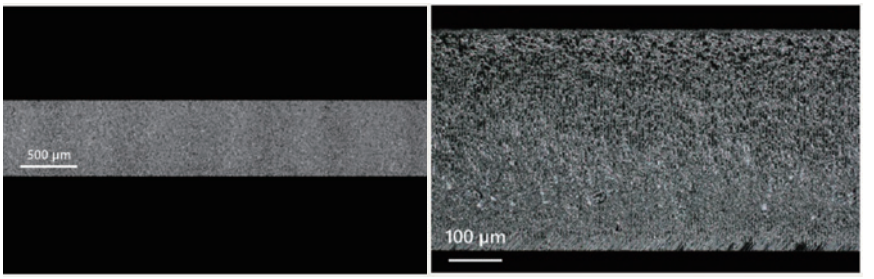


(b) 在soda-lime玻璃中利用GHz脉冲串加工高深宽比的通孔。(图片来源: koneer)

图6：利用GHz飞秒激光脉冲串在玻璃上加工高深宽比的通孔。



(a) 飞秒脉冲串结合贝塞尔光束切割4.8mm厚的钠钙玻璃，右图为切割侧面图。



(b) 飞秒脉冲串结合贝塞尔光束切割1mm厚钠钙玻璃的侧面图

(c) 飞秒脉冲串结合贝塞尔光束切割蓝宝石的侧面图

图7：飞秒脉冲串结合贝塞尔光束切割玻璃和蓝宝石，均获得了光滑的切割面。

光器提供的灵活的 MHz、GHz 以及 MHz+GHz 组合的灵活的脉冲串配置加工模式，为玻璃等传统方法难以加工的硬脆性材料，提供了一种新的加工工具，不仅能提供卓越的加工质量，同时还能大大提升加工吞吐量。

另外，FemtoLux 30 还采用了创新性的冷却方式，它使用一个带有制冷剂的密封系统有效冷却激光器，摒弃了传统的水冷方法。这消除了容易发生故障的水泵，不但节省了空间，还减少了系统维护工作。这些创新使得 Femto Lux 30 不仅高度可靠，而且更易于安装和操作，增加了其在工业微加工应用中的吸引力。❑

上接第22页

激光光束积分器或均质器，是另一种类型的光束整形组件。它们由小透镜阵列组成，将入射光分离成更小的光束。然后，聚焦透镜将小光束叠加到目标平面上。最终输出光束是阵列中每个小透镜产生的衍射图样的总和。它们可以将入射的高斯光束整形为均匀的平顶轮廓。然而，这些系统经常会遇到随机辐照度波动，导致输出的光束轮廓并非完全强度均匀。表 1 将各种光束整形器进行了对比。

平顶光束适用于各种激光系统，在这些系统中，精度和效率比成本更重要。目前市场上有折射型、衍射型和其他类型的光束整形器，激光系统集成商在选择光束整形器时有多种选择。表 1 提供了一些有用的经验法则，但如果想充分利用激光系统，还需要联系光学元件供应商，以获得更多关于选择最佳光束整形器件的专业指导。❑

表1：几种典型的光束整形技术对比

	光束整形器类型		
	折射型	衍射型	光束积分器
整形原理	决定性的	决定性的	随机或准随机
随机波动	低	低	高
对准灵敏度	低	高	高
输出光束均匀性	高	中高	低
成本	高	中	低
占地大小	大	小	小

参考文献

1. A. Laskin et al., Proc. SPIE, 9887, 98872E (Apr. 27, 2016); doi:10.1117/12.2217927.
2. See iso.org/standard/72945.html.
3. M. Eryilmaz et al., Cancers, 10, 1 (Jan. 22, 2018); doi:10.3390/cancers10010025.
4. Y.-J. Hung et al., J. Vac. Sci. Technol., 35, 3 (Apr. 11, 2017); doi:10.1116/1.4980134.
5. A. Laskin et al., Proc. SPIE, 9950, 995002 (Sept. 27, 2016); doi:10.1117/12.2235712.

2025 深圳工业展

ITES®

高端装备 精密制造 · 工业技术 智能制造

ufi Approved Event 国际展览业认证展会

BPA WORLDWIDE EVENTS



第26届 ITES 深圳工业展

2025.3.26-29 深圳国际会展中心（宝安）

五大主题展

- 深圳国际金属切削机床展览会
- 深圳国际金属成形机床展览会
- 深圳国际工业零件展览会
- 深圳国际机器人及自动化设备展览会
- 电子智能制造展

联系方式

0755- 8202 6356
info@iteschina.com
www.iteschina.com

每日工业资讯▼

主办单位

深圳市环悦会议展览有限公司
深圳市协广会议展览有限公司
环盛展览（深圳）有限公司

极性、插损、回损一体化测试探头RD-SP

Santec 推出集 Polarity（极性）、Insertion Loss（插入损耗）和 Return Loss（回波损耗）于一体的 RD-SP 探头，集成了 Santec 新一代 Gen2 积分球和极性测试技术，搭配 Santec 高精度快速插回损测试仪 RLM-100 和光开关 OSX-100，提高了测试效率。

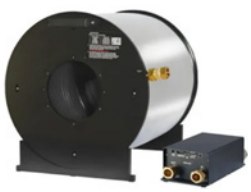

RD-SP

特性：(1) 一次连接完成所有参数测试：Polarity/Insertion Loss/Return Loss 测试。(2) 支持多个探头的复杂路由测试系统：外置型探头便于测试系统灵活配置搭建，配合 RLM-100 和 OSX-100 可最多连接 16 个 RD-SP 探头，实现复杂场景的测量。(3) 配套软件支持批量生产：服务器端 XNS 和操作端 Cable assembly software 的搭配使用，适合于自动化批量生产环境。(4) 测试速度快：快速测量模式下测试一根 MPO-12 跳线两个波长的极性 /IL/RL 总测试时间仅需 35s，在两个波长下插损和回损的测试时间仅需 30s（快速测量模式）。(5) Multifiber assemblies 测试：例如 MPO、MMC 和 duplex LC 等。

Santec，www.samtec.com

Ophir®150kW超高功率激光传感器

MKS 宣布推出 Ophir®150kW 超高功率激光传感器，专为测量高达 150kW 的超高功率水平而设计，适用于工业和国防领域。这款水冷式量热传感器的工作波长范围为 900~1100nm，能够测量 10~150kW 的功率，其极低的反射率（<0.5%）确保了操作的安全性。



150kW 传感器冷却选项包括使用自来水或去离子（DI）水，集成了一个用于处理高功率激光吸收和散热的光束收集器，以及一个用于测量功率水平的单元。该测量单元配备了一个 RS232 接口和一个“智能连接器”接口，可与 MKS 的 Centauri、StarBright、StarLite 和其他 Ophir 智能显示器配合使用；Juno 和 Juno+ 紧凑型 USB PC 接口；Juno-RS、Pulsar 和 Quasar 虚拟功率和电能表；和 EA-1 以太网适配器。可满足应用中对更高功率不断增长的需求，如高功率光纤激光器的开发和测试、定向能量系统以及工业生产中的切割和钻孔等应用。

MKS，www.mks.com

ARM FL20D光纤激光器

Coherent 公司推出 ARM FL20D 光纤激光器，20kW 的超高功率和独特的双环光束配置，能够在多种应用场合中提供更快的焊接速度和更出色的焊接质量。ARM FL20D 的独特设计为一个中心梁和两个同轴环梁，均具有独立控制。这一创新配置能实现铸铝等挑战性材料的理想焊接效果，并能显著降低成本并提高工艺效率。

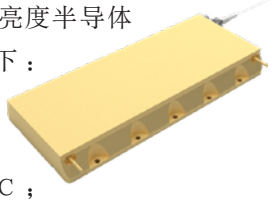


核心优势：(1) 功率升级：最高可达 20kW，提升焊接速度。(2)双环配置:精准调控焊接过程,确保焊接质量。(3)无焊丝焊接:多领域应用成本节约,效率倍增。(4)品质卓越:即使面对铸铝等难焊材料，也能实现稳定焊接效果。

Coherent，www.coherent.com

750W 976nm 220μm锁波长高亮度半导体激光器

锐科激光推出全新锁波系列半导体激光器，其中一款 750W 976nm 220μm 锁波长高亮度半导体激光器的性能（水冷 25℃）如下：中心波长 976±0.5nm；输出功率≥750W；光纤芯径 220μm；光谱宽度≤0.5nm；温漂系数 0.02nm/℃；电光转换效率≥50%；输出光 NA（95%）≤0.17；防反波段 1030~1200nm。

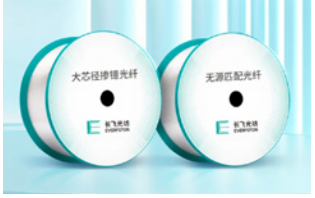


产品亮点：(1) 20~35℃水冷条件下，高功率全电流锁定；(2) 高亮度、小 NA 设计，极大避免合束时引发的高温问题，为下游使用创造有利条件；(3) 壳体高兼容性，轻量化结构版本产品同步发行，散热性能优良，既轻又可靠；(4) 模块采用独特的散热设计，温度分布更均匀，芯片结温低，热风险低，可靠性升级。

锐科激光，www.raycuslaser.com

高能量脉冲大芯径掺镱光纤

长飞光坊的高能量脉冲系列大芯径掺镱光纤，基于领先的光纤制备技术，实现超大尺寸芯棒和大芯包比光纤开发，具有先进的光学和组分设计、光学波导和掺杂元素分布均匀，具备优异的光束质量、高斜率效率、高非线性阈值、抗光子暗化等特性。



具体特性：(1) 平均功率可达 2kW，单脉冲能量最高可达 200mJ，峰值功率可达 2MW。(2)高效率、低损耗。(3) 超大尺寸，掺杂芯棒制备技术。制棒效率和光纤产出率大幅提升，芯径尺寸≥400μm，实现大芯包比。光纤径向和轴向一致性优异，径向折射率波动控制在 2×10^{-4} 水平。

掺镱光纤可实现高单脉冲能量、高峰值功率的稳定激光输出，并结合配套的无源匹配光纤提供一体化解决方案，广泛应用于汽车制造、3C 电子、轨道交通、船舶制造等领域。

长飞光坊，www.everfoton.com

980/1470nm高功率、低热阻、低Smile传导冷却半导体激光器

新一代 100W 980nm 和 30W 1470nm LCS 传导冷却激光器，采用炬光科技自研的核心键合技术，克服了传统的 Indium 软焊料和 AuSn 硬焊料键合方式的热电迁移、疲劳特性差及热阻增加等挑战，实现了低应力、低热阻及超低 Smile 效应的完美平衡，显著提升了 GaAs 或 InP 基半导体激光器的性能和可靠性。与传统键合技术相比，新键合技术生产的新型 LCS 传导冷却激光器，光功率提升 30% 以上，热阻降低 20%，产品性能和可靠性在国内外同类产品中均处于领先水平。



新型 LCS 系列产品在 Smile 效应控制方面表现卓越，平均值仅为 0.56μm，超过 90% 的 Smile 值小于 1μm，远优于传统键合工艺，为高精度光束整形提供了设计的灵活性与实现可能，助力客户在光学整形、光纤耦合等应用中取得更佳效果。

目前可提供 LCS 系列 980/1470nm 激光器样品及小批量生产能力，交期灵活。

炬光科技，www.focuslight.com

1064nm微芯片激光器MCL-1064

BATOP 推出微芯片激光器 MCL-1064-150，该激光器包含一个半导体泵浦源以及一个软件控制的电子模块。该微芯片基于 Nd:YVO_4 激光晶体和具有半导体可饱和吸收体的输出耦合器构成。



微芯片激光器 MCL-1064-150-f 可提供光纤耦合输出版本，输出光纤为带有 FC/APC 接口的单模保偏光纤。

MCL-1064-150 特性：(1) 紧凑型激光模块，输出 1064nm 的激光脉冲；(2) 脉冲重复频率可通过 USB 接口和控制程序设定，可高达 500kHz；(3) 具备独立运行模式，可在用户预先配置的重复频率下工作，无需软件控制；(4) 能够与外部时钟同步或按需产生脉冲。

该激光器适用于微加工、激光雷达、精密测量、频率转换、种子激光等应用领域。

顶尖科仪，www.psci.cn

用于快速成型的双束光纤激光器

IPG 专为增材制造设计的新型激光器 YLR-1000/3000-AMB（中心光束功率 1kW+ 环形光束功率 3kW）和 YLR-2000/2000-AMB（中心光束功率 2kW+ 环形光束功率 2kW），采用双光束设计，可独立控制同时发射的中心光束和环形光束，实现更好的精度、效率和可靠性。

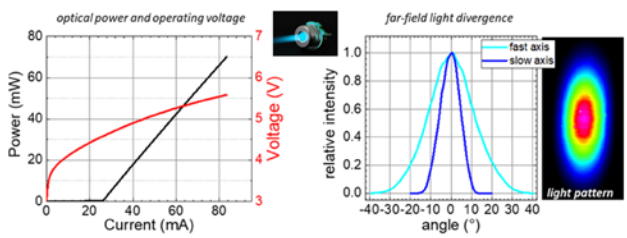


YLR-1000/3000-AMB 激光器在 Ti-6Al-4V 材料上实现了超过 324cm^3/h 的成型速度，密度超过 99.9%；单模和多模输出结合，总功率达 4kW，可提供多功能加工方案；通过独立调节核心与环光束，实现更优化的热量分配，促进快速且高质量的建设；紧凑设计，采用 2U 19 英寸（482.6mm）机架式设计，便于集成，大大节省空间。

YLR-AMB 系列适用于航空航天组件、医疗设备及定制工具等高性能应用领域。

IPG，www.ipgphotonics.com

488nm法布里–珀罗激光二极管



488nm 法布里 - 珀罗激光二极管（FP-LD）基于氮化铝铟（AlInN）层，适用于荧光显微镜、流式细胞术和光谱学。它们采用非冷却 TO56 Can 封装，自由空间输出，可提供超过 50mW 的连续波（CW）光功率。14 针蝶形（BTF）封装版本，具有 SMF 或 PMF 输出，可提供 20~30mW 的光功率。

Exalos，www.exalos.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/015-8611	7
ITES China Expo	ITES深圳工业展	www.iteschina.com	37
LASERFAIR SHENZHEN 2025	第十八届深圳国际激光与智能装备、光子技术博览会	www.laserfair.cn	IFC
2025 慕尼黑上海光博会		www.world-of-photonics-china.com.cn	IBC

文章投稿指南

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

具体要求

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

发布新产品投稿指南

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

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

eFOCUS VIDEO Magazine Webcast
www.laserfocusworld.com.cn

行政及销售人员 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

HK Office (香港办公室)

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

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

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

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

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

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

US Offices

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

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

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

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

销售人员 Sales Offices

China (中国)

Shanghai (上海)
Tel: 86 21 6251 1200

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

Amber Li (李歆), amberl@actintl.com.hk

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

Season Ji (季一民), seasonj@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

慕尼黑上海光博会

LASER World of PHOTONICS CHINA

20 YEARS OF LASER CHINA

2025年3月11日至13日

上海新国际博览中心-3号入口厅

慕尼黑上海光博会

20周年盛典 致，追光的你！

扫码即刻注册参观

激光器与光电子

激光智能制造

检测与质量控制

光学元器件及材料

生物医学光子学

光学制造

集成光子学

红外技术与应用

LaserFocusCon
激光聚会 2025

2025激光技术创新及产业应用交流会

2025.5　中国 苏州

主题峰会：激光技术创新下的应用破局与市场趋势

- 中国工业激光加工市场现状与增长机会
- 碟片激光器的发展与应用突破
- 国产激光芯片最新进展
- 新型半导体激光器的发展及应用
- VCSEL激光器技术最新进展及应用情况
- 蓝光/绿光激光器最新进展及工业应用
- 激光技术与人工智能、大数据、云计算等先进技术的融合
- 水导激光技术及工业应用
- 激光微纳加工技术发展与应用
- 先进的光束整形与控制技术

分会场1：激光焊接技术的进展及应用

- 高反材料的精密稳定焊接
- 激光锡焊技术进展及应用
- 异种材料的激光焊接
- 激光电弧复合焊技术
- 激光玻璃焊接技术及应用
- 焊缝质量实时跟踪与监控技术
- 其他相关话题

分会场2：超快激光技术进展与应用

- 飞秒激光器进展及工业应用前景
- 超快激光器在稳定性方面的新突破
- 光纤超快、固体超快、碟片超快技术进展
- 紫外飞秒技术进展及工业应用
- 玻璃、半导体晶圆、显示屏加工应用
- 超快技术与AI结合的创新应用
- 其他相关话题

分会场3：增材制造与激光熔覆技术及应用

- 金属增材制造效率、精度及工艺优化
- 复合材料的增材制造及应用前景
- 多材料增材制造及应用
- 激光沉积过程实时监控与控制
- 增材制造/熔覆过程的环保可持续发展
- 增材制造新材料研究及工业应用前景
- 数字孪生和大数据分析在增材制造中的应用
- 其他相关话题

分会场4：激光清洗技术进展及应用

- 提升清洗效率及降低表面损伤
- 激光清洗过程中的精确能量控制
- 激光清洗与激光焊接的工艺融合
- 激光清洗的工业应用及发展前景
- 激光清洗的安全性及环保性措施
- 大型复杂构件的高效激光清洗
- 激光清洗与AI的结合及发展
- 其他相关话题







主办单位　ACT INTERNATIONAL　大会媒体　激光世界 LaserFocusWorld China　工业激光应用　LASER FOCUS WORLD

支持媒体　视觉系统设计 Vision Systems China　工业AI　一步步新技术　半导体芯科技 SILICON CHINA　化合物半导体 COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

咨询会议　关注公众号