光学和光电子产业的主导刊物 www.laserfocusworld.com.cn 2024年3/4月 第2期
ISSN: 1817-6917

激光世界
LaserFocusWorld® China

全球光子学市场继续保持稳健增长态势 10

飞秒激光蚀刻磷酸盐玻璃的意外收获 15

毫焦级500W飞秒激光器背后的技术奥秘 16

高功率皮秒激光加工电池极片及钙钛矿电池 41

如何为清洗应用选择合适的激光源? 45

ACT INTERNATIONAL
ENDEAVOR BUSINESS MEDIA

微信公众号

LaserFocusCon 激光聚会 2024

激光技术创新及产业应用交流会

Laser Technology Innovations and Industrial Applications Exchange Conference

2024年8月7日-8日　中国 • 苏州

- 专业行业交流平台，多渠道多模式深度融合交流
- 覆盖激光行业全产业链平台，助力产业交流互联
- 汇聚激光技术及应用领域专业论坛，精准资源对接
- 系列增值服务，全方位市场推广，实现展前、中、后持续曝光
- 线上线下整合营销，助力提高品牌知名度

展览展示 | 技术报告 | 专家论坛

致力于打造激光行业专项技术及细分领域应用的交流平台

主办单位　ACT INTERNATIONAL

大会媒体　激光世界 LaserFocusWorld China　工业激光应用 INDUSTRIAL LASER APPLICATIONS · CHINA　LASER FOCUS WORLD

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

技术推动产业　产业带动技术

8月7日 主题峰会

激光技术最新进展与市场发展趋势

- 中国工业激光加工市场现状与增长机会
- 半导体激光器芯片领域的创新及市场趋势
- GaN激光器最新研究进展与应用
- VCSEL激光器技术最新进展及应用情况
- 碟片激光器的发展与应用突破
- 蓝光技术进展及应用

8月8日 专题分会场

分会场一 激光焊接技术及焊缝质量跟踪监控

- 焊缝质量实时跟踪与监控技术
- 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
- 激光手持焊产品及市场机遇
- 其他相关话题

分会场二 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
- 其他超快相关话题

分会场三 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
- 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
- 其他相关话题

分会场四 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
- 其他相关话题







展示范围

激光器

- 光纤激光器
- 固体激光器
- 半导体激光器
- CO2 激光器
- 准分子激光器
- 超快固体激光器
- 超快光纤激光器
- 紫外激光器
- 蓝光 / 绿光激光器
- 量子级联激光器
- 碟片激光器
- 激光芯片
- 激光二极管
- Bar 条 / 叠阵

光学材料、光学元件和器件

- 光学晶体
- 芯片材料
- 光学材料
- 激光增材制造原材料
- 光纤材料
- 光学透镜
- 光学棱镜
- 光学窗口
- 偏振元件
- 滤光片
- 波片
- 反射镜
- 分光镜
- 匀光元件
- 光栅
- 整形元件
- 光纤
- 光纤准直器
- 光纤放大器
- 光纤耦合器
- 波分复用器
- 光电开关
- 光隔离器
- 光学调制器
- 光学平台
- 光具
- 激光电源
- Q 开关

激光加工系统、组件及周边

- 激光切割
- 激光焊接
- 激光清洗
- 增材制造
- 激光熔覆
- 激光打标
- 激光雕刻
- 激光划线
- 激光钻孔
- 微加工与宏加工激光系统
- 光谱仪
- 光束质量分析仪
- 功率计 / 能量计 / 探头
- 激光测试测量系统
- 激光加工头
- 扫描振镜
- 焊缝跟踪监测系统
- 冷却系统
- 保护气体
- 数控系统
- 运动控制
- I/O 设备
- 工装夹具
- 机械臂
- 机器人
- 各类光学软件

商务咨询　参会报名　媒体合作　了解更多

市场观察



10 全球光子学市场将继续保持稳健增长态势

预测显示，全球光子学市场依然会继续其几十年来保持的稳定有力的增长态势。



12 OpenAI 7万亿美元的AI芯片梦，对光子学意味着什么？

人工智能（AI）处理器的进步，将需要能够改进存储器和通信电路性能的创新举措。这将为光子学带来什么机会？

访谈

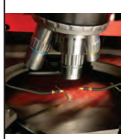


13 与创新者为伍，做时间的朋友

——专访罗悉激光技术（上海）有限公司董事总经理丁元东先生

技术中心

15 飞秒加工



飞秒激光蚀刻碲酸盐玻璃会发生什么？

飞秒激光诱发玻璃中形成一种活性光电导材料，其在紫外和可见光的照射下，能在数月内稳定地产生电流。

16 飞秒激光器



毫焦级500W飞秒激光器背后的技术奥秘

500W毫焦级飞秒激光器实现了高功率飞秒激光器又一个新的里程碑，本文将介绍其背后的技术支撑。

19 超快激光器



工业超快激光器正迈向千瓦级时代

Yb:YAG碟片超快激光器，平均功率超过1kW、脉冲宽度小于10ps、单脉冲能量大于1mJ，为精密加工提供了新工具。

22 量子光学



量子光学技术展示半导体内光与物质相互作用的新方式

光子级联相关光谱学能窥视量子领域：创建光子的时间图像并揭示它们的传播倾向，进而了解它们如何相互作用。

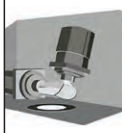
25 光束偏转



如何选择光束偏转技术？

本文详细比较了六种光束偏转系统，并提出了设计光子仪器时需考虑的注意事项。

27 运动控制



使用单个运动控制器控制激光扫描头和伺服平台的优势

使用单一Automation1控制平台控制激光扫描头和伺服系统，能够对激光加工过程实现精密控制，满足苛刻的加工要求。

31 微纳加工

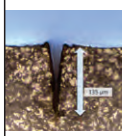


用于激光微纳加工的激光能量控制模块

ACS激光能量控制模块LCI，旨在满足最苛刻的激光微纳加工应用，用成熟的方案减少上市时间和用户成本。

工业应用专栏

35 脆性材料加工



高功率纳秒绿光激光器高效切割和划刻氧化铝陶瓷

使用功率70W的纳秒绿光激光器切割氧化铝陶瓷，在合适的重复频率和加工速度下，加工的沟槽光滑，产量高。

37 塑料焊接



功率与速度的最佳配合下980nm半导体激光器成为塑料焊接利器

980nm半导体激光器在合适的夹具、激光功率和焊接速度的最佳工艺下，能实现精密可靠的塑料焊接。

39 激光切割



纳秒脉冲光纤激光器化身多功能切割工具

TruPluse nano纳秒脉冲光纤激光器可切割锂电池极耳、硅基太阳能电池、高反/贵金属、细线、非金属等众多材料。

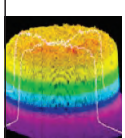
41 超快加工



高功率皮秒激光器加工电池极片及钙钛矿电池

利用高功率皮秒激光器切割电池极片和划刻钙钛矿电池，均实现了高质量的精密加工效果。

45 激光清洗



如何为清洗应用选择合适的激光源？

在激光清洗中，需综合考虑要清洗的材料、不损伤基材以及清洗效率等诸多因素，选择合适的脉冲或连续激光器。

商业论坛

51 好奇心和对知识的渴望，成就超构光学领域的佼佼者

5 编者的话
6 前沿简讯
53 产品撷英
56 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

SCANLAB
innovators for industry

The New intelli*SCAN* IV
Smart and Highly Dynamic Scanning



LASER World of PHOTONICS CHINA

Visit us at Booth #1336, Hall W1
at SNIEC, Shanghai,
March 20–22, 2024

- Outstanding dynamics for more throughput
- Particularly easy integration and installation
- Compact design ideal for multi-head applications
- Ready for *SCAN*motionControl

Laser Scan Systems for Exceptionally Demanding Applications

QUALITY MADE IN GERMANY

www.scanlab.de

MARKET WATCH



10 Photonics market continues the steady and robust growth



12 Chasing the $7 trillion AI semiconductor dream: What's in it for photonics?

INTERVIEWS



13 Collaborate with innovators and being a friend of time
——interview with Mr. Ding Yuandong, Managing Director of Luxinar

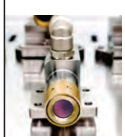
TECHNOLOGIES CENTER



15 Femtosecond Processing
What happens if you etch tellurite glass with a femtosecond laser?



16 Femtosecond Lasers
The core technologies behind the 500W mJ level femtosecond lasers



19 Ultrafast Lasers
Industrial ultrafast lasers are moving towards the kilowatt level era



22 Quantum Optics
Quantum optics technique reveals new type of light-matter interaction within semiconductors



25 Beam Steering
How to select beam steering technology

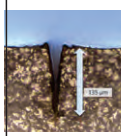


27 Motion Control
The benefits of controlling a laser scan head and servo stages from a single motion controller



31 Micro-Nano Processing
Laser micro-nano processing – ACS energy control module LCI

INDUSTRIAL APPLICATIONS COLUMN



35 Brittle Material Processing
Cutting and engraving of alumina ceramics with high power nanosecond green laser



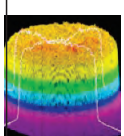
37 Plastic welding
980nm diode laser could achieve good plastic welding under the optimal combination of power and speed



39 Laser Cutting
Nanosecond pulse fiber laser act as a multifunctional cutting tool



41 Ultrafast Processing
High power picosecond laser processing of battery electrodes and perovskite batteries



45 Laser Cleaning
How to choose a suitable laser source for cleaning applications?

BUSINESS FORUM

51 Curiosity and thirst for knowledge made the outstanding CEO and Metalenz company in the field of meta-optics

5 EDITOR'S NOTES
6 LEADING EDGE SNAPSHOTS
53 PRODUCTS HIGHLIGHTS
56 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
© 2024 版权所有 翻印必究

不断突破边界，创新为应用注入革新力量

3月8日，凯普林光电在官微发布全球首台雷霆120kW工业光纤激光器（p53），再次令业界瞩目，这是继去年的100kW产品之后，其在输出功率上的又一次提升。短短几年内，国产万瓦级工业光器的功率不断飙升，已经从40kW发展到60kW、80kW再到100kW、120kW，不久的将来甚至还会有更高功率的产品出现。

随着万瓦级功率不断被刷新，“削铁如泥”早已不再是武侠小说中某把宝剑的特有神威，如今的万瓦、十万瓦级的光纤激光器，已经将削铁如泥的故事在真实的生产车间中一遍遍地书写。据悉，凯普林雷霆120kW产品通过高速空气切割技术，能够轻松切割300mm的超厚板，而且无论是切割质量还是切割速度，都较传统工艺更胜一筹。

尽管最初大家对如此高功率的实际应用情况多少存有质疑，但是出货数据坚挺地证明了市场的青睐，万瓦级、十万瓦级激光切割正在以取代等离子切割的势头，在厚金属板材切割领域引发一场不断突破边界的变革。激光切割在加工质量、加工效率、成本及节能环保等方面的优势，将最终受益于行业终端用户。

以上是面向宏加工应用的激光功率的迅猛飙升；同样面向微加工应用的工业超快激光器，其功率也在不断攀升，正在向千瓦级时代迈进。近日，中辉激光表示，其首台千瓦级皮秒激光器在苏州正式下线，其平均功率超1000W、脉冲宽度小于10ps、单脉冲能量大于1mJ（p19）。值得关注的是，中辉激光是国内致力于碟片激光器的新兴公司，本次千瓦级产品的发布，将国内皮秒激光器的功率从百瓦量级提升至千瓦量级。

飞秒激光器作为当前工业微加工应用领域最前沿的超快激光源，其功率也在节节高升。近期，国内致力于工业级飞秒激光器的奥创光子，新推出了平均功率达到500W的毫焦级飞秒激光器，并已实现全球首家小批量出货（p16）。据悉，该产品已得到相关终端行业客户的测试验证。飞秒激光器创下的这一新的里程碑，将飞秒的功率从“小几百瓦”带到了“大几百瓦”，另据奥创光子透露，千瓦级毫焦级的飞秒激光器正在研发中，预计将于今年年底上市销售。

每登上一个科技新高地，背后都少不了创新。无论是面向宏加工的十万瓦级削铁如泥的“利剑”，还是面向微加工领域精工细作的“精细刻刀”，都离不开技术创新的支撑，比如凯普林的TCT芯片一体化技术、中辉激光和奥创光子各自的放大技术。

尽管激光市场内卷依然厉害，但内卷不该是一个行业的常态。正如罗悉激光董事总经理丁元东先生所说，“内卷的本质是创新不足”（p13）；那么摆脱内卷泥潭的最根本途径，是致力于通过技术创新不断去解决实际问题。❑

本刊编辑部

前沿简讯 Leading Edge Snapshots

水导激光比超快激光更具加工优势：兼具高精度与高效率

连续激光和长脉冲激光的加工速度快，但产生的热影响区较大，容易形成重铸层。超短脉冲激光直接将材料转化为等离子态，实现材料的喷发去除，理论上可以达到“冷加工”的效果，但加工效率较低。相较于超短脉冲激光，短脉冲激光的性价比更高，但其本质上仍是一种热基工艺，存在重铸层、热影响区、微裂纹等问题。

为解决以上激光加工过程中出现的问题，水导激光技术得以成功开发。其基本原理是将大功率脉冲激光束耦合到水射流之中后，再作用于工件表面实现加工的过程，这样不仅能保证加工精度，还能确保加工区域的干净和冷却。

由于绿光在水中传输损耗小，而且波长短，具有较高的光能转化效率，材料对于绿光的吸收较高。相比于红外激光器，532nm 激光器在深加工方面利用率较高，已经成为水导激光技术应用的标准光源。

英谷激光的 GP 系列水导绿光激光器能量大，光束质量好，峰值功率高，在加工效果方面表现出色。相较于超快加工，水导激光加工有如下优势：

- 无损材料，被加工区域几乎无热影响区、无变形，无污染；
- 高切割速度，在保证加工质量的同时，可实现更快的加工速度；
- 独特的平行激光束，提高加工精度，切面无锥度，材料损耗小。



图1：英谷激光GP系列水导激光器。

水导激光可应用于半导体材料、陶瓷、硬质合金和复合材料等超硬脆性材料的加工。水导激光拥有巨大的市场应用空间，能有效提升生产效率，为行业发展注入新动能。

目前全球工业用超硬材料主要为工业金刚石，其中超过 90% 为人造金刚石。我国作为全球第一大人造金刚石生产国，垄断了全球大约 95% 工业金刚石市场份额。2021 年我国金刚石单晶和金刚石微粉市场规模约为 42.1 亿元和 17.5 亿元，预计到 2025 年工业金刚石需求约达 101 亿元，复合年均增长率约为 13.9%。

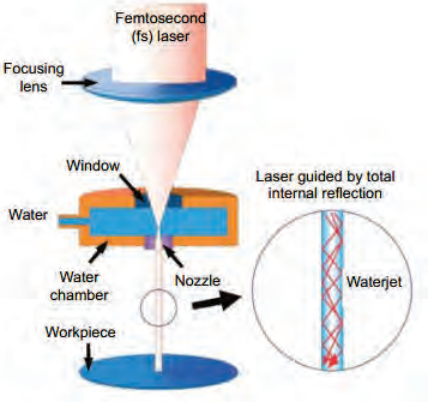


图2：水导激光切割的基本原理图。

综合来看，工业金刚石应用领域广阔，可用于光伏切割、消费电子、蓝宝石衬底切割、精密机械加工等领域，市场规模大。

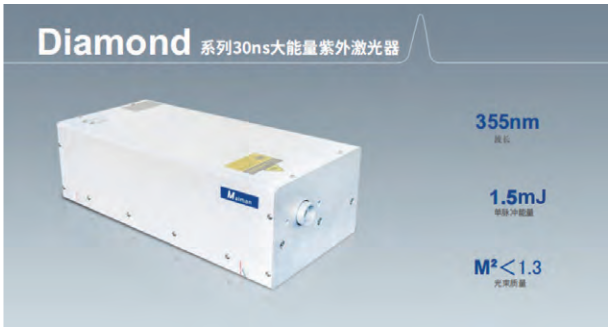
水导激光作为金刚石加工的不二之选，可以实现高效高质量加工。水流的直径小（25 ~ 150μm），加工出来的金刚石切缝窄、表面无烧蚀。水射流对激光的导向作用，使得激光能量呈近似的平顶均匀分布，激光聚焦的景深长，增大了加工的深径比，不会出现“干激光”加工时的锥形切口、边缘不整齐、毛刺等现象。高速水射流在激光脉冲间隙冷却材料，不仅可以极大地减小热影响区，降低材料的热变形和热损伤，还可以带走熔融材料。水束光纤的工作距离大，且无需激光焦点与加工位置高精度对准。

除了工业金刚石，GP 绿光水导激光器还适合加工钻石，加工过程无热损耗，无需调整激光焦点，操作方式便捷，能以最低的切割损耗完成超高成品率，切割出来的钻石拥有超高的精度和平整的切面。（来源：英谷激光）。❑

大能量紫外激光器为金刚石晶圆研磨开辟高效无损新路径

在半导体产业迅猛发展的今天，高性能材料（如金刚石晶圆）的加工技术，成为行业的重大挑战。传统的机械研磨方法因效率低下、成本高昂以及对大尺寸晶圆（如两英寸）存在碎裂风险而受到限制。针对这一问题，梅曼公司推出的 DIAMOND 系列紫外激光器，展现出了解决行业难题的巨大潜力，有望成为金刚石晶圆研磨领域的关键技术。

DIAMOND 系列激光器特点鲜明，波长 355nm、单脉冲能量＞ 1.5mJ，具备优越的光束质量（M^2 ＜ 1.3）。这些技术指标不仅预示着在金刚石晶圆加工上的新应用可能，而且该系列激光器已经在金刚石切割和刻面等相关加工领域得到应用，并取得了较好的效果。这一实践经验为其在金刚石晶圆研磨领域的潜在应用，提供了坚实的基础。



该系列激光器在金刚石晶圆研磨方面展现出了显著潜力，业界正在进行深入探索。其在金刚石其他加工领域的成功应用，已经证明了这种激光器的高度可行性，这也在很大程度上预示着其在提升金刚石晶圆加工技术方面的巨大潜力。这些激光器的非接触加工方法、低热量输入和提升的加工速度等优点，不仅展示了解决半导体行业中金刚石晶圆加工难题的能力，而且也明显提升了金刚石晶圆的加工效果和生产效率。

随着 DIAMOND 系列激光器在金刚石晶圆研磨领域的进一步研究和应用，其有望为半导体产业提供一种更为高效、经济和安全的金刚石晶圆加工技术。❑

HAUCORE 山东华光光电子股份有限公司
先进光电子产品和领先解决方案的服务商
光纤耦合（FH）系列
宏通道叠阵（HD）系列
微通道叠阵（WD）系列
单管封装系列
传导冷却叠阵（GD）系列
外延片系列
光纤耦合（FM）系列
单巴封装系列
芯片巴条系列
光纤耦合（FT）系列
直接半导体系统
微信公众号
联系电话:0531-88877508/地址:山东济南高新区天辰路1835号/网址:www.haucore.com

快速无磨损的 CFRP 高精度激光微钻孔工艺

德国汉诺威激光中心（LZH）的科学家们宣布，他们已成功开发出一种自动化激光钻孔工艺，该工艺能够高效地加工碳纤维增强塑料（CFRP）等复合材料。他们表示，这一工艺在轻质结构和隔音等方面的应用中展现出巨大潜力。

CFRP 作为一种卓越的轻量化材料，在汽车和航空器等领域的结构制造中扮演着重要角色。为了进一步优化 CFRP 及其夹层材料的加工流程，LZH 的科学家们与 Invent 和 KMS 技术中心紧密合作，共同研发出了这一独特的激光工艺。

在这一新工艺中，激光束通过特制的衍射光学元件被分割成多个部分光束，这些光束能够同时击中材料的不同位置，从而实现高效的多孔加工。理想情况下，该工艺能同时处理多达 25 个部分光束，使得打孔时间缩短至原来的 1/25，每个孔的加工时间不到 1/10 秒。这种速度是传统方法所无法比拟的，而且即使是处理较大的孔洞，也能保持高效的加工效率。

值得一提的是，这种激光工艺能够制造出直径范围在 0.25~1.2mm 之间的微小孔洞，这一精度远超过传统机械方法在夹层和 CFRP 材料上所能实现的精度。而且，通过 KMS 技术中心开发的光学机械装置，科学家们还能够在不更换工具的情况下，灵活调整孔径大小和加工模式，进一步提高了工艺的适应性和灵活性。



此外，这种激光微钻工艺在航空领域也展现出了巨大潜力。例如，在减少飞机噪音排放方面，发动机的吸声包层元件，就需要在大面积上制造大量小孔。由于激光微钻是无接触加工方式，因此不会产生压力和磨损，从而避免了因钻头磨损导致的高成本和质量问题。在实际声学测试中，项目合作伙伴 Invent 对激光钻孔夹层板的隔音性能给予了高度评价，称其表现“非常好”。❑

中科院半导体所研制出室温连续功率 4.6W 的 GaN 基紫外激光器

氮化镓（GaN）基材料被称为第三代半导体，其光谱范围覆盖了近红外、可见光和紫外全波段，在光电子学领域有着重要的应用价值。

GaN 基紫外激光器由于波长短、光子能量大、散射强等特点，在紫外光刻、紫外固化、病毒检测以及紫外通信等领域有着重要应用前景。但由于 GaN 基紫外激光器基于大失配异质外延材料技术制备而成，材料缺陷多、掺杂难、量子阱发光效率低、器件损耗大，是国际半导体激光器领域研究的难点。

中国科学院半导体研究所赵德刚研究员、杨静副研究员长期聚焦于 GaN 基光电子材料与器件研究。2016 年研制出 GaN 基紫外激光器；2022 年实现电注入激射 AlGaN 紫外激光器（357.9nm）；同年实现室温连续输出功率 3.8W 的大功率紫外激光器。

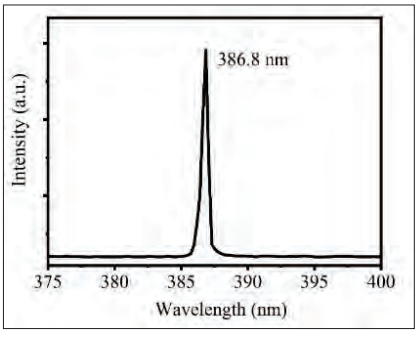


图1：大功率紫外激光器的激射光谱。

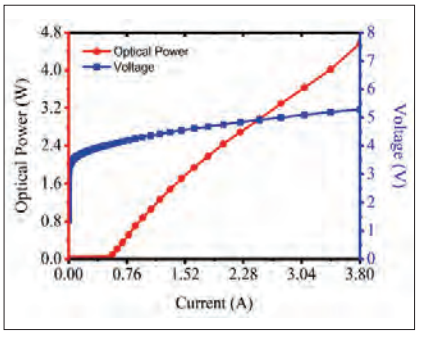


图2：紫外激光器的光功率-电流-电压（P-I-V）曲线。

近期，该团队在 GaN 基大功率紫外激光器方面又取得了重要进展，发现了紫外激光器温度特性差主要与紫外量子阱对载流子的限制作用弱有关，通过引入 AlGaN 量子垒新结构等技术，显著改善了大功率紫外激光器的温度特性，使紫外激光器的室温连续输出功率进一步提高到 4.6W，激射波长为 386.8nm。图 1 为大功率紫外激光器的激射光谱，图 2 为紫外激光器的光功率 - 电流 - 电压（P-I-V）曲线。GaN 基大功率紫外激光器的突破将推动器件国产化进程，支撑国内紫外光刻、紫外固化、紫外通信等领域的自主发展。❑

通快利用激光驱动 X 射线源，提升电动汽车电池性能

未来，电动汽车电池制造商可以通过紧凑的 X 射线源，进一步提高电动汽车电池的耐用性和性能。这一突破性的进展，源于通快公司领导的一个研究项目——XProLas。

目前，XProLas 项目的开发合作伙伴正致力于激光驱动的 X 射线源的开发工作，预计首批演示系统将于 2026 年问世。这些系统将为制造商提供实时监控电池充放电过程的能力，并能够以极高的精度确定电池内部的杂质。这些研究成果将直接应用于新电池的开发过程中，有望改善诸如充电速度等关键性能参数。

值得一提的是，以往此类研究通常在超过 100 米长的大型粒子加速器上进行，而这些设施极为罕见，限制了研究的广泛性和效率。相比之下，激光驱动的 X 射线源，体积仅相当于一个移动房屋，制造成本更低，因此更适合在工业环境中广泛应用。

在该项目中，通快公司正利用其在工业激光器制造方面的专业知识，与巴斯夫和 Cellforce 等合作伙伴共同提供电池材料和组件进行测试。此外，Ushio 德　国、Excillum、Bruker 和 Viscom 等公司也在光束源和系统构建方面，提供了关键的专业知识。汉诺威大学以及位于亚琛和耶拿的弗劳恩霍夫研究所，也在学术层面为该项目提供了重要支持。

除了上述应用外，XProLas 项目还致力于开发一种紧凑、高亮度的 X 射线源，专门用于分析电动汽车电池的阴极材料。电动汽车电池的阴极材料对其整体性能和可靠性至关重要，而这些材料的精确成分，只有通过 X 射线测定才能准确得知。

而紧凑的激光驱动 X 射线源，将有望取代这一领域的大型研究设施，从而加速正极材料制造商的开发进程。在 X 射线产生过程中，激光充当了上游光束源，通过激光脉冲击中特定金属（如镓、铟或锡）目标产生等离子体，进而释放出 X 射线等极短波光。❑

光学引领未来™



TECHSPEC®
120i Plan APO 无限远校正物镜
- C 口安装螺纹，便于系统集成
- 设计与 120mm 镜筒透镜搭配使用
- 是生命科学和工业应用的理想选择
- 荣获 2023 VSD 创新者奖铜奖

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/034-8612

全球光子学市场将继续保持稳健增长态势

预测显示，全球光子学市场依然会继续其几十年来保持的稳定有力的增长态势。

文/Patricia Panchak

光子学技术的应用市场非常广泛，几乎能够涉及各行各业，这使得确定广泛的光子学市场的增长率并不是一件容易的事。尽管如此，多方市场跟踪都共同预测了光子学市场光明的前景，并突显了快速增长的领域。



2024 年 1 月，在 Photonics West 展会的全球商业论坛上，SPIE 邀请了几位分析师评估了光子学市场的发展状况，这些分析师的报告有助于企业高管判断市场环境，了解市场发展背后的驱动因素，进而制定与时俱进的企业发展战略。

首先，SPIE 全球业务发展高级总监 Andy Brown 分享了 SPIE 针对 2024 年的市场预测。

自 2012 年以来，SPIE 一直使用相同的方法跟踪光子学核心器件的收入。首先，SPIE 确定在全球生产这些器件的公司（近 5000 家），然后根据公司总部所在国家的货币确定公司的实际收入，最后将收入转换为美元，以便进行全球趋势比较。Brown 指出，使用一致的方法有助于更准确的逐年比较。

SPIE 对 2024 年的收入预测数据介于 3600 亿美元（比 2022 年的实际收入下降 2.5%）和 4010 亿美元（比 2022 年的实际收入增长 8.9%）之间。“在同一张图表中，这既是乐观又是悲观的。”Brown 解释说，最后他们决定“采用大约 3790 亿美元的中等收入预测，这个数据比 2022 年大约增长了 3%”。

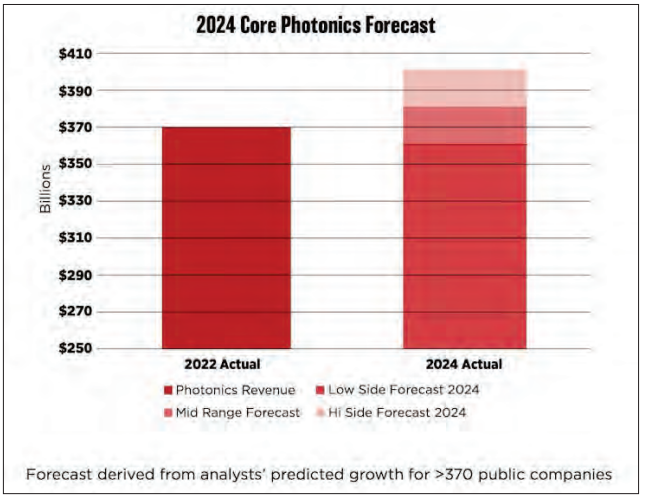


图1：SPIE的预测基于2023年秋季收集的数据，预计2024年全球光子学行业的总收入将处于高（4010亿美元）、中（3790亿美元的）、低（3600亿美元）的范围内，并指出“行业总是好于最低预测”。（图片来源：SPIE）

Brown 指出，SPIE 的预测是基于 2023 年秋季收集的数据，“当然自去年秋季之后，我们的世界发生了很多变化，其中一些变化是不幸的。”他补充道。

从长远来看，光子学市场未来 12 年的复合年增长率将达 7%。

此外，Brown 还分享了 SPIE 对光子学器件所支持的细分市场的分析，包括消费、国防、生物医学等领域，正

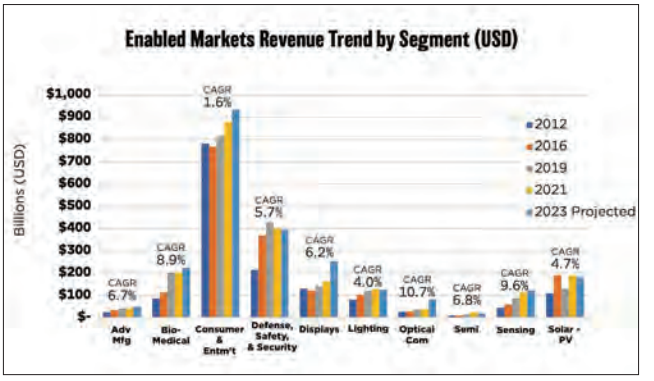


图2：SPIE最新估计，2023年光子学使能市场的价值为2.39万亿美元，10年间的复合年均增长率为4.3%。（图片来源：SPIE）

是这些应用领域的需求保证了光子学器件市场的稳定增长。他说："光子学是各种应用的基础。这也使得市场充满了多样性，因为大多数公司都不止为一个市场提供服务。"

欧洲市场

法国市场咨询公司 Tematys 合伙人兼联合创始人 Thierry Robin 使用与 SPIE 不同的光子学器件定义，提出了另一种市场观点。该公司在由 Photonics21 发布的一份报告

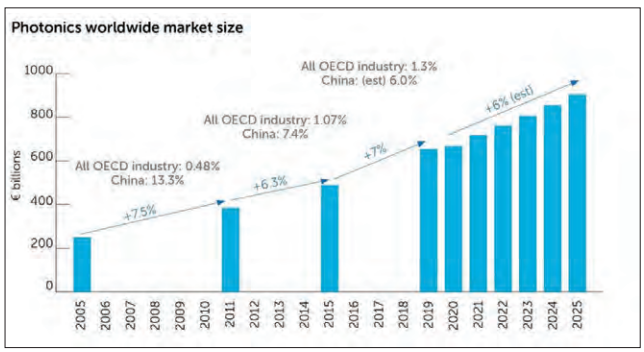


图3：Tematys/Photonics21在2021年发布的一份报告中预测，到2025年，光子学市场将超过1万亿欧元。（图片来源：Temtys）

中详细介绍了其定义；据悉，Photonics21 还将于 3 月发布该报告的一份更新版本。Robin 和 Brown 指出，尽管方法上存在差异，但这两项分析都对过去十年市场的增长率给出了几乎相同预测——Tematys 为 7%，SPIE 为 7.3%。

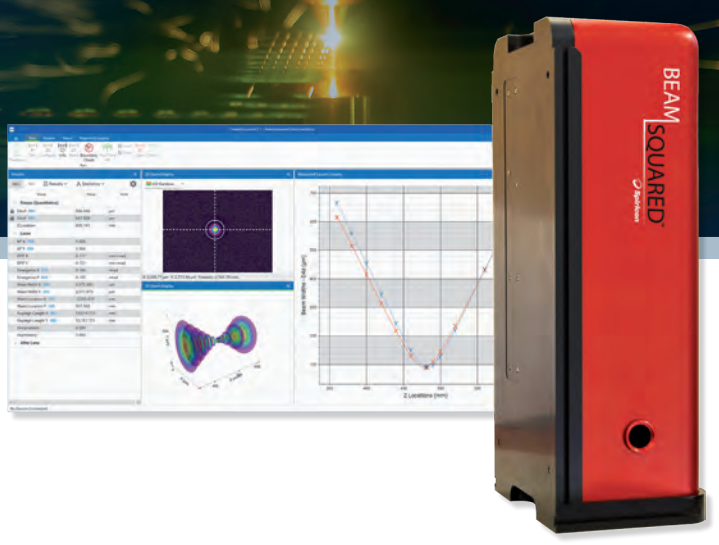
Robin 还深入分析了特定的器件市场。他表示，Tematys 预测，从 2022 年到 2027 年，所有细分市场都将增长 7%-10%。他特别强调了以下细分市场的预计增长情况：

- 光源：在价格合理的新波长和更好的功率成本的驱动下，LED 市场将增长 8%，激光器市场将增长 7%。
- 光学器件：在紧凑组件和快速 / 精确光束偏转的驱动下，分立光学器件市场将增长 7%，光纤市场将增长 10%。
- 光子传感器：在价格合理的新波长和片上功能的驱动下，成像探测器市场将增长 8%。

Robin 还估计，包含激光器、光学器件和传感器的光子集成电路（PIC）市场规模约达 10 亿美元，并强调了两种快速增长的新兴技术：用于光学和射频（RF）领域的超构材料，以及芯片尺寸大小的光谱仪。"预计光学超构表面市场将迅速增长，因为它们已经用于智能手机和微电子产

下转第44页

BeamSquared®
M²&超薄，
快速，自动测量，操作简便



光束传输分析仪
特殊设计，小型化全自动光束传输系统，Ultracal专利校准使BSQ成为市面上最准确的测试仪器，测试符合ISO 11146标准

- 1分钟完成ISO标准测量
- 266-1700波长实现自动测量，1700nm远红外可选手动
- 可在产线上连续使用
- 超高的专利校准精度
- 支持长瑞利长度激光测量
- 新改进：更高灵敏度和分辨率的COMS相机
- 新改进：增强NIR波段的M2测量

了解更多信息，请拨打客服热线400 799 8000 或发邮件至china@mksinst.com

更多信息请联系
www.ophiropt.com
或拨打00000

www.ophiropt.com
mks | Ophir

OpenAI 7 万亿美元的 AI 芯片梦，对光子学意味着什么？



人工智能（AI）处理器的进步，将需要能够改进存储器和通信电路性能的创新举措。这将为光子学带来什么机会？

文/LFWC

OpenAI 的首席执行官 Sam Altman 引领了生成式 AI 的大发展，ChatGPT 和 Sora 的推出，正在颠覆着很多传统知识工作。最近 Sam Altman 又大胆地抛出了又一个宏伟目标：重塑全球半导体行业。

Sam Altman 表示，计划筹集高达 7 万亿美元的资金来重塑全球半导体芯片行业，大力发展 AI 芯片。是的，没错，是 7 万亿美元！

Sam Altman 高达 7 万亿美元（约相对于英伟达、台积电和微软三家巨头的市值总和）的融资数额，无疑令分析师和业内人士惊讶不已。OpenAI 对于发展 AI 芯片的决心之大可见一斑。

OpenAI 发言人表示，OpenAI 就增加芯片、能源和数据中心的全球基础设施和供应链进行了富有成效的讨论，这对于人工智能和相关行业至关重要。Sam Altman 指出，“对于目前的科技公司来说，要想在大模型的竞争中赶上潮流，就必须构建强大的算力设施，AI 芯片正在成为瓶颈，而且已经一定程度上限制了 OpenAI 的成长。”他还发帖表示，“世界需要比目前人们计划更多的人工智能基础设施，包括晶圆厂产能、能源、数据中心等。建立大规模的人工智能基础设施和有弹性的供应链，对于经济竞争力至关重要。”

目前，全球先进 AI 芯片的产量相对有限，似乎唯一的解决办法就是构建一套全新的、完整的芯片产业链，因此 Sam Altman 有了 7 万亿美元的 AI 芯片梦。

现有的 AI 芯片厂商英伟达，在生成式 AI 的发展热潮中，赚得盆满钵满，其收入从截至 2020 年 1 月的 2020 财年的 110 亿美元增长到 2023 财年的 270 亿美元，其市值已经飙升至近 2 万亿美元。有分析师预计，英伟达今年的收入将超过英特尔和 IBM，同时将产生梦幻般的利润和现金流，并在 2025 财年达到超过 1000 亿美元的收入。英伟达的 GPU 为 OpenAI、谷歌、Meta 和全球众多不断增长的大型语言模型提供动力。资金雄厚的初创公司都在争夺生成式人工智能的市场份额。

行业领头公司的发展动向，往往预示着新的发展趋势和机会，OpenAI 和英伟达的发展规划，尤其值得光子学行业积极关注，因为他们的举措正在或将要涉及光子学行业的各个方面，从光子学技术应用案例到供应链，再到终端市场的新应用。今年 3 月英伟达在美国加州圣何塞举行的年度春季会议，是一场集新产品发布、案例研究、建立合作伙伴关系和展示发展路线的一场盛会。感兴趣的读者可以去了解一下英伟达首席执行官黄仁勋今年的年度主题演讲，并从中探知那些有助于推动光子学新发展的新洞见。

多年来，尽管风险投资界和超级大公司一直在大力投资开发自己的 AI 芯片，但英伟达建立的生态系统和势头看起来足够强大，足以支撑其在未来几年的持续发展。黄仁勋表示，2023 年，他预计将对数据中心设备进行 1 万亿美元的彻底检修，以便数据中心更好地服务于加速计算和生成式 AI。他认为不需要一个新的 7 万亿美元的替换型半导体供应链。相反，他表示半导体行业需要继续发展架构创新，以继续提高性能，尤其是“设计出更好的存储器和通信电路”。

英伟达目前占据着 AI 芯片约 80% 的市场份额，如果 OpenAI 的 7 万亿美元芯片计划成功，将改变英伟达一家独大的现状。

当然对于光子学行业而言，无论 OpenAI、英伟达乃至其他公司之间如何竞争，只要有大量 AI 芯片生产，就有增量市场：光通信、改进的内存 I/O、共封装光学器件、处理器之间的高速互连、机架顶部通信和布线，都在推动下一代计算解决方案和 AI 方面发挥着重要作用。

因此，无论是 Altman 还是其他人想重塑半导体行业，光子学在其中发挥的作用都只会越来越大。❑

与创新者为伍，做时间的朋友

——专访罗悉激光技术（上海）有限公司董事总经理丁元东先生



罗悉激光技术（上海）有限公司董事总经理丁元东先生

文/LFWC

英国 Luxinar Ltd.，是全球工业用封离型射频 CO_2 激光器的主要制造商之一。其前身是原德国罗芬（Rofin）集团生产该类型激光器的子公司 Rofin-Sinar UK Ltd.，2017 年开始独立运营，并在 2019 年启用新品牌——Luxinar。2018 年 4 月，其在中国的子公司——罗悉激光技术（上海）有限公司在上海成立，丁元东先生出任该公司董事总经理至今。

当前光纤激光器、超快激光器等激光器产品大行其道，在这样的市场环境中，CO_2 激光器的生存空间在哪里？其真实的市场情况是怎样的？为此，《激光世界》杂志（简称 LFWC）特别采访了丁元东先生。

LFWC：过去几年罗悉激光在中国市场的业绩增长情况如何？主要在哪些应用领域获得了增长？

丁元东：2024 年，是罗悉激光成立后的第六个年头。在 2018-2023 年的第一个五年中，虽然受疫情以及国际供应链波动等多重因素的影响，我们依然在中国实现了大约 20% 的复合年均增长率。特别是在疫情结束之后的 2023 年，我们实现了相较于 2022 年约 40% 的增长，业绩记录也创了新高。

Luxinar | 罗悉激光在中国的成长，来自于我们在中国近 70 家充满活力和创新思维的优秀系统集成商！

这些系统集成商活跃在制衣制鞋、包装印刷、消费电子、新能源、新型烟草、新医药、文化创意等多个领域。他们创造性地将 CO_2 激光工艺与不断发展和进步的新材料相结结合，拓展激光技术的应用边界，增加这些材料的附加值，强化材料技术的发展对激光加工手段的依附。

近几年，以下应用领域成为了我们在中国业绩增长的重要支撑：

- 场景化快时尚消费品；
- 新能源汽车轻量化及内饰加工；
- 高产能电池在线辅助生产；
- 新能源电驱扁线与 Busbar 的高效清洗；
- 文创纸品加工；
- 低害化加热不燃烧（HnB）新型烟支。

LFWC：Luxinar| 罗悉激光的产品有哪些独有的特点？在中国市场，这些产品获得了怎样反馈？

丁元东：Luxinar| 罗悉激光的封离型射频 CO_2 激光器产品，输出功率范围 100~1000W，可提供 10.6μm、10.25μm 和 9.3μm 三种波长。在我们的产品组合里，既有量大面广、喜闻乐见的 SR 系列（100~300W），也有专业专精、力大无穷的 OEM 系列（400~1000W）。它们都是服务于高效率、高负荷的生产场景，并且常年工作在烟尘量大的恶劣工况条件下。

我们的产品设计，充分考虑了这样的应用场景，采用等级为 IP66 的工业封装，实现了对于环境敏感度高的光学器件、电子器件的主动保护。另外，全系列激光器都标配了自诊断功能，可以非常便利地对来自外部供电、冷却回路等因素导致的故障进行判断，极大地缩短了故障判断和排除的时间。同时，卓越的光束品质和超长的使用寿命，是 Luxinar | 罗悉激光的产品在市场上获得良好口碑的最重要原因。

时间检验了我们的产品，也肯定了我们的产品。也正是有了这个良好的口碑，使我们需要以超前布局的方式，来保证这个美誉度能得以延续和提升。2024 年，我们将搬入升级一新的中国服务中心，增加服务品类、缩短服务时间，并提供多种应用场景下灵活的、定制型服务方案。在我们持续高速成长、安装基数不断增加的同时，更重视服务更加贴近市场需求。

LFWC：工业激光器的种类很多，Luxinar| 罗悉激光的产品同这些工业激光器存在竞争性关系吗？在应用上存在什么特别之处？

丁元东：CO_2 激光器是最早大规模用于材料加工应用的工业激光器。在 2015 年之前，千瓦级的 CO_2 激光器是激光金属焊接、切割、表面处理等应用的主流产品。从 2010 年开始，光纤激光器快速成长，极大地替代了千瓦级 CO_2 激光器在工业加工领域的

地位，并以高亮度、高效率、低成本的优势，拓展了激光在工业领域的应用。近年来，超快激光器又作为一个独特的门类，在精密加工甚至微纳加工领域快速成长，方兴未艾。

Luxinar | 罗悉激光的 CO_2 激光器，与光纤激光器和大多数超快激光器并不形成替代或者竞争关系。相反，我们和这些新型激光器形成了很好的伴生关系。举例来说，在发夹电机扁线清洗这个应用方向，需要我们的 CO_2 激光器和光纤激光器一同完成这个工序；在红外皮秒激光器切割玻璃等硬脆材料时，需要大量用到 CO_2 激光器做切割后的裂片处理。

我们所面对的材料对象是海量的，相对于金属材料而言，非金属材料更加繁复多变。不同的应用要求，需要选择不同的激光器与之匹配。Luxinar| 罗悉激光的 CO_2 激光器，其输出波长处在大多数非金属材料的吸收尖峰，在充沛的输出功率保证下，其在非金属材料的高效率加工方面存在着独特优势。同时，由于 CO_2 激光加工属于宏加工范畴（Macro Processing），对部分材料的加工，其热影响区难以突破 50μm 以下的限制，这也使得 CO_2 激光为超快激光等新型激光器的技术进步，提供了应用指引。

LFWC：贵司 CO_2 激光器的市场开发思路是怎样的？

丁元东： CO_2 激光器作为一个技术成熟度高和制造成本较为固化的激光器类型，其市场增长的源泉在于应用开发。Luxinar| 罗悉激光作为 CO_2 激光器的主要制造商，一直秉持着应用导向型的产品思路和市场开发理念，这主要体现在以下几方面：

（1）以开放的心态接收广泛的材料挑战

Luxinar | 罗悉激光的应用实验室，在过去的 25 年间，积累了约 10,000 条各类型材料的测试数据。我们整理和归纳了具有行业代表性和通用性的材料加工工艺数据，并通过微信公众号等社交媒体发布。同时，与我们的系统集成商联手，通过抖音、视频号等短视频平台，直观地展示我们的真实应用，以接纳更多的工艺测试请求，使 CO_2 激光的加工应用被更多的人认知并参与。

（2）以应用要求指导产品研发

Luxinar | 罗悉激光掌握着封离型射频 CO_2 激光器的完全设计和制造技术，其标准产品是以最大应用覆盖为着眼点定标生产的。但丰富的应用要求，还是会给标准产品提出挑战，高峰值功率、高光束指向性、高脉冲间稳定性、超窄脉宽等不同特征的应用要求，需要我们动态调整产品的参数性能，以实现与加工要求的最佳匹配。

Luxinar| 罗悉激光为满足这些应用要求，近年来投放了 SR AOM 系列用于 PI 薄膜低热影响区切割，SRs 系列用于玻璃裂片，SRx 系列用于打孔等高峰值功率应用，获得了不错的市场反馈。

（3）形成材料与激光加工工艺的共同繁荣

大量用于服装和运动鞋装饰用的刻字膜，近几年成为一个繁荣的行业，特别是在电商平台的加持下，刻字膜丰富多彩、灵活多变的特征，推动快时尚行业达到了“快速设计、快速生产、快速交付、快速迭代”的新高度。刻字膜最初是以安全反光提示为目的的功能性材料，出现在消防、警察等职业的工作服上，后面延续到体育服装上，其加工手段以机械刀具切割为主。在和 CO_2 激光切割复合以后，刻字膜的基材和面材得以突破，从而实现从功能性材料到装饰性材料的飞跃，进而成就了快时尚行业这支耀眼的新生力量。这是一个新材料和激光工艺共同成就、共同繁荣的案例。

LFWC：您如何看待当下激光市场的内卷情况？

丁元东：我们认为内卷的本质是创新不足，即发现新的问题和解决新问题的能力不够或者动能受阻。

产业升级和市场规模的扩大，以及结合新型激光技术导入带来的叠加效应，使国内激光市场经历了一个从 2005 年开始的长达 15 年的高速成长阶段，产业规模、从业人口、技术进步和行业覆盖，都做出了令世界震撼的成绩。在这个过程中，包括激光器、传输光路、运动控制等器件加速标准化、模组化，激光系统制造的难度大大降低，从而出现较高的产品同质化，通用型激光加工系统的市场快速被占领且趋于饱和。在缺乏新增需求、产品技术导入阶段的红利被摊薄之后，所体现出来的以价格竞争为主的市场态势，就是内卷的表现。

内卷不是一个行业的常态，它只是产业发展到一定阶段的自我调整。而率先脱离内卷泥潭的，一定是找到了应用痛点、行业痛点的解决办法，并把它转化成生产力的公司。

Luxinar | 罗悉激光始终和一群立足于创新的、活跃的系统集成商团体在一起，发现新的应用需求，捕捉新的行业机遇，提升自己产品的适应性，增加新材料和激光工艺的粘度，完善自身的服务能力，这是我们深耕中国激光行业的经验所得，也是我们将一直坚持的经营之道！❑

飞秒加工

飞秒激光蚀刻磷酸盐玻璃会发生什么？

飞秒激光诱发玻璃中形成一种活性光电导材料，其在紫外和可见光的照射下，能在数月内稳定地产生电流。

瑞士洛桑联邦理工学院（EPFL）和日本东京工业大学（Tokyo Tech）的科学家，在探索磷酸盐玻璃中的原子在飞秒激光脉冲作用下如何重组时，发现了一种将磷酸盐玻璃转化为半导体材料的方法（见图 1）。

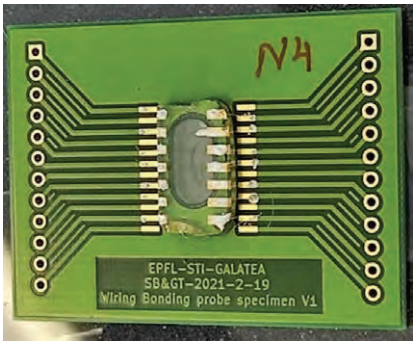


图 1：用飞秒激光在磷酸盐玻璃上刻蚀半导体图案，能将其变成透明的光能收集器。

这是一个惊人的发现，因为半导体材料在日光辐照下可以产生电——这为将透明窗口转变为单一材料的光收集和传感器件带来了巨大潜力。

是什么启发了这项工作呢？“这完全是一次机缘巧合。”在 EPFL 负责 Galatea 实验室的微工程学教授 Yves Bellouard 说，“研究团队原本感兴趣的是激光材料加工过程中纳米级自组织的基本机制，包括在飞秒激光作用下的一些衬底材料（如二氧化硅、磷酸盐、蓝宝石、SiNx 等）中观察到的超快结晶现象。”

Gözden Torun 的博士论文的一部分是研究玻璃中的自组织过程，当时她“偶然发现了玻璃表面形成了半导体磷纳米晶相，这启发了我们探索其可能存在的光电导特性，以及开发与光能收集器件相关的想法”，Bellouard 说。

Torun 采用的是东京理工大学生产的磷酸盐玻璃，利用飞秒激光对其进行改性并分析效果，从而获得了这一发现。她在直径 1cm 的磷酸盐玻璃表面蚀刻了一个简单的线条图案后，发现它在紫外和可见光的照射下可以稳定地产生电流，并且这种情况持续了数月之久（见图 2）。

飞秒激光的魔法

飞秒激光诱导的局域电离现象，由多光子吸收过程引发，并通过雪崩和 / 或隧穿电离等进一步放大。

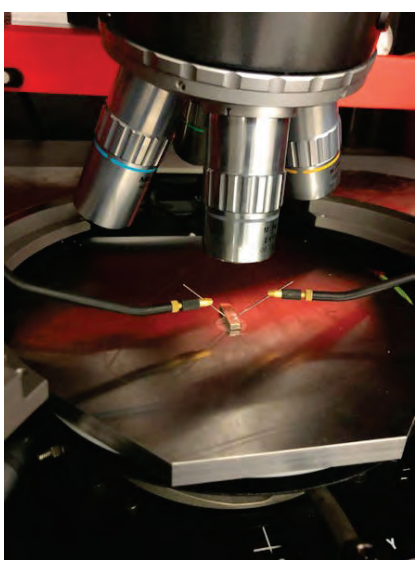


图 2：通过探针台测试激光刻线的磷酸盐玻璃。

“简言之，材料的内部结构被‘打破’，处于一种创造条件重新形成比初始亚稳态（‘玻璃态’或其他类似的亚稳态相）更稳定的材料相。”Bellouard 解释说，“Torun 观察到，当飞秒激光作用于磷酸盐玻璃时，其结构被改造，由磷原子簇组成的晶相种子形成，并最终随着玻璃相的分解而生长成磷纳米晶。”

“这是一个非常偶然的发现，”Bellouard 补充说，“她发现了一种纯磷相的形成——一种嵌入玻璃材料中的半导体相！”

与使用多种材料来制造器件相比，该团队可以用激光对材料进行局域改性，改性后区域的性质就与原始材料不同了。“最初的材料不导电，也不能收集光子，”Bellouard 介绍说，“但是一旦经过飞秒激光的作用，材料的局部表现就完全不同了。在这项工作中使用激光的关键在于能够实现局域改性，这样就可以在材料上刻写任意图案以形成器件。”

从经济的角度来看，这种器件制备方法不需要额外的材料，简化了工艺，从而降低了成本。此外，这种方法还可扩展到任何类型 / 尺寸的基底材料，因为激光只需要在基底表面扫描即可。

下转第34页

飞秒激光器

毫焦级 500W 飞秒激光器背后的技术奥秘

500W毫焦级飞秒激光器实现了高功率飞秒激光器又一个新的里程碑，本文将介绍其背后的技术支撑。

文/奥创光子

随着激光制造不断向更高的生产效能迈进，作为精密加工的光能输出工具的飞秒激光器，也随之朝着更高功率、更大能量、更多波长等方向演化。

大面幅精密激光加工、并行精密激光加工、高重频高效率精密激光加工等作为谋在当前、兴于未来的精密制造领域的主流方向，对飞秒激光光源有着更高、更强输出能力的必然要求。

激光科技领域的重大科学装置、前沿科学研究等国之重器的布局，也在多个分支领域提出了对百瓦乃至万瓦级飞秒脉冲激光光源的期待。随着民用市场、科技行业近期的刚性需求和长远的战略发展要求，千瓦级、毫焦级高功率飞秒激光器技术和产品正在持续迭代中。

飞秒激光放大技术

奥创光子飞秒系列产品的前端种子源，是结合了非线性光纤光学机理和光纤激光工程化工艺的高稳定性、长寿命锁模光纤激光器，其技术源于奥创光子初创团队二十余年光纤非线性锁模理论和实验研究的坚实技术积累，以及工程团队在锁模激光器产品化转化方面的不懈深耕。

定位于超短、超强激光产品的飞秒激光放大技术，是奥创光子在突破了传统的固体放大器技术、光纤 CPA 技术后，从工程实践发展出来的 innoslab 放大器技术，它解决了高功率热管理难题、克服了光场耦合匹配的困难、突破了单级 innoslab 放大向多级 innoslab 放大过渡的技术瓶颈，已实现了 300~500W 高功率飞秒激光器产品化定型生产，既满足工业应用的高可靠性要求，也符合科研用户对极端性能指标的追求。

500W毫焦级飞秒激光器

近期奥创光子新推出了平均功率 500W 的毫焦级飞秒激光器，目前已得到相关终端行业客户的测试验证，并已实现全球首家小批量出货。

随着激光输出功率的提升，随之而来的是更严重的热效应，以及激光能量更接近光损伤阈值、非线性效应阈值，这些不可避免的物理效应需要在技术路线制定过程中加以考虑，并施以有针对性的应对措施。



图1：奥创光子500W飞秒激光器。

奥创光子的高功率产品升级基于已有的 300~400W 飞秒激光器，为了进一步提升输出功率，对主放大器的 innoslab 光路结构做了优化。

（1）主放大器的结构优化

主放大器设计为两级布局，第一级担负着将小信号光功率急剧拔升，第二级负责将已获得放大的光能进一步推高，二者均为 innoslab 放大器。

第一级放大模块设计为多通光路结构，以不少于 5 次的通过次数穿越激光增益介质，实现高增益放大效果。由于激光器的设计（尤其是多级放大架构的激光器设计）需将放大布局作为一个整体通盘考虑，因此第一级 innoslab 放大器并未片面地追求放大功率，而是设计为放大输出功率和光束质量，以满足后续第二级 innoslab 放大所需要的光强度匹配、空间分布匹配、光热效应可控，这与奥创光子百瓦产品家族的单级 innoslab 放大模块的光学设计思路不尽相同。

第二级 innoslab 放大器受到强泵浦光和强信号光的双重高功率激光照射，热负荷极大；其设计也采用多通放大方式，且信号光整形光斑横向尺寸更大，让信号光场与泵浦光场充分交叠，提高放大效率，进一步减小热损耗。innoslab 晶体的光热效应在高功率放大时更加明显，第二

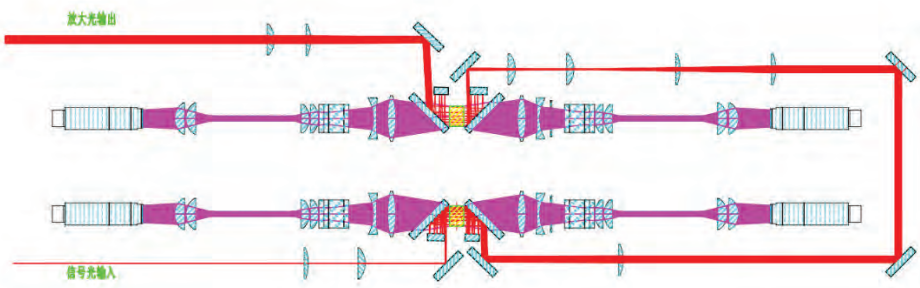


图2：双级双端泵浦的innoslab Yb:YAG高功率激光放大器的光路布局示意图。

级 innoslab 放大器中晶体热焦距已不足 35mm，对于放大后的信号光，存在着光束束腰落在光学元器件表面的风险，因而这是限制激光放大器能量提升的一个重要因素。

（2）放大光路

综合设计布局的激光放大系统全光路的高斯光束演化，在综合考虑了光束整形光学透镜组、热透镜等曲面光学元件的影响后，确保每个光学元器件上的激光能量密度远离膜层损伤阈值、远离材料自聚焦阈值，这是对毫焦级高能飞秒脉冲激光放大光路设计的指导原则之一。在该高功率、大能量飞秒激光系统中，奥创光子对其激光光学设计进行了充分地计算和仿真（见图 2），以将实验隐患消除在设计阶段。

作为 innoslab 放大系统的核心光学设计，信号光高斯光束整形光路、泵浦光匀化整形光路及器件的开发，决定了放大系统最终的放大效能。奥创光子在光纤无源器件如光纤准直器、光纤隔离器等方面积累了光纤光学工程设计和产品化经验；另外在块状固体激光放大器的多级级联、单级多通放大设计方面，早已实现了从工程化向产品化的过渡，因此对于高斯光束在强激光系统中的光学变换镜组设计技术储备成熟，并已移植到 innoslab 放大模块的信号光光束整形系统中，成就了奥创光子百瓦级毫焦级飞秒激光系列产品的主放大级。

激光器的设计必须符合工程可制造性要求，出于简化激光器生产环节装调难度的考虑，舍去了多通共焦腔的设计思路，转而采取整形后信号光光束呈自然发散、反复进出 innoslab 晶体的简洁光路方案。多镜组立体光路设计布局如图 3（a），设计过程已将激光晶体的热焦距计算在内，并在实际装配过程中调整整形椭圆形光斑的发散角，来控制信号光在增益介质中的交叠程度。

泵浦光的光场整形系统设计稍显复杂，这是一种匀化光场能量分布的多模激光传输变换计算，经过在泵浦光场设计过程中反复迭代各个镜组的选型，最后得到优化数据后的几组最优解。具体的器件选型还要在实验中去尝试，筛选出符合光场实际分布的最优镜组组合。

虽然光场整形设计过程和要求复杂，在奥创光子前期的多型号高功率飞秒激光器产品开发的基础上，此 500W 飞秒激光器的主放大器泵浦光路设计方案如图 3（b）所示。出于提升激光放大器输出功率的考量，两级 innoslab 放大器均采用了双向泵浦方式，这种泵浦模式既充分利用了激光增益介质的储能，也提升了激光晶体内的光功率密度。奥创光子的设计体系要求泵浦光功率密度不小于 30kW/cm^2，这是有效提升 innoslab 放大器效率的基本内控指标之一。

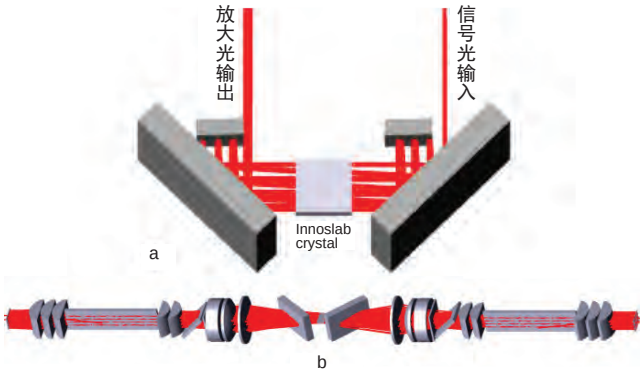


图3：双级双端泵浦的innoslab Yb:YAG高功率激光放大器光路布局示意图。

（3）激光晶体的散热

激光晶体作为激光放大器的增益介质，在高功率放大系统中其光学性能受散热条件影响显著，即激光晶体的高效散热和冷却，才能保证高效的激光增益和良好的光束质量。尤其对固体激光器常用的 Yb:YAG 激光晶体，其准三能级结构更增加了晶体激光特性对散热条件的依赖性。

innoslab 放大器采用的薄平板状激光晶体，平板的两个大面积侧面作为散热面紧贴金属热沉，因此晶体和热沉之间的封装工艺是 innoslab 放大器的关键器件生产工艺之一。奥创光子的专业铟焊车间装备了回流焊设备，实现对 innoslab 放大器的模块化热沉封装。

按照封装程序，定制的 innoslab 激光晶体首先在光学冷加工工序进行二次抛光。专业的抛光机能够最大程度地减少晶体表面形貌的微起伏，杜绝导热不良的接触点。激光晶体金属化是工艺细节和用料最考究的一道工序，一般由经验丰富的工程师操作，并有专人负责检验。而后将晶

体封装于铜质热沉的模块中，最后送出对两个通光面进行镀膜。镀膜过程启动前，由奥创光子专业工程师使用特制的工装包裹热沉的金属部分，防止镀膜过程引入污染。

在高功率 innoslab 放大模块封装测试环节，奥创光子实现了该模块封装成功率 >85%。正是严苛的质检内控指标，确保了 innoslab 模块在各级放大器中放大效率和光热的可控性，也是保障高功率激光器整机品质和产品一致性的基本途径。

（4）高效、易于维护的组装方式

同样是出于产品化对系统可维护性的要求，该 500W 双级高功率 innoslab 放大系统，在光机组装过程尽量设计为线下组装方式，即通过总装线之外的子模块组装产线，将 innoslab 放大器模块的外围耦合镜片、输入输出镜片以及偏振控制光学组件预先装配完成，形成一个准半成品。这样的半成品随后只需在总装线上安装，然后由激光工程师线上精调信号光、泵浦光的耦合光路，一定程度减少了总装线工程师的工作量，实现了粗调和精调在时间、空间上的分离，以此提高生产效率、优化工种配置。

此外，准半成品的另一优点是易于后期对激光器进行维护。在极端情况下，如需更换某个 innoslab 放大单元，只需卸下旧模块换上全新的相同规格的模块，可简化后续的维修装调流程。

（5）丰富的传感器自动监测设计

在实际的高功率飞秒激光整机中，围绕高功率器件和光路还设置了若干传感器，用于自动监测激光头内部的环境状况、激光运行参数状况等，为激光器的日常“健康监测”和定期维护提供数据依据。

得益于有效的偏振态管理，在放大光功率达 589W 时，脉冲压缩器的整体效率获得保障，输出了超过 500W 的压缩后飞秒激光，在重复频率 ≤120kHz 下，对应的最大单脉冲能量能够达到 3mJ。该系列产品的整机输出技术指标见图 4、图 5、图 6。

（6）升级拓展

在高增益放大条件下，激光介质的光谱增益窄化、热透镜效应更加显著，反映在输出的飞秒脉冲时域宽度以及光束质量等参数。该产品定位于高能量型号，对于高重复频率应用，亦可根据客户要求配备 GHz 重复频率的种子源，实现 GHz 脉冲串输出模式。如选配奥创光子的高功率非线性压缩装置外挂于激光头，输出脉宽可实现数倍的二次压缩，激光器就可方便地升级为兼具高功率、大能量和窄脉宽的超短超强光源。

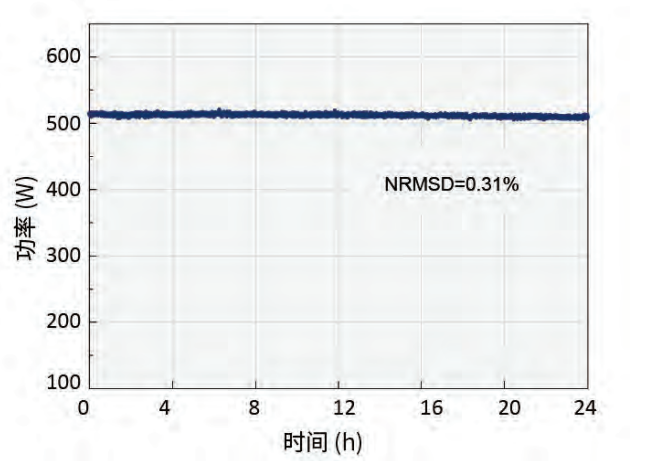


图4：Orientation-500-IR飞秒激光器输出功率稳定性测试。

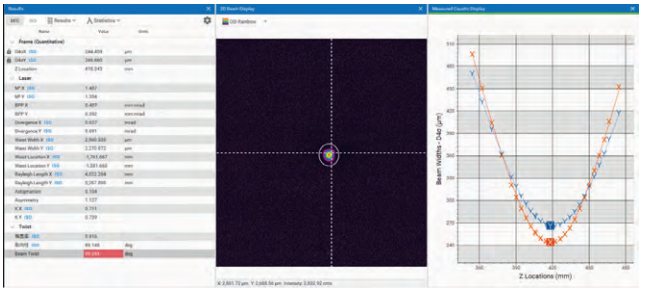


图5：Orientation-500-IR飞秒激光器，在最大输出功率下的光束质量测量（M^2~1.4）。

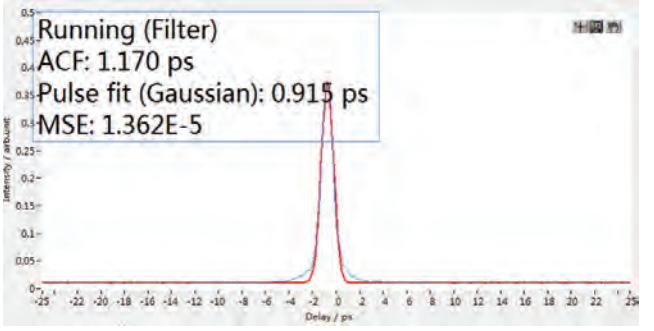


图6：Orientation-500-IR飞秒激光器输出飞秒脉冲自相关曲线。

小结

在成熟的 innoslab 放大平台上，毫焦级 500W 飞秒激光器完成了研发和实现全球首家小批量出货。这个里程碑式的高功率飞秒激光器，是单级 innoslab 放大器向多级 innoslab 放大器过渡的成功案例，带给用户的是“小几百瓦”到“大几百瓦”飞秒激光的转型升级。在产品和技术持续改进的开发理念推动下，奥创光子正在研发千瓦级毫焦级飞秒激光器，预计将于今年年底实现市场化销售。❑

超快激光器

工业超快激光器正迈向千瓦级时代

Yb:YAG碟片超快激光器，平均功率超过1kW、脉冲宽度小于10ps、单脉冲能量大于1mJ，为精密加工提供了新工具。

文/中辉激光

超快激光的概念

一般认为脉冲宽度短于 1ns 的激光脉冲为超短脉冲，而飞秒激光是一种脉宽较窄的超短激光，其脉冲发射持续时间一般低于 1ps。而对于飞秒这个单位，存在这样的换算关系，1fs= 10^{-15}s。此类超短脉冲一般是通过锁模产生的，对于某些应用，可以直接使用飞秒振荡器输出的光。

对于飞秒这个时间概念，可以这样换算：10fs 和 1min 相比，等效于 1min 和宇宙的寿命相比。更直观一些，在 10fs 的时间内，光可以在真空中传播 3μm；3μm 是多长的距离呢？正常成年人的头发直径在 100μm 左右，3μm 大约相当于头发直径的 1/30。

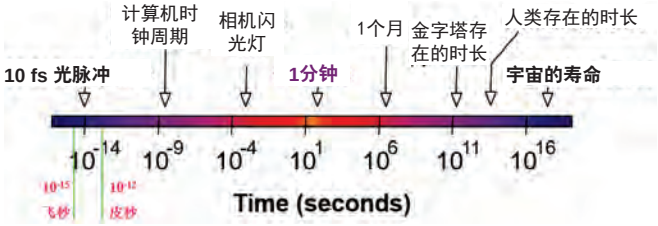


图1：各种时间尺度 。

超快激光是如何产生的?

在介绍飞秒激光器之前，首先需要了解几个知识点。

第一是振荡器的原理，基于此可以知道激光是依托于什么样的条件产生的；第二是锁模原理，通过该原理介绍可以知道飞秒激光是如何产生的；第三是啁啾脉冲放大原理，通过该原理可以理解飞秒激光是怎么放大的。

（1）振荡器原理

激光器的原理是自发辐射光，在由两面反射镜和增益介质组成的谐振腔内来回振荡；随着光束在腔内来回反射，特定的模式在腔内不断加强，最后通过输出镜出射，产生激光，图 2 所示是最早的红宝石激光器的原理图。

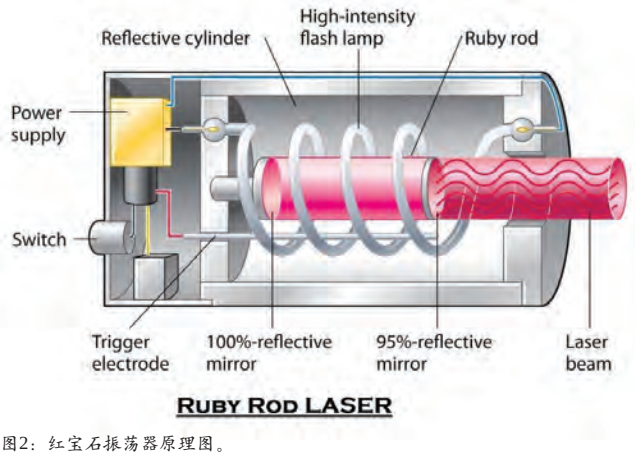


图2：红宝石振荡器原理图。

（2）锁模原理

自发的辐射光在激光谐振腔内来回振荡，只有满足特定条件的模式才能一直存在，而不满足条件的部分则会逐渐衰减抑制。具体来说，就是只有半波长的整数倍对应的激光纵模，才能在腔内振荡，而其他的模式由于不满足谐振关系，会逐渐消逝（见图 3）。

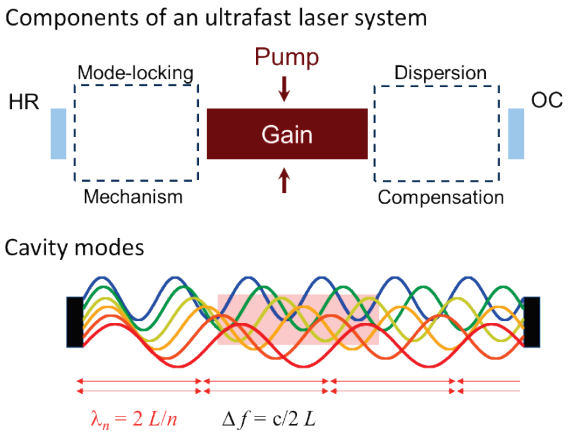


图3：振荡器的原理。

飞秒激光的产生除了离不开这些不同模式的叠加，还需要满足一定的条件：首先纵模要足够的多，覆盖的足够

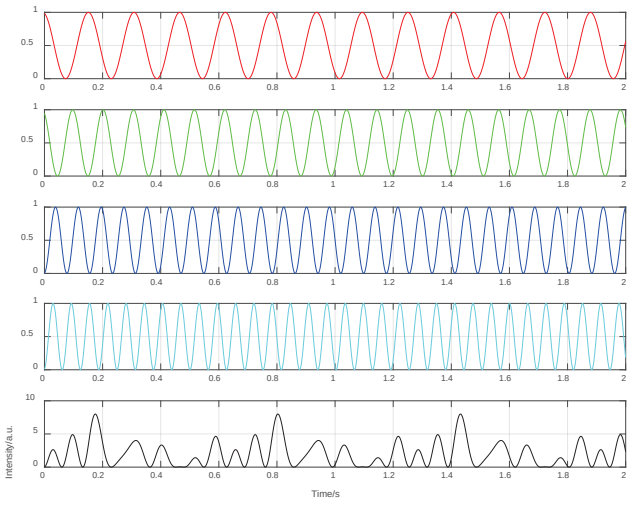


图4：时序无关的不同纵模的叠加效果。

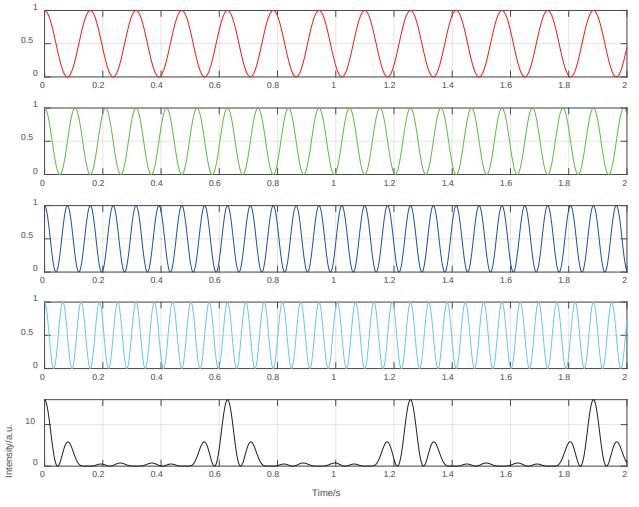


图5：时序相关的不同纵模的叠加效果。

宽；另外不同纵模之间需要满足一定的关系，如图 4 所示，假如不同的纵模间的相位关系随机，则合在一起的时域波形分布也比较随机。但是假如使用类似于 SESAM 被动锁模等手段，将这些不同模式的相位锁定，等相位差的不同纵模组合在一起，可以产生时域上强度非常高的激光脉冲（见图 5）。

（3）啁啾脉冲放大原理

上面讲到激光振荡产生的原理以及产生超快激光的条件，其实使用上面这些方法产生的激光能量还是比较低，一般在纳焦量级。为了获得更高能量的激光脉冲，需要使用一些方法来对激光脉冲进一步放大。对于普通的脉冲激光放大来说，不存在器件损伤以及提取效率降低等问题；但对于超快激光器来说，由于较短的脉冲宽度以及较高的峰值功率，一方面会引入器件损伤，另一方面会极大地降低脉冲放大提取效率，并且恶化激光的光束质量。

Morou 教授参照电路放大技术并首次将其引入飞秒激光领域。其思路是将飞秒激光脉冲进行展宽后放大，再进行时域压缩，从而获得更高功率的激光脉冲输出。该技术也被称为啁啾脉冲放大（CPA，chirped pulse amplification）技术。啁啾这个词语最早源于鸟的叫声，其表示鸟在不同时刻发出声音的频率不一样。激光啁啾脉冲放大，就是让激光的频率在不同的时间上进行展开，使得激光脉冲更宽，在放大过程中降低其峰值功率，以减少对激光器件的损伤并提高放大效率。飞秒激光领域典型的 CPA 技术见图 6。

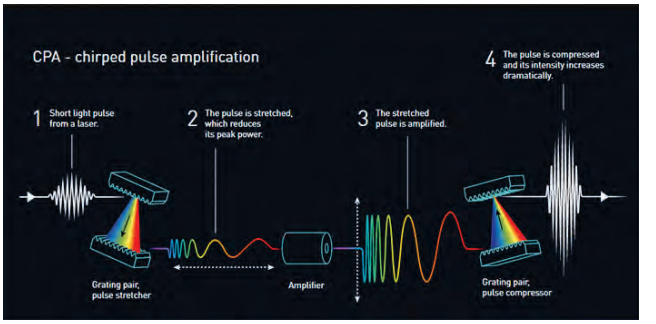


图6：啁啾脉冲放大原理。

飞秒激光器的发展史

（1）超快激光的起源

飞秒超快激光的产生，最早源于两个人的一场赌局（见图 7），Leland Stanford 先生和 Eadweard Muybridge 先生打赌骏马在跑起来的时候，四条腿能不能同时离地。后来，为了更清晰地拍摄出骏马奔腾时的效果，人们研究出了更快的摄影，之后逐渐产生了飞秒激光器。



图7：超快相机发明的由来。

（2）第一代飞秒激光器：染料激光器（脉宽 <5fs）

染料激光器（Dye laser），是使用有机染料作为激光增益介质；有机染料通常是一种液体溶液。相比于气体激光器和固态激光器，染料激光器通常产生更广泛的激光波

长。由于具有宽阔的带宽，这使得染料激光器特别适合于可调谐激光器和脉冲激光器。

染料激光器是由彼得·索罗金（Peter P. Sorokin）和弗里兹·彼得·薛弗（Fritz Peter Schäfer（及其同事）在1966年分别独立发现的。最早的飞秒技术诞生于20世纪70年代，当时是被动锁模染料激光器产生的脉冲大于1ps；随后的进展使得基于染料的激光振荡器直接产生了几十飞秒的激光脉冲（见图8）。

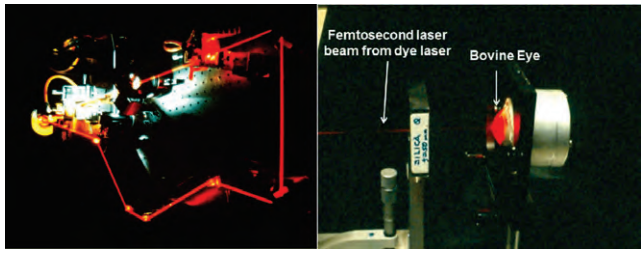


图8：第一代飞秒染料激光器。

尽管激光染料的储能能力差，并且放大受限到微焦的能量和兆瓦的峰值功率，但正是这种第一代飞秒技术（1FST），打开了时域直接测量的大门。

（3）第二代飞秒激光器：钛宝石激光器（脉宽 <30fs，峰值功率 >10PW）

掺钛蓝宝石激光器是可调谐激光器，它们发出650~1100nm范围的红光和近红外光，见图9。1982年6月，Peter Moulton在MIT林肯实验室首次构造和发明了基于掺钛蓝宝石的激光器。



图9：第二代飞秒钛宝石激光器。

钛蓝宝石作为激光增益介质，它是一种掺有 Ti^{3+} 离子的蓝宝石晶体（Al_2O_3），通常用波长514~532nm的激光泵浦。

第二代飞秒激光器（2FST）是基于CPA的掺钛蓝宝石的全固态激光器，在该系统中，脉冲宽度压缩到25fs量级；另外，掺钛蓝宝石的结构可以支持更高的单脉冲能量输出，从而使其峰值功率提升到拍瓦（PW）量级。

（4）第三代飞秒激光器：Yb: YAG碟片激光器（脉宽 <1ps，平均功率 >1kW）

基于Yb:YAG碟片技术可以产生的平均功率超过千瓦量级的超快激光（见图10），称为第三代飞秒技术（3FST），其特征在于高峰值功率（兆瓦级）和高平均功率（千瓦级），将超短光脉冲产生的性能提升到了新高度。这种前所未有的参数组合，将使人们能够探索物质的极端非线性，并且将超短脉冲的波段从纳米、亚纳米覆盖到微米波长水平上。



图10：第三代飞秒Yb:YAG激光器。

中辉激光超快激光器

中辉激光是一家致力于为客户提供世界领先的碟片激光器与解决方案的新兴科技公司。凭借对碟片技术、电光驱动技术、镀膜技术和焊接技术等核心科技的深入研究及反复试验，中辉激光成功地实现了高功率超快激光器关键元器件的国产化。

中辉激光推出的PL150系列碟片超快激光器，其输出功率达150W以上，能够全面满足多种应用场景的需求。

近日，中辉激光的国内首台千瓦级皮秒激光器（见图11）正式下线，该激光器由低功率种子源及碟片多通放大器等组成，碟片多通放大器具备5-25倍的常规放大能力，可根据应用需求灵活定制不同规格参数的大功率激光器。

中辉激光首台已实现量产的千瓦级超快激光器，由光纤振荡器、碟片再生预放大器和碟片多通主放大器组成，平均功率超过1kW、脉冲宽度小于10ps、单脉冲能量大于1mJ。该激光器的发布，将国内皮秒激光器的功率水平由目前的百瓦量级提升至千瓦量级，从而能进一步拓展超快激光在航空航天、半导体芯片、新能源锂电、太阳能光伏等领域的应用，助国内高端制造的水平更上一层楼。❑

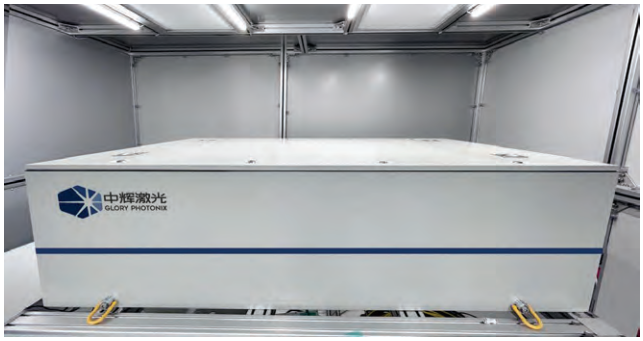


图11：千瓦级超快激光器。

量子光学

量子光学技术展示半导体内光与物质相互作用的新方式

光子级联相关光谱学能窥视量子领域：创建光子的时间图像并揭示它们的传播倾向，进而了解它们如何相互作用。

文/Sally Cole Johnson

由澳大利亚麦考瑞大学的Thomas Volz教授领导的一个科学家团队，开发出了一种量子光学技术，该技术能够以前所未有的方式，了解半导体内光与物质相互作用的基本特性。探索微小的光粒子如何与物质相互作用，将为揭示半导体等固体材料的量子特性提供了宝贵信息。

该团队的光谱技术使用辐射量子级联，在这种级联中，存储在材料中的光子沿着光与物质相互作用时产生的能级阶梯向下传播，它有可能推动在量子光子学技术的探索方面取得突破。

“量子级联描述了从能级阶梯发射连续的光子。通常，当原子被高度激发并相继发射光子时，就会产生这种连续的光子发射。”Volz解释说，“就原子而言，其发射的光子通常具有明显不同的颜色，因此很容易将它们分开。然后通过探测这些光子就能直接提供关于原子的信息。”

光子是从半导体系统发射的，能量非常接近，因此该团队使用窄带滤光器来区分它们。他们还可以探测光子的时间顺序以及是否成对发射，从而揭示有关底层系统的重要信息。

“想到半导体，人们通常会想到电子-空穴对（或激子）。”Volz介绍说，“但是，在我们的实验中，我们在一个光学腔中将电子-空穴对与光耦合，形成新的准粒子，我们将其称为极化子（polaritons）。它们实际上是一种光与物质的混合粒子，可以因为彼此之间的相互作用而相互碰撞。”

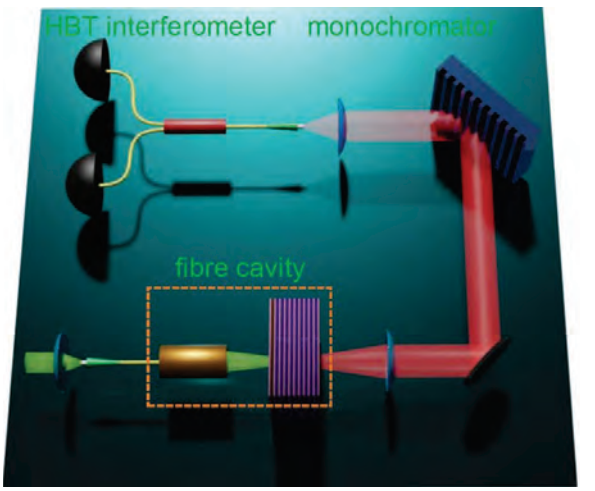


图1：量子级联实验的装置，包括光纤腔、基于光谱仪的光谱滤波器、50/50光纤分束器和两个探测器。

将光子耦合到电子-空穴对，是使光粒子彼此强烈相互作用的一种方式。最终，它可以为单个光子构建晶体管，研究人员或许能够使用光子（极化子）而不是电子执行计算功能。但是极化子仍然是一个抽象的概念。

该团队的方法非常灵敏，可以揭示有关底层半导体系统的重要信息。Volz说：“同时，该方法实施起来相对简单，应该适用于一系列不同的光学活性半导体平台。”

辐射量子级联装置

该团队的装置（见图1）包含一个由两个反射镜制成的光学微腔，它们在其中插入了一种光学活性材料（可以吸收光），以产生极化子。

麦考瑞大学前博士后、荷兰代尔夫特理工大学博士后研究员Lorenzo Scarpelli说：“通过腔传输的光首先被送到一个非常窄的光谱滤波器，该滤波器由光谱仪制成，其中衍射光栅将不同的光频率分散到不同的方向。然后我们用一个大透镜收集所有这些频率的光，并将它们聚焦到透镜后面的一个很小的空间区域——但在某种程度上，每个频率的光聚焦的位置略有不同。”

接下来，他们放置一根光纤，该光纤只传输其所在位置的频率，

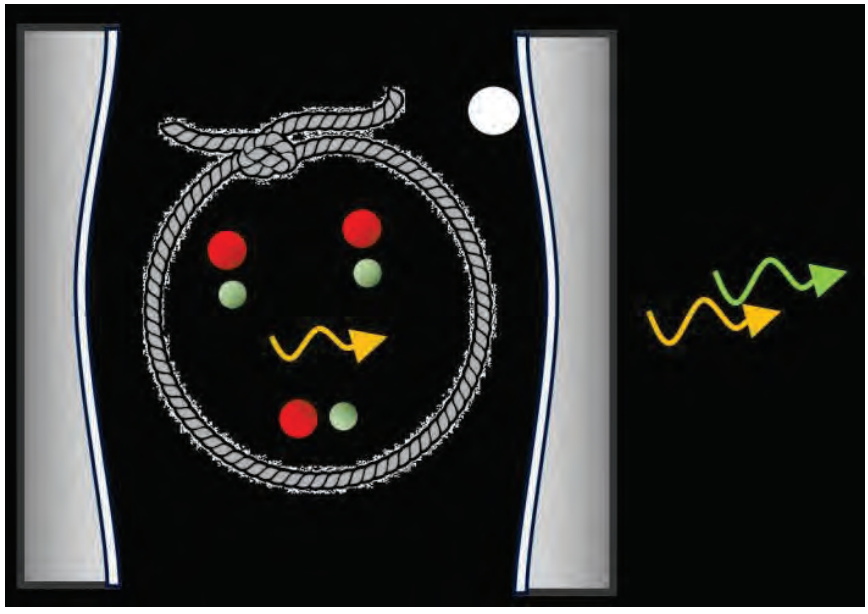


图2：与光纤腔内的光物质混合粒子（极化子）耦合的三激子束缚态。束缚态改变了极化子之间的相互作用，并强烈地改变了发射光的性质。

它创建了一个光谱滤波器。Scarpelli 补充道：“耦合到光纤的传输光，使用光纤分束器进行分束，其中 50% 的光发送到一个超导单光子探测器，另外 50% 的光发送到第二个完全相同的探测器。然后我们就可以研究不同光子的到达时间与滤波器频率之间的相关性。”

对于 Scarpelli 来说，这项技术最酷的地方是它相对容易设置，同时也有可能在单个光粒子的水平上研究光与物质之间的相互作用。他说：“如果你想想正在发生的事情，这项技术的效果真是太棒了——这是一个巨大且令人愉快的惊喜。”

费什巴赫共振

该团队工作中最令人惊讶的地方是，他们的新技术使他们能够探测与极化子的费什巴赫（Feshbach）共振相关的激子（电子 - 空穴对）的复杂束缚态。这一概念在原子物理学中广为人知并得到了利用。

“Feshbach 共振强烈地改变了粒子之间相互作用的强度，在我们的实验中，极化子之间的相互作用被强烈地改变了。”Volz 说，“虽然之前已经证明了两体 Feshbach 共振（包括两个束缚激子），但我们的技术首次显示了极化子的三体 Feshbach 共振（包括三个束缚激子）（见图 2）。”

一段时间内，研究小组无法理解他们获得的实验数据。“我们的雷达上没有 Feshbach 共振，只是期望极化子相互作用的单调行为。”Volz 解释说，“简单地说：随着光子和组成极化子的电子 - 空穴对之间的能量差的变化，极化子相互作用的强度应该会发生变化。”

极化子越像光子，彼此之间的相互作用就越弱——真空中（没有半导体）的光子之间根本不会相互作用。

“我们的测量揭示了一种完全非单调的行为。”Volz 说，“很长一段时间以来，我们一直在检查实验的所有设置，觉得是不是我们有哪里做错了，因为我们根本无法理解得到的数据。即使当我们意识到是 Feshbach 共振起了作用时，最初的数据也与我们的理论预期不符。最后，当我们再次阅读现有的极化子方面的文献时，我们才意识到可能存在三体 Feshbach 共振在发挥作用。这一切都很有意义！”

光与物质之间的相互作用

该团队的工作将有助于半导体材料平台的基础研究。Volz 说：“我们的方法可以直接揭示极化子之间的相互作用，这是一个很难直接测量的重要的量。另外，也有可能在其他平台上应用这种方法来研究复杂的多体状态，当然这需要在每种情况下进行一些更具体的建模。”

这个新工具对量子光学意味着什么？“这无疑是一个重要的工具，有助于理解光与物质之间相互作用的基本原理。”Scarpelli 说，“我们的实验是在砷化镓（GaAs）上进行的，但这项技术可以应用于更广泛的光学活性材料。尽管 GaAs 中的极化子已经被研究了很多年，但是通过我们的新技术，我们观察到了一种以前只是以理论形式存在的特定类型的相互作用。希望我们的技术也能用于其他材料的进一步探索。”

研究人员计划继续寻找一种能够在单光子之间形成超强相互作用的材料，并最终实现单光子晶体管的梦想。Volz 说：“目前，我的研究小组正在研究铜氧化物中的里德伯（Rydberg）极化子，我们希望在新材料系统中重复我们的测量方法。”

Volz 目前被借调到德国慕尼黑一家旨在制造光量子计算机的初创公司工作。❑

OVC EXPO 2024

第二十届“中国光谷”国际光电子博览会暨论坛

The 20th Optics Valley of China International Optoelectronic Exposition and Forum

第二十届武汉光博会

OVC EXPO 2024

国际光日 · 再遇见

2024.5.16-18

中国光谷科技会展中心（中国·武汉）



参展范围：激光技术·激光应用·光芯片·光传感·光通信

光学器件·精密光学·新材料

四展联动/300+展商/15000+专业观众/20+同期论坛

更多展会详情，请登录：www.ovcexpo.com.cn

光束偏转

如何选择光束偏转技术？

本文详细比较了六种光束偏转系统，并提出了设计光子仪器时需考虑的注意事项。

文/David Henderson

光束偏转技术是高性能光子仪器和系统的关键，这些仪器广泛用于医疗、工业、国防和消费市场。仪器中光学元件的基本功能是精确调控光路，进而优化光束质量、准直、对焦及其他关键参数。

在产品开发周期中选择合适的光束偏转方案，将会获得最佳产品性能，包括尺寸、重量、功率、速度和运动范围等。本文介绍了在比较几种不同的光束偏转系统（如 MEMS、微型万向节和振镜系统）时，需注意的一些事项。

本文评估的是除共振模式扫描振镜和短程快速偏转镜之外的一系列产品，它们能够提供双轴光束偏转（俯仰和倾斜），机械旋转角度大于 4°，并能进行精确的点对点定位。

评估的产品性能参数包括：

- 反射镜的尺寸和性能
- 反射镜的调节范围（俯仰和倾斜的角度）
- 移动时间和稳定时间
- 步进精度
- 电子元件和传感器的集成度
- 系统总尺寸
- 移动和保持位置所需的电压和功率

MEMS反射镜

微机电系统（MEMS）是采用硅微制造方法制造的一体式结构。复杂的单件式 MEMS 镜组，集成了单个反射镜、致动器和导向机构。与本文提到的其他解决方案相比，MEMS 器件在大批量生产时成本较低。然而，其尺寸并不一定最小。MEMS 反射镜使用两种不同的力进行驱动：静电力和电磁力。

MEMS 静电致动器。MEMS 静电致动器利用静电吸引和排斥产生镜面运动。镜面旋转是输入电压的非线性函数，必须进行校准。驱动和控制电子元件与 MEMS 是分开的。

MEMS 电磁致动器。MEMS 电磁致动器使用线圈和磁铁来产生洛伦兹力，从而使镜面旋转。这种致动器也称为音圈电机（VCM）。输入电流产生的力可使扭转弹簧产生线性偏转，从而旋转反射镜。镜面旋转是输入电流的函数，必须进行校准。驱动和控制电子元件与 MEMS 也是分开的。

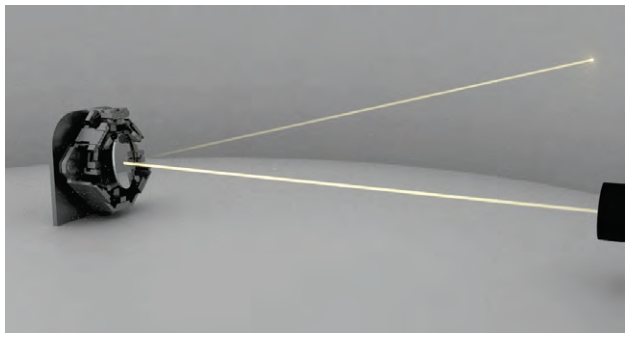


图 1：基于压电超声波电机的微型万向节实现光束偏转的实例图。

微型万向节组件

微型万向节组件使用分立元件来实现镜面的双轴旋转（俯仰和倾斜）。在此，介绍两种类型的微型万向节致动器：压电电机和 VCM。

基于压电超声波电机的微型万向节。这种微型万向节系统利用微型压电超声波电机，使正交镜面产生旋转（见图 1）。直线驱动电机可产生线性切向力，使正交轴产生旋转，并可利用静态摩擦力以零功率保持任意角度位置。集成的位置传感器可实现闭环控制。驱动和控制电子元件与反射镜集成在一起。

基于音圈致动器（VCM）的微型万向节。基于 VCM 的微型万向节，利用线圈和磁铁产生的洛伦兹力，使正交的镜面产生旋转。电流为零时不产生作用力，因此镜面移动到柔性导轨的中心点。集成的位置传感器可实现闭环控制。驱动和控制电子元件是分开的。

微型振镜系统

双轴振镜使用两个独立的旋转致动器驱动两个正交镜面（见图 2）。在此，分别介绍压电电机驱动和传统 VCM 驱动的振镜系统。



图 2：两个微型压电旋转平台，使用两个独立的反射镜来偏转激光束。

基于压电电机驱动的微型振镜。这种振镜有两个独立的压电电机旋转平台，其旋转轴正交，沿用了传统的振镜扫描结构。压电电机产生切向力，使每个平台上的反射镜发生旋转，并在零功率条件下保持位置。光束从镜子表面反射，实现双轴光束转向。角度传感器和电子元件集成在每个旋转模块中，因此无需外部控制器。

基于 VCM 驱动的振镜。传统的大尺寸振镜采用两个独立的电磁旋转模块（VCM），驱动两个正交反射镜。光束从两个正交反射镜反射，产生双轴光束偏转。角度传感器是集成的。驱动和控制电子元件是分开的。

如何选择光束偏转系统?

虽然有众多光束偏转技术可供选择，但此处介绍的示例通常用于光子学领域，特别是对精度、速度和功率有严格要求的应用。表 1 对所介绍的示例进行了详细的技术比较。

反射镜特性：直径和反射率。根据光束尺寸、运动范围、波长和光功率这些参数选择所需的最小反射镜直径和反射率大小。

MEMS 反射镜的直径最小（通常为 1~3mm），而且仅限于反射率适中（约 90%）的金属涂层。反射率较高（>99%）的电介质涂层则很难与硅微加工集成。

微型万向镜和振镜的直径较大（5~20mm），并且使用可分离的反射镜，很容易定制基底材料和涂层。

选择范围：很多不错的选择。考虑光束俯仰和倾斜的角度范围，并且光束反射角是反射镜角度的两倍。由于硅结构的限制，MEMS 反射镜对光束的偏转角度比较小（最多 ±10°）。而微型万向节和振镜对光束的偏转角度更大（高达 ±25°）。对许多应用而言，±10° 的角度移动已经绰绰有余；而大于 ±25° 的角度移动，可能会由于低角度反射和较大的横向光束位移而产生光学问题。

速度：体积越大速度越快。在速度方面，传统的 VCM 驱动的振镜显然是赢家，然而其系统尺寸最大，耗电量也最大。这一结果可能会令人惊讶，因为通常认为体积越小速度才越快。传统振镜由于其高扭矩、高转速以及高谐振频率，其稳定时间至少比其他方案快 10 倍（<0.25ms）。

精度：系统越大精度越高。同样，传统振镜也是赢家。步进精度取决于角度传感器的分辨率。直径越大的传感器测量的半径也越大，因此角度灵敏度也越高。传统振镜的精度（0.0001°）是小型系统的 10-100 倍。

集成：内置控制电子元件可节省空间和时间。将电子元件、传感器和执行器集成到一个完整的运动系统中，是减小光束偏转和光子系统总体积和总质量的关键。用于微型万向节和微型振镜的压电电机，将传感器、智能驱动和控制电子元件集成到一个机电一体化系统中。唯一的输入是 3.3V 直流电源和数显。这种系统架构

下转第40页

表1：光束偏转镜模块对比图

光束偏转产品	MEMS Flexure (A)	MEMS Gimbal (B)	MEMS Gimbal (C)	MEMS Gimbal (D)	MEMS Galvo (E)	MEMS Galvo (F)
	单镜双轴				双镜双轴	
制造商	Mirrorcle	Hamamatsu	Hamamatsu	Hamamatsu		scanlab Novanta
驱动技术	静电驱动	VCM驱动	VCM驱动	压电驱动	压电驱动	VCM驱动
反射镜直径 (mm)	0.8-2.4	1.2-2.6	15	6-10	6-12	10-20
反射镜旋转调节范围(+度)	4.5-6	5-10	25	8	25	25
特殊镜面涂层	NO		YES			
步进和静止 (ms) 小步进	10-20*					0.258
精度 (± 度)	0.1		0.001	0.03	0.03	0.0001
集成电子元件	NO			YES		NO
集成传感器	NO		YES			
系统尺寸	8	8	27	2	4	1500
驱动电压	± 160	3.3	28	3.3		24
移动功率	0.15	2	12	0.75	1.5	50
保持功率	0.04	0.16	1	0.025	0.05	4
0功率保持	NO	NO	NO	YES	YES	NO

*采用前馈阻尼和滤波进行开环控制或闭环控制
**包括驱动和控制电子元件的预估体积

运动控制

使用单个运动控制器控制激光扫描头和伺服平台的优势

使用单一Automation1控制平台控制激光扫描头和伺服系统，能够对激光加工过程实现精密控制，满足苛刻的加工要求。

文/Patrick Wheeler，Bryan Germann；Aerotech产品经理

许多激光机器制造商都有搭建系统的经验，包括激光扫描头和直接或丝杆驱动的伺服平台。在大多数情况下，激光与材料的相互作用，驱动了组件的选择和过程控制方法。例如，激光扫描头的选择通常基于工艺过程产量的考虑。然而，激光扫描头通常使用 f-theta 透镜，这会影响光束质量（从而影响零件质量和工艺性能），因为光束会离光学中心更远。加工吞吐量与质量之间关系的考虑，要保证在用户希望的时间和地点，能将激光能量施加到更大的表面范围。

幸运的是，对于机器制造商来说，有一种方法可以权衡多方因素，进而打造出既能保证零件质量、又能优化工艺产量的机器：Aerotech 的高性能激光扫描头和控制器，使用单个控制器进行扫描头和伺服运动控制，并且能够对加工过程进行精密控制。

高性能激光扫描头与控制

AGV-XPO 高动态激光扫描头，是 Aerotech 公司的一款高性能激光扫描头。该双轴激光扫描头，有助于最大限度地减少速度和精度之间的权衡。其低惯性、高效率的电机能实现迅猛的轮廓加速；而超高分辨率的位置反馈和优化的结构动力学，提供了出色的零件轮廓跟踪与最小的跟随误差。如图 1 所示，与 Aerotech 的 AGV-HP 2D 扫描头相比，AGV-XPO 产品在位置抖动方面有了一个数量级的改进，这一参数表明了其跟随能力的大大提升。

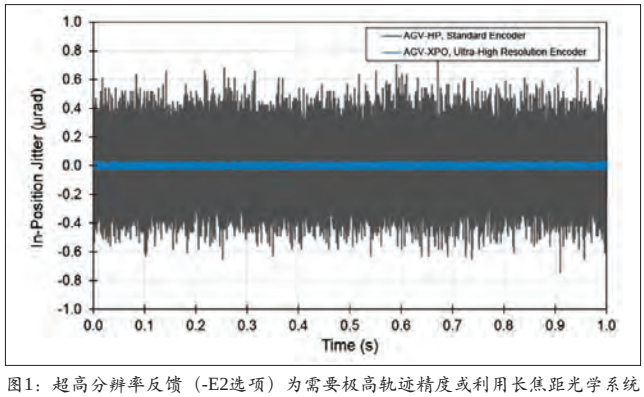


图1：超高分辨率反馈（-E2选项）为需要极高轨迹精度或利用长焦距光学系统的应用，提供最低的噪声水平。

这些结果来自 Aerotech 的 AGV-XPO 与 Automation1 运动控制平台的配合。AGV-XPO 的控制架构是独一无二的，放大器和伺服控制回路不包含在激光扫描头内。相反，它们位于 Automation1 GL4 Galvo 激光扫描头线性驱动器中的远程位置。这种架构以传统的集成控制的扫描头无法匹敌的方式，提高了系统性能。将电子热源从扫描头中移除，可以确保始终如一的性能，这对于任何材料加工应用都是必须的。GL4 使用线性放大器，这是驱动振镜电机的最高性能的放大器技术，并提供改进的速度控制和位置稳定性（相对于标准脉宽调制（PWM）放大器技术），见图 2。

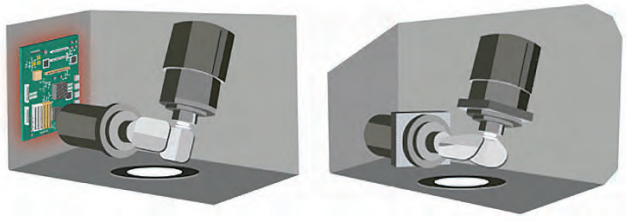


图2：许多激光扫描头将有热量散出的电子器件放置在靠近扫描头的地方，这会引入热稳定性问题。Aerotech的AGV激光扫描头中去掉了散热的电子器件，而是将它们放置在控制柜中，从而使激光扫描头实现了更高的性能，并减少了热漂移。

一个控制器完成对扫描头和伺服运动的控制

Automation1 iSMC 基于软件的智能运动控制器，是



图3：Aerotech IGM与AGV-HP激光扫描头系统，是在 Automation1 Studio的机器设置（Machine Setup）向导中配置的。

一个中央运动引擎，能够通过 HyperWire® 运动控制通信总线生成单个运动控制位置流到 Automation1 激光扫描头和伺服电机驱动电子设备。HyperWire 总线的速率为 2Gbps，位置更新速率为 100kHz。Automation- iSMC 控制器能够为激光扫描头轴每秒产生和通信 100,000 个位置命令点，为伺服轴每秒产生 20,000 个位置命令点。通过 HyperWire 总线，Automation1-GL4 接收 100kHz 的点流，并将点的数量插值到 200kHz，用于 200kHz 两轴激光扫描头伺服控制器。

可以使用各种 Automation1 伺服电机驱动器，每个驱动器通过 HyperWire 总线接收 20kHz 的位置命令点流，并直接在驱动器的伺服控制回路中使用它们。轨迹点是 64 位双精度浮点值，即使在单个 HyperWire 端口上添加 16 个总轴，驱动器到驱动器的抖动也能够小于 1ns。简单地说，少有更好的运动控制技术能够如此协调精密激光扫描头和伺服轴的运动。

使用单一控制器驱动激光扫描头与伺服轴的最高性能协调，以满足最苛刻的激光加工应用。Aerotech 独特的 Automation1 控制器平台，不仅能为扫描头和伺服轴提供单一的配置和编程环境，而且它还可以由一些独有的控制器功能来实现更高性能的系统。

用于精密过程控制的控制器功能

Automation1 有几个控制器功能，用于创建精密激光材料加工设备。一个典型的例子是 Automation1 Studio 应用程序的机器设置（Machine Setup）向导。如图 3 所示，Machine Setup 向导允许用户设置真实的电气和机械设备，然后将这些设备互连以形成真正的运动轴。

工厂对激光扫描头的优化是充分的，因为激光扫描头轴有一个恒定的惯性（扫描镜）。然而，许多机器制造商在伺服轴上放置定制负载，这通常需要进一步优化。Automation1 提供广泛的编码器反馈调谐和伺服调谐工具，以优化这些轴的性能。

一旦轴在伺服控制水平上进行了优化，所要求的位置可能不会导致实现所需位置目标的实际运动。这是由激光扫描头的光学畸变和用于控制激光扫描头和伺服运动轴的光学反馈装置的制造公差引起的误差，导致的常见问题。只要误差是可重复的，这个问题可以用误差映射来解决。

基于误差映射的 1D 和 2D 校准表，都可以构建并加载到 Automation1 控制器中。Aerotech 为伺服轴的误差映射提供了专门服务。然而，机器制造商可以自行管理这个过程。同样，激光扫描头校准通常由机器制造商处理，并且使用 Aerotech 的 GalvoCFC - Galvo 校准文件转换器等工具简化了该过程（见图 4）。

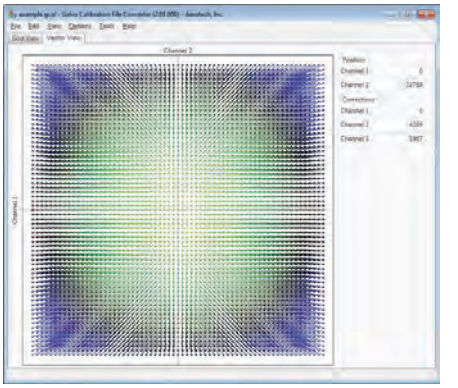


图4：Aerotech Galvo校准文件转换器（Calibration File Convertor）工具，使用户能够创建和修改校准文件，将校准文件缩放到用户单位，将校准表插入到更高的分辨率，并将多个校准表组合到单个文件中。

一旦定位精度被校准，就可以采取另一个步骤来提高产量和零件质量。Aerotech 的无限视野（IFOV）功能，使用户能够直接编程一个零件（或一系列零件），这些零件延伸到激光扫描头的视场（XY 运动约束）之外，具有单一的 XY 轨迹。IFOV 通过预处理较大的运动路径、并将该路径的较高速度部分分配给激光扫描头来实现这一点。IFOV 将较低的速度部分分配给伺服轴，使扫描头始终在其视野内工作。由于 IFOV 消除了步进和扫描的运动，使激光在更大比例的时间内保持工作，因此增加了生产量。

使用 IFOV 的另一个独特优势是，Automation1 GL4 激光扫描头控制器能够立即在伺服控制回路之前，了解到实际的伺服平台位置。这使得激光扫描头能够实时补偿动

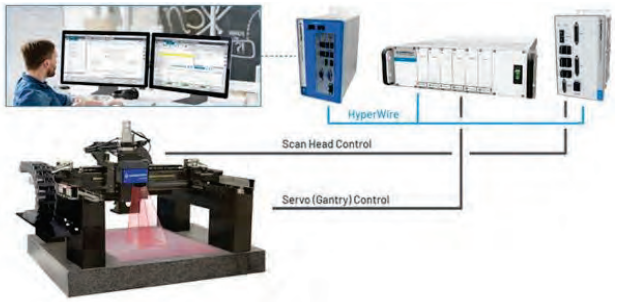


图5：Aerotech的无限视场（IFOV）功能，可以通过将伺服运动平台的运动纳入考虑来消除步进扫描操作，从而实现比激光扫描头视场更大的工件的激光材料加工。

态位置误差。以这种方式趋近扫描头和伺服工作台的组合运动，有助于管理可能比扫描头位置误差大几个数量级的伺服工作台位置误差。图 5 为 IFOV 系统配置。

IFOV 还有一个意想不到的好处——提高零件质量。在使用过程中更多地依靠平台运动，可以将激光扫描头的行程限制在扫描头的光学中心。光学中心是发生最少量激光光斑畸变的部分。由于增加的点畸变降低了生产质量，使用 IFOV 来指挥运动有助于提高整体零件质量。

如果限制扫描头行程不能提供足够的解决方案，Automation1 还提供了 galvo 功率校正表。根据激光扫描头轴的位置，用户可以调整模拟输出的电压。由于激光光斑畸变改变了功率密度，这种功率校正可以用来调整激光功率，以确保激光与材料相互作用的一致性。

当每个电气设备正确控制各个机械设备时，所有运动轴都经过校准，激光功率在 XY 激光扫描头视野上进行校准，这时候可以开始管理运动过程中发生的激光 - 材料相互作用——换句话说，当轴在运动时，管理如何将激光能量应用于材料。在运动过程中发生的激光加工，必须至少要考虑以下几点：

- 激光发射是连续的还是脉冲的?
- 激光功率可以调制吗？调制的速度有多快?
- 激光与材料的相互作用，对加工速度有多敏感?

Aerotech 的位置同步输出（PSO）工具，为精密激光机器制造商提供了灵活的工具集，用于管理激光材料的相互作用。对于脉冲激光器，脉冲间距（见图 6）可以通过跟踪实际行进距离和基于固定或可变距离产生的发射事件来管理。

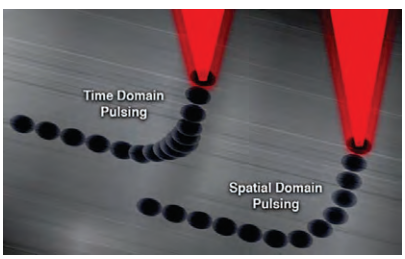


图6：固定距离发射的一个亮点是速度（加速度）的变化不会影响脉冲到脉冲的激光间距。这种类型的控制提高了零件质量和高动态精密加工的生产量。

触发事件通常会在指定的 Automation1 伺服电机驱动器上，为 PSO 输出创建状态的物理变化。输出的功能是可配置的。输出可以保持“开”一段特定的时间，可以产生特定的波形或产生一系列脉冲。此外，模拟输出可以随着每个触发事件进行修改。

当操作 Automation1 GL4 或 Automation1 GI4 激光扫描头控制器时，用户还可以访问一系列激光输出控制功能，控制三个数字输出（见图 7）。

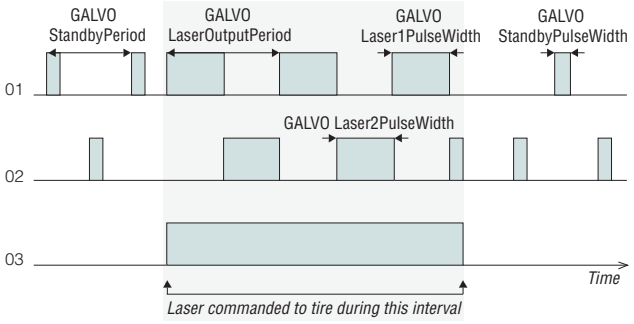


图7：在这个标准的galvo激光模式控制配置中，当激光发射时，O1和O2是具有可配置频率和固定180° 相移的调制信号。当激光器不发射时，O1和O2输出可配置为输出备用脉冲。

这三种输出以不同的模式运行，每种模式都意味着与特定类型的工业激光器一起工作。第一激光数字输出(O1)典型地控制激光发射。第二激光数字输出（O2）用于抑制第一请求的激光脉冲，或者是第一输出的反转或相移版本。第三个激光数字输出(O3)通常用于控制激光的“门”，并且在激光发射期间它始终处于开启状态。一些工业激光器需要“挠痒式的”（tickle）脉冲。因此，当激光门控制关闭时，O1 和 O2 可以配置一个待机周期输出脉冲。这可以通过将待机脉冲长度配置为 0μs 来关闭。

IFOV、PSO 和激光输出控制功能，都是 Automation1 运动控制平台的强大功能，并且在一起使用时更加强大。

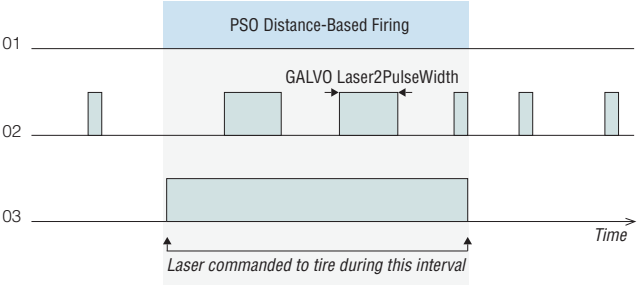


图8：当位置同步输出（PSO）和Galvo功能都配置正确时，O1输出（参见图7）被PSO配置覆盖，而O2和O3仍然按照Galvo功能配置工作。

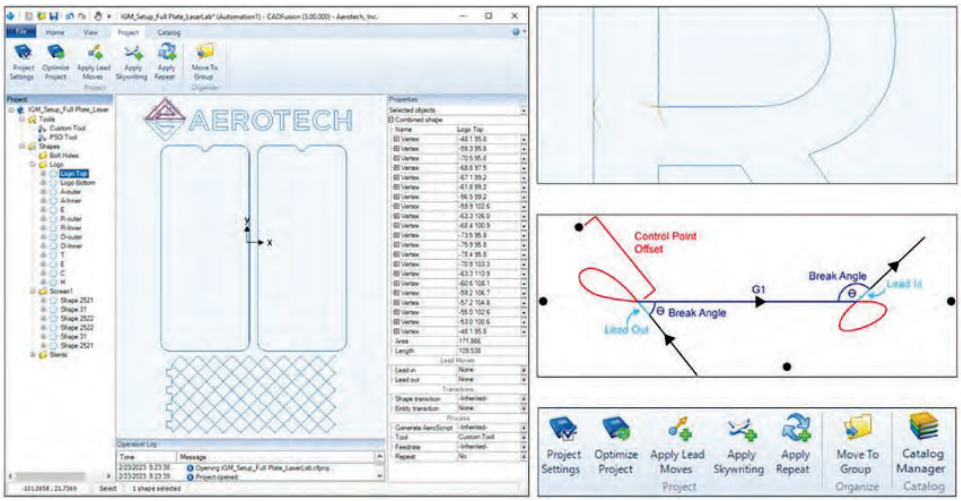


图9：在CADFusion中，用户可以从头开始开发新项目，或导入现有的DWG或DXF文件。使用CADFusion的绘图画布（左）和例如引线和引线移动工具（右-顶部）、空中书写（右-中间）和其他工具栏项（右-底部），优化零件路径。

制器默认处理 G 代码，所以部件路径可以由输出 G 代码语法的任何计算机辅助制造（CAM）工具生成。Aerotech 提供了自己的解决方案，针对 2D 轮廓运动应用，如玻璃切割或钻孔。CADFusion® 工具降低了实施风险，并确保 Automation1 控制器的最佳性能和精确性。它通过帮助用户实现 PSO 和 IFOV 等激光加工功能，大大提高了零件质量。使用 CADFusion，用户可以导入现有的 DWG 或 DXF 文件或从头开始设计。

当配置用于 IFOV 系统时，Automation1 GL4 可同时访问扫描头和伺服级编码器反馈。它使用这些信息来启用 IFOV 并执行两轴 PSO 版本，该版本将一个伺服 X 轴和一个 galvo X 轴合并为单个轴，并将一个伺服 Y 轴和一个 galvo Y 轴合并为单个轴。这使得 GL4 控制器可以根据沿部件行进的实际激光光斑距离，实时命令激光输出发射事件。当 PSO 和激光输出控制功能配置正确时，O1 激光输出变为 PSO 控制，O2 和 O3 输出保持 Galvo 模式工作，见图 8。

在精密激光生产过程建立并准备在工业机器上运行后，必须开发部件路径（或轮廓）。因为 Automation1 控制器默认处理 G 代码，所以部件路径可以由输出 G 代码语法的任何计算机辅助制造（CAM）工具生成。Aerotech 提供了自己的解决方案，针对 2D 轮廓运动应用，如玻璃切割或钻孔。CADFusion® 工具降低了实施风险，并确保 Automation1 控制器的最佳性能和精确性。它通过帮助用户实现 PSO 和 IFOV 等激光加工功能，大大提高了零件质量。使用 CADFusion，用户可以导入现有的 DWG 或 DXF 文件或从头开始设计。

为了处理激光加工的一些现实情况，CADFusion 具有一系列优化性能的部件路径规划功能。如图 9 所示，用户可以在 CADFusion 中创建零件路径，并执行更多操作：应用工具（如引入和引出移动）创建过渡移动，如空中书写，设置零件路径的重复部分，并使用 Catalog Manager 自动应用过程工具控制语法，包括 PSO。然后，只需单击一个按钮，就可以导出在 Automation1 控制器上运行的 AeroScript 程序文件。

结果

最后能实现一台领先的精密自动化机器，其具备自动化运动开发工具包（MDK）的绝大部分优势，包括 Studio 应用程序、Automation1 API 和 Automation1 MachineApps 基于 Windows 的自定义人机界面工具。Automation1 Studio 应用程序（见图 10）作为一个单个的应用程序，可用于配置、编程、调试和优化系统等众多功能。

Automation1 Studio 拥有强大的编程 IDE 和数据可视化工具，可以同时查看 1D 和 2D 数据。Automation1 API 包括 .NET、C 和 Python。最后，用户可以使用 MachineApps（一个为设备或运动系统快速开发自定义的有效的 HMI 屏幕的工具）构建自定义 HMI。MachineApps 允许机器制造商将其品牌应用于机器界面，并使用基于模块的方法快速布局用户界面。

Automation1 的这些工具使其能够控制整个运动，进而帮助机器制造商成为精密激光材料加工领域的佼佼者。❑

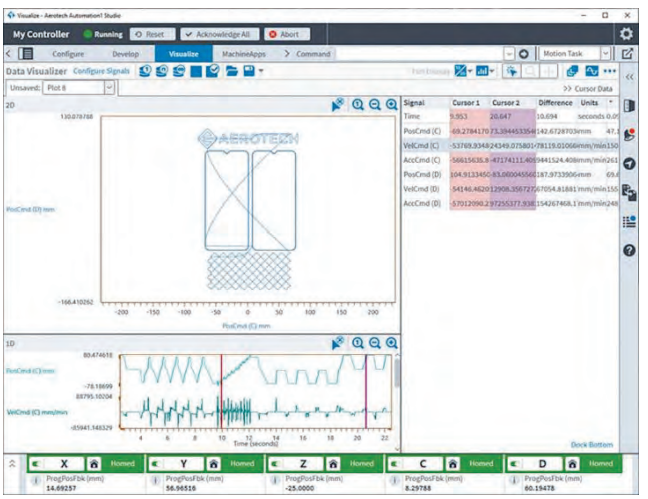


图10：Automation1 Studio应用程序包括Machine Setup向导、MachineApps HMI构建器、先进AeroScript™编程语言和数字示波器（Data Visualizer），使用户能够在一个开发环境中设置、编程和优化伺服和步进电机、精密平台、振镜扫描系统等。

微纳加工

用于激光微纳加工的激光能量控制模块

ACS激光能量控制模块LCI，旨在满足最苛刻的激光微纳加工应用，用成熟的方案减少上市时间和用户成本。

文/ACS

与传统的机械加工相比，激光加工更精密、更准确、更迅速，其利用激光束与物质相互作用的特性，对包括金属与非金属的各种材料进行加工，可用于焊接、切割、打标、打孔、热处理、成型等多种加工工艺。激光独一无二的特性使之成为微加工的理想工具，广泛应用于微电子、微机械和微光学加工三大领域。为适应 21 世纪高新技术的产业化、满足微观制造的需要，作为激光加工的一个分支，激光微纳加工在过去十年广受关注。

过去的数年中，ACS 陆续发布了两款与激光微纳加工相关的产品——LCM 和 LCI。其中，LCI 是 LCM 的升级型号，配合 ACS 的高性能驱动器，旨在满足最苛刻的激光微纳加工应用需求。作为 SPiiPlus EtherCAT 运动控制系统的一部分，LCI 将激光器控制与高精度多轴运动紧密同步，以实现更高的激光器处理精度和吞吐量。

LCI产品亮点和应用

> 基于亚微米精度位置的激光器触发

> 灵活的激光器功率控制选项

> 将激光器控制与多达 5 个协调运动轴同步

> 模拟和高速数字接口

> 支持紧凑型 DIN 导轨安装

> OLED 与 Micro LED 显示面板加工

LCI 适用于半导体晶圆加工；电子制造业的玻璃、PCB、FPC 切割和钻孔；汽车、航空航天、生物医学用金属板材和管材切割；以及生物医学装置和电动汽车电池焊接。

LCI特性

> 激光控制信号接口：RS422 差分 (LCS_D+/LCS_D-) 或 5V/24V 单端（LCS_SE）

- 最大输出频率：固定距离脉冲，10MHz（差分），1MHz（单端）；基于分段或基于阵列的脉冲或选通模式，16kHz（差分 / 单端）

> 输出模式

- Fixed Distance Pulsing（固定距离脉冲）
- Segment-Based Gating（基于分段的选通）
- Coordinate Array Pulsing（坐标阵列脉冲）
- Distance Array Pulsing（距离阵列脉冲）
- Coordinate Array Gating（坐标阵列选通）
- Distance Array Gating（距离阵列选通）
- Fixed Distance Pulsing AND Segment-Based Gating（固定距离脉冲和基于分段的选通）
- Fixed Distance Pulsing AND Coordinate Array Gating



图 1：ACS激光能量控制模块LCI，外观尺寸为134mm × 75.4mm × 31mm。

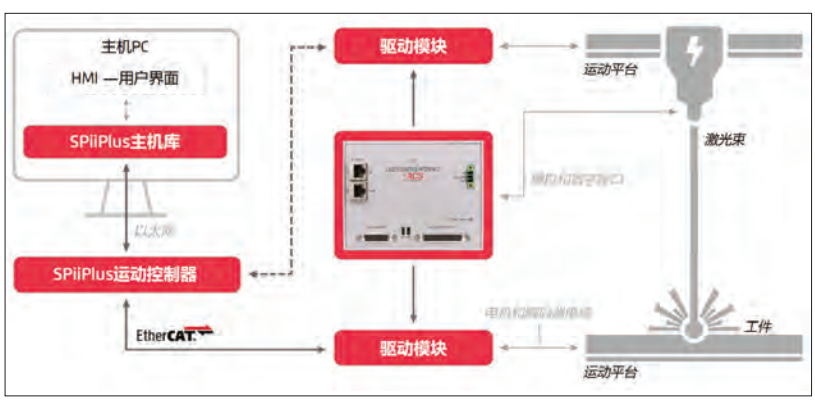


图2：LCI模块应用系统图。

（固定距离脉冲和基于坐标阵列的选通）

- Fixed Distance Pulsing with Dynamic Pulse Width（具有动态脉冲宽度的固定距离脉冲）
- Segment Based Gating AND PWM Power Control（基于分段的选通和 PWM 功率控制）
- Coordinate Array Based Gating AND PWM Power Control（基于坐标阵列的选通和 PWM 功率控制）

> 延迟和抖动：1μs

> 激光器功率控制 PWM 模式输出（5V 或 24V，单端；最高输出频率 100kHz）

> 激光器功率控制模拟量输出（0~10V，单端；分辨率 12bit）

> 激光器功率控制 8 位输出（5V 或 24V，单端）

> 通用型模拟量输入 / 输出（0~10V，单端；分辨率 12bit）

> 通用型数字量输入 / 输出（5V 或 24V，单端，sink 或 source）

> 外部同步输入时钟（RS422 差分；最高支持 10MHz）

> 激光开启 / 关闭延时补偿

> Tickle 模式：当激光器不加工的时候，短脉冲保持激光器“热机”状态。

> Skywriting 补偿：Skywriting 运动在轴的加工路径上增加了额外的部分，在路径的拐角处避免减速或相对减速的少些。LCI 支持这种方法，当轴的运动路径是辅助部分时，将激光器关闭；当轴的运动路径是加工部分时，将其打开。

> 可配置高速输出

- P/D 脉冲 / 方向
- PEG Pulse/State/Active
- 数量 8
- 接口：RS422 差分
- 最大输出频率：10MHz

LCI激光控制信号输出模式

从控制器固件版本 3.10 开始，ACSPL+ 支持标准的结构体类型。标准结构体类型可以实现面向对象的 ACSPL+ 编程。用户可以在程序中定义结构体，并访问结构体类型变量的 Fields 和 Functions。

图 3 中 LCI 是控制器固件的结构体类型关键字，用户可以创建 LCI 结构体类型的变量，如 lcUnit。

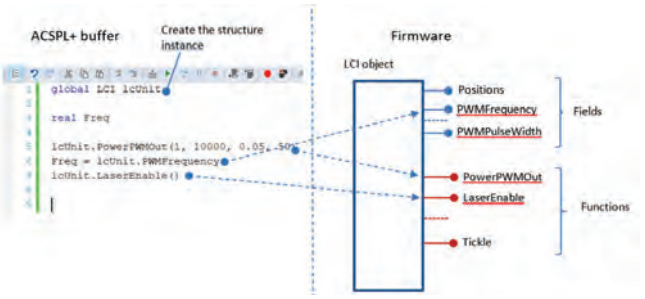
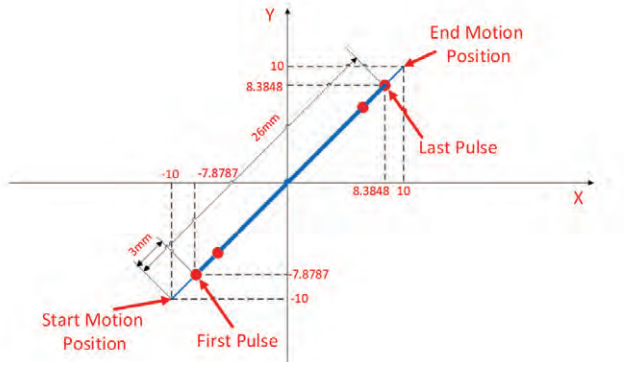


图3：图中LCI是控制器固件的结构体类型关键字。

1、Fixed Distance Pulse Mode（固定距离脉冲模式）是以固定距离作为脉冲触发条件。



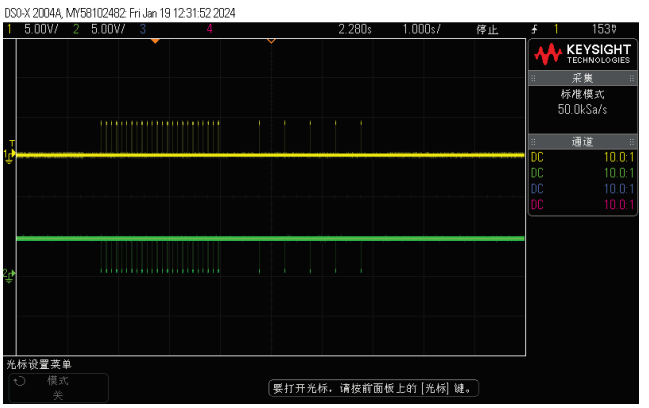


图4：根据程序设定，XY轴的合成矢量轴从坐标位置（-10，-10）运动至（10，10），运动距离3~26mm中每隔1mm触发一个脉冲。从坐标位置（10，10）运动至（-10，-10），运动距离3~26mm中每隔5mm触发一个脉冲。

2、Distance Array Pulse Mode

该功能与 LCM 原有的功能类似，脉冲是根据一个预设的位置数组（点位），计算基于 XYZ 轨迹。与 LCM 版本相比，此模式对点数没有限制。LCI 支持最高动态以 16kHz 的速率加载新的位置点位。

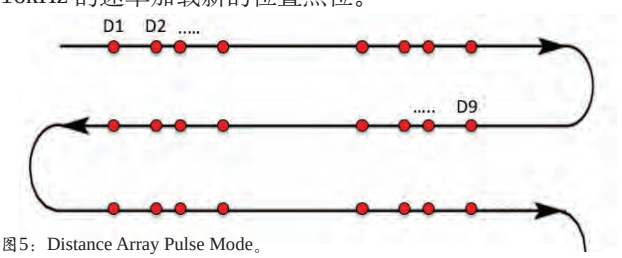


图5：Distance Array Pulse Mode。

Distance Array Pulse Mode – dynamic loading ：

动态导入由控制器的固件自动执行，最快速度16points/ms。需要触发激光控制信号的位置数组中的后一个元素必须大于前一个元素。如果电机实际运动的位置已经超过位置数组中对应元素的位置，那么从这个位置元素开始以及后续的位置元素，都将不会触发激光控制信号。例如，axis 0 正向运动，当 axis 0 的实际运动位置为 1.5mm，在 PosArr(10)=1.5 的位置触发脉冲信号，而 PosArr(11)=1.2，那么从 PosArr(11) 开始的位置元素都将不会触发脉冲信号。

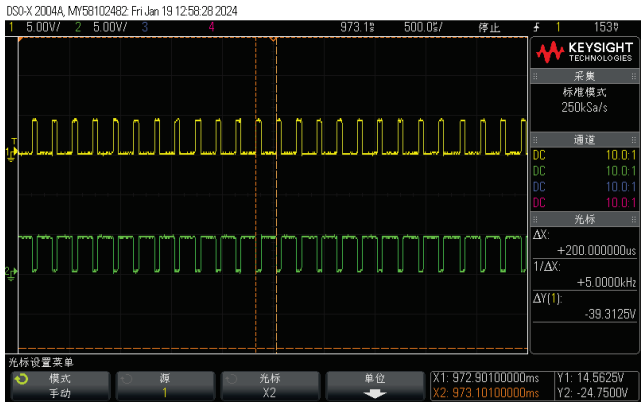


图6：激光控制信号的触发间隔为0.002mm，XY轴的合成矢量轴的运动速度为10mm/s，脉冲的触发频率为5kHz。

3、Distance Array Gate Mode

该模式为系统添加了门控选通功能。在这种模式下，激光器将在预定义位置打开或关闭（电平信号）。



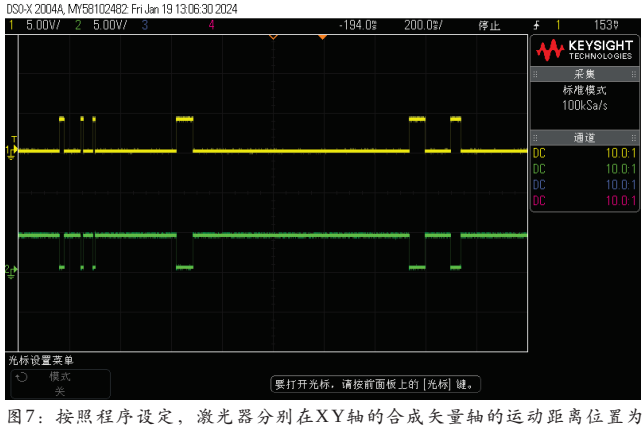
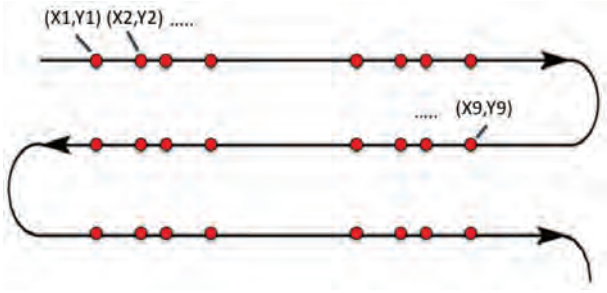


图7：按照程序设定，激光器分别在XY轴的合成矢量轴的运动距离位置为3.5~4.5mm、7.7~8.3mm、10.1~10.6mm、26.5~29.5mm、62.5~65.5mm、70.5~72.5mm，共6段距离中被触发工作。

4、Coordinate Array Pulse Mode

该模式初始化基于多轴坐标阵列的脉冲触发。



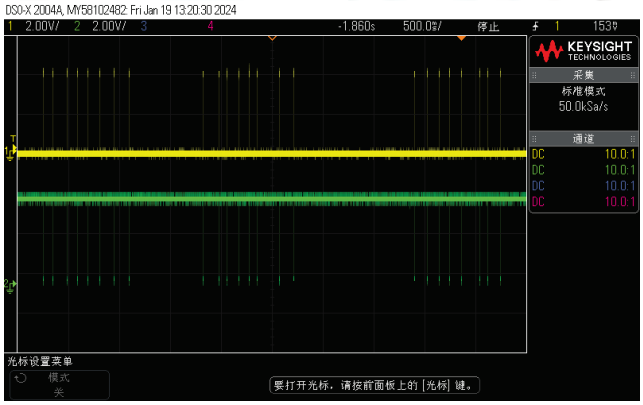
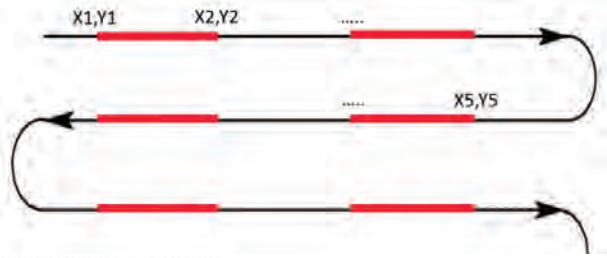


图8：按照程序设定，X轴是扫描轴，Y轴是步进轴。在Y轴坐标位置为0mm、20mm、40mm的位置，同时根据X轴的位置不同，各有8个脉冲信号触发激光器工作。

5、Coordinate Array Gate Mode

该模式初始化基于多轴坐标阵列的门控选通模式。在这种模式下，激光器将在预定坐标打开或关闭（电平信号）。



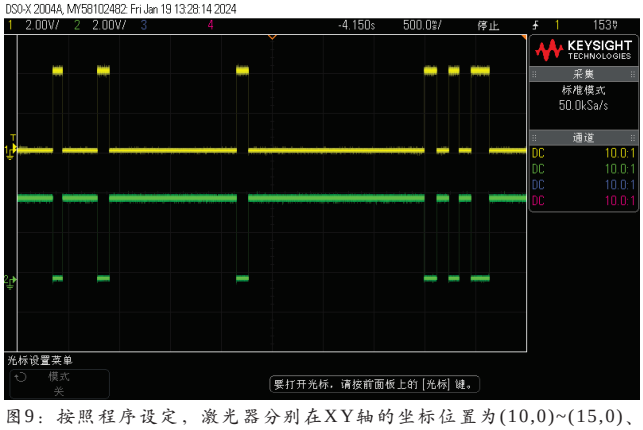


图9：按照程序设定，激光器分别在XY轴的坐标位置为(10,0)~(15,0)、(32,0)~(38,0)、(41,20)~(35,20)、(10,40)~(16,40)、(22,40)~(27,40)、(33,40)~(42,40)，共6段距离中被触发工作。

6、Segment Based Gate Mode

该模式下，LCI 在确定的图形以分段选通模式输出信号触发激光器工作。此模式特别适用于使用 XSEG 指令的应用程序，以 XSEG/p 来控制 LCI 是否触发控制激光器的信号。

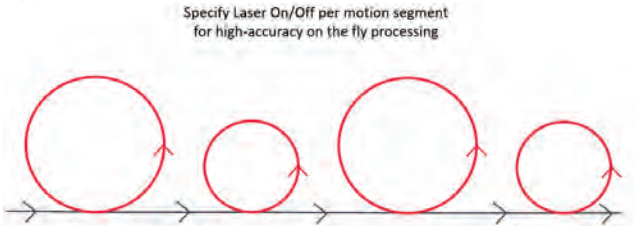


图10：LCI以分段选通模式输出信号触发激光器工作。

例程：

```
int AxX = 0 ! Actual moving X axis
int AxY = 1 ! Actual moving X axis

VEL(AxX)=50; VEL(AxY)=50
lc.SetSafetyMasks(1,1) ! Ignore LCI safety errors and faults
lc.Init() ! set LCI unit to default states
! Axes 0,1 used for vector velocity calculation.
lc.SetMotionAxes(AxX,AxY)
ENABLE (AxX,AxY)
WAIT 200
PTP/e (AxX,AxY) ,0, 0 ! go to the beginning position

lc.SegmentGate() ! Synchronize Laser with segmented motion
lc.LaserEnable() ! LCI ready to generate pulses in motion.
!*****************************************************
! Motion commands during which gates signals are issued
XSEG(AxX,AxY), 0, 0
!acceleration segment to the beginning of the 1st circle – laser OFF
LINE/p (AxX,AxY), 10, 0, 0
ARC2/p (AxX,AxY), 10, 5, 2*pi, 1 ! 1st circle -laser switched ON
LINE/p (AxX,AxY), 20, 0, 0 ! laser switched OFF
ARC2/p (AxX,AxY), 20, 2.5, 2*pi, 1 ! 2nd circle -laser switched ON
LINE/p (AxX,AxY), 30, 0, 0 ! laser switched OFF
ARC2/p(AxX,AxY), 30, 5, 2*pi, 1 ! 3rd circle -laser switched ON
LINE/p(AxX,AxY), 40, 0, 0 ! laser switched OFF
ARC2/p (AxX,AxY), 40, 2.5, 2*pi, 1 ! 4th circle -laser switched ON
! deceleration segment to the end of motion -laser OFF
LINE/p (AxX,AxY), 50, 0, 0
ENDS(AxX,AxY)
till GSEG(AxX) = -1

!*****************************************************
lc.LaserDisable() ! stop pulses
lc.Stop () ! Stops any previously initialized laser mode
PTP/e (AxX, AxY), 0, 0
STOP ❑
```



图11：持续时间较长的两段电平信号对应的是两个大圆的轨迹；持续时间较短的两段电平信号，对应的是两个小圆的轨迹；而激光器只在这4段轨迹中被LCI触发工作。在圆与圆之间的切换轨迹中，LCI是不产生触发信号的。

上接第15页

Bellouard 指出，要想更好地了解纳米晶的形成机制，还需进一步开展研究工作，以提高器件的性能，并将这种概念验证探索转化为工业化过程。

但是，有几种潜在的光子学应用需要检测和量化特定波长或光谱范围的光，以及确定能够采集光的窗口，这些应用可能会从该团队的工作中受到启发。

“我们面临的最大挑战之一是，如何确保激光改性区域也是肉眼看不见的，这样还能透过玻璃清楚地看到外面，保持其透光功能的同时不破坏其美观性。”Bellouard 说，Galatea 实验室从功能和系统集成的角度，探索材料在超快激光作用下的转变。“总的来说，我们探索激光诱导各类材料的结晶相的形成、非晶化或自组织结构。”Bellouard 总结说，“我们的主要研究目标之一是推广这些方法，以实现其他类型的功能和特性——包括电气学、光子处理或机械学，如调整热机械特性。”

目前，该团队的主要目标是改进玻璃中碲纳米晶半导体初步概念验证的工艺。❑

脆性材料加工

高功率纳秒绿光激光器高效切割和划刻氧化铝陶瓷

使用功率70W的纳秒绿光激光器切割氧化铝陶瓷，在合适的重复频率和加工速度下，加工的沟槽光滑，产量高。

文/MKS | Spectra–Physics

2024 年 1 月，在 Photonics West 展会的全球商业论坛上，SPIE 邀请了几位分析师评估了光子学市场的发展状况，这些分析师的报告有助于企业高管判断市场环境，了解市场发展背后的驱动因素，进而制定与时俱进的企业发展战略。

陶瓷经常用于恶劣环境下的印刷电路板（PCB）基板和高散热 LED 封装等领域，以及包括植入物和医疗设备在内的生物医学应用。由于陶瓷具备硬度、化学惰性以及在恶劣高温环境下的整体适应性等特点，它们成为众多行业的理想材料选择。制造陶瓷部件时通常会使用切割、划刻或钻孔等形式的激光加工，因此了解市场上不同激光技术的影响会有所助益。

烧结氧化铝（Al_2O_3，氧化铝）是一种常用的工业陶瓷，使用激光加工这种材料面临着多项挑战。首先，它的烧蚀阈值高，需要高通量才能有效去除材料；其次，它非常脆，基材较薄时，很容易因为过度加热而破裂；最后，氧化铝成本相对较高，容易产生狭窄的切口和密集的特征，因此脆性可能会成为严重影响产量和生产成本的问题。

为了克服这些挑战，一种众所周知的方法是使用二极管泵浦固态纳秒脉冲（ns DPSS）激光器，特别是绿光和紫外（UV）波长效果较好。

与绿光激光器相比，紫外激光器在加工氧化铝时具有多项优势，包括：在粘合剂材料中吸收率更高，可提高烧蚀效率，光斑尺寸更小，瑞利范围更长，有利于加工更密集、更高纵横比的特征。尽管紫外激光器具备以上优势，但是绿光激光器依然是一种颇具竞争力的选择，因为它们的输出功率更高，总体成本（初始成本和拥有成本）更低。

MKS Spectra-Physics® Talon® 纳秒 DPSS 激光平台，使用绿光和紫外波长切割和划刻工业陶瓷时，均展现出了优异的质量和产量。本文将介绍使用 Talon GR70 纳秒绿光激光器加工的效果。

氧化铝板材料的划线加工

Talon 绿光纳秒激光器输出波长 532nm，可以在 275kHz 的脉冲重复频率（PRF）下，可提供超过 70W 的平均功率；并且能在高达 700kHz 的重复频率下，保持超过 60W 的功率，同时纳秒脉冲宽度更短。在测试中，使用 f = 100mm 的 f-theta 透镜将激光聚焦至直径约 16μm（$1/e^2$）。通过高速多次加工实现切割和划刻，扫描速度为 4m/s，并且通过改变扫描次数来控制划线深度。

对 200 μm 厚的氧化铝板材料进行划线，激光器参数为 65W、500kHz，脉冲能量输出 130μJ。图 1 显示了 25μm 深、

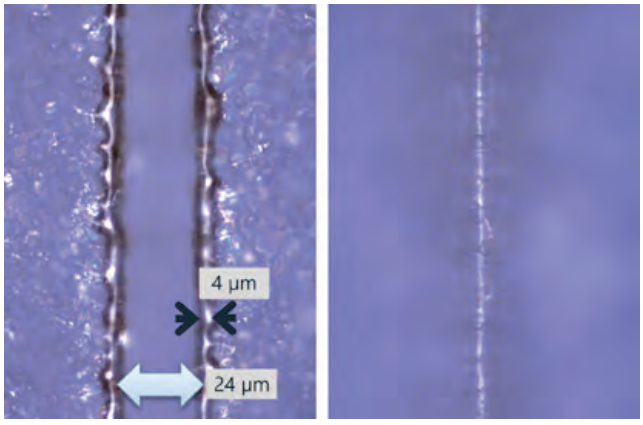


图1：划线俯视图，观察位置分别为表面顶部（左）和划线底部（右）。划线宽度为 24μm，热影响区（HAZ）为 4μm。划刻底部的视图显示出深度均匀的光滑沟槽。

24μm 宽的划线结果，加工方式为以 4m/s 速度进行 10 次重叠扫描，净速度为 400mm/s。划线周围几乎没有碎屑，热影响区（HAZ）小于 5μm 且非常均匀。此外，划线底面光滑、深度均匀，说明所用的扫描速度和 PRF 为最佳组合。

为了对氧化铝板进行全切割，必须按固定的横向间距加工多条相邻的平行划线，以加宽切口。这有助于补偿随着划线变深而降低的划刻效率（每次扫描的深 度）。由于划线会随着深度增加而自然趋向于变窄（有锥度出现），可以配合这种趋势，减少相邻划线的数量。MKS Spectra-Physics 改进了这种锥度配合技术，通过逐次略去最靠外的一次扫描来提高整体划刻效率，因为在不断加深的沟槽中，靠外的扫描烧蚀的侧壁材料较少。

Talon UV&GR系列激光器加工氧化铝的沟槽深度 Vs. 加工速度

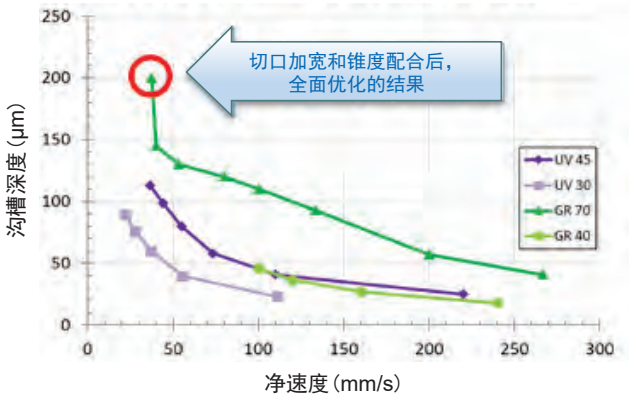


图2：四种不同Talon激光器（分别为UV30、UV45、GR40 和 GR70）加工的沟槽深度与净加工速度对比。图中显示，Talon GR70的净速度显著提高，切割200μm厚的氧化铝时，净加工速度达到了37.5mm/s。

图 2 显示了几种不同的 DPSS 纳秒激光器加工的沟槽深度与净速度对比。与功率级别为 30W 和 45W 的 Talon UV 系列紫外激光器和低功率绿光激光器相比，Talon GR70 的产量显着提高。红圈标出的是结合采用切口加宽和锥度配合后全面优化的结果，以 37.5mm/s 的净速度实现了 200μm 厚氧化铝板的全切割。与 Talon UV45 在相同净速度下取得的结果相比，深度增加了一倍。其他数据点代表未采用切口加宽或锥度配合的多次重叠扫描的划线深度。

与低功率绿光和紫外激光器相比，Talon GR70 划线深度的显著改善，不能单纯用平均功率参数来解释。例如，在净速度为 100mm/s 时，GR70 在 65W 功率下的加工深度几乎是 GR40 和 UV45 激光器的 2.4 倍，而功率则分别为 1.63 倍和 1.44 倍。额外的效率提升可能是由于更高的 PRF（3.3 倍）和更长的脉冲宽度（2 倍）增加了材料发热，这有利于提高产量，前提是要保持材料充分冷却，以避免破裂和低热影响区等热应力故障。值得注意的是，划线较深时，GR70 相对于 UV45 激光器的深度优势会有所降低。这可能是由于紫外波长较短，导致瑞利范围较长，有利于加工较高纵横比的特征。

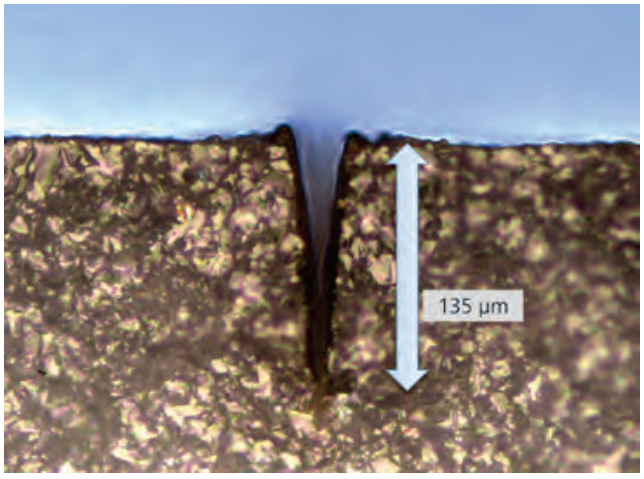


图3：深135μm的高纵横比（5:1）划线横截面显示，划线内部碎屑堆积极少，热影响区小。未进行任何后处理或清洁。

在陶瓷上加工高纵横比深划线较为困难，部分原因是侧壁有角度导致通量降低，碎屑也难以排出。随着划线深度的增加，碎屑容易积聚，会减缓加工速度并最终阻碍烧蚀。对 Talon GR70 加工出的一条较深划线进行横截面观察，显示出一 致的 6° 锥度，整体纵横比为 5:1（见图 3）。作为尚未进行后处理的加工划线，其质量非常出色，热影响区小，残留碎屑极少。

由于具备多种有利的材料特性，氧化铝等工业陶瓷在从医疗器械到电子产品封装的多个应用领域得到广泛使用，但同时也带来了一些加工挑战。氧化铝的烧蚀阈值高，需要高激光通量，并且容易因热应力导致破裂。本文中的测试结果表明，Talon GR70 是氧化铝加工的理想工具，因为它能够同时实现高产量和高质量，性能远优于低功率绿光和紫外激光器。划线结果显示沟槽底面光滑、热影响区极小，并且几乎没有碎屑沉积。通过切口加宽和锥度配合优化，200μm 厚的氧化铝板的净切割速度可以达到 37.5mm/s。

Talon GR70纳秒绿光激光器

Talon GR70 纳秒绿光激光器具备如下性能要点：

- 超高性价比，在划刻和切割氧化铝时展示出优异的产量和质量。
- 其高 PRF 优化点（275kHz下 70W，700kHz下输出超过 60W）非常适合以更高速度对陶瓷进行显微机械加工。

下转第53页

塑料焊接

功率与速度的最佳配合下 980nm 半导体激光器成为塑料焊接利器

980nm半导体激光器在合适的夹具、激光功率和焊接速度的最佳工艺下，能实现精密可靠的塑料焊接。

文/纳飞光电

塑料广泛应用于各个工业领域，工业生产对塑料的需求量已经逐步接近甚至超过了钢铁材料。特别是在电子制造、医疗、食品包装、汽车等行业，塑料已经成为不可或缺的关键材料之一，生产中对各个塑料零部件的精准、高强度连接需求，也在随着塑料的大量使用而日益增多。



图1：焊接汽车塑料件。

塑料件连接工艺的选择，对塑料制品的最终应用有着重要影响。传统的塑料连接工艺有螺纹连接、胶黏连接、插入连接、压合连接等，以及以热板焊接、超声波焊接为代表的熔融连接。这些结合方式的优点是操作简单、连接方便，适用性强；但缺点也比较明显，比如有特定形状要求，连接强度相对较低，在面对三维几何形状、中空等复杂不规则图形，以及大型零部件，乃至连接后对气密性有一定要求的塑料件，可操作空间小，效率较低。

与此同时，在追求产品创新与品质提升的现代工业领域，对焊接质量的要求越来越高。随着激光技术的发展，也推动了塑料焊接工艺的逐步应用，激光塑料焊接技术成为一个重要的发展方向，正逐渐成为连接材料的新宠，常用于白色家用电器塑料件、汽车塑料件等部件的焊接。

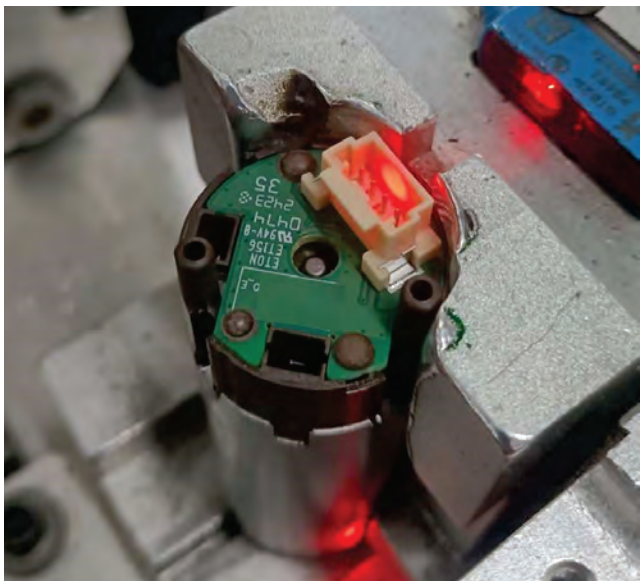


图2：焊接白色结构件。

激光塑料焊接原理

激光塑料焊接又称为激光透光焊接，要求上层塑料工件透光率高，下层工件则能吸收激光能量，因此当前主流焊接的对象为“透明塑料＋黑色塑料”、“透明塑料＋透明塑料”的组合方式。

由于大部分透明塑料对 800nm~1100nm 波段的光透过率较高，吸收小，基于此纳飞光电推出了 980nm 半导体激光器，其在紧凑的结构中集成了高精度控制系统，使用方便。其利用先进的半导体激光技术，输出中心波长为 980nm 的近红外激光，该波长的激光能量能穿透透明或半透明塑料表面，被下层吸收并转化为热能，可用于实施精准高效的塑料焊接。该激光器具有较高的电光转换效率，提供连续

激光输出，功率级别可以根据焊接工艺需求选择，范围可以从数瓦至数百瓦调节输出，使其可兼顾大面积、高速度的塑料组件焊接作业。

激光塑料焊接实际应用中除了包括激光器本体，还需要搭配焊接头以及焊接夹具等。使用 980nm 半导体激光器进行塑料焊接时，先将两个待焊接零部件借助夹具装配在一起，焊接的基本原理是焊接头输出的激光束透过上层透明塑料，在程序控制下精确投射到下层塑料件的待焊接区；下层塑料在吸收高度聚焦的激光能量后熔融，并使上下两层塑料件接触面热交换充分熔化并结合在一起，在一定外力辅助下，冷却后形成焊缝，完成最终焊接。

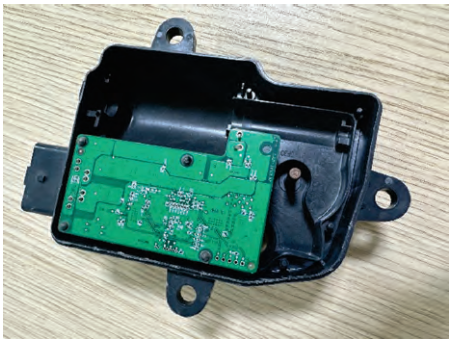


图3：焊接电路板塑料结构件。

同时，借助专用的控制系统，可以实现透射焊接过程中的精确热量控制和局部加热，焊接质量一致，避免对周边材料造成不良影响，广泛应用于汽车零部件、医疗器械、电子元件等行业中的精密塑料部件焊接。

PC+ABS塑料焊接测试

实际操作中，为了保证焊缝质量和足够的熔融深度，还需要综合考虑焊接速度与激光功率的关系，找到最优的工艺窗口。

以焊接 PC、ABS 塑料进行测试，先将两种塑料件置于载具叠放，并使用夹具施加压力夹紧。

调整激光输出功率到 300W、焊接速度设定为 20mm/s 时（最大可达 10000mm/s），两层塑料焊接成功，焊缝融合均匀，焊缝宽度适中，密封性好，经拉力测试强度达到要求。

激光输出功率保持 300W 不变，当焊接速度降低调整到 10mm/s 时，两层塑料焊接成功，焊缝融合均匀，焊缝较宽，密封性好；但由于熔池温度过高，可能导致其中部分材料分解，从而致使焊接强度降低。

而当功率调整到 200W，焊接速度设定为 20mm/s 时，焊缝宽度适中，融合情况良好，密封性好，拉力测试强度低于高功率时焊接的强度。

激光焊接优势

激光焊接与熔融结合的工艺类似，但前者的优势更为明显：

首先，精准度高，激光的光斑小且高度均匀性，能够精确地对准更微小的焊接部位，能够迅速将激光能量转化为焊接所需的能量，实现精密焊接，并能大幅度提升焊接效率。结合专业设计的焊接头，能够确保激光能量在焊接区域得到充分吸收，保证焊接处的强度。

其次，热影响区小，能够在焊接过程中避免对塑料表面造成热损伤，保持了材料的透明性和光洁度。这使得透光焊接后的产品既保持了原有的外观特性，又增强了结构的稳固性。

第三，解决了传统焊接方式在焊接速度和焊接质量之间的矛盾，能在短时间内完成大面积焊接，大大提高了生产效率。一个原本需要数小时的焊接作业，现在只需几分钟或几十分钟就能轻松完成，节省了大量的时间和成本。

此外，非接触式的焊接作业，避免了传统连接方式产生的机械应力和振动，保护了塑料表面的完整性，也保证了焊缝的精密性，材料间的连接更加紧密可靠，密封性极佳，满足了防水、防尘等高标准的产品要求。



图4：焊接汽车塑料件。

小结

目前，980nm 半导体激光器已经展现了强劲的市场潜力和应用价值，是塑料焊接的利器，尤其是在汽车塑料焊接方面，带来了实现高效、稳定的焊接效果。在内饰焊接中，可用于仪表盘、中控台等的焊接；在外饰件焊接中，可轻松胜任车门把手、车灯等的焊接；在汽车电子零部件焊接方面，980nm 半导体激光器同样表现出色，可用于诸多电子元器件的塑料焊接，显著提高连接强度和密封性，确保了各个零部件的稳定性和可靠性。未来，随着功能的不断开发，980nm 产品还将迎来更为广泛的应用。❑

激光切割

纳秒脉冲光纤激光器化身多功能切割工具

TruPluse nano纳秒脉冲光纤激光器可切割锂电池极耳、硅基太阳能电池、高反/贵金属、细线、非金属等众多材料。

文/通快公司

采用 GTWave 和 PulseTune 技术的被动脉冲式光纤激光器 TruPulse nano，是通快产品系列中功能广泛的工业用激光器之一。这类激光器在纳秒级脉宽范围内工作，适合各种工业应用。该类激光器完全无需保养，用户无需对其进行费时且昂贵的养护，仅需专注于结果。



图1：TruPulse nano脉冲光纤激光器。

TruPulse nano用作切割解决方案

通快 TruPulse nano 脉冲光纤激光器，凭借其在激光打标系统中的应用而闻名，但其作为精细切割工具的能力却鲜为人知。利用基于振镜的远程切割或带有同轴吹气的切割头，TruPulse nano 激光器可用于切割金属和非金属材料，还被广泛应用于光伏和电子行业的精细划线和切割应用。

锂电池正负极耳切割

TruPulse nano 激光器已被广泛应用于锂电池极耳切割工序，高达 600W 的平均功率，可以助力客户实现 200m/min 的高速模切效率。TruPulse nano 系列激光器凭借通快的 GTWave 专利及 Pulse Tune 技术，可提供丰富的脉冲波形选项，支持用户根据材料特性调整脉冲特性，以优化工艺参数，满足各种材料的切割质量和加工速度要求。

硅基太阳能电池切割

在光伏行业，纳秒脉冲光纤激光器被广泛用于硅基太阳能电池制造中的“划线”应用。目前的趋势是将较大的电池片切割成较小的条状，通过减少电阻损耗来提高性能。这些电池组件设计，高度依赖于激光器所能实现的高质量与低热损伤加工。TruPulse nano 激光器凭借优异的光束质量，是硅基太阳能电池切割 / 划线应用的最佳光源。

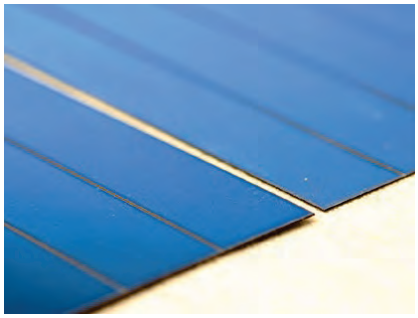


图2：使用TruPulse 1005 nano对硅基太阳能电池进行切割/划线。

高反/贵金属切割

TruPulse nano 激光器在珠宝行业也得到了很好的应用，纳秒脉冲的高峰值功率可有效耦合到金银等高反金属中。纳秒光纤激光器目前已成为加工金银制品的标准，可用于切割、打标、雕刻和制版，为设计师和制造商提供了更大的灵活性。



图3：使用TruPulse 2007 nano切割的银饰。

细线切割

另一个有趣的小众应用是利用纳秒脉冲激光器切割金属细线，这类材料过去通常使用传统的机械切割方式进行加工。这尤其适用于易变形的软金属或者易碎裂的硬脆材料。

使用简单的 20W 纳秒脉冲激光器，采用基于摆动（wobble）的多重扫描切割技术，只需几秒钟便可获得精确的、可重复的无接触式切割效果。编织线也可以切割，从而降低了单股断裂或拉扯的风险。

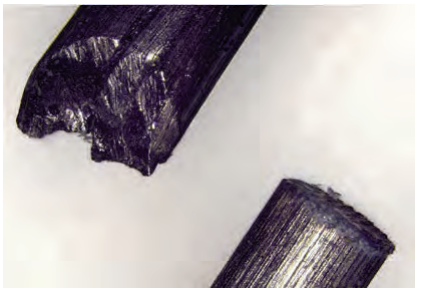


图4：使用TruPulse 2002 nano对0.7mm钨丝进行激光切割和机械切割的对比。

非金属切割

值得注意的是，纳秒脉冲光纤激光器不仅可用于切割金属材料，还能有效用于各种非金属材料的切割。对1μm 波长有一定吸收率的非金属材料，TruPulse nano 激光器可以对其进行加工，这类材料通常包括硅、碳纤维增强复合材料（CFRP）、陶瓷、橡胶以及一些聚合物。



图5：使用TruPulse nano激光器加工3mm厚的CFRP材料。

辅助气体切割

与传统CW激光器类似，TruPulse nano 纳秒光纤激光器也可与标准切割头和辅助气体喷嘴配合使用。使用 50W 的纳秒脉冲光纤激光器，就可以切割银和铜等高反材料；而使用 CW 激光器，则需要大于 200W 的功率方可完成切割。

结语

光纤激光器的多功能性在工业应用中表现突出。同一激光源可实现切割、标记和焊接微型组件，简化了制造流程并节省了制造成本。采用 MOPA 设计的 TruPulse nano 纳秒脉冲光纤激光器，在处理薄片材料和高反材料方面表现出色；随着平均功率的提升，还可取代传统的 CW 切割光源。❑

上接第26页



图 3：基于压电超声波电机的微型万向节的总尺寸，仅为 14mm × 14mm × 7mm。

大大减少了电缆和连接器，创建了一种即插即用的解决方案，最容易集成到光电子产品中。而单独的电子元件需要更多空间，并会延长开发时间。

系统尺寸：MEMS 系统并不是最小的。机电一体化减少了基于压电电机微型万向节系统（约 2cm^3；见图 3）和微型振镜系统（约 4cm^3）的体积，从而实现了最小的系统尺寸。MEMS 系统的体积略大（约 8cm^3），而传统振镜的体积是其 750 倍（1500cm^3）。

虽然 MEMS 系统元件非常小，但创建系统所需的外围设备及电子器件却相对较大。高压驱动电子元件和连接件的微型化，也具有挑战性。

系统功率：移动和保持功率。必须同时考虑移动功率和保持功率，才能为应用案例选择最佳解决方案。当移动不频繁时，保持功率占主导地位。当移动频次较高时，移动功率最为重要。在这些案例中，功率选择的跨度超过 300 倍。

移动功率最小的是 MEMS 静电反射镜，其移动功率仅为 150mW。而压电电机的移动功率要高出 5-10 倍（150~1500mW）。较小的 VCM 移动功率为 2~12W，而传统的大型振镜移动功率需 50W。

压电电机的保持功率最小，其可以通过静摩擦力保持，耗电量为零。可以通过关闭电子元件来实现。如果电子元件必须保持激活状态，则压电电机和 MEMS 静电反射镜的静态功率在 10mw 以内。

哪种光束偏转方案最适合？

在选择最佳解决方案时，要权衡利弊。传统的大尺寸振镜可以实现最佳精度和速度。具有嵌入式电子元件的压电系统，可以实现最佳尺寸、重量和功率（SWaP）。

对于高度定制化的应用来说，MEMS 系统可能并不实用。然而，MEMS 系统可以为大批量生产提供成本最低的选择。

压电电机光束偏转系统是机电一体化解决方案，专为光子仪器中的嵌入式运动系统而设计。这些创新实现了最小的系统尺寸、最简单的集成和最快的开发时间。

嵌入式光束偏转解决方案与探测器、光源、计算机处理性能、成像、生物学、量子器件和微光学领域的光子技术创新并驾齐驱。当与下一代光子学仪器相结合时，会产生更多新的功能，包括：更紧密的光通道和采样通道，以提高吞吐量；更灵敏、更快速的探测器，以更高的信噪比采集更多数据；嵌入式计算机处理和存储器，用于近传感器数字化和数据处理；缩小样品尺寸；降低功耗和热量；以及在更大范围的环境中实现稳健的主动对准。❑

超快加工

高功率皮秒激光器加工电池极片及钙钛矿电池

利用高功率皮秒激光器切割电池极片和划刻钙钛矿电池，均实现了高质量的精密加工效果。

文/英谷激光

随着工业的不断发展，生产中对于加工技术的要求也逐步提高，传统工艺已无法满足当今社会工业智能化、加工精密化的需求，激光技术应运而生。从最初的纳秒激光器，到现如今已趋于国产化的超快激光器，无一不体现出激光加工技术在生产领域的重要性、特殊性。随着激光技术的不断革新、完善，多元化市场也在持续被开拓。

超快激光器简介

超快激光器是一种基于半导体可饱和吸收反射镜（SESAM）、克尔透镜等锁模技术、脉冲宽度在 ps 甚至 fs 量级的激光器。

超快激光器峰值功率高，单脉冲能量大，在对材料进行加工时，可以有效减少热效应，边缘效果好，无熔边，大大提高加工质量，提升加工效率。

超快激光器新应用：极片切割

国家目前正在大力推广新能源汽车产业发展。根据行业市场分析，截至 2023 年底，我国新能源汽车保有量为 2041 万辆，占汽车保有量比重为 6.1%，较 2022 年底提升两个百分点。新能源车前景乐观，动力电池和电极极片作为新能源汽车的核心部件，直接影响着汽车的性能与续航，与动力电池、电极极片有关的技术创新和优化都备受行业瞩目。

（1）超快激光切割极片基本原理

激光切割的基本原理，是利用高功率密度激光束照射被切割的电池极片，使极片很快被加热至很高的温度，迅速熔化、汽化、烧蚀或达到燃点而形成孔洞；随着光束在极片上的移动，孔洞连续形成宽度很窄的切缝，从而

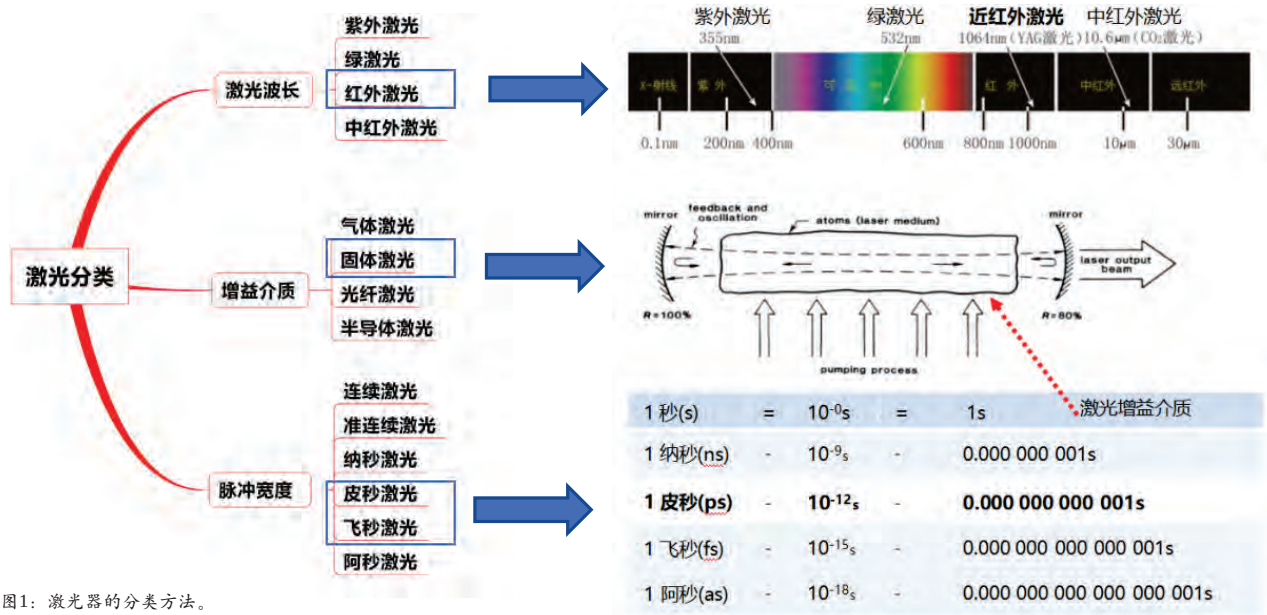


图1：激光器的分类方法。

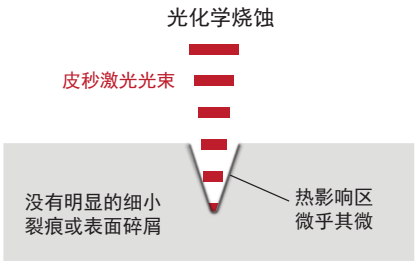


图2：激光切割示意图。

完成对极片的切割。

其中，激光能量和切割移动速度是两个主要的工艺参数，对切割质量影响巨大。当激光功率太低或者移动速度太快时，极片不能完全切开；而当功率太高或移动速度太低时，激光对材料作用区域变大，切缝尺寸随之增大。

锂电池极片是双面涂层、中间为集流体金属层的结构，而且涂层与金属箔材之间性质差异大，对激光作用的响应也不相同。激光作用在负极石墨层或正极活性物质层时，由于它们具有很高的激光吸收率，导热系数也很低，因此，涂层需要相对较低的熔化和汽化能量；而中间的金属集流体对激光具有反射作用，并且热传导快，因此金属层的熔化和汽化需要的激光能量更高。

（2）切割案例

采用英谷激光 300W 皮秒红外激光器（见图 3），分别对厚度 10μm 的铝箔、厚度 150μm 负极材料、厚度 150μm 的三元锂材料和厚度 200μm 的磷酸铁锂材料进行切割。切割效果显示，各类材料边缘（毛刺＋热影响）≤40μm，断面毛刺 ≤10μm（见图 4a-d）。

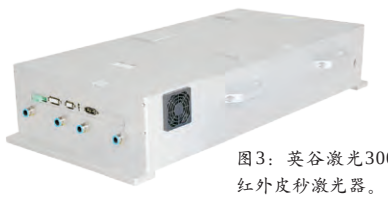
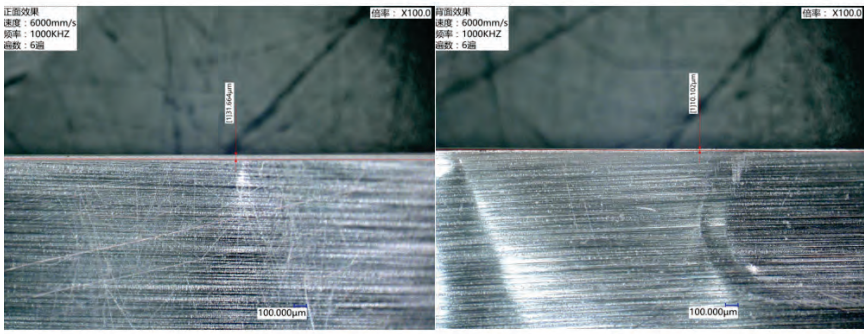
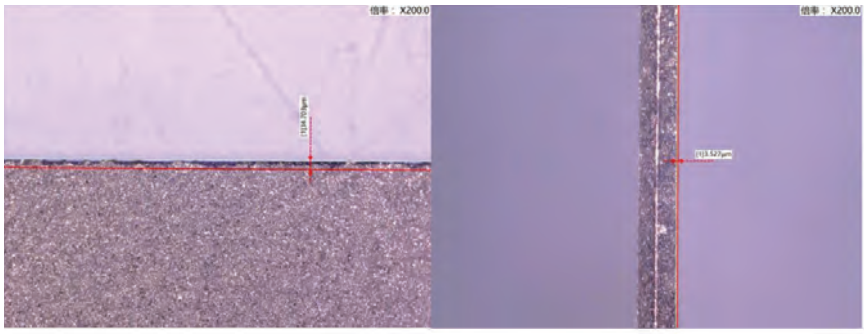


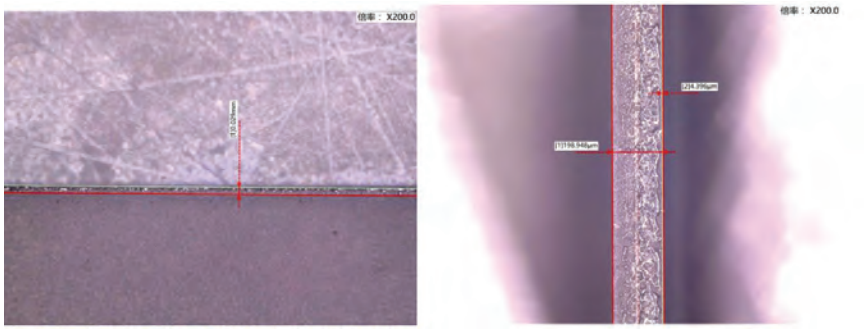
图3：英谷激光300W红外皮秒激光器。



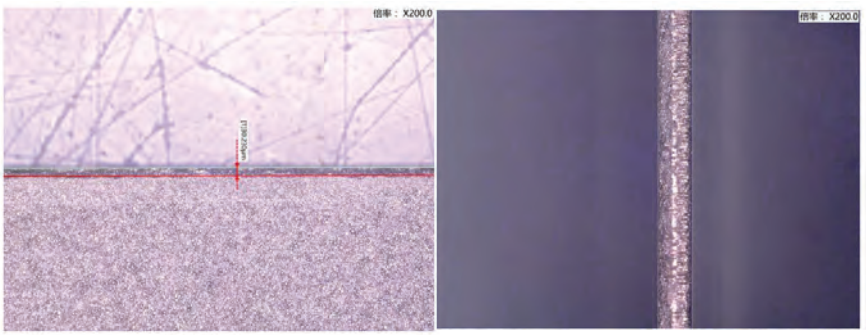
(a) 铝箔区切割效果。



(b) 负极材料切割效果。



(c) 磷酸铁锂材料切割效果。



(d) 三元锂材料切割效果。

图4：英谷激光300W皮秒红外激光器切割各类极片的效果。

皮秒激光的模切工艺，解决了目前五金模切存在的问题，让电极极片实现了高效高质量的切割。与传统的切割方式相比，激光切割具有无污染、更环保、边缘效果好、加工精度高、加工工具无损耗，运行成本低等优势，

能够有效提升加工效率、降低企业生产成本，缩短新产品的模切周期（见表 1）。

同时具备窄脉宽和高重复频率的激光器，是动力电池切割的理想选择。英谷激光的高功率 300W 红外皮秒激光器，平均功率大，重复频率高，效率高，能够替代传统模具，为动力电池的加工提供更柔性、更便捷的加工方式。激光切割一方面节约了五金磨具的换刀片时间，另一方面也省去了极片换型的时间，显著提升了加工效率。从成本角度看，皮秒激光器后续维护成本低，无需耗材，不会出现五金模具切割修模、换模的情况，降低了企业成本，性价比更高。

表1：超快激光切割与传统切割的对比

当下传统工艺	
项目	说明
五金刀模	1.经常修模(~100万/次)，修模10次后需更换整套模具； 2.大尺寸极片对模具要求高，成本相对较高； 3.五金模具状态不良会产生毛刺，导致制片不良； 4.换型需更换模具，浪费时间，不适合柔性生产； 5.大尺寸模具冲压产生振动越大，多台设备存在共振风险； 6.为增加能量密度，正极材料越来越紧实，模具越易损化；

激光制片工艺	
项目	说明
皮秒激光制片	1.维护成本低，一次投入，可完全替代五金刀模； 2.皮秒激光加工，不易产生毛刺熔珠，制片品质高； 3.实现柔性生产，减少换型时间； 4.激光制片，节省设备工艺制程；

钙钛矿刻蚀

除了极片切割这一新应用，钙钛矿刻蚀也是当下热门的话题。

钙钛矿太阳能电池（PSCs），是利用钙钛矿型的有机金属卤化物半导体作为吸光材料的太阳能电池，是第三代高效薄膜电池的代表，也被称作新概念太阳能电池。一般称晶体硅太阳能电池为第一代太阳能电池，而将一般型的薄膜太阳能电池归为第二代。

第一代太阳能电池制作工艺简单，但由于关键材料晶体硅的价格比较高，因此成本高；且单晶硅太阳能电池的光 - 电转换效率已接近 29.4% 的理论极限，未来效率提升空间小。而第二代薄膜太阳能电池虽然材料和制作的成本较低，但其转换效率低，仅有 6%-10%。

为了寻找以上两种太阳能电池的替代品，钙钛矿太阳能电池应运而生。它凭借着良好的吸光性、电荷传输速率、巨大的开发潜力和绿色环保的加工过程，实现了高效率、高柔性、低成本，被称为“光伏领域的新一代革命者”。随着钙钛矿原材料的量产化，成本正在大幅降低；与此同时，钙钛矿太阳能电池还可以通过与晶硅电池叠层，形成晶硅 / 钙钛矿叠层电池技术路线，为光 - 电转换效率带来质的飞跃，目前全球最高纪录已达 33.2%，未来应用市场潜力较大。

钙钛矿电池虽然优势很突出，但它的工艺精度要求到 0.3~0.5 μ m，对于激光设备的技术指标、加工精度要明显高于晶硅电池。

钙钛矿电池结构一般被认为包含 P1、P2、P3 三层，P1 为 FTO 导电玻璃层，P2 为 ITO 或钙钛矿层，P3 为镀金材料或度银材料，也有些项目组使用碳粉材料。

激光刻蚀作为钙钛矿电池制造工艺中的关键环节，其作用在于对 P1、P2、P3 进行激光划线，阻断导通，确保电池间的绝缘性，使整个钙钛矿面板形成一道道的子电池，实现增大电压和串联电池的效果，并负责 P4 的清边，从而完成最后的封装环节。该工艺的难点主要体现在以下两方面：

第一，划线工艺控制

激光划线非常容易损伤电池，对于激光器的功率、脉冲宽度的要求极高。需要保证在对下一层激光刻蚀的同时不伤及上一层级，尤其是 P3 层衬底为钙钛矿薄膜，厚度仅百纳米量级，能否做到精准划线，直接影响着钙钛矿电池的良品率和寿命。

第二，划线线宽

在钙钛矿太阳能电池生产过程中，有三个步骤需要激光划线，可称之为 P1 线、P2 线和 P3 线。这三条线所包围的区域是不能用来发电的，故而被称为死区。死区越大，光能转化为电能的效率就越低；死区越小，发电有效面积越大，光能转化为电能的效率也就越大。由于死区面积和 P1、P2、P3 的线宽直接相关，因此提升激光刻蚀线宽、激光刻蚀线间距的精确度，成为了钙钛矿电池技术突破的首要任务。

激光器作为激光设备的核心零部件，更是重中之重。随着钙钛矿太阳能电池的迅速发展，对于加工的精度和效率要求越来越高，现有的纳秒激光器已无法满足需求。皮秒激光器成为新的刻蚀工具。根据每家公司的情况不同，可选择皮秒紫外、绿光或者红外激光器进行刻蚀。目前，英谷

激光的皮秒紫外激光器功率最高可达 100W，绿光最高达 200W，红外最高达 300W，可按需选择。

采用英谷皮秒激光器进行实验，将激光器光斑通过 DOE 整形成方平顶光进行单次划线测试。以国内某家的反式钙钛矿电池测试为例，皮秒激光器用来去除钙钛矿电池中的 P2 + P3 层。

刻划 P2，去除钙钛矿层，厚度为 400~600nm（空穴传输层 + 钙钛矿吸收层 + 电子传输层以及其他钝化层），暴露底电极且不损伤底电极；刻划的线槽为相邻的两节子电池正负极提供通道。测试结果显示，划刻线宽度为 30~60μm（可选），热影响区 ≤1μm，火山口 ≤8nm。

刻划 P3，将 P2 层、传输层、顶电极层全部划开，厚度为 600~1000nm；刻划形成子电池之间的相互独立，并通过上下电子层形成相连的结构。测试结果显示，划刻线宽为 20~60μm（可选），热影响区 ≤6μm，火山口 ≤60nm。

钙钛矿的发展前景

2023 年 9 月，国家能源局发布《关于组织开展可再生能源发展试点示范的通知》，将钙钛矿及叠层太阳能电池列入示范工程。2023 年 11 月，工信部等五部门发布《关于开展第四批智能光伏试点示范活动的通知》，优先考虑方向中包括钙钛矿及叠层太阳能电池。国家一系列利好政策的出台，持续助力钙钛矿电池行业的发展。据中商产业研究院分析师预测，2024 年中国钙钛矿电池渗透率将达到 0.5%，2030 年将增长至 30%。2024 年中国钙钛矿电池新增产能将达 2GW，2030 年将达 161GW，市场前景广阔。

超快激光器正在朝着更高功率、更大单脉冲能量的趋势发展，促进光伏、新能源等行业的蓬勃发展。近年来，超快激光器也在逐渐由国外进口转向国产化，国产高功率超快激光器市场覆盖率不断提高，打破了国外垄断，为光伏、新能源等行业带来大幅度的降本增效。❑

上接第11页

品中，并且还将用于虚拟现实（VR）和显示等应用中。”Robin 说道。

Tematys 预测，用于光学的超构材料和超构表面的收入将从 2022 年的 2660 万美元，增长到 2029 年的 7.79 亿美元。在射频市场，预计超构材料和超构表面的收入将从 2022 年的 1.128 亿美元，增长到 2029 年的 5.601 亿美元。

超构材料使用标准材料的结构图案来实现独特的光学特性。Robin 指出，在光学 / 光子学领域，超构材料的应用包括滤光器和组合器、波前选择性金属透镜以及有源波束成型 / 波束控制器件；在 RF 应用中，其应用包括天线、无源发射机 / 反射器和有源波束成型 / 波束切换器件。

在光谱仪领域，Robin 表示，“我们看到芯片尺寸大小的光谱仪市场的巨大增长，特别是因为它们已经用在智能手机中（用于相机增强）。”尽管他没有透露具体的增长数字，但他在演讲中的一张图表显示，到 2026 年这类光谱仪的市场规模将超过 5 亿美元，这类光谱仪主要用于消费应用，而在 2020 年这个市场还几乎为零。

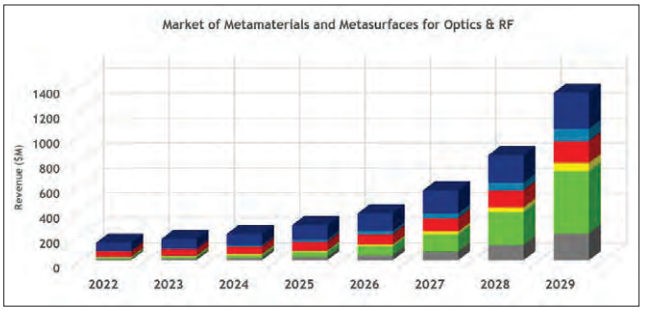


图4：Tematys预计，到2029年，用于光学和射频领域的超构材料和超构表面的总市场收入将增长到超过13亿美元，八年间的复合年均增长率高达38%。（图片来源：Tematys）

增长背后的驱动力

对于光子学市场增长背后的驱动因素，Robin 总结了以下几点：

- 对高速数据传输的需求不断升级，以满足数字化、机器学习和物联网（IoT）的需求，并且这些需求还在不断发展。
- 对用于 AR/VR、自动驾驶汽车、高级驾驶员辅助系统（ADAS）、过程自动化和无人侦察的远程视觉和传感技术的需求，不断增长。
- 数字化和增材制造的进步，实现了更高的精度、更少的浪费和更大的设计灵活性。
- 医疗保健和生命科学的快速发展，实现了更好的诊断、个性化医疗和创新治疗。
- 随着各国政府努力应对地缘政治带来的不稳定性，各国政府越来越关注国防和监控创新，并加强其供应链。❑

激光清洗

如何为清洗应用选择合适的激光源？

在激光清洗中，需综合考虑要清洗的材料、不损伤基材以及清洗效率等诸多因素，选择合适的脉冲或连续激光器。

文/深圳市杰普特光电股份有限公司

激光清洗技术作为一种高效、环保的清洗方式，正在逐渐替代传统的化学清洗和机械清洗方法。随着国家对环保要求的日益严格，以及工业制造领域对清洗质量和效率的不断追求，激光清洗技术的市场需求正在快速增长。中国作为制造大国，拥有庞大的工业基础，这为激光清洗技术的广泛应用提供了广阔空间。在航空航天、轨道交通、汽车制造、模具制造等行业，激光清洗技术已经得到了广泛应用，并且正在逐步向其他行业拓展。

工件表面清洗技术在很多领域都有广泛的应用，传统的清洗方法往往是接触式清洗，对清洗物体表面有机械作用力，损伤物体的表面或者清洗的介质附着于被清洗物体的表面，无法去除，产生二次污染。现如今国家倡导发展绿色环保的新兴工业，用激光清洗是最好的选择。激光清洗的无研磨和非接触性，使这些问题迎刃而解。激光清洗设备适用于各种材质的物体清洗，被认为是最可靠、最有效的清洗办法。

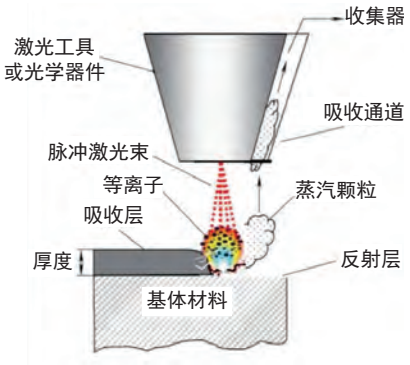


图1：激光清洗原理图。

激光清洗原理

激光清洗是通过将高能量密度的激光束照射到物体待清洗的部位，使激光被污染层和基底吸收，通过光剥离、气化等过程，克服污染物与基底之间的粘附力，使污染物离开物体表面，进而达到清洗目的，并且不损伤物体本身。

在激光清洗领域中，光纤激光器以其超高的光电转换效率、优异的光束质量、稳定的性能和持续发展性，已经成为现在激光清洗光源中的优胜者。光纤激光器由脉冲光纤激光器和连续光纤激光器两种类型为代表，分别占据着宏观材料加工和精密材料加工的市场领先位置。

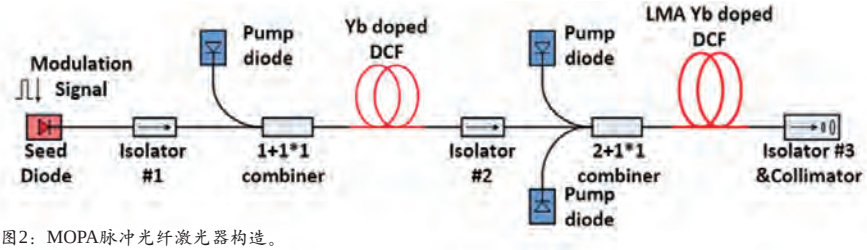


图2：MOPA脉冲光纤激光器构造。

MOPA脉冲光纤激光器 vs. 连续光纤激光器清洗应用对比

对于新兴的激光清洗应用，不少人面对市面上的脉冲激光器和连续激光器，可能会有些困惑：到底该选用脉冲光纤激光器还是连续光纤激光器呢？下面采用两种不同类型的激光器对两种材料表面进行除漆实验，用最佳的激光清洗参数，优化好的清洗效果进行对比。

测试机型分别为CL-300-10-A MOPA脉冲光纤激光器和CW-R-B-W-2000L连续光纤激光器，见图3。



图3：CL-300-10-A MOPA脉冲光纤激光器（上）和CW-R-B-W-2000L连续光纤激光器（下）。

测试结果如图 4、图 5 所示。通过微观观察，钣金经高功率连续光纤激光器加工后，产生了重熔现象。钢材经 MOPA 脉冲光纤激光器加工后，轻微损伤基材，保持基材纹路；经连续光纤激光器加工后，产生严重损伤和熔融物质。

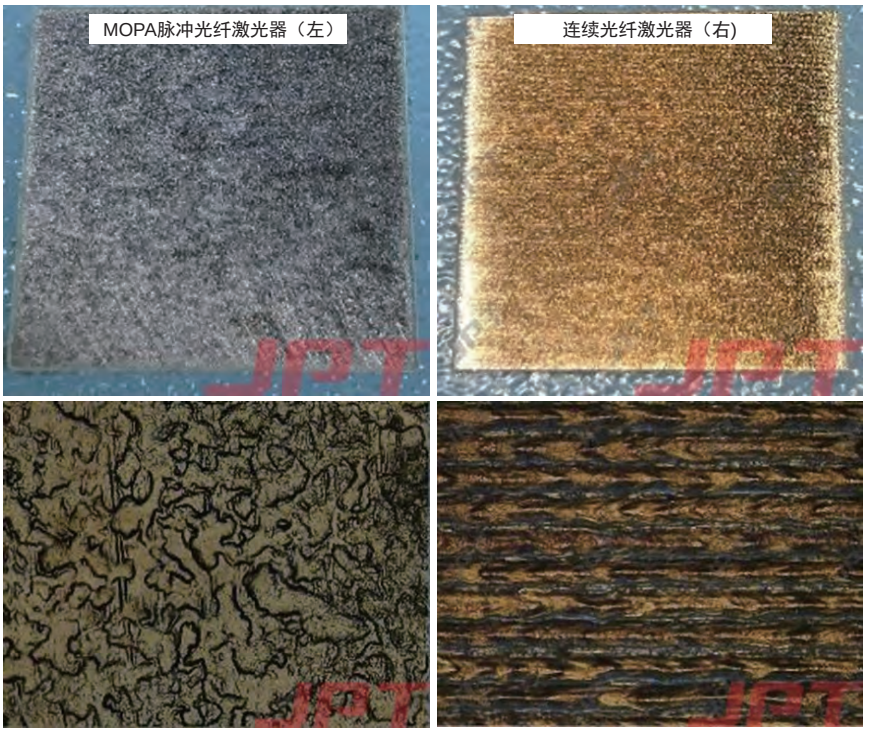


图4：使用MOPA脉冲光纤激光器（左）和连续光纤激光器（右）对钣金表面脱漆后的表面效果（上）和微观图（下）对比。

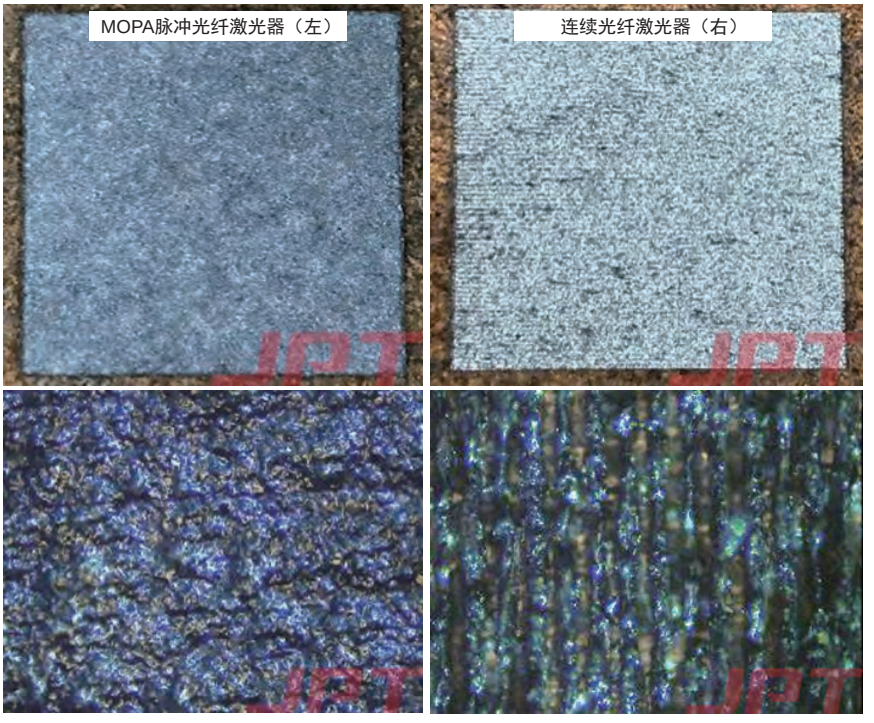


图5：使用MOPA脉冲光纤激光器（左）和连续光纤激光器（右）对钢材除锈后的表面效果（上）和微观图（下）对比。

通过以上对比可知：连续光纤激光器因其热量输入大，易导致基材变色及变形；如对基材损伤要求不高，且材料清洗的厚度较薄的情况下，可选用该类激光器作为光源。MOPA 脉冲光纤激光器是靠高峰值能量和高重频脉冲的方式作用到材料上，通过对清洗物瞬间气化和震荡让其剥离；其拥有热效应小，兼容性高，精细度高，可做到不破坏基材的特点。

由此结论，面对精密度高，需要严格控制基材升温，要求基材无损的应用场景，比如喷漆后的铝、模具钢，推荐选择 MOPA 脉冲光纤激光器；对于一些大型高强度铝合金材料、圆形管道等，由于体积大散热快，对基材损伤要求不高，可以选择连续光纤激光器。

单模及多模激光器的原理及应用区别

（1）单模及多模激光原理简介

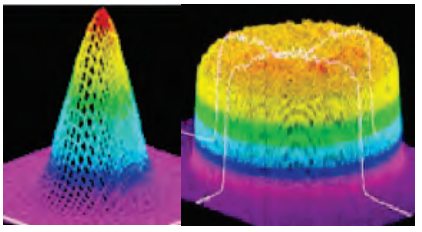


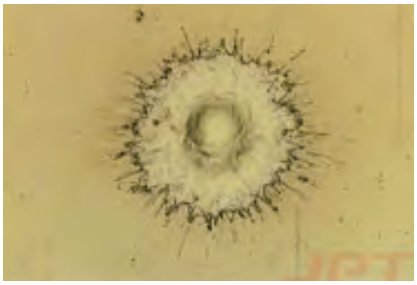
图6：单模（左）和多模（右）。

单模

单模指的是激光能量在二维平面上的单一分布模式，也指激光束的横模，即横截面内只有一个模式，呈山峰形状，中心至外缘的能量密度依次递减，能量分布为高斯曲线形式，也称为高斯光。

多模

多模指的是多个分布模式叠加在一起而形成的空间能量分布模式，也指激光束的横模，即横截面上有很多



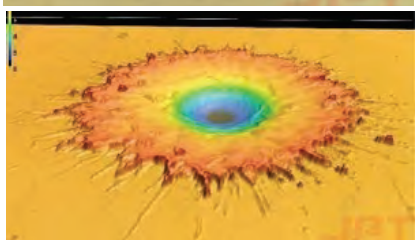
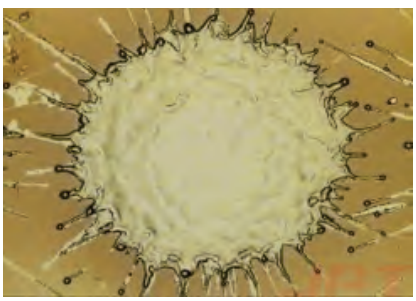


图8a：CL-1系列光斑图，单模。



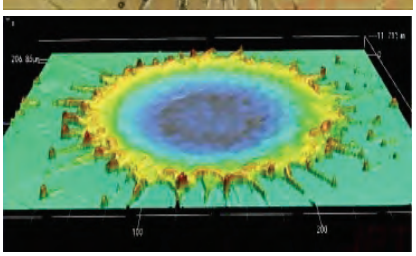
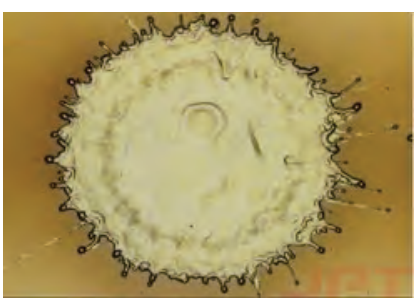


图8b：CL-5系列光斑图，多模。



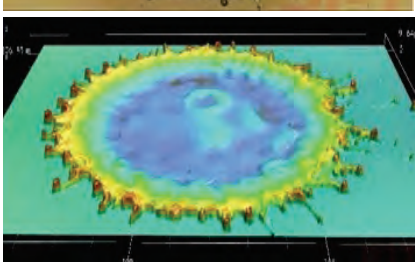


图8c：CL-10系列光斑图，多模。



图7：CL-2000-100-W多模光纤激光器（上）和CL2-200-1&5-A单模光纤激光器（下）。

个能量点，模式越多，则能量越呈现平顶分布，也称为平顶光。

凭借在核心光源领域的技术创新和经验积累，杰普特公司针对激光清洗应用自主研发了 MOPA 100~2000W 功率段的 CL 系列激光器（见图 7），其优势在于轻量化的机壳及输出头设计，拥有单模、多模多种光束类型系列的光源可供选型，后续还将继续研发升级 CL 系列。

（2）单模及多模激光加工光斑形貌对比

根据图 8a-c 可以看出，CL-1 系列光斑效果呈现“深坑状”形态；CL-5 系列光斑效果呈现平顶式的“弧状”形态，CL-10 系列光斑内部有深度，像外围火山口。

（3）单模及多模应用区别

多模和单模的区别：单模发出的是典型的高斯光束，能量非常集中，类似陡峭的山峰（见图 6 左），光束质量也要优于多模；多模相当于是多束高斯光束的组合，所以能量分布近似一个倒扣的杯子（见图 6 右），比较平均，当然光束质量较单模也要差一些。

根据不同的特性表现，单模和多模的应用方向也有所区别，比如在除漆、除锈、去油污和毛化应用中，若被清洗物有一定厚度或锈渗透进材料里层的，选用单模激光器去清洗比较合适；若对材料有较高要求，不能伤基材的情况，可以选择多模激光器去清洗。

激光清洗实验

（1）不锈钢除漆清洗实验

在不同能量密度下，通过材料微观图（见图 9）可以看出，CL-1 系列伤基材，大部分基材纹路被打掉了；CL-5/-10/-15 系列不伤基材，保留材料基材纹路。

（2）碳钢基材除锈清洗实验

通过碳钢基材除锈清洗实验（见图 10），CL-50 系列宏观效果表面更为平整，表面粗糙度值也会更小，因为 CL-50 的光斑比 CL-15 的光斑更大

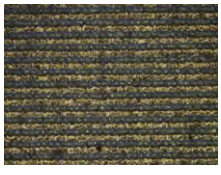
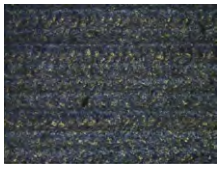
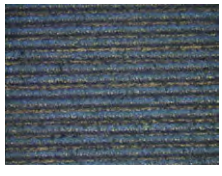
	CL-1系列 单模	CL-5系列 多模	CL-10/15系列 多模
F160			
F254			

图9：不同能量密度下，CL-1/-5/-10/-15的清洗效果。

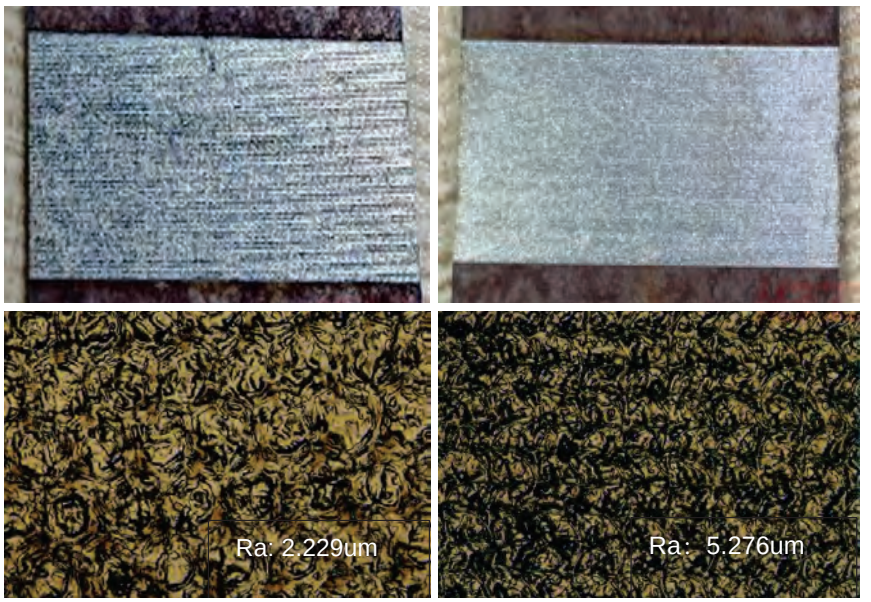


图10：使用CL-1000-15（左）和CL-1000-50（右）获得的碳钢清洗效果。

一些；且与单模相比，多模的平顶光能更有效地利用能量，对清洗基材损伤程度能减到最小，适用于对基材要求高的工况。

（3）元素分析测试

采用 JCM-7000 扫描电子显微镜对表面元素含量进行元素分析，具体结果见表 1。

从表 1 可看出，经 CL-10 系列激光器清洗后，材料表面 SiO_2 的含量下降了 0.21%，SO_3 的含量下降了 3.1%，氯已经被清洗掉了；经 CL-1 系列激光器清洗后，所有表面元素完全被清洗掉了。

通过元素数据分析，在固定的清洗次数下，多模清洗后，表面的氧化物还有残留；单模清洗后，表面的杂质基本去除干净，效率也相比于多模会更好。

综上所述，以上实验验证单模和多模的原理及应用效果区别。CL-1 系列激光器可以彻底清洗表面锈迹，但在基材表面易造成纹路的损伤；CL-5/-10/-15 系列在去除涂层或漆面的同时，对基材几乎没有影响，能够有效保留基材的原始纹路；CL-50 系列聚焦光斑比 CL-15 系列更大，在宏观效果上更具优势。

单、多模激光宏观上都可以去除表面氧化层，单模清洗后比较彻底，对材料基材损伤程度较大。多模清洗后表面粗糙度较低，对材料基材损伤程度更小，但是清洗不到材料里层的物质，同等参数下多模的清洗效果会更好。

像激光除锈、剥阳极、焊前焊后处理、手持打标等这些应用，使用杰普特研发的 CL-1/5/10 系列清洗激光器效果更佳；如果材料需要高效率清洗，用较大光斑的平顶光去加工材料更合适，如 CL-10/15/50 系列清洗激光器；如需要除漆、除镀层、除薄锈且不伤基材的应用，可使用 CL-50/100 系列激光器。

除了 CL 系列，杰普特公司还研发了 200~1000W 功率段的 M7 系列光源，也属于单模激光器，M7 系列采用隔离器输出，对高反材料加工效果更佳，光束质量比 CL 系列更优，加工底纹更加细腻。M7 系列适用于激光除锈、表面处理、薄板切割、焊接、雕刻、钻孔、剥涂层等应用。

在激光清洗中，需综合考虑材料情况以确保在满足清洁需求的同时，最大程度地减少对基材的损伤。根据实际工作情况，选择合适的激光光源至关重要。

激光清洗想要走入规模化应用，离不开新技术和新工艺的创新，杰普特将继续坚持激光 + 的定位，控制好发展节奏稳扎稳打，努力深耕上游核心激光光源技术，重点解决关键激光材料与部件关键问题，为先进制造提供动力之源。❑

表1：表面元素含量分析

元素/ (含量%)	未清洗材料	CL-10系列清洗	CL-1系列清洗
二氧化硅 (SiO_2)	0.47%	0.26%	0%
三氧化硫 (SO_3)	4.18%	1.08%	0%
氯 (Cl)	0.33%	0%	0%

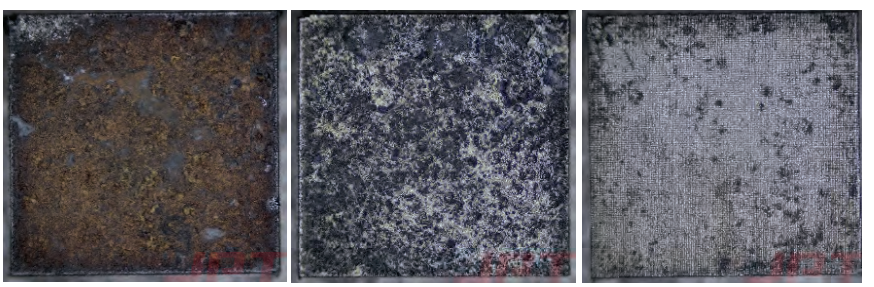


图11：（a）未清洗材料　（b）CL-10系列清洗效果　（c）CL-1系列清洗效果

好奇心和对知识的渴望，成就超构光学领域的佼佼者

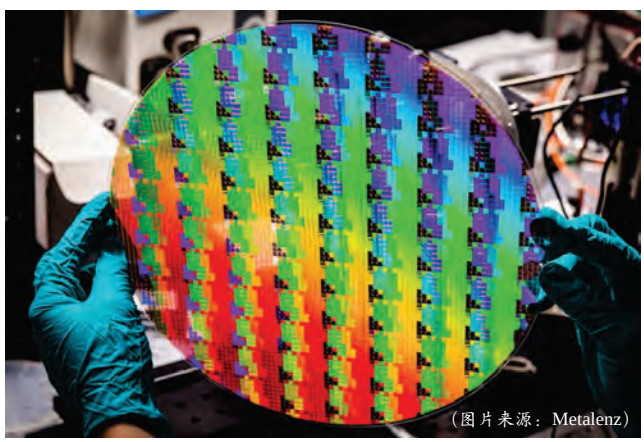
编者按：

成立于2016年的Metalenz公司，是全球第一家将超构光学元件商业化的公司，并在短短的时间内获得了可观的发展，成为光学技术领域脱颖而出的一匹黑马。希望Metalenz公司联合创始人兼首席执行官Rob Devlin的成长、学习和从业经历，能给读者带来有价值的启发。

文/Jose Pozo

Metalenz 公司联合创始人兼首席执行官 Rob Devlin，在成长的过程中深受祖父的影响。Devlin 的祖父是一位二战时期的无线电操作员和自学成才的工程师。Devlin 小时候经常和祖父一起组装电阻器、电容器和各种其他元器件，以创建功能性的解决方案，将不同的无线电元器件化身为可操作的设备。到了十几岁的时候，Devlin 开始自己动手建造滑板坡道，并在自家后院设计出了精致实用的“滑板公园”。

这些早期的经验和兴趣为 Devlin 的职业发展奠定了基础，这使他后来希望利用材料科学和工程方法，以最佳效果解决现实世界中的应用问题。



（图片来源：Metalenz）

好奇心的驱使

Devlin 选择进入美国德雷塞尔大学学习电气工程，专注于半导体器件。然而，在完成了大约两年的本科学习后，他意识到自己的热情更多的是在选择具有正确性能的正确材料，并对其进行工程设计，以获得尽可能好的结果——这需要将材料科学和电气工程相结合。

进入硕士课程的学习后，Devlin 对材料科学的关注度越来越高。硕士学习期间，他抓住机会开始了一个关于材料的开放式项目。作为实验室中唯一一个具有电气工程背景的学生，他被允许可以根据自己的直觉去探索潜在的场景，而不受现有技术的限制，这让他将视野扩大到更广的范围。Devlin 在这种环境中茁壮成长，他可以研究以前没有人看过的场景，而这种开放的探索也将他带到了哈佛大学去攻读博士学位。

在哈佛大学，Devlin 的一位教授是著名的光学科学家 Federico Capasso，他主持了一门关于半导体器件物理学的课程。这门课程不但激起了 Devlin 的兴趣，而且 Capasso 教授的方法还开启了他的探索性思维。在上课之前，Capasso 教授提出了一个很难的开放式问题，然后叫某个同学到黑板上去推理解答——不是用数学或正确的方程和积分，而是用逻辑方法。Capasso 教授创造了一个让学开动脑筋思考的学习环境，这对 Devlin 后来的职业发展产生了很多积极影响。

一个想法诞生了

在哈佛期间，Devlin 第一次听说“超构表面（metasurface）”这个词，当他全身心地投入到超构透镜（metalenses）及其背后的光学领域时，正是这个词为他打开了一个新的潜力领域。由于其庞大而复杂的结构，Devlin 意识到超构材料（metamaterials）几乎不可能大规



LMN
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 2024
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）

2024年6月19-21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: karry.wang@hmf-china.com



图1：Metalenz公司联合创始人兼首席执行官Rob Devlin。
（图片来源：Metalenz）

模生产。然而，超构透镜的概念激发了他的兴趣，他想找到方法，克服超构材料大规模生产的挑战。

在这次探索中，Devlin 专注于工程材料的理念。随着超构材料市场的发展，不局限于现有材料、而是以某种方式对其进行构图以创造材料的新功能的概念，引发了更多的探索。

随后在 2016 年，Devlin 及其同事通过生产能够实现高质量图像的超构表面，率先实现了超构光学的商业化。他们的研究结果表明，一个纳米级的表面显示出了与由 12 个元件组成的显微镜（成本数千美元）相似的图像质量。这一发现促成了 Metalenz 公司的诞生。

市场中的新玩家

Devlin 在完成了博士课程后，选择继续在学术界工作，这激发了他对开放式问题和研究的热情。然而，当他的团队发表了一篇关于他们的研究结果的论文时，他们开始听到了来自世界上最大的手机公司、企业家、投资者和其他人的声音，大家都在宣扬 Devlin 团队所取得的突破的重要性。随即，Metalenz 公司成立了，2017 年 Devlin 完成了博士课程，并开始在 Metalenz 这家初创公司全职工作。

接下来的几年，Metalenz 迎来了大量的企业合作和风险投资。2020 年，Devlin 已经准备好担任 Metalenz 的 CEO，推动超构光学技术的发展。

恰逢其时的好机会

Metalenz 的快速成功，在一定程度上归功于赶上了好时机。Metalenz 公司成立的那一年，恰好是苹果在 iPhone 中提供人脸识别功能的那一年，这是业界推出的第一个面向大众市场的窄带成像应用。虽然增强现实也在早期获得了一些热议，但是 Metalenz 团队决定将他们的技术应用于市场，并将他们的资源集中在光学传感系统上。

随后，Metalenz 与全球领先的半导体制造商意法半导体（STMicroelectronics，ST）建立了合作关系。ST 的垂直集成能力特别引发了 Devlin 的兴趣：ST 的制造专业知识、大批量制造能力和已经差异化的产品线。作为合作伙伴，ST 了解这项技术，并将直接受益。通过与 ST 的合作，Metalenz 首次向消费市场推出了一项新的光学技术——超构光学。

事实证明 Metalenz 的选择是正确的，因为 Metalenz 很快就获得了商业成功。有很多技术从实验室走向产品规模量产的例子，但很少有技术在从实验室转化为产品的头两年，就能获得数百万的销量。对于 Metalenz 团队来说，看到他们的愿景在商业化中得以实现，相当于验证了这项技术和公司的能力。

独特的思维方式

随着 Metalenz 的成熟并不断赢得客户，Devlin 意识到他的好奇心对他很有帮助。Metalenz 公司处于一个未知的领域，他们很快就发现，客户解释不清楚他们到底需要什么。客户会对自己的系统中想要什么有一个大致的想法，并可以在更高的水平上进行描述，但总是在现有技术的背景下进行描述。对于 Metalenz 团队来说，这可能会让超构光学解决方案发挥出最大价值，变得更具挑战性。

考虑到这一点，Metalenz 团队开始以不同的方式与客户交谈，鼓励客户拓宽视野，将技术视为改变整个系统的一种方式。如何替换和简化？最大的痛点是什么？如何使用超构表面解决这些痛点？这些问题促使 Devlin 和他的团队寻找答案——他们要设计一个新的系统来解决这些问题。因为这项技术太新了，工程师们通常还考虑不到这类解决方案。因此，Metalenz 团队从头开始与客户讨论围绕超构表面构建的设计参考。

一种新的生物识别解决方案

在这种方法的指导下，Metalenz 公司不断发展壮大，其影响力也在不断扩大。例如，最近 Metalenz 宣布了一款新产品 Polar ID，其将为所有智能手机带来更简单、更安全的生物特征面部识别。这款产品利用偏振传感获取面部信息，并将其应用于安全识别。

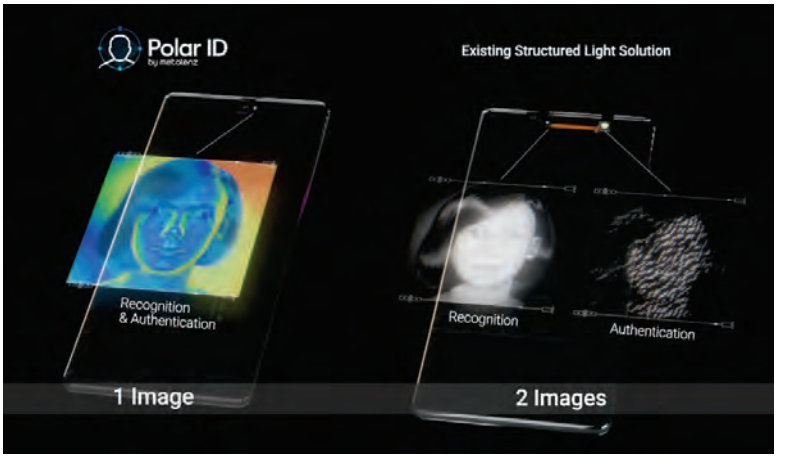


图2：Polar ID为所有智能手机带来了安全的生物特征面部识别，它利用偏振传感获取面部信息并将其应用于安全识别。（图片来源：Metalenz）

传统的 3D 图像传感器无法捕捉这些信息，但是超构表面光学可以对不同偏振的光子进行分类，以揭示更丰富的场景信息。人脸上独特的“偏振特征”本质上是不可伪造的。

从历史上看，这种类型的偏振工作，需要只有在科学实验室和医学实验室才能找到的桌面大小的传感器。但是 Metalenz 的技术已经实现了芯片大小的解决方案，可以首次嵌入移动和消费设备中，其价格也允许市场大量采用。

Devlin 指出，这项偏振传感技术可以应用于更广泛的领域。例如，偏振可以应用于医学领域，例如潜在地识别皮肤上的癌细胞或监测血糖水平。它还可以应用于空气质量监测，这令 Metalenz 团队非常兴奋，因为光学和光子学界能够藉此评估如何利用这项技术创造新的价值。这种开放式的潜力，正是 Devlin 认为 Metalenz 能在未来脱颖而出的地方，它为消费设备提供了一个完整的传感平台。

激励下一代

同样，Devlin 热衷于培养下一代善于思考的年轻人，他强调教育的重要性。

Devlin 忠告年轻一代，做成任何事都不是那么容易的。Metalenz 公司每一次胜利的背后，都经历过很多失误。虽然 Metalenz 很幸运能在早期获得商业成功，但 Devlin 回忆道，在最终 Metalenz 获得成功之前，他已经在错误的道路上耗费了成百上千个小时。

尽管担任公司的商业领导可能会耗费 Devlin 大量时间，但他仍将继续参与开发这项技术，因为这是他的热爱，也是他做事的基础。Metalenz 有一个设计和工程团队在领导技术开发，Devlin 会花时间与他们交谈、进行测量，通常也有机会亲自动手，这让他回到了他最初开始这项工作的源头：他对材料科学的热情。

Devlin 走过了经历丰富的成长道路，从建造收音机和滑板坡道，到哈佛大学的 Capasso 实验室，再到现在的 Metalenz 首席执行官。一路走来，持续的好奇心、对知识的渴望以及对解决问题的关注，推动并指导了他的职业生涯。正是这些特质在继续推动着 Metalenz 的成功。❑

上接第36页

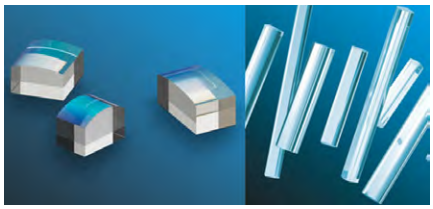
- 脉冲对脉冲稳定性高，550kHz 时 <3%rms，可在每个脉冲中产生最佳通量，从而实现高质量，同时脉冲速率极高，可提高产量。
- 与低功率绿光和紫外 DPSS 激光器相比，Talon GR70 的产量提升超出预期。
- 总体优势是能够以优异的性价比，提高对高难度工业陶瓷进行高质量激光加工的生产效率。

Talon 系列紫外和绿光半导体泵浦固态（DPSS）调 Q 激光器，在性能、可靠性和成本方面实现了完美结合。Talon 基于 Spectra-Physics 的 It's in the Box 设计，将激光器和控制器集成到一个极小的封装中。Talon 可在运行数万小时后保持较高的脉冲对脉冲稳定性，以及出色的 TEM00



模式质量。Talon 激光器经过专门设计，非常适合全天候制造环境中的微加工应用，系统正常运行时间对此类环境至关重要。宽泛的功率和波长范围可以带来极大优势，而全面的 Talon 产品组合恰恰能够提供这一优势。Talon 具有优异的性价比：在不影响功能、性能或可靠性的前提下，能实现较低的拥有成本。❑

面向蓝光应用的FAC和SAC



在激光加工应用中，特别是在铜、铝等高反金属的精细加工中，蓝光激光器展示出了得天独厚的技术优势。FISBA在蓝光领域深耕多年，相继推出了多款快轴准直透镜（FAC）和慢轴准直透镜（SAC），以满足不同客户、不同应用的多样化需求。值得一提的是，FISBA最早交付的FAC和SAC已经在客户端运行超过9年，展现了出色的稳定性和可靠性。

针对蓝光应用，FISBA的FAC和SAC的设计制造均采用了优化的材料和镀膜工艺。低吸收率、高折射率材料的使用，让透镜在准直性能、“易于对准”的要求和吸收率之间，达到了最佳平衡。

除了提供成熟的标准产品外，FISBA还可根据客户需求进行定制，并且可以快速送样和进入大批量生产阶段。

FISBA，www.fisba.com

120kW工业级光纤激光器



凯普林雷霆120kW工业级光纤激光器，助力高端制造业超厚板加工。其输出功率≥120kW（满功率直接测试），峰值波长为1080.429nm，M^2=23.77@200μm。该产品克服了高功率核心器件耐温承受能力、高亮度激光非线性效应等问题，实现了芯径200μm120kW输出，同时支持铠缆长度≥30m。

该激光器采用了颠覆性的CTC芯片一体化技术，将芯片、热沉结构、泵浦模块与激光器完美融合，彻底摒弃了传统的分体式设计，简化了生产工艺，大幅缩小了产品体积。

雷霆120kW产品通过高速空气切割技术，进一步击穿超厚板加工壁垒，轻松直面300mm及以上超厚板加工；其速度数倍于传统工艺，可大幅缩短切割工时，提高生产效率，切割质量更胜一筹。尤其是加工中厚板碳钢、不锈钢，切割能耗更低，有望取代昂贵的氮气、氩气切割工艺以及速度较慢的氧气切割，引领行业向更高效、更环保的方向发展。

凯普林光电，www.bwt-bj.com

多通道光功率计MPM–210 H



Santec的多通道光功率计MPM-210 H，适合测量多通道光器件的光学特性，是测量多通道光学器件的IL和PDL的理想选择，包括密集波分复用（DWDM）、AWG、波长选择开关（WSS）等。搭配Santec TSL系列可调谐激光器使用，可以提供完整实时高精度IL测量。

MPM-210H在高速、高精准的同时，可测量多达20个通道。其具有高精度、高线性度和极低的偏振相关灵敏度特点，并覆盖1250~1680nm全通信波段，以及-80~+10dBm(-70~+5dBm@MPM-215)的高功率动态范围。支持GPIB、TCP/IP和RS-232C接口，为客户提供便捷高效的自动测试方案。

Santec，www.santec.com.cn

紧凑轻量款30W红外皮秒激光器

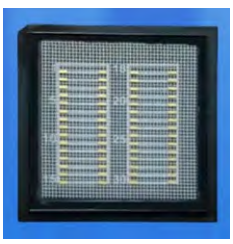


贝林激光自研的新款Amber NX IR-30M皮秒激光器，输出波长1064nm，高达30W的皮秒红外光，频率1Hz~2000kHz，脉宽<15ps，光斑模式TEM00（M^2<1.3），8小时内的功率稳定性<1% RMS，10分钟内的脉冲稳定性<3% RMS。

Amber NX IR-30M的尺寸较标准款Amber NX IR-30S减小了40%，仅为520mm×295mm×120mm；重量减轻45%，仅重24kg。紧凑的外观尺寸和轻便的重量，更好地满足了精密打标等要求激光器小型化的应用场景需求，为激光加工带来了新的突破和可能。

贝林激光，www.beilinlaser.com

1470nm高功率半导体激光芯片



西安立芯光电自主设计与生产的1470nm半导体激光芯片LC-UMC-95-1470-TE-3-2.0-D1，发光条宽95μm，腔长2mm，输出功率3W，光电转换效率为25%。芯片寿命在电流12A、水温30℃、1000H的老化条件下无明显衰减，性能达到国内领先水平。

AMTS

Automotive Manufacturing Technology & Material Show

2024上海国际汽车制造技术与装备及材料展览会

Shanghai International Automotive Manufacturing Technology & Material Show

打造设计、研发、装配、制造一站式汽车研发、工程展示平台



汽车技术
工程领域的盛会

SINCE
2004

19届 AMTS 2024

2024.7.3-5

上海新国际博览中心

W1-W5, E1-E3馆

展位预定中

RX Hengjin
励进展览(上海)有限公司
www.shanghaiAMTS.com

扫码立即申请展位

关注公众号，查看更多信息

LC-UMC-14XX 系列激光芯片的波长公差范围控制小于 10nm，极限输出功率 4W，从芯片设计、外延材料生长、制备工艺、性能验证等方面均实现自主化制造，实现从外延材料到芯片的完全自主可控。

该产品具有高转化效率、高可靠性、模式稳定、可定制化等特点，主要应用于生物医疗、激光装备、美容、科研等领域。

立芯光电，www.lumcorelaser.com

200W/2mJ/400fs飞秒激光器

盛镭科技推出 200W/2mJ/ 400fs 飞秒激光器产品，采用 CPA 放大和光谱窄化抑制技术，最窄脉冲宽度 376fs。该激光器具有可选配脉宽连续调节功能，实现脉宽 400fs~10ps 连续调节，为客户提供 fs/ps 的不同脉宽加工参数。通过优化激光器热管理系统，在实现高功率大能量飞秒激光输出的同时，能保持良好的光束质量。



该激光器内置 35 路各类传感器，实时监测关键器件运行及激光输出状态，支持远程服务及在线维护，可实现 24/7/365 全天候运行。其采用 Supercontrol V2.0 电控系统，兼容 POD/PSO/GATE 多模式并行工作，同时支持快速改变功率和频率参数，切换响应时间 <10μs。

盛镭科技，m.super-wave.com.cn

40kW大功率激光功率计

EXTREME 是意大利 LaserPoint 公司推出的一款新型激光探头，专为高功率激光器设计，功率范围 500W~40kW，可用于测量高达 40kW 的激光功率，且无需水冷。其便携而紧凑的设计，非常适用于维修和维护高功率光纤激光器和固态激光器。其配有一个用于光束精确定位的标靶。



顶尖科仪，www.psci.cn

激光光热传感器 Enovasense

普雷茨特推出一款激光光热传感器 Enovasense，其使用激光光热技术来测量不透明和半透明涂层的厚度，可对相关零件进行快速、准时、非接触式无损测量。



该传感器可以用来测量油漆、清漆、金属、陶瓷或有机层、油墨、高光漆、珐琅、树脂、粘合剂等涂层，无论其沉积在什么基材上。该传感器的测量对振动不敏感，并可以对许多不同的零件形状和弯曲度提供精确测量，即使高温也不是障碍。

普雷茨特，www.precitec.cn

“桌面式”手持激光焊机LW-1200A

光惠激光推出“桌面式”手持激光焊机 LW 系列，针对性解决无法连续焊接、噪音大、设备笨重不便移动等问题，更适合手持焊。



该产品设计独特，特别注重操作过程中噪音的最小化，搭配 26kg 轻量化设计，携带方便，可以持续焊接，无需停机，能在 -10~40℃ 的环境温度中实现连续工作。该产品集成了多重安全防护功能，包括输入气压检测、焊枪头出光开关、激光使能数控开关、LOOP 安全锁、急停按钮、激光电源开关等，还拥有四大报警监控（温度报警、电流报警、电压报警、气压报警），为用户提供全方位、智能化的安全保障。

光惠激光，www.gwlaser.tech

dToF 3D激光雷达传感器VL53L9

意法半导体的一体化、直接飞行时间（dToF）3D 激光雷达传感器 VL53L9，是一款即用型低功耗模块，具有 dToF 片上处理功能，无需额外组件或校准。提供 5cm~10m 的测距功能，并集成双扫描泛光照明，可以检测小物体和边缘，捕捉场景中的 2D 红外（IR）和 3D 深度图信息，分辨率高达 2300 个测量点。



这款真正实现一体化集成，能以 60fps 的帧率传输经处理后的二维图像、深度数据和置信度图。另外还有一种原始直方图输出模式，可用于输入人工智能（AI）系统以供进一步处理。

意法半导体，www.st.com

Advertiser	广告客户	网址	页码
AMTS	上海国际汽车制造技术与装备及材料展览会	www.shanghaiAMTS.com	54
第二十届'中国光谷' 国际光电子博览会暨论坛		www.ovcexpo.com.cn	24
Edmund Optics China	爱特蒙特光学 (深圳) 有限公司	www.edmundoptics.cn/034-8612	9
华光光电		www.haucore.com	7
LFSZ	第十七届深圳国际激光与智能装备、光子技术博览会	www.laserfair.cn	50
Ophir Optronics Ltd.		www.ophiropt.com	11
全球光电产业(重庆)展览会和第六届全球电子技术(重庆)展览会		http://www.gemecq.com/	IBC
Scanlab Gmbh		www.scanlab.de	3

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

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

US Offices

ENEADOR Business Media, LLC
61 Spit Brook Rd, 5th Floor Nashua, NH 03060
Group Publisher
Paul Andrews
pandrews@endeavorb2b.com

Editor in Chief
John Lewis
jlewis@endeavorb2b.com

销售人员 Sales Offices

China (中国)

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

Shanghai (上海)
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
Tel: 86 21 6251 1200

Shenzhen (深圳)
Jenny Li (李文娟)
jennyl@actintl.com.hk
Tel: 86 755 2598 8572

Beijing (北京)
Cecily Bian (边团芳)
cecilyb@actintl.com.hk
Tel: 86 10 8484 4007

Wuhan (武汉)
Grace Zhu (朱婉婷)
gracez@actintl.com.hk
Tel: 86 159 1532 6267

Asia (亚洲)

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

Taiwan, Singapore, Malaysia (台湾，新加坡，马来西亚)
Regional Sales Director
Floyd Chun (秦泽峰)
floydc@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

North America (北美)

East & Central
Jeff Nichols
jnichols@endeavorb2b.com
Tel: 1-413-442-2526

West & Mountain
Anne Marie St.John-Brooks,
amstjohn@endeavorb2b.com
Tel: 510.606.0630

Europe & Middle East (欧洲及中东)

Europe
Holger Gerisch
hgerisch@endeavorb2b.com
Tel: 49(0)8801 9153791

Israel
Dan Aronovic
aronovic@actcom.co.il
Tel: 972-9-899-5813

GEME

第六届全球电子技术（重庆）展览会

The 6th Global Electronic Technology (Chongqing) Exhibition

30000+ 展出面积（m^2）

500+ 参展企业

25000+ 专业观众

2024年5月7-9日　重庆国际博览中心

参展范围 Exhibition Area

电子智能制造	智慧工厂	测试测量	PCB及电路载体制造
连接器及线束加工	电子元器件	电子和化工材料	政府、产业园区

同期活动 Concurrent Activity

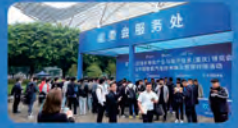
1. GEME第三届全球电子产业链创新发展大会
2. 第六届未来半导体产业发展大会
3. 2024全球光电产业（重庆）展览会
4. 2024全球储能产业（重庆）展览会



上届精彩瞬间

展位价格 Booth Price

精装标准展位(3mX3m)	￥12800/个(国内企业)	$ 3500/个(境外企业)
光地(36m^2起)	￥1200/m^2(国内企业)	$ 400/m^2(境外企业)











关注微信公众号　加入供需对接群　18702393578 张萍



国际知名媒体授权
引领全球高新科技信息

8本专业杂志(双月刊)
欢迎免费索阅

全年行业资讯

ACT INTERNATIONAL

免费订阅

扫一扫添加
ACT读者服务号免费订阅

雅时国际商讯（ACT International）成立于1998年，为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品－包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动－为跨国公司及中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站，以及各种技术会议，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、电磁兼容等领域的约二十多万专业读者及与会者。ACT亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT总部在香港，在北京、上海、深圳和武汉设有分公司及联络处。