光学和光电子产业的主导刊物 www.laserfocusworld.com.cn 2020年11/12月 第6期
ISSN: 1817-6917

激光世界
LaserFocusWorld® China



激光顺序加工在一台设备上实现精密切割和焊接 18

激光打造量子技术世界 15

使用纳秒脉冲光纤激光器对超薄铝箔铜箔进行边缘微焊接 20

超短脉冲激光实现更快、更光滑的表面微加工 23

皮秒和飞秒光纤激光器服务工业和科学应用 34

ACT
ENDEAVOR BUSINESS MEDIA

微信公众号

LaserFocusCon
激光聚会2021

激光技术聚焦峰会

动荡与机会并存
如何把握制胜商机

工业 4.0、中国制造 2025、5G ……为制造业带来了发展机遇，中国制造业处于向上发展的历史大潮中；然而，中美贸易摩擦影响持续蔓延，也为中国制造业带来了挑战。在这个机遇与挑战并存的关口，制造企业该从何处着手谋求长远发展？如何通过部署先进制造技术快速实现转型升级、让自身在市场竞争环境中拥有“硬本领”？激光，作为一种先进的加工工具，随着自身技术的不断提升和市场需求的发展，已经在制造业的发展中挥发着举足轻重的作用。

那么，最近激光在技术方面有哪些新的进展？这些新发展又将如何应用到制造业中、能为制造业带来哪些好处？为了让制造企业及时了解先进的激光加工技术、让激光技术厂商及时了解市场需求，由雅时国际商讯旗下的《激光世界》杂志举办的 LaserFocusCon 激光研讨会，将于 2021 年再次走进苏州，为制造企业和激光技术供应商，搭建面对面交流探讨的平台。

大会主题（拟定）

- 激光精密加工与运动控制
- 皮秒及飞秒激光的工业应用
- 高功率半导体激光器技术发展及应用
- 蓝光 / 绿光在高反金属加工中的应用
- 激光金属增材制造技术及应用
- CO_2 激光器的新应用机会
- 激光精密焊接与实时质量监控技术
- 新基建、智能制造为激光技术带来的新机遇

往届听众分析

- 应用研发
- 主管/总裁/副理/负责人
- 工程人员（包括项目理）
- 制造/生产工艺设计
- 工程管理
- 技术支持/服务
- 基础研究
- 封装/装配
- 工程设计（器件/系统/子系统）
- 教育/培训
- 销售/市场



会议规模

时间地点：苏州 · 2021年6月

目标人数：200-220名技术和管理人员

会议咨询

如有问题，可添加“小镭助手”

微信号“LFC-RA”进行咨询

小镭助手微信

主办单位

ACT

大会媒体

激光世界 LaserFocusWorld China

LaserFocusCon



光无源器件快速扫描测试系统

快速、精准、稳定获取WDL&PDL数据
优化WDM和高Q光子器件光谱特性的测试
支持多工位、可大大降低设备的投资成本

FREE DEMO



santec The Photonics Pioneer since 1979

www.santec.com.cn

微信公众号

官网



18 封面故事
激光顺序加工
激光顺序加工在一台设备上实现精密切割和焊接
本文介绍了一种全新的多激光头、多步骤激光切割和焊接工艺，能够在同一台设备上实现精密切割和焊接工艺。

市场观察

08 新冠疫情对全球激光市场带来的影响
新冠疫情在许多方面影响了全球激光市场。尽管一些行业遭受到了严重损失，但是市场的总体增长趋势和收入数字，并没有人们担心的那样糟糕，至少目前是这样。

技术中心

10 新型激光器
研究人员展示首款电注入GeSn激光器
首款电注入锡化锗（GeSn）激光器，可以显著提高激光微加工速度和效率，同时降低用光实现信息传输和传感的电子元器件的尺寸和生产成本。

11 薄膜设计进展
简单且宽可调谐的球透镜带通成像滤光片
基于受抑全内反射，可调谐滤光片结构紧凑，可调谐范围大，并且可以轻松设计到光学系统中。

12 光纤光学
空芯光纤光缆实现10Gbit 10km密集波分复用（DWDM）传输
利用双管嵌套抗谐振无节点光纤（NANF）技术开发的空芯光纤光缆，在超过10km的通信链路上实现了DWDM传输。

13 光学仿真软件
全波仿真扩展透镜分析的范围和深度
本文介绍了物理光学分析与全波光学分析之间的差异，以及每种分析方法的适用情况。

15 量子技术
激光打造量子技术世界
窄线宽可调谐二极管激光器、放大和倍频激光系统、频率梳和波长计，使许多量子技术成为可能。

工业激光专栏

20 箔片焊接
使用纳秒脉冲光纤激光器对超薄铝箔铜箔进行边缘微焊接
使用MOPA纳秒脉冲光纤激光器对铝箔和铜箔进行焊接，焊缝非常光滑，没有气孔和焊缝间断，变形很小。焊缝的拉伸强度2.5~27N不等。

23 超快加工
超短脉冲激光实现更快、更光滑的表面微加工
高功率皮秒激光器能比纳秒激光器实现更好的烧蚀、清洗和金属表面抛光效果。

27 超快加工
应用研究推动激光技术发展
目前立陶宛正在开展的一些新的激光技术和应用活动，旨在帮助本地公司在生产中更轻松、更快速地采用激光技术。

30 激光热丝加工
激光热丝加工可灵活应用于各种材料和场合
该方法提高了钎焊、熔覆、增材制造以及焊接的生产率和质量。

32 焊接在线检测
基于AI的机器视觉软件实现激光焊接质量在线检测
机器视觉软件HALCON实现焊接质量在线检查，减少错误产生，将最终产品的安全性和可靠性提高到一个新水平。

光子学产品

34 超快激光器
皮秒和飞秒光纤激光器服务工业和科学应用
最新一代的超快光纤激光器的发展，让双光子显微光学、3D打印、精密切割等众多工业和科学应用受益。

39 访谈
为电动汽车制造中的激光焊接工艺保驾护航
——访普雷茨特精密技术（上海）有限公司销售总监刘良明先生

4 编者的话
6 前沿简讯
41 产品撷英
44 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。

扫一扫 免费下载电子书



18 COVER STORY

Sequential laser processing

Sequential laser processing realizes precise cutting and welding using one machine

An entirely new multi-head, multistep laser cutting and welding manufacturing process, which realizes precise cutting and welding process using one machine.

MARKET TRENDS

08 **Global laser markets and the impact of the COVID-19 pandemic—A market research update**

The pandemic has affected global laser markets in many ways. Although some sectors have suffered much more than others, the overall growth trends and revenue figures are not as severely impacted as feared—so far.

TECHNOLOGIES CENTER

10 Novel laser

Researchers demonstrate first electrically injected GeSn laser

The first electrically injected germanium-tin (GeSn) laser could significantly improve microprocessing speed and efficiency, while reducing the size and cost of electronic components that use light for information transmission and sensing.

11 Advance in thin films/coatings design

Bandpass imaging filter in ball lens is simple and widely tunable

Based on frustrated total internal reflection, a tunable filter is compact, has a large range, and can be easily designed into optical systems.

12 Fiber Optics

Lumenisity unveils hollow-core fiber-optic cable for 10Gbit DWDM transmission over 10km links

The deployable fiber-optic cable contains hollow-core fiber based on nested antiresonant nodeless fiber (NANF) technology has done DWDM operation over links in excess of 10km.

13 Optical Simulation software

Full-wave simulation extends the range and depth of lens analysis

In this article, the differences between physical-optics and full-wave-optics analyses are described, as well as when each type of analysis is best used.

15 Quantum Technologies

Lasers shape the world of quantum technologies

Narrow-linewidth tunable diode lasers, amplified and frequency-doubled laser systems, frequency combs, and wavelength meters enable many quantum technologies.

INDUSTRIAL LASER COLUMN

20 Foils Welding

Edge Microwelding of Ultra-thin Aluminum/ Copper foils by Nano-second pulsed fiber laser

Using MOPA nanosecond pulsed fiber laser to weld ultra-thin Aluminum/Copper foils, and achieving very smooth weld beads with no intermittent beads and little distortion. The measured tensile strength of the welded foils is from 2.5N to 27N.

23 Ultrafast Processing

Microstructuring with ultrashort-pulse lasers: Faster or smoother?

High-power picosecond lasers ablate, clean, and polish metal surfaces better than a nanosecond laser.

27 Ultrafast Processing

Applied research pushes the deployment of laser technologies

Current activity in Lithuania is demonstrating new laser technologies and applications, that supports for companies in the easier and faster adaptation of laser technologies in their production at the European scale.

30 Laser Hotwire Processing

Laser hotwire processing is flexible for various materials and applications

The method improves production rates and quality in brazing, cladding, additive manufacturing, and welding.

32 Online Welding Inspection

Online inspection of laser welding quality based on AI machine vision software

The machine vision software Halcon can realize the online inspection of welding quality, reduce errors, and improve the safety and reliability of the final product to a new level.

PHOTONICS PRODUCTS

34 Ultrafast Lasers

Picosecond and femtosecond fiber lasers serve industry and science

Two-photon microscopy, 3D printing, and other applications all benefit from the newest generation of ultrafast fiber lasers.

INTERVIEWS

39 **Escort laser welding quality in electric vehicle manufacturing**

—Interview Mr. Liu Liangming, sales director of PRECITEC

4 EDITOR'S NOTES **6** LEADING EDGE SNAPSHOTS **41** PRODUCTS HIGHLIGHTS **44** 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 article reprinted from Laser Focus World magazine. Laser Focus World is exclusively owned and published by PennWell Corporation. PennWell Corporation 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 products described by independent vendors.

乐观告别 2020 积极迎接 2021

转眼间，日历已经翻到了 2020 年的最后一个月了。这一年，疫情成了所有人都避不开的一个话题，对于激光行业而言同样如此。新冠疫情在全球的爆发和蔓延，以及在全世界都很可能进入与疫情长期共处的状态下，这对整个激光行业将带来怎样的影响？激光行业专业分析公司 Laser Markets Research 公司总裁兼首席激光分析师 Allen Nogee 认为，从目前的情况来看，疫情对激光行业的影响并没有人们之前担心的那样糟糕；相反，疫情的持续迫使全球大量人口进入“在家办公”状态，这恰恰促进了通信市场的发展提速，同时作为工业激光市场大部头的材料加工市场，也在逐渐恢复 (p8)。

材料加工依然是主导工业激光市场的重要领域，随着市场的拓展，高效和精细加工成为市场新的关注点。在本期的封面故事中，介绍了一种在一台激光加工设备上，通过多个激光加工头、按照多步骤作业的方式，依此有序实现了车辆排气系统工件的精密切割与焊接，大大提高加工效率 (p18)。

从本期开始，我们为读者增加了工业激光专栏，精选激光技术在工业应用中的一些研究与应用案例与读者分享。使用传统的激光搭接焊方法很难将超薄的高反射性金属箔，如铝箔和铜箔焊接到一起，功率太低或太高都不行，熔池深度极难控制；对此通快提供了一种用 MOPA 脉冲光纤激光器进行有效焊接的新方案 (p20)。另外，在这个栏目中，还介绍了用超短脉冲激光对工件进行表面微结构化、清洗和抛光 (p23)；超短脉冲激光在玻璃加工以及表面纹理微结构加工方面的应用案例 (p27)；激光热丝加工在熔覆、焊接和增材制造方面的应用 (p30)；以及如何利用机器视觉软件，实时检测激光焊接质量 (p32)。

另外，本期的光子学产品栏目，特别为读者介绍了最新一代超快光纤激光器的发展情况 (p34)；访谈栏目中，普雷茨特的销售总监刘良明先生介绍了普雷茨特的激光焊接过程的实时监控技术。

2020 年，中国是全球唯一保持经济正增长的经济体。虽然疫情迫使很多激光企业在上半年被迫停产一段时间，但是从下半年开始，国内企业就基本开始复工复产。疫情下减少人员密集和接触的要求，使得很多企业加速了自动化生产加工环节的部署进程，不少企业原本计划在今后 3-5 年内进行的自动化部署，因为疫情的出现被迫提上日程开始行动，这对激光行业而言无疑是个利好。另外，中国从疫情中复工复产的速度较快，而身处海外的企业受疫情影响相对严重，特别是供应链的限制导致生产停滞，这为国内激光厂商满足市场需求提供了好机会。事实上，不少国内激光公司今年的业绩，都出现了可喜的增长。面对即将到来的 2021 年，5G 通信的发展、国家的新基建政策、AI 技术促动下的智能化生产等等因素交叉融合到一起，我们有理由相信，2021 年会是充满发展机会的一年，愿大家鼓足干劲，积极迎接新的一年！❑

本刊编辑部

激光世界
LaserFocusWorld China

中国/香港特别行政区 China / Hong Kong SAR
电话 (852) 2838 6298
传真 (852) 2838 2766
地址 香港九龙长沙湾青山道478号
百欣大厦13楼B室
出版总监 麦协林 Adonis Mak
电邮 adonism@actintl.com.hk
社长及副总裁 麦协和 Mark Mak
电邮 markm@actintl.com.hk
中国区总经理 徐旭升 Michael Tsui
电邮 michaelt@actintl.com.hk
中国版主编 庞会荣 Rossie Pang
电邮 rossiep@actintl.com.hk
记者 胡婴 Lily Hu
电邮 lilyh@actintl.com.hk
记者 陈玉婷 Julie Chen
电邮 juliec@actintl.com.hk
技术顾问 顾正

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
© 2020 版权所有 翻印必究

CASTECH®

福晶科技



全球先进的一站式超快方案供应商

- **激光光学元件**
  - 光栅
  - 啁啾镜
  - 高损伤光学元件
  - 超光滑镜片
  - ...
- **激光晶体**
  - Yb:CALGO
  - Yb:CaF_2
  - Yb:KGW
  - Yb:YAG
  - Nd:YVO_4
  - ...
- **激光器件**
  - 声光调制器
  - 高功率隔离器
  - BBO普克尔盒
  - ...

扫描二维码
了解更多信息
+86-591-83710533

前沿简讯 Leading Edge Snapshots

通快与西克联手开发工业级量子传感器

日前，通快全资子公司 Q.ANT 与西克（SICK）宣布，双方将联合开发工业量子光学传感器。量子传感器能实现前所未有的测量精确性。

根据合作协议，西克负责传感器的应用开发和销售，Q.ANT 将负责测量技术的生产，也即承担传感器的核心技术部分。

“量子技术对德国和欧洲工业而言是个巨大机遇。量子传感器可实现高精度测量，并且其提供的信息能够实现全新的工业应用。”通快首席技术官 Peter Leibinger 说。新的量子传感器计划于 2021 年首次投入使用。

“量子技术能够实现粒子运动和粒子大小分布的超快测量。随着这些传感器的产业化，我们正在朝着量子技术的商业化迈进。”Q.ANT 首席执行官 Michael Fürtsch 说。

“量子技术是传感器的下一级技术，因为它转移了迄今为止牢固确立的技术极限。使用量子效应，可以从信号噪声中感知到其他细节，这将能够测量比人的发丝宽度小约 200 倍的粒子。”西克高级研发副总裁 Niels Syassen 表示。量子传感器最初将被用于分析空气中的物质。

未来，量子传感器可能成为用于各行各业的日常设备。例如，它们可用于土木工程中，在施工开始前可视化地下结构；在制药行业，它们可以更容易地确定片剂粉末的最佳成分；



在电子行业，它们可以穿过表面检查电路；以及在一般行业中实现高度精确的测量。德国国家科学与工程研究院（Acatech）的专家估计，到 2023 年，全球工业量子传感器的市场规模约为 11 亿欧元。❑

麻省理工与滑铁卢大学合作研发出便携式量子级联激光器

麻省理工学院（MIT）和滑铁卢大学的研究人员合作开发出一种高功率、便携式量子级联激光器（QCL），该激光器可以在实验室环境之外产生太赫兹辐射，该激光有可能应用于诸如精确定位皮肤癌和探测隐藏爆炸物等领域。

麻省理工学院电子工程和计算机科学特聘教授胡青（音）表示：“太赫兹 QCL 是一种嵌入芯片的微型半导体激光器，由于可适应 200 开氏度以上的温度环境，因此可将太赫兹 QCL 集成到一个小巧的便携式系统中，并将这项突破性技术带出实验室。这有望令便携式太赫兹成像和光谱系统得以面世，这将对医学、生物化学、安全等领域的广泛应用产生重要影响。该技术还可应用于许多需要检测产品内部异常以确保产品安全和质量的领域。”

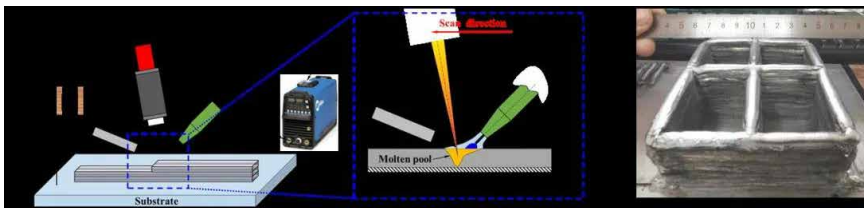
这些激光器只有几毫米长，是量子阱结构，带有精心定制的阱和屏障。在这种结构中，电子“级联”地沿着一种阶梯向下，每走一步都发射出一种轻粒子，即光子。研究中的一项重要创新是将激光内的屏障高度提高一倍，以防止电子泄漏，而这种现象在高温下往往会增加。

胡教授说：“电子泄漏是致命的。如果不使用低温恒温器冷却，就会导致系统崩溃。所以，我们设置了更高的屏障来防止泄漏，结果证明这是突破的关键。”因此，研究小组为能带结构开发了正确的参数以及为整体设计开发了一个概念新颖的优化方案。❑

大连理工在铝合金激光 – 电弧复合增材制造上取得重要进展

激光增材制造与电弧增材制造是目前铝合金增材制造的两种主流技术。但由于铝合金对激光的反射率高、导热性强等特点，激光增材制造铝合金容易产生裂纹、气孔等缺陷；而电弧增材制造技术沉积效率虽然较高，但成形件性能较低。组织 - 应力 - 性能不可控的难题一直限制铝合金增材制造技术的进一步应用，是铝合金增材制造领域的难题之一。

大连理工大学研究人员提出了一种铝合金激光 - 电弧复合增材制造方法，该方法基于“小域成形 - 逐层累加”思想，采用定域可控的激光作为热源之一，与热输入较大的电弧复合共同熔化焊丝，实现高质量制造。通过激光与电弧的协同作用，提高了增材制造过程稳定性，可望实现增材制造铝合金组织 - 应力 - 性能协同控制以及缺陷可控性的目标。

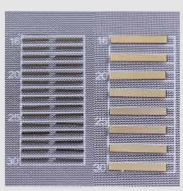


采用激光 - 电弧复合增材制造工艺，电弧预热可提高丝材对激光的吸收率，有利于激光产生匙孔效应，喷发光致等离子体，反过来益于引弧和稳定电弧，形成高能量密度热流；两者协同作用还可以降低熔池的温度梯度。此外，还利用脉冲激光对熔池进行冲击、搅拌作用，改善熔池流动特征，调控凝固组织状态，进一步改善微观组织、减少热应力，抑制缺陷，实现组织与性能的协同控制。

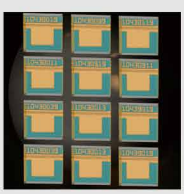
由于激光 - 电弧复合增材制造独特的微观组织特征，Al-Cu 合金成形构件热处理前抗拉极限超过 300Mpa，断后伸长率超过 12%；经过热处理后，抗拉极限可达到 T6 态锻件标准，断后伸长率达到 15%。该技术也可用于铝锌合金、铝锂合金、铜合金等金属构件增材制造，拓展激光增材制造技术的应用领域。❑

EVERBRIGHT
心所往 · 光所至
中国激光芯，光耀美好生活

长光华芯全自主半导体激光芯片

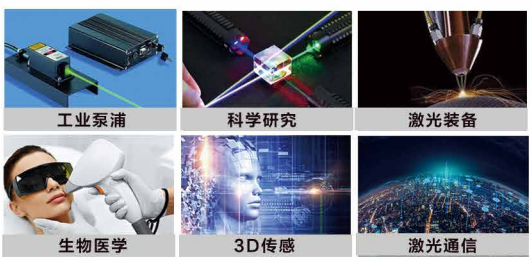

高功率半导体激光芯片


高功率高效率VCSEL芯片


高速光通信激光芯片

长光华芯拥有外延设计与生长、芯片制备、封装测试、光纤耦合模块、直接半导体激光器等完整的研发、量产垂直工艺平台。

应用领域：



定制需求请联系
苏州长光华芯光电技术有限公司
地址：江苏省苏州市高新区科技城昆仑山路189号2号厂房
邮编：215163
电话：+86-512-69372570
传真：+86-512-66806323
邮箱：sales@everbrightphotonics.com
网址：www.everbrightphotonics.com

新冠疫情对全球激光市场带来的影响

新冠疫情在许多方面影响了全球激光市场。尽管一些行业遭受到了严重损失，但是市场的总体增长趋势和收入数字，并没有人们担心的那样糟糕，至少目前是这样。

文/Allen Nogee

身处激光行业，我经常被问到新冠疫情对整个激光市场的影响。这个问题涉及的行业范畴非常大，我不能简单地给出答案，因为“激光市场”所涉及的领域非常广泛，甚至可以说是包罗万象，而下面我的讨论将集中在材料加工和通信市场，因为这两部分市场构成了全球激光市场的最大部分（这并不是说激光市场的其他部分没有受到疫情影响或者并不重要，只是在这里我暂不讨论）。

为了全面了解目前材料加工和通信市场的现状，首先必须得回顾一下过去几年中材料加工和通信市场所处的环境。



Allen Nogee，Laser Markets Research 总裁兼首席激光分析师

通信市场

在通信市场中，激光器是收发器中的关键，而收发器又是通信市场中的核心器件。收发器市场几乎每年都在增长，这一点并不奇怪；但是受到购买周期和其他经济因素的影响，收发器市场的收入并不总是保持稳定增长。2013 年 -2015 年间，来自该领域的激光器收入增长缓慢；但在 2015 年 -2017 年期间，这部分市场增长快速。2018 年，中美之间紧张的贸易关系，以及 5G 手机全面推出前的市场停滞，导致来自收发器市场的激光器收入与 2017 年持平。中美贸易问题的持续加剧以及中国经济的增长放缓，导致 2019 年激光器市场的总收入下降了近 18%。

到 2020 年，来自通信市场的激光器收入基本呈现稳定状态，同时我们也有理由对该市场持乐观态度。全球最大的收发器供应商 II-VI（Finisar），在其第二季度财报中表示，其来自通信市场的收入连续增长 25%。第二大收发器供应商 Lumentum（Oclaro），其第二季度来自通信市场的收入下降了 7%，主要原因是新冠疫情在一定程度上影响了其供应链。需要注意的是，Lumentum 将其 3D 传感收入也纳入了通信市场部分，而预计其 3D 传感收入这季度是下降的。

总的来说，我认为新冠疫情对通信市场的激光器收入将是个利好。因为新冠疫情，使得数百万人不得不将工作地点从公司转移到家中，并且对其中的许多人来说，这种变化甚至是永久性的。来看看户外零售商 REI 的例子：这家公司花了 4 年时间和数亿美元在华盛顿州贝尔维尤市新建了一个占地面积 8 英亩的公司总部。8 月中旬，该公司宣布，将在员工尚未搬入之前出售刚刚建成的总部，并声称新冠疫情已经将该公司变成了一家“远程办公”的公司，这使得这个新建的大型总部变得没有必要了。

电信公司已经开始了一项艰巨的任务，即为新的“在家工作”的市场需求增强他们的通信网络。事实上，这一趋势早在新冠疫情之前就已经开始了，但是本该在十年内完成的事情，现在不得不在三个月内就实现。我相信，这种情况可能会促使未来几年内，来自通信市场的激光器收入出现一个很好的增长，如果说 II-VI 今年第二季度的收入已经显示出了这种迹象的话，这说明来自通信市场的激光器收入增长已经在顺利进行中。

材料加工市场

接下来我们来看看来自材料加工市场的激光器收入。早在 2006 年，随着工业光纤激光器开始慢慢取代二氧化碳激光器，全球来自材料加工市场的激光器收入，每年约

以 7.5% 的速度增长，并且将会在未来 10 年内保持这种增长态势。大约在 2010 年前后，中国开始意识到工业激光器的重要性，随之中国工业激光器制造商品牌开始越来越多地在市场上涌现。我从 2013 年开始跟踪中国的激光器公司，从那时到 2016 年，中国的工业激光器收入每年增长超过 22%。

2016 年 -2018 年间，中国和非中国的激光公司都经历了令人难以置信的增长，这期间，激光总收入每年增长近 60%。到 2018 年年中市场泡沫破裂，其中的主要原因是美中贸易战以及进出美国的各种贸易关税。就在中国国内外市场对激光器的需求下降之际，中国激光器企业正在以创纪录的速度生产激光器。激光器的供应过剩和关税的双重作用，对激光器的价格产生了负面影响。2019 年，用于材料加工的激光器收入下降了近 10%，而用于微观精细材料加工的激光器收入下降了近 20%。激光器的价格也同样出现了急剧下跌。

进入 2020 年，迎接我们的是一场突如其来的新冠疫情。好消息是，目前对材料加工激光器的基本需求还是相对强劲的。受新冠疫情影响，2020 年第一季度，中国市场的激光器收入大幅下降；进入第二季度，中国激光市场和经济开始复苏，中国激光企业公布第二季度收入较上年同期下降 15%-20%。我们预计第三季度中国激光业务收入较上年同期将仅下降约 10% 或更少。而在中国以外的市场，新冠疫情对激光市场的全面影响比中国晚了约一个季度，第二季度来自材料加工市场的激光器收入仅比上年同期略有下降。

总的来说，2020 年第三季度激光器收入表现良好，但未来激光器收入可能会有所下降。我乐观地认为，2020 年，全球激光市场的总体表现基本不会像我原先担心的那样糟糕。从 2020 年下半年的情况来看，通信等一些市场可能会强劲增长，但是材料加工市场可能只比去年略有增长或与去年持平。（注：本文完成于 2020 年 9 月。到目前为止，疫情的影响仍在继续。）

【编者按：Allen Nogee 将在 2021 年 3 月 8 日举办的 SPIE Photonics West 期间，汇报全球激光器市场最新回顾与展望。】❑

光学引领未来™



新品

激光光学元件产品目录！

Edmund Optics® 2020 激光光学元件产品目录 - 是一份激光光学解决方案的资源手册，共164页。其中专业教程篇幅多达50多页，此外各种精密光学元件产品介绍附带计算公式和技术术语也涵盖其中。这些宝贵的资源均旨在助您全方位了解激光光学元件的各种复杂性。

关注公众号

电子版已同步上线

Edmund optics | china

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

欲了解更多信息，请点击此处:
www.edmundoptics.cn/110-8617

新型激光器

研究人员展示首款电注入 GeSn 激光器

首款电注入锡化锗（GeSn）激光器，可以显著提高激光微加工速度和效率，同时降低用光实现信息传输和传感的电子元器件的尺寸和生产成本。

文/John Lewis

对材料学领域的科研与工程开发人员来说，如果技术可行的话，他们会使用硅（Si）、锗（Ge）和锡（Sn）这些第四主族半导体材料开发单片激光器。为什么会这么说呢？用第四主族半导体材料开发的半导体激光器，可以显著提高激光微加工的速度和效率，同时降低未来芯片上光子和纳米电子元器件的尺寸和生产成本；这是因为 GeSn 外延生长技术与 CMOS（互补金属氧化物半导体）工艺完全兼容。此外，当 Sn 含量超过 8% 时，GeSn 就是直接带隙材料，能够在宽波长范围内有效地发光，适用于多种中红外波段应用，如生物/化学传感、光谱学和高温测量等。

近年来，光泵浦 GeSn 激光器取得了重大进展，但是电注入 GeSn 激光器仍然难以实现。由阿肯色大学电气工程教授 Shui-QingYu 领导的美国材料科学研究小组，首次公开了用 GeSn 半导体基片实现的电注入激光器。[1] 这项研究由美国空军科研办公室资助。

该项目由阿肯色大学的研究人员（包括 Shui-Qing Yu 和博士生 Yiyin Zhou），与多所机构共同合作完成。这些合作机构包括亚利桑那州立大学（Arizona State University）、马萨诸塞大学波士顿分校（University of Massachusetts – Boston）、达特茅斯学院（Dartmouth College）和威尔克斯大学（Wilkes University）。合作单位还包括半导体设备制造商 Arktonics 公司。

结构生长工艺

电注入 GeSn 激光器的研究成果发表在重要学术期刊 Optica 上，根据其论文内容可知，激光二极管结构是用化学气相沉积法（CVD）在 200 mm 厚的 Si（100）衬底上生长而成的。GeSn/SiGeSn 双异质结构的生长，确保了对载流子和光学约束。为了解决由于 GeSn 和顶部 SiGeSn 势垒之间的 II 型能带对准而导致的空穴泄漏，研究人员设计了 p 型顶部 SiGeSn 层，以促进空穴注入。

因此，在半导体基片上从下到上生长了 5 个外延层：第一层为 500nm 厚的应变驰豫 Ge 缓冲层，n 型掺杂浓度为 $1\times10^{19}cm^3$；第二层，采用自发驰豫增强生长方法制备厚度为 700nm 的 GeSn 缓冲层，Sn 成分含量由 8%（底部）增加到 11%（顶部），n 型掺杂浓度为 $1\times10^{19}cm^3$；第三层为厚度 1000nm 的 $Ge_{0.89}Sn_{0.11}$ 活性层；第四层为厚度 170nm 的 $Si_{0.03}Ge_{0.89}Sn_{0.08}$ 掩蔽层，p 型掺杂浓度为 $1\times10^{18}cm^3$；第五层为厚度 70nm 的 $Si_{0.03}Ge_{0.89}Sn_{0.08}$ 欧姆接触层，p 型掺杂浓度为 $1\times10^{19}cm^3$。所有浓度的掺杂都是通过原位掺杂相应的气体实现的。使用 x 射线衍射和透射电子显微镜技术可以测量 Sn 含量和层厚。

在外延生长层上，通过湿法蚀刻制备 80mm 宽的脊形波导结构，然后切割成腔长分别为 0.3mm、0.5mm、0.8mm 和 1.7mm 的单个器件。蚀刻深度被控制在 1.4mm，暴露出 GeSn

下转第17页

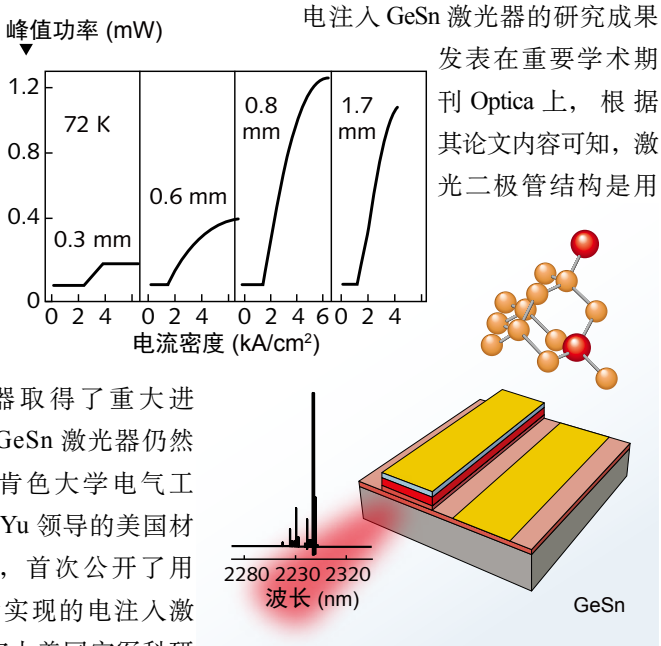


图1. 电注入GeSn激光器的原理图及其功率-电流输出关系和频谱特性。（图片来源：阿肯色大学）

薄膜设计进展

简单且宽可调谐的球透镜带通成像滤光片

基于受抑全内反射，可调谐滤光片结构紧凑，可调谐范围大，并且可以轻松设计到光学系统中。

文/John Wallace

用于光谱学的可调谐带通光学滤光片有许多可能的配置，包括衍射光栅、声光、液晶、体布拉格光栅、倾斜多层滤光片镀膜平板，以及带通中心波长在整个滤光片上线性变化的平坦带通滤光片。其中许多需要复杂且昂贵的额外光学元件。最后两种依靠多层薄膜，比较简单但也有缺点。例如，除非使用几个单独的滤光片，否则通过倾斜调整的平面滤光片的调谐范围有限，而线性变化的滤光片必须尺寸较大，以适应宽带调谐，并且必须安装在位移台上。

加拿大阿尔伯塔大学的研究人员基于受抑全内反射（FTIR），已经在开发一种新型波长可调谐滤光片，适用于成像系统，其中两个平坦的光学表面足够靠近，因此通带中的光会通过小的空气间隙，从一个元件共振隧穿到另一个元件（每个表面都镀有几层高折射率对比的导纳匹配薄膜）。通过适当的设计，相对于入射光倾斜此微米级间隙区域，可在大的光谱区域内调谐通带。

第一代器件基于棱镜，而第二代器件则是使用柱透镜制造的，在1000~1800nm 的光谱范围内具有可调谐性。现在，该小组已经开发了一种极其紧凑的基于 FTIR 的可调谐滤光片，该滤光片将两片半球形的透镜以小间隙放置在一起，形成旋转的球以进行调谐。当耦合到孔径或光纤中时，滤光片本身可以构成光谱仪的核心（可以同时用作将光耦合进光纤的透镜）。并且，由于球透镜可以变成光学系统中的另一个透镜，因此它可以用作紧凑型高光谱成像仪中的可调谐滤光片（见图 1）。

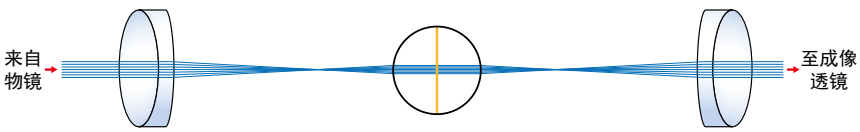


图1：具有小通带形成空气间隙（图中）的球透镜可以旋转，以使通带在较大的光谱区域内移动。这里，球透镜是可用于高光谱成像的光学系统的一部分。

平顶通带

该器件设计包括两个半球，形成 10mm 球透镜，其中一种用于 400~700nm（可见）调谐范围，另一种用于 1000~1800nm（近红外）调谐范围。半高全宽（FWHM）通带（具有良好的平顶形状）约为 2~4nm。空气间隙滤光片平面可以从正入射方向倾斜最多 60° 的角度，以匹配或超过典型紧凑型商用光谱仪 0.2 的数值孔径（NA）（球透镜滤光片的接收角在偏离正入射的角度下减小）。如果输入来自 NA 为 0.13 的单模光纤，则可以根据需要甚至倾斜更大。使用压电定位器同时调节空气间隙，以优化可调谐性。应当注意，由于对横向磁偏振光的高抑制，输出是高度偏振的。

实验器件使用两片来自 Edmund Optics 的 N-BK7 半球透镜构建，在两个平面上均镀有薄膜叠层。Thorlabs 公司的压电定位器可以调节空气间隙。测试了使用光纤输入或成像系统配置的设置。可见光范围的滤光片可以进入 450~700nm 范围；由于静止空气间隙太大，实验上无法达到 400~450nm 的范围。近红外设置可以进入整个光谱区域，但是由于用于固定元件的铝夹具的性能欠佳，因此难以在 1100nm 以下保持准直。但是，这些问题都不是根本性的。整个调谐区域中，设备插入损耗变化的典型数值约为 3dB。

使用两个焦距为 19mm 的消色差双合透镜组成成像系统；该系统清晰成像了 1951 USAF 分辨率靶。通过使用具有 33mm 焦距和可调节光圈的无限远校正物镜增强该系统，创建了高光谱成像仪，可以选择性地成像不同颜色（红光、绿光和蓝光，以及用于比较的白光）的 LED。

研究人员指出，提供平顶通带形状的能力是其可调谐滤光片方案的制胜法宝之一；另一个关键因素则是简单。❑

光纤光学

空芯光纤光缆实现 10Gbit 10km 密集波分复用（DWDM）传输

利用双管嵌套抗谐振无节点光纤（NANF）技术开发的空芯光纤光缆，在超过10km的通信链路上实现了DWDM传输。

文/John Wallace

位于英国的光纤光缆制造商 Lumenisity 公司发布了一款名为 CoreSmart 的新型空芯光缆，在超过 10km 的通信链路上实现密集波分复用（DWDM）传输。

空芯光纤，是将光纤做成空芯，形成微观毛细管结构，光就在空芯管中的空气中传播。因此，与传统的实芯（固体玻璃）光纤相比，光在空芯光纤中的传输速度要快 50%。此外，由于光功率高，在实芯玻璃光纤中传输易诱导非线性效应，降低光的传输能力。而将光束缚在空气中传播，在同样的传输功率下，其诱导的非线性效应降低 1000 倍，因此，光在空芯光纤中传播能够传输更大的信息量、传输更长的距离。

然而，空芯光纤光缆的设计与制造依然面临诸多挑战，包括光纤的制造、光缆的结构开发，以及光缆在现有网络和新兴应用网络体系中的实地安装等。Lumenisity 公司表示，通过与南安普敦大学（University of Southampton）合作，研究团队已经克服重重挑战，设计了一段长度可观的加固空芯光纤光缆，用于英国地铁网络的铺设。

目前，Lumenisity 公司采用“双管嵌套抗谐振无节点光纤”（NANF）技术开发的 CoreSmart 新型空芯光纤光缆，已经申请了专利保护。Lumenisity 公司还设计了另一款空芯光纤——光子带隙光纤（PBGF）。光子带隙光纤本质上是多模传输的，需要较为复杂的设计来减少寄生模式对光纤传输性能的影响。而 Lumenisity 公司设计的新型光子带隙光纤，能够实现 1310nm 光波在 C 波段和 L 波段单模传输。NANF 技术降低了空芯光纤的传输损耗，其损耗值目前已达到甚至优于传统玻璃光纤的损耗值。CoreSmart 空芯光纤光缆的损耗值在较大温度范围内保持在 2dB/km 左右，Lumenisity 公司称这是目前商用空芯光缆能够达到的最低损耗。

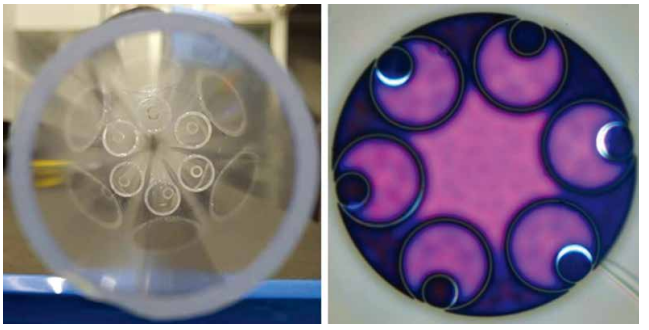


图1：Lumenisity公司发布了一款名为CoreSmart的新型空芯光缆，在超过10km的通信链路上实现了DWDM传输。

CoreSmart 光缆技术与现有网络和系统设备兼容。使用 Lumenisty 公司的空芯光纤与传统光纤的适配技术（正在申请专利），目前已经开发了商用的连接件，安装人员直接用这款连接件就可以实现空芯光纤与传统光纤的拼接。即使用连接件拼接 10 段光纤，仍然能满足载波级通信误码率的要求。

Lumenisity 公司表示，其光缆技术已经在严苛的环境中经过了考验。Lumenisty 公司及其客户和合作伙伴已经在全球部署了多条光缆，其中一些光缆用于通信传输的时间已经超过三年。Lumenisity 公司刚刚发布的这款新型空芯光纤光缆，传输能力大大提升，能在超过 10km 的通信链路上，实现每通道 10Gbit 的全宽带 DWDM 光路传输能力。随着应用场景的不同，光缆长度也会发生变化。

接下来的几个月中，空芯光纤光缆的数据传输能力将会进一步提升。❑

光学仿真软件

全波仿真扩展透镜分析的范围和深度

本文介绍了物理光学分析与全波光学分析之间的差异，以及每种分析方法的适用情况。

文/Yosuke Mizuyama

除了在手机、笔记本电脑等设备中使用的光学镜头以外，每天我们还被通过光学镜头处理过的物品所包围。例如，在硬件器件（包括手机和计算机）上看到的许多徽标和其他图形都是激光刻写的，或者是用高功率激光切出的，在这些情况下，激光束已经穿过了许多透镜。食品包装上的日期标记、医疗器件上的标记，以及在车门上看到的所谓门框贴纸也是如此。事实上，尽管我们并不知道，但我们却在很大程度上间接受益于计算镜头分析。

此类镜头（见图 1）在现实世界中使用之前，通常需要执行许多计算机仿真。虽然仿真不能代替测试，但可以帮助减少所需的原型数量，并提供有价值的见解以进行更好的实验。对于镜头的仿真，可以使用不同的方法，从传统的镜头设计方法，到可以解整个麦克斯韦方程组的仿真。但是，最终选择哪种方法执行镜头仿真，到底是如何决定的呢？

设计与分析

为了便于本文的理解，我们将镜头仿真分为两类：设计和分析。这里的设计意味着针对特定应用优化镜头；而分析意味着对镜头系统中发生的事获得更深入的了解。

对于镜头设计，人们试图找到一种最佳的镜头形状，以便按照想要的方式传送光束。换句话说，要确保镜头适当地聚焦或发散光束。镜头设计的目的通常是使光学像差最小化。仿真可以用来实现最佳的镜头设计，这是光学仿真的标准应用。对于镜头设计的目的，出于计算效率的原因，通常通过光线追踪法进行仿真。



图1：不同种类的多元件光学镜头示例。

在光线追踪仿真中，电磁波被光线近似。这种方法的缺点是不包括衍射效应。但是，在许多情况下，了解衍射效应对设计并不重要。当衍射效应重要时，除了在计算机上将数字形式的仿真值拟合所需的数值方法之外，可以使用波动光学方法来求解全套麦克斯韦方程组，而无需固有的近似。什么时候使用波动光学代替光线追踪进行镜头仿真呢？事实证明，它对于设计和分析都是非常有用的。

波动光学用于镜头设计。在镜头设计中，镜头的重要指标之一是光斑尺寸。光线追踪无法仿真聚焦光束，因为它是衍射效应的结果。衍射的详细仿真需要全波光学仿真。为了解决这个问题，光线追踪软件通常附带一些波动光学仿真工具，例如傅立叶变换，以及基于惠更斯定理和菲涅耳衍射的方法。这三种方法有时统称为物理光学。所使用的公式是从近似理论推导出来的，通常可以找到标量电磁场解，足以在许多情况下设计光束尺寸。

波动光学用于镜头分析。在镜头分析中，物理光学可能就足够了，但是有时需要更严格的理论（明确地说是麦克斯韦方程组）才能获得电磁场的完整矢量表示。这种方法有时称为全波方法。高数值孔径镜头需要全波方法才能进行准确分析；物理光学方法不适用于分析快速镜头。

当偏振重要或材料具有某些各向异性时，需要使用全波分析代替标量近似。很少有镜头本身具有如此复杂的特性，但也很少有被分析的系统仅由单个透镜组成；通常还涉及其他几种光学组件。如果是这样的话，最好尽可能通过全波方法不仅仿真镜头，

而且一起仿真其周边的光学元件。从历史上看，全波方法经常在计算上非常苛刻，以至于无法实际使用。

物理光学与全波光学

物理光学和全波仿真之间存在两个根本的区别。

传播或域解。在物理光学的情况下，一旦在一个平面中知道了某个场，该方法就可以在另一个平面中计算该场，无论平面在哪里。也就是说，只要两个平面之间的间隔是均匀的，就不需要两个平面之间的信息。因此，在其计算域中不需要体积网格。

另一方面，全波方法需要在整个域中求解麦克斯韦方程组。对此一种非常强大的数值方法是有限元方法，其中将域划分为网格。它细分为具有简单形状的小元素。为了满足奈奎斯特标准，最大网孔尺寸被限制为波长的一小部分。波长越短，有限元网格元素的尺寸就越小。较小的元素意味着需要更多数量的有限元，并且随之而来的是计算时间和内存方面的更多计算资源。

单向或双向。物理光学方法通常会找到出射波场作为解，而忽略任何反射。这就是物理光学公式如何推导出来的。与之相比，全波方法找到的解自动包含反射（如果存在）。如果仿真模型中存在任何材料界面，则麦克斯韦方程组将不会仅给出出射波场，因为这并不是真正的解。真正的解是相干合束的出射波场和材料界面的反射。

全波方法镜头仿真

使用全波方法进行镜头仿真很困难，主要有三个原因。

网格。请记住全波方法需要网格，而网格尺寸需要解析波，人们可以立即理解使用全波方法仿真镜头有多困难。例如，如果镜头尺寸和焦距在毫米量级范围，则域尺寸可以是波长的一千倍。然后，网格元素的数量将达到数十亿，因此常规计算机无法处理。

折射率。通常，任何光学元件的折射率都高于 1，例如 1.5。因此光学元件中的波长是真空中波长的 2/3。这再次增加了网格元素的数量，从而进一步增加了计算需求。

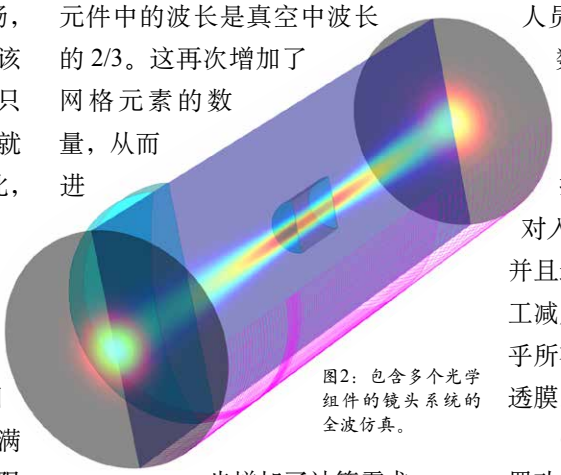


图2：包含多个光学组件的镜头系统的全波仿真。

干涉。任何光学元件都具有材料界面，会发生菲涅耳反射。对于垂直入射光束，折射率为 1.5 的材料表面的反射率为 4%。这种反射引起与入射光束的干涉，从而导致条纹出现，其周期为波长的一半。网格需要解析波长的一半。结合折射率效应，在折射率为 1.5 的情况下，需要解析波长的 1/3；也就是说，镜头仿真的情况比已经很困难的开放空间中的仿真要糟三倍。

光束包络法和增透膜

通过以上讨论，看起来几乎不可能仿真镜头。但是使用全波方法，具有以下两种纠正方法：

光束包络法。如果波矢量是已知的，则可以求解缓慢变化的包络函数，而不是求解快速振荡的电场。这种方法称为光束包络法。在这种情况下，没有理论近似，但这等效于求解麦克斯韦方程组。在此公式中，网格需要解析包络函数而不是场本身。如果包络函数缓慢变化，则网格元素的数量将大大减少，这是许多镜头仿真的实际情况。

减反射（AR）膜。即使采用光束包络方法，干涉条纹也不会给设计人员提供免费通行证，因为包络函数不再在条纹中缓慢变化。为了解决这个问题，可以使用减反射膜。通过人工相位跳跃来模拟材料界面是可能的，该界面会对入射光束人为地产生破坏性干涉，并且最终不会出现条纹。引入这种人工减反射膜可以得到推动，因为在几乎所有实际情况中，光学元件都镀增透膜。

COMSOL Multiphysics 具有作为内置功能提供的这些纠正措施。波动光学模块的“光束包络”界面由光束包络公式构成，并包含“过渡”边界条件，可以用作减反射膜。因此，通过结合使用“光束包络”界面和“过渡”边界条件，能够以直接的方式进行全波镜头仿真。可以很容易地仿真慢镜头，而快镜头的仿真由于事实上需要更细的网格而对计算的要求更高。足够强大的计算机仍然可以进行快镜头仿真。

多组件光学系统的全波仿真（见图 2）以前是遥不可及的。但是，使用本文中概述的方法，只要减反膜方法是适用的，就可以仿真一整套光学系统，包括镜头和其他光学组件。此外，全波仿真使双折射分析成为可能，因此它不仅可以用于仿真镜头，还可以用于仿真液晶，或包括透镜在内的二次谐波产生（SHG）光学元件。以这种方式执行的全波仿真扩展了镜头分析的范围和深度。❑

量子技术

激光打造量子技术世界

窄线宽可调谐二极管激光器、放大和倍频激光系统、频率梳和波长计，使许多量子技术成为可能。

文/ Stephan Ritter，Jürgen Stuhler；TOPTICA

当一个世纪前首次提出量子理论时，谁能猜到量子物理学中有多少技术发展，正在塑造着我们今天的生活和互动方式呢？无论我们是使用计算机工作、使用手机，还是基于磁共振成像进行诊断，所有这些技术的基础都源自对量子力学的理解。

在光子学中，激光和发光二极管（LED）是主要的例子，仅激光器当前的市场就超过 120 亿美元。现在，出现了新的量子技术，其应用是如此令人兴奋，以至于研究人员和很多业内人士都宣告第二次量子革命的到来。

从基础研究到市场

政府和大量投资“量子 2.0”的公司也分享了他们的热情。量子系统最脆弱的特性，通常被认为违反直觉甚至是诡异的，实际上是新技术的来源。尽管最终的应用是新颖的，但是使量子技术成为可能的工具却并非如此。牛顿已经承认了现代科学和技术的核心：“如果我看得更远，那是因为我站在巨人的肩膀上。”

对于量子技术尤其如此。例如，激光是第一次量子革命的产物，是量子技术的赋能技术。它的应用绝不限于纯光学量子技术。相反，在大多数量子装置中都能看到激光。

实际上，德国激光器公司 TOPTICA Photonics 起源于激光冷却和原子粒子光谱学，现在是为量子技术的所有领域，包括量子通信、量子计算、量子模拟、量子计量学和量子探测，提供激光系统的主要供应商。

最明显的是，光源位于量子网络的核心，因为光子是长距离量子态的自然载体。它们使诸如量子密钥分发和量子计算机未来互连之类的应用成为可能，但是激光器还是许多量子计算机、量子传感器和光学时钟中必不可少的组件。从本质上讲，对激光器发出的光的所有自由度的令人难以置信的控制（通常在量子极限处），是初始化、操纵和读出其他量子系统的主要工具。

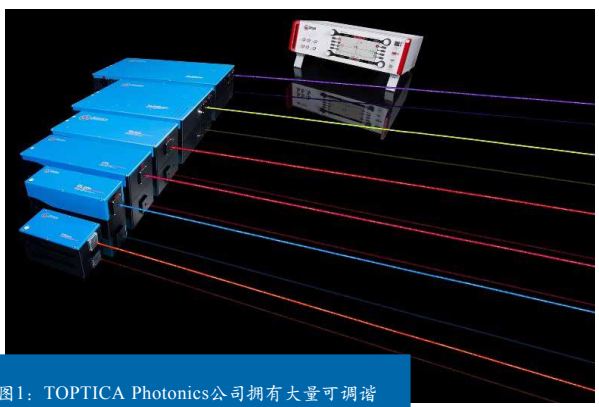


图1：TOPTICA Photonics公司拥有大量可调谐二极管激光器和便利的数字控制，可以为需要激光器的量子技术提供定制解决方案。

激光器的每个特性，即其波长、线宽、功率、偏振、时域和空间光束轮廓，都是量子技术中的重要控制参数。在量子通信中，这反映在量子信息的许多不同编码中。单个光子的偏振可以携带一个量子位（qubit），就像它的时域形状可以是时间纠缠（time-bin）量子位的形式一样。

单个光子的时间、频率、空间结构，甚至轨道角动量同样可以用于编码量子信息，每项都有其特定的优点和缺点。这些自由度中的某些甚至可以用来超越存在于两能级系统中的量子位，并对高维量子态进行编码，这是将量子位推广到额外维度的方法。光脉冲的相位和幅度也用于量子通信。

所需的所有波长

用于或建议用于量子技术的量子系统的列表与量子应用的列表相同。与硅基的经典计算机技术的“一物万能”方法相比，这似乎还不成熟。但是，它反映了各个原子特性的固有相互联系，例如能级结构和各种应用。

通过利用元素周期表中的许多不同元素，研究人员利用自然界提供的

全部多样性，这些元素不仅以中性形式存在，也以离子形式存在于分子中，并嵌入固体中。这些自然量子系统由人造原子和其他纳米结构（如量子点）补充。所有提到的系统的共振频率覆盖了电磁频谱的很大一部分，因此基本上需要所有波长的激光（见图 1、图 2）。

从字面意义上讲，这种多彩加

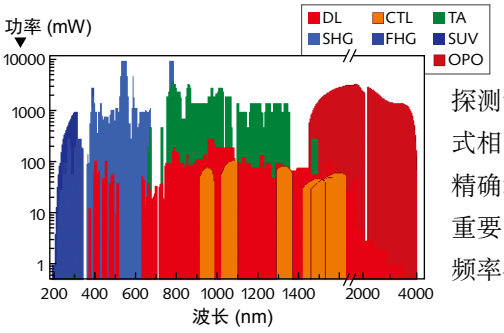


图2：每个量子系统都需要具有特定波长和功率水平组合的激光器。TOPTICA的可调二极管激光器提供从190nm~4μm的宽波长范围，可以实现许多量子应用。

上每个种类中定义非常明确的跃迁频率，可以称得上是完美无缺，这使具有极窄跃迁的原子和离子成为理想的频率标准。当在光学时钟中用激光检查这些跃迁时，激光的线宽通常会定义时钟的质量（见图 3）。

在这种极高的精度水平下，环境的控制起着重要作用。例如，必须使用所谓魔术波长的光来俘获中性原子。仅在该波长下，由光阱引起的时钟跃迁的干扰，对于目标精度而言足够小。

对于某些应用，单频激光器是不够的。例如，一对两个锁相激光器可以驱动单个激光器无法处理的原子跃迁。激光束中许多离散频率的极端形式是光学频率梳，例如 TOPTICA 的 DFC CORE +。[1,2] 尽管其输出仍然是空间单模，但频率梳的频谱由等间距的线组成。

想象一下重叠大约一百万台激光器的低功率光束，它们以略有不同但具有明确相位关系的完美定义的频率运行。这样便可以想象频率梳。这是非常出色的工具，可以将光钟推向 21 位有效数字的前所未有的精度。[3] 通过使用不同的波长扩展，DFC CORE + 的光梳谱可以转移到 420~2200nm 之间的频率。

在称为直接频率梳光谱的应用中，光梳结构可用于同时探测许多不同的等距频率。与传统方式相比，可以使用频率梳产生甚至更精确和更低噪声的微波频率。而且最重要的是，它们可以准确地弥合光学频率与微波频率之间的间隔。

这样，可以将量子系统中光学跃迁的精度传递到射频和微波频域中的普遍存在的信号。在光学频率梳的首次实验性实现之后的 20 年，无法想象没有它们的光钟。它们已经从本身只是研究主题的庞大演示器，变成了具有最高精确度的紧凑而强大的工具，可以方便地用于越来越多的科学应用中。

对所有激光特性的高要求

光阱是如何使用激光操纵原子运动的一个例子。它也可以用来将原子冷却到绝对基态。在保持对光谱特性完全控制的同时，这通常需要大量功率。当基于捕获的离子扩展量子计算机时，还需要高功率，其中携带单量子位的每个离子都必须被单独寻址。

在这种情况下，理想的是与光学放大器一起使用，例如基于半导体的锥形放大器。它们令人惊奇的特性之一，是继承了种子激光的光谱特性。因此，从为提供必要的、非常特定的光谱特性而定制的单个激光器开始，锥形放大器的分光和级联提供了必要的可扩展性。

当将更多形式为捕获离子的量子位添加到量子计算机时，添加锥形放大器是扩展所需激光功率的最有效方法。显然，对于所采用的激光束的指向性和其他空间特性，所有这些方法也都要求很高。

激光的偏振是另一个控制旋钮，可用于采用选择规则，甚至在光谱简并跃迁之间进行区分。已经提到了单个光子的偏振是量子通信中量子位编码的自然自由度。

未来几年的挑战

除了应用决定和物理驱动的控制所有激光参数的需求外，量子技术光源还面临许多技术挑战。无跳模调谐、大调谐范围、指向和功率稳定性、可靠性、紧凑性、低功耗、低拥有成本和远程控制是许多必不可少的功能。

二极管激光器非常好地满足了其中的许多要求。它们本质上是小型器件，能以无与伦比的效率将电能转换为激光。必须通过仔细设计包括驱动、控制电路以及激光头本身在内的整个系统，以满足大多数其他要求。

TOPTICA 公司结合数十年的经

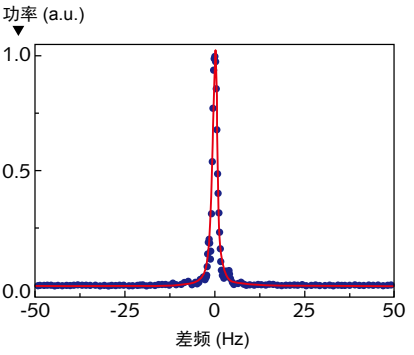


图3：窄线宽激光器是诸如光学时钟等应用的关键。通过锁定到高精细的光学腔，可以将外腔二极管激光器的线宽减小到1Hz。该图显示了两个独立的腔稳定的TOPTICA 1162nm二极管激光器之间的光学拍频信号。

验以及与客户的紧密合作，其中许多是量子光学和量子技术领域的世界领先研究人员。从头开始为数字远程控制设计的控制电路，以及广泛的频率参考，只是超越激光器本身带来的众多成果中的两个。

考虑到激光器与量子技术的相关性和多功能性，许多装置都需要多台（有些甚十几台）具有不同特性的激光器是不足为奇的。在特定情况下，例如上述的量子计算机，系统尺寸的扩展还需要在一个装置中使用多台相同类型的激光器，从而使总数增加到数十台激光器。

这就要求在激光器系统的外形、集成度和功能性方面开辟新途径。为了满足这一需求，TOPTICA 已开发了新颖的、高度模块化的产品系列：量子技术认可的用于工业机架集成的激光器（见图 4）。窄线宽可调谐二极管激光器和分布式反馈激光器提供了紧凑的解决方案，而放大激光器则满足对高输出功率的需求。

频率转换的二极管激光器覆盖了光谱的可见光和紫外光部分，而频率梳和锁定电路则提供了最高的频率稳定性。所有这些模块化激光系统都可以集成到 TOPTICA 的 T-RACK 19 英寸机柜中，该机柜具有模块化电源输入单元，以及专业的电缆和热量管理功能。对于用于量子技术的激光器而言，这是一个转变，从研究级光学平台上的庞大装置转向了专用的、完整的解决方案，能以工业尺寸实现终极性能。



图4：为了满足量子应用中对紧凑而强大的激光器解决方案的需求，TOPTICA公司已开发了19英寸机架系统模块化激光器，包括窄线宽可调谐二极管激光器、放大和倍频激光器系统、频率梳、波长计和其他组件。数字激光控制器可实现激光模块的远程控制，并可与应用的控制软件进行深度集成（例如使用Python软件开发套件）。

联合国曾经宣布 2015 年为国际光年，庆祝光和光基技术的重要性。2020 年是激光发明 60 周年。量子技术为由激光实现的基于光的启蒙这本伟大的著作增添了新的篇章。观察小型激光器将如何继续作为未来量子技术能够可靠依赖肩膀的巨人，将是一件有趣的事。❑

参考文献

1. R. Kliese et al., Eur. Phys. J. Spec. Top., 225, 2775 (2016).
2. T. Puppe et al., Opt. Lett., 41, 1877 (2016).
3. E. Benkler et al., Opt. Express, 27, 36886 (2019).

上接第10页

缓冲层用于金属接触。电子束蒸镀的 Cr 和 Au 通过剥离工艺沉积形成 p 电极和 n 电极，厚度分别为 10nm 和 350nm。Si 衬底最终厚度达到 140mm，劈裂形成法布里 - 珀罗腔。最后，将器件通过导线连接到 Si 片上，并安装在低温恒温器中进行低温测量。

脊形波导 GeSn 激光器，在 100K 的温度下观察到了脉冲激光输出。对不同尺寸的基片，分析其阈值 - 温度的关系可知，在 10~77K 的温度范围内，不同器件的特征温度 T0 在 76~99K 范围内。其中 1.7mm 的基片阈值最低，在 10K 时，阈值为 598A/cm^2。电流 - 电压（IV）采用直流测量。而脉冲测量，则采用脉冲高顺应性电压源驱动激光，电流用校准过的磁耦合电流计监测（见图 1）。

GeSn 激光器电致和光致发光信号通过单色仪（分辨率 10nm）和液氮冷却的 InSb 探测器（响应范围 1 ~ 5.5mm）采集和分析。高分辨率光谱由傅里叶变换红外光谱仪（FTIR）测量，探测器为 InSb，步进扫描分辨率为 0.25cm^{-1}。

由于需要掺杂和设计结构，像 GeSn 这样的用电注入方式实现的激光器特别具有挑战性。然而，科学家正在寻找更优的 GeSn 激光器结构设计方案，以进一步提高设备的性能，例如增加锡含量以提高带隙的直接性，从而提高注入效率。❑

参考文献

1. Y. Zhou et al., Optica, 7, 8, 924–928 (2020); https://doi.org/10.1364/optica.395687.

激光顺序加工

激光顺序加工在一台设备上实现精密切割和焊接

本文详细介绍了一种全新的多激光头、多步骤激光切割和焊接工艺，能够在同一台设备上实现精密切割和焊接工艺。

文/Dan Robinson，Weil Engineering

为了满足日益严格的环境法规，如今的汽车和卡车的排气系统已经变得相当复杂。商业车辆的排气系统现在已经成为仅次于引擎的第二大最昂贵的组件。乘用车的排气系统包括不同负载条件下改变气体路径的分流器襟翼、减少氮氧化物（NOx）排放并使发动机更快升温的废气再循环（EGR）控制系统，以及用于抑制柴油机尾气排放的尿素喷射系统。所有这些新的主动排气控制组件，都需要在系统中安装传感器与之匹配，而安装传感器则需要在系统中增加更多的螺纹连接件。

一般而言，形状为鞍状的带有螺纹的传感器安装凸台，可以用熔化极惰性气体保护焊（MIG）的方法焊接到中间管道上，可以手工焊接，也可以用机器人焊接。而将凸台安装到钣金部件上，就要用到凸焊，同时需要另一种锥形凸台。随着对传感器安装凸台的需求增加，排气制造商开始寻找一种更快、更便宜的组装和焊接方法。为顺应市场需求，顺序激光加工（Sequential laser processing）——一种用激光在钣金件或管道件上安装元器件的新方法——应运而生（见图 1）。

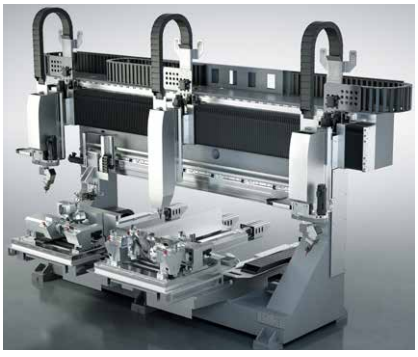


图1：柔性激光单元机（FLC）的三个激光头同时工作，一个激光头用于切割，两个激光头用于焊接。

顺序激光加工，是将工件一次性加载到工装夹具中，将工件按预设的形状切割，再将需要焊接的部件直接焊接到第一次切割的部位（见图 3）；切割和焊接直接在一台设备上完成，而不需要将工件从一台设备移动到另一台设备上。为了安装传感器凸台，在焊接前先用激光在工件上切割一个孔，切割的孔精度与焊接的尺寸完全匹配，并且孔的位置被加工系统精确定位，直接用于第二步焊接。柔性激光单元机，加工精度高，可以自动放置零件和自动焊接，这为排气系统制造商提供了一个快速、可靠的加工过程，其拥有以下众多优势：

- 更快的工作周期；
- 简化了凸台设计，凸台结构焊接到管道或钣金上不再需要复杂的鞍形结构或凸点结构；



图2：柔性激光单元机在管道上切割传感器凸台孔。



图3：柔性激光单元机焊接传感器凸台。

- 不再需要焊丝，因为激光切割孔与安装的凸台直径完全匹配，激光可以直接焊接；
- 激光焊接减少了钣金组件的热变形；
- 焊缝更加美观；
- 应用新的零偏移旋转焊接头，焊接路径更短；

新工艺用途更广泛

这种新的激光加工方案用于传感器凸台焊接，可以降低材料成本和制造周期。第一台激光切割 - 焊接组合

表1：螺纹凸台切割和焊接系统配置

切割头	焊接头
直径100mm光纤	直径200~600mm 光纤，双芯
焦距75mm准直器	焦距200mm准直器
焦距125mm	焦距200mm
光斑尺寸170mm	光斑尺寸200~600mm
切割速度240 英寸/min	焊接速度320英寸/min

注：每个凸台加工周期为15~20s（包括加载工件、切割、焊接、卸载工件）。

设备的使用，让客户联想到也可以用它加工排气系统的其他部件。例如，排气扇和尿素喷射部件，目前只用激光焊接，没有用激光切割，因此也可以用这套激光切割 - 焊接组合设备，实现切割、定位、固定、焊接等一系列连续的顺序加工作业。

废气再循环控制系统的分流器襟翼的作用，是在发动机预热阶段直接越过废气再循环冷却模块，使发动机更快达到峰值效率。当发动机处于正常工作温度时，襟翼将废气输送到废气再循环系统，以减少氮氧化物的排放。由于靠近发动机的排气热端，所以废气再循环系统组件需要非常坚固。液压壳体通常用于废气再循环系统的输入端，用于连接排气管和容纳分流器襟翼。为了在不使用时密封废气，襟翼外壳必须是一个精密的部件。

采用切割 - 焊接这种顺序激光加工过程，可以将两个半状壳体焊接成一个精密的完整壳体（见图 4）。首先，将两块冲压的半壳体加载到夹具上，用两个激光切割头分别对其精修，将典型的冲压件加工成成精密部件。然后夹具将两个半壳体推到一起，激光焊接头进入，将半壳体焊为一体。切割、焊接操作一气呵成，无需人工干预。



图4：一个废气再循环系统的分流器襟翼壳体，由两个半壳焊接而成。

排气襟翼（见图 5）是另一个排气组件，也需要用到激光焊接。排气襟翼本质上是一个位于排气系统冷端的蝶阀。随着发动机负载的变化，襟翼将被启动以改变气路和腔体体积，以优化功率 - 声音输出。排气襟翼需将襟翼精密焊接到旋转轴，先将襟翼精确定位到阀罩内，然后再焊接。激光焊接在这里显得格外有优势，与熔化极惰性气体保护焊（MIG）一样，因为热效应低，不会使旋转轴和襟翼发生形变。



图5：激光焊接排气襟翼。

柔性激光单元机-多功能加工设备

目前已经在一些设备上用激光焊接排气襟翼，客户询问是否可以通过更换工装夹具，在同一激光焊接系统上焊接不同的襟翼。在这种情况下，不需要激光切割功能，只需将襟翼精确放置到罩体内，并将其焊接到旋转轴上。在一台激光加工设备上运行多个应用程序的想法，催生了使用工具托盘快速切断电源、气动和控制信号的方法。最后，在新机器中使用了双加工室系统，这样可以同时运行多个作业。客户将加载两个能够快速切换的工具托盘，用于他们需要运行的任何作业，并启动这样一种生产模式：一个加工室在加工一个工件，而另一个加工室被重新加载新工件。

柔性激光加工系统提供了新的激光加工工艺和多用途激光加工功能，客户发现其可以实现多种用途，并订购了第二台机器。尿素混合器，用于将注入的尿素混合到柴油发动机的废气中，其内部组件可以通过激光切割、机器人组装，然后用激光焊接在一起，从而建立一个三维整体，所有这些都无需人工干预。

焊接前的精密切割

经验丰富的自动化焊接专家也表示，并非所有零件都适用于自动化焊接。因为任何自动化焊接操作，都要求焊接位置的高度重复性。在需要产生精密、狭窄的应用中，情况更是如此。当试图用激光将两个尺寸不同的成型钣金组件焊接到一起时，更加不能有丝毫的焊机位置偏移。

激光顺序切割 - 焊接加工设备，可以轻松应对焊接位置精密定位的问题。因为它先将成型组件精密切割到焊接的要求，然后再焊接。这就保证了焊接接头每次都在已知的可重复的位置焊接。由于客户在第一台机器制造之前就预见到了其不同的应用，Weil Technology 公司能够通过快速更换工具托盘，最大化发挥机器的效用。

Weil 公司的 Andreas Scholz 说：“这是一个针对汽车排气系统研发的不同寻常的整体激光应用和机器开发项目。”为某一特定客户开发的应用现在看来可以广泛应用于其他行业。“我们正在寻找顺序激光加工在其他领域的应用，如家用电器和硬件装置。因为这台机器最初是为多次装配和快速工作转换而开发的，所以我们能够以异乎寻常的快速方式，将这项技术应用到新的领域。”❑

箔片焊接

使用纳秒脉冲光纤激光器对超薄铝箔铜箔进行边缘微焊接

使用MOPA纳秒脉冲光纤激光器对铝箔和铝铜箔进行焊接，焊缝非常光滑，没有气孔和焊缝间断，变形很小。焊缝的拉伸强度为2.5~27N不等。

文/Yidong Zhou，Daniel Capostagno，Ken Dzurko，Jack Gabzdyl；通快公司

连续波和长脉冲（>ms 脉冲）红外激光器，被广泛用于焊接不锈钢（1-4）、铜和铝（5）板中，这些材料的厚度通常从50μm 到几毫米不等。然而，使用传统的搭接激光焊接方法很难焊接厚度小于 50μm 的超薄高反射金属箔，如铝和铜。这是因为焊接熔池的深度非常难控制，它需要大于一个箔的厚度，并小于两个箔的厚度。在低功率密度下，铝箔的反射率太高（对于 1μm 激光，R=80%）而无法焊接；而在高功率密度下，铝箔会迅速吸收大部分能量（成为 1μm 激光的高吸收体），随之生成的等离子体会使熔融材料大量汽化而难以焊接薄箔。

因此，为了抑制等离子体的形成，薄金属箔的焊接速度和激光参数（平均功率和峰值功率等）都需要更加精确的控制。其次，超薄金属箔对热量非常敏感，由于其重量轻、热诱导的表面张力大的特点，很容易发生变形。所以一个良好的工艺需要足够高的峰值功率来熔化金属，并尽可能降低激光总平均功率以减少热影响。

我们发现，在对超薄高反射金属箔进行焊接时，通快集团旗下 SPI 品牌的 MOPA 脉冲光纤激光器是一个很好的工具，它可以在很低的激光平均功率下提供高达数十千瓦的峰值功率（与 CW 激光相比）。此外，它还能提供非常宽范围的激光脉宽（波形）和很宽泛的峰值功率调节范围。

边缘微激光焊接技术

激光搭焊是一种针对厚度在 50μm 以上的薄金属箔进行焊接的传统方法。薄金属箔搭焊的典型问题包括箔的过度变形、箔层之间缺乏紧密接触和高残余应力。因此，搭焊不适合超薄金属箔的焊接，特别是对红外光存在高反射率的金属箔，如铝箔和铜箔。

我们使用一种可以同时切割和焊接超薄金属箔的新方法来焊接铝箔或铜箔：用夹具将两片超薄金属箔精密固定，将纳秒脉冲光纤激光器产生的激光光束照射到堆叠的金属箔上，切割出一条穿过金属箔的切缝。切割所使用的激光参数可以使材料在切口中心汽化，由于高斯光束的轮廓特性，切口边缘的材料温度稍低，因而部分切口边缘的液态金属可能会在从切口中喷出前重新凝固，从而将这两片薄箔部分凝固在一起。

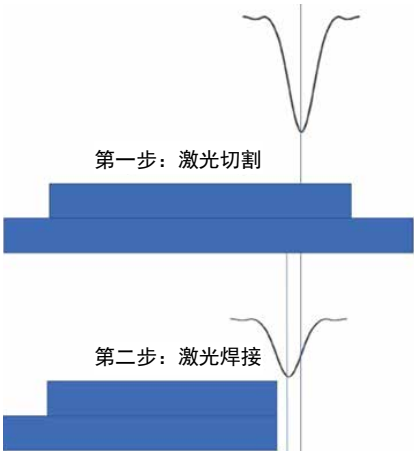


图1：边缘焊接示意图：（1）高峰值功率切割；（2）低峰值功率的重熔焊接。

这种初步的切割 / 凝固产生的焊缝有较多的空隙缺陷，为了提高焊接质量，需要用第二或第三道激光束来重新熔化和固化边缘。因为切割后材料的侧壁变得比较粗糙，因而使得材料对红外激光的吸收效率变得更高，所以设置第二道激光束的参数时，可以将激光的峰值功率密度设得较低。这样，材料既可以吸收激光，也可以避免材料温度过高汽化并抑制等离子体，让熔化的材料保持在焊缝处固化而形成连续的焊缝。

实验结果

用于测试的焊接系统配置了 SPI G4 70W HS-H 脉冲光纤激光器，该激光器的脉冲持续时间在 10~250ns 范围内，峰值功率可达 25kW。激光的

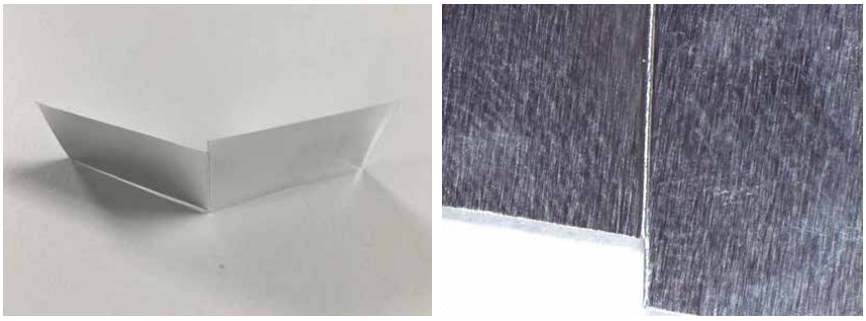


图2：25μm铝箔与25μm铝箔的焊接（左）及其~50μm的无间断焊缝（右）。

可调节参数范围宽，开始能以高峰值功率模式进行切割，然后立即切换至低峰值功率模式进行焊接。

这种边缘焊接方法可分为两个步骤（见图 1）。第一步是对准备好的两个薄金属箔用较高峰值功率的激光进行切割和部分预焊。其结果是两个金属箔以较小的强度部分地连接在一起。第二步是用较低峰值功率的激光来重熔焊接，以增强焊缝强度。

加工激光束切口位置应当靠近夹具以达到更好的散热效果，并防止切割过程（烧蚀）中等离子体喷射所导致的箔片翘曲。两个金属箔可以被展开因而呈现对接焊形状（见图 2 到图 4）。

实验的激光束光斑大小约为 127μm，第二道激光相对第一道激光偏移了 100μm。通过控制偏移量可以控制输入的激光总能量，从而达到热量控制以减小样品变形。实验采用的样品为铝箔（厚度分别为 50μm、25μm 和 10μm）和铜箔（厚度为 10μm）。所有样品的焊缝长度均为 15mm，并使用拉伸强度测试仪来评估焊道的拉伸强度。

铝箔焊接

图 2 显示了 25μm 铝箔与 25μm 铝箔焊接（左）及其无间断焊缝在光学显微镜下的照片。该工艺没有使用保护气体，第一步用高峰值功率激光切割，材料汽化有飞溅；但第二步用低峰值功率激光焊接时，基本没有观察到等离子飞溅。该样品的焊缝非常光滑，没有断续的焊珠或气孔，而且变形很小。

表 1 是第二步焊接过程中的激光参数。对于所有厚度的箔片，我们都采用了相同的平均功率（70W）和峰值功率（10.6kW），但不同厚度箔片都有相对应的最佳焊接速度。较慢的焊接速度所导致的主要缺陷是：焊珠上的气孔和间断的焊缝。气孔的形成，是因为表面张力大，熔融金属在再凝固过程中凝结不均匀所造成的；而间断焊缝的形成，是因为热影响区（HAZ）过大，使得箔片变形翘曲所导致的。当焊接速率较快时，因为激光的能量密度不足而形成间断的焊缝，从而削弱了焊接强度。

本次实验中，我们发现在给定的激光功率下，若要达到最佳焊接质量，50μm、25μm 和 10μm 箔片焊接的最佳焊接线速度分别为 10mm/s、25mm/s 和 35mm/s。所有的样品都使用了相同的激光切割参数（平均功率为 70W，峰值功率为 10.6kW），所有样品的焊缝长度均为 15mm。

一般来说，为了确保激光焊接有足够的穿透深度，搭焊的激光峰值 / 平均功率是和材料厚度成比例的。但对边缘焊接技术，我们可用相同的平均功率（70W）和峰值功率（相同的脉冲宽度和脉冲频率）来处理所有厚度（10~50μm）的箔片组合。

第一步的激光切割使两个箔片的侧壁整齐地叠加并暴露在外，同时切割也使箔片侧壁无论厚度如何都变得更粗糙，而粗糙度又增加对红外光的吸收率。事实上，用于焊接箔片的脉冲能量只有大约一半照射到箔片边缘（见图 1，步骤 2），其余的激光脉冲能量都穿过了切口。我们用聚焦光束的部分尾部能量（不是中间的峰值能量）来熔焊箔片。图 3 是采用边缘微焊接法焊接的最薄铝箔片（10μm）的光学显微镜图。该焊缝（宽度 20μm）

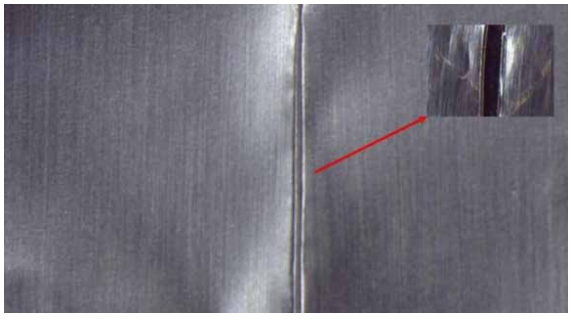


图3：10μm和10μm铝箔的无缝焊接。图中插入的照片（右上角）为拉拔试验后，上下箔片的断裂痕迹，显示为熔焊的图像。

表1：第二步焊接过程中的激光参数，优化后的焊接速度可以达到最佳焊接质量和强度

铝箔结构	50μm-50μm	25μm-25μm	10μm-10μm
激光平均功率	70W	70W	70W
激光峰值功率	10.6kW	10.6kW	10.6kW
优化后的焊接速度	10mm/s	25mm/s	35mm/s

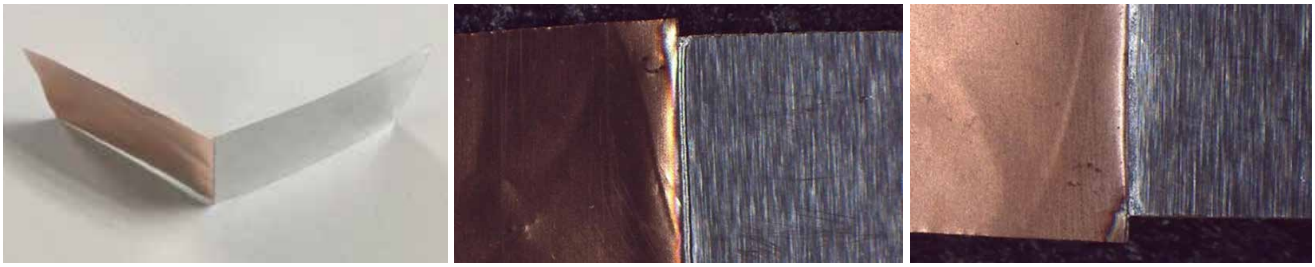


图4：25μm铝箔和10μm铜箔焊接（左图）及其正反两面无间断焊缝图（中图和右图）。

干净无缺陷。右上角的照片是一张断裂样品图，在上下两片箔片边缘都能看到熔化的焊缝。这种焊缝形状是典型的低峰值功率激光的熔焊。

铝箔和铜箔的焊接

这种边缘微焊接方法也被广泛用于新能源汽车电池中的超薄铝箔和铜箔之间的异种金属焊接。图 4 为 25μm 铝箔与 10μm 铜箔的焊接，在这个焊接中，将铝箔放置到铜箔之上，使用同铝箔焊接（Al-Al，25μm）相同的激光参数。但与铝箔焊接不同的是，第一步切割对铝箔和铜箔的边缘都进行了修整，但两个箔片几乎没有接合，即重铸的金属焊珠相对较少。第二步（焊接）对接合边缘起着至关重要的作用。通过第二步激光熔焊，我们通常还可以看到有不少气孔缺陷，或沿着焊缝有间断性的焊接。

为了消除这些缺陷，需要重复第二步激光焊接，以进一步提高焊接质量。通常情况下，可以按需增加激光重复次数来提高接合质量。可以说，对高质量的异种薄金属材料进行焊接，非常具有挑战性。然而使用这种新工艺，完全可以实现超薄异种金属箔焊接。

表 2 总结了同种金属箔和异种金属箔焊缝的抗拉强度测量。异种金属焊缝（Al-Cu）的强度比同种金属焊缝的强度要低得多。这是因为铜箔表面有较大的热影响区（见图 4），从而降低了焊接强度。

通常由于红外激光在铜箔表面（侧壁）的吸收率较低，而铜箔的热导率又比较高，从而需要较高的激光功率密度焊接，这就导致铜箔上的热影响区较大。为了提高铝铜箔焊缝的强度，应该使用更好的散热夹具以防止出现较大的热影响区；同时，需要进一步研究与优化第二步焊接激光的偏移量及峰值功率密度。

总结

利用 SPI 纳秒脉冲光纤激光器，成功地将边缘微焊接技术应用于焊接同种或异种超薄铝箔（厚度 50μm、25μm 和 10μm）和铜箔（10μm）的工艺中。首先将高峰值功率密度激光束用于切割堆叠的金属箔（第一步），然后用较低峰值功率密度的光束焊接金属箔的边缘（第二步），此焊缝形态为热传导焊接型。虽然金属箔片接头的抗拉强度不如母材，但基于箔片厚度，其抗拉强度可达到 2.5~27N。实验焊接样品的焊缝非常光滑，没有断续的焊缝和气孔，金属箔片基本没有变形。

表2：金属箔焊接的抗拉强度（焊缝长度为15mm）

超薄金属箔焊接	拉伸强度
50μm铝对50μm铝	27N
50μm铝对25μm铝	14N
25μm铝对25μm铝	9.5N
10μm铝对10μm铝	3.5N
50μm铝对10μm铜	2.5N
25μm铝对10μm铜	2.5N

超薄箔片焊接的应用范围包括：新能源汽车行业中的锂离子电池、医疗和电气工业中的催化转换器及真空绝缘技术，以及压力传感器的应用与包装。面对具体的工业应用，需要更进一步地研究和优化工艺。❑

注：文中所述工艺已提交专利申请。

参考文献

1. Abe Nobuyuki, Funada Yoshinori, Imanaka Takashi, Tsukamoto Masahiro, (2005) Micro welding of thin stainless steel foil with a direct diode laser, Transactions of JWRIVol.34, No.1
2. Martin Petrich, Martin Stambke, Jean Pierre Bergmann, (2014) Examinations on laser remote welding of ultra-thin metal foils under vacuum conditions, Physics Procedia, 56, 768-775
3. Vicente Afonso Ventrella, Jose Roberto Berretta, Wagner De Rossi, (2014) Application of pulsed Nd:YAG laser in thin foil microwelding, Int. J. Materials and Product Technology, Vol 48, Nos. 1/2/3/4
4. John C. Pernicka, Fort Collins, David K. Benson, C.Edwin Tracy, (1994) Method for laser welding ultra-thin metal foils, United States Patent 5502292
5. Thomas Engelhardt, Michael Brandner, Rudolf Weber, Thomas Graf, (2015) Influence of welding parameters and stack configuration on pore formation of laser welded aluminum foil stacks, Lasers in Manufacturing Conference

超快加工

超短脉冲激光实现更快、更光滑的表面微加工

高功率皮秒激光器能比纳秒激光器实现更好的烧蚀、清洗和金属表面抛光效果。

文/Andreas Brenner，Andreas Thoss

到目前为止，超短脉冲（USP）激光器在微结构加工方面能够实现最高精度，但价格昂贵、加工速度慢也是 USP 激光器面临的问题。新一代高功率 USP 激光器的出现，将有望改变这种情况。平均功率 100W 或更高的新一代 USP 激光器，能够在实现高精度加工的同时兼顾更大的生产量。这对工装和模具行业来说是个好消息，因为钢制工具必须以非常高的精度进行加工。

不过，要想正确设置USP激光器，还需要对加工工艺和激光参数有一定的了解。有了正确的参数设置，就可以将更多的 USP 功率转化为更高的效率，直到实现加工效率超过纳秒激光器。为了进一步了解 USP 激光工艺的最佳设置，德国弗朗恩霍夫激光技术研究所（Fraunhofer ILT）的专家们，将纳秒激光器和皮秒激光器的微结构加工效果进行了比较。他们发现，如果选择正确的工艺参数，USP 激光器的加工速度快 4 倍、加工后的表面粗糙度小 4 倍，并且效率相当。

此外，专家们开发了优化的参数，以使用 USP 激光器进行不同的加工，如清洗和抛光。这就形成了一个专用的光子加工链，使得同一激光系统可以用于后续一系列任务，如烧蚀、清洗和抛光。这样，USP 激光器就走出了原有的狭窄市场定位，成为现代工业中完成各种任务的一个非常方便的工具，最终走向生产加工车间。

皮秒脉冲和纳秒脉冲的比较

很明显，更高的平均功率意味着更高的烧蚀速率。对于 USP 激光器而言，这句话只是部分正确。最佳脉冲通量（每个光斑面积上的脉冲能量）约为阈值通量的 7 倍。每个脉冲的能量更高，并不意味着每秒的烧蚀速率就更高，因为它们可能会产生带有锥形突起的粗糙表面。解决这个问题的一个可行的方案是应用多光束光学元件，将一个脉冲的能量引导到类似的多个光束中。[1]

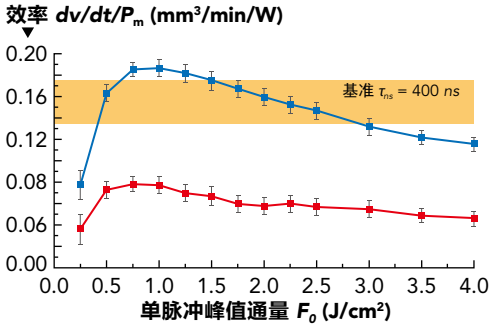


图1：在单脉冲情况下，2ps激光脉冲（蓝色）去除的钢量，约是400ns基准激光脉冲的1.2738倍；相比之下，10ps激光脉冲（红色）的去除效果则相差很多。

另一种利用更高平均功率的方法是，使用中等脉冲能量配以更高的重复频率——这为扫描技术带来了挑战，而这一技术尚未被掌握。对于许多应用而言，一个更简单的解决方案是使用传统扫描振镜产生的脉冲串。一个脉冲串是由几个相等的激光脉冲组成的序列，间隔几纳秒。脉冲串的功率就是单个脉冲的功率之和。脉冲串的重复频率通常约为 100kHz。关于 USP 脉冲串的更多信息，可以参考其他文献。[2, 3]

USP 激光器的主要优势在于其加工精度。它们可以亚微米的精度烧蚀材料，几乎没有热影响区。一旦 USP 激光器能实现更高的平均功率，那么关键的问题是：USP 激光器的加工优势能否在更高生产率的情况下不受影响？为了回答这个问题，Fraunhofer ILT 的科学家们比较了 USP 激光器和纳秒激光器的烧蚀过程。

在基准测试中，纳秒激光器使用的是一台脉冲宽度为 400ns、脉冲能量可变的光纤激光器，USP 激光器使用的是单脉冲模式下脉宽 2ps 和 10ps 的激光器，并将两者的测试结果进行比价（见图 1）。将脉宽从 10ps 缩短到 2ps，效率提高了约 2.5 倍；

在 2ps 脉宽时，USP 激光器每分钟瓦特所烧蚀的体积与 400ns 激光器相当。在平均功率为 312W 时，2ps 激光每分钟烧蚀的钢量超过 40mm3。有趣的是，脉宽为 10ps 时，USP 激光器每分钟瓦特所实现的烧蚀量只有 2ps 时的 30%。这也说明 USP 激光器在使用中合理的参数设置非常重要，从图 1 中可以明显看出：脉冲短至 2ps 的 USP 激光器的烧蚀效率与纳秒激光器相当甚至更高。

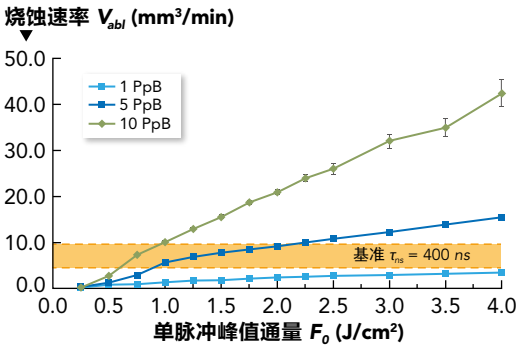


图2：脉宽2ps激光器的每个脉冲串中设置不同的脉冲数（1、5、10），其材料烧蚀速率与400ns基准激光器烧蚀速率的对比。

那么，如果使用脉冲串会发生什么情况呢？图 2 显示了烧蚀速率是如何随着每个脉冲串中的脉冲数量和每个脉冲所施加的通量而增加的。脉冲串中的所有脉冲都用于烧蚀，因此每个脉冲串中的脉冲数越多，每个脉冲串的烧蚀速率就越高。

例如，在单脉冲操作中，通量为 1J/cm2 时，2ps USP 激光器的烧蚀速率为 1.49mm^3/min。在每个脉冲串中包含 10 个脉冲的情况下（10PpB），同一激光器的材料烧蚀速率可以达到 10.15mm^3/min。在通量为 4J/cm^2 时，该激光器的材料烧蚀速率甚至能达到 42mm^3/min。使用的最大功率为 312W，重复频率 500kHz。

找到“甜蜜点”

这些观察结果中有一个明显的问题：如果脉冲数增加，表面质量会发生什么变化？回答是，要视情况而定。当一个脉冲串中的脉冲数量从 1 增加到 5 时，表面质量会有所改善；但是当脉冲数增至 10 时，表面质量反而更差。

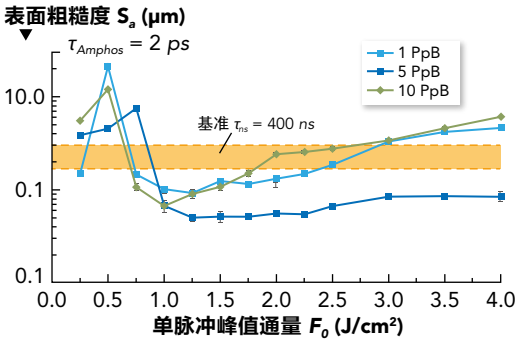


图3：表面粗糙度随2ps脉冲串中的脉冲数量的增加（1，5，10）而变化的情况，以及与400ns激光器（基准）的加工效果的对比。

图 3 显示了用 2ps 激光器对钢表面进行烧蚀的表面质量测量结果。同样，在单脉冲峰值通量逐渐增加的情况下，采集了不同脉冲串的数据，并与纳秒激光器获得的粗糙度进行比较。需要注意的是，这里的通量是指每个脉冲的峰值通量，因此，在使用脉冲串的情况下会有更多的能量。

从图 3 中可以看出，当每个脉冲串中的脉冲数量极低(1 个)和极高(10 个）时，USP 激光器加工的表面粗糙度比不上纳秒激光器的加工效果。在 1 个脉冲和 10 个脉冲之间，存在一个最佳“甜蜜点”——5 个脉冲，此时 USP 激光器加工的表面粗糙度降至 0.5μm。

总之，这些结果表明，使用 USP 激光器可以采用两种不同的加工策略。

（1）高烧蚀速率。当 USP 激光器的每个脉冲串中包含 10 个脉冲、脉冲通量高达 3J/cm^2 时，其烧蚀速率是纳秒激光器的 3-4 倍，表面粗糙度水平两者相当。

（2）低粗糙度。当 USP 激光器的每个脉冲串中包含 5 个脉冲、脉冲通量在 1~2J/cm^2 之间时，其加工的表面更加光滑（表面粗糙度低至 0.5μm），此时的烧蚀速率与纳秒激光器相当。

当然，实际加工效果也与被加工的材料有关。这些试验使用的材料是 1.2738 钢，这种材料通常用于制造塑料零件的模具。图 4 显示了几个例子，其中包括用 USP 激光器在钢工具表面加工微结构。平均功率 90W、脉冲串中

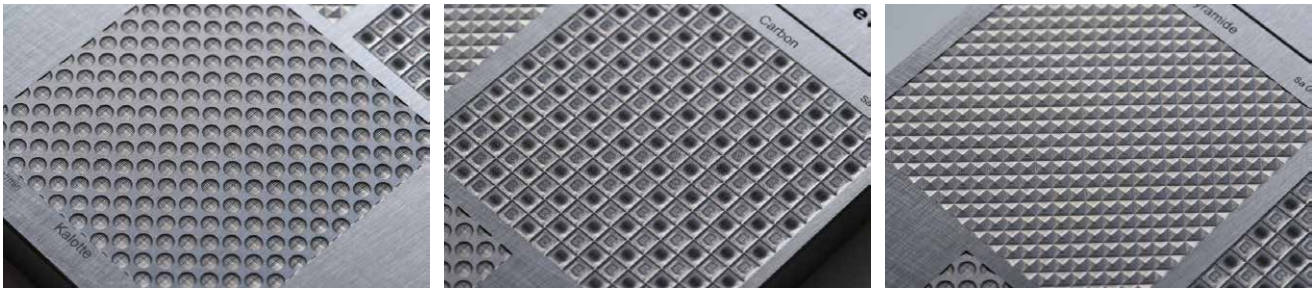


图4：用平均功率90 W的2ps脉冲串在钢表面加工三种不同的微结构；烧蚀速率约为11mm^3/min，表面粗糙度约为0.6μm。

reci 热刺激光

高功率
光纤激光器

400 002 0565售后专线

- 多重抗高反能力
- 高可靠性、长寿命
- 电光转换效率高
- 免维护运行



▶ 热刺激光 www.recilaser.com 联系电话：86-10-6436 6506

——关注我们——

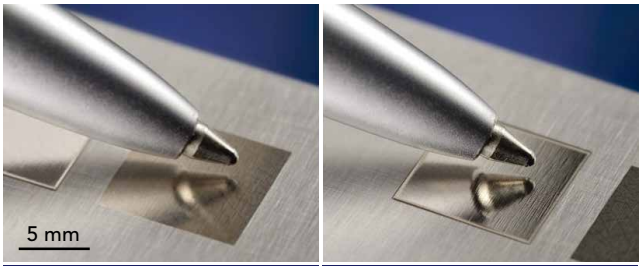


图 5：用USP激光器抛光表面，使表面粗糙度降低了两倍。

包含 5 个脉冲时，获得的加工速率与纳秒激光器相当，但是表面更加光滑。

对于更高的平均功率（165 W）和类似的脉冲串设置，USP 激光器的烧蚀速率可翻倍至约 20mm^3/min，而表面粗糙度翻倍至 1.3µm（金字塔结构）或 1.5µm（碳纤维织物结构）。典型的工业纳秒激光器在 5mm^3/min 烧蚀速率时，加工粗糙度为 1.5µm；在 10mm^3/min 烧蚀速率时，加工粗糙度达 2.5µm。因此，165W 的 USP 激光器可以比纳秒激光器多烧蚀 4 倍的材料，获得的表面粗糙度两者相当。或者是在更低的功率下，USP 激光器能在相同烧蚀速率的情况下，实现比纳秒激光器好 4 倍的表面粗糙度。

用USP激光器进行清洗和抛光

微结构加工是一种得益于 USP 激光器加工精度的工艺，这些加工过程依赖于 USP 激光器与物质之间极短的相互作用。例如，在清洗过程中，超短脉冲会将物体表面上的氧化层炸开。在适当的设置下，这种清洗过程几乎是在不熔化物体表面的情况下进行的。

抛光是一个不同的过程，在此过程中表面是局部熔化的，以使该区域变得平整。根据不均匀度的大小，表面可以被加热到不同程度。显然，清洗和抛光需要不同的工艺参数设置。例如，在抛光过程中，这些参数不得超过烧蚀的脉冲通量阈值。

理解这些过程有助于找到合适的参数范围。对于清洗而言，需要一个没有热量积累的快速过程。因此，单脉冲的通量刚好高于烧蚀阈值就可以了。

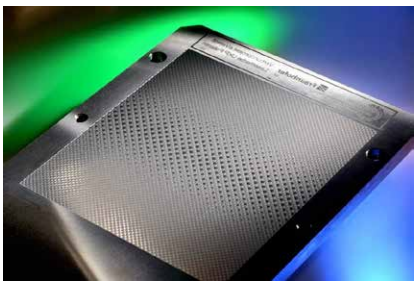


图 6：用USP激光器对一个钢工具进行表面加工，采用三步工艺链：微结构加工、清洗和选择性抛光。

对于抛光应用，则需要积累热量。因此，由低能量脉冲组成的长脉冲串非常适合。它们的总通量输入不得超过烧蚀阈值。因此，脉冲串中的单个脉冲的能量，要比清洗时低得多。由于局部区域的表面熔化需要对某个点进行多次扫描，因此扫描速率也需要实时调整。

不同的表面结构需要不同的抛光工艺。例如，实现 0.5µm 的表面粗糙度，需要用不同于实现 1.0µm 的粗糙度的方法。图 5 显示了用 USP 激光器成功实现抛光工艺（a），将表面粗糙度从最初的 0.6µm 降低到 0.3µm。关于 USP 激光器抛光的更多信息，可以从相关文献中获得。[4]

基于光子加工链的光滑表面快速加工

到目前为止，已经有研究表明，一方面，USP 激光器能比纳秒激光器实现更快的烧蚀速度和更光滑的表面；另一方面，USP 激光器还可以用于清洗和抛光表面。总之，这些知识可以用来建立一个全光子加工链，完成快速 USP 烧蚀、清洗和表面抛光等任务。

Fraunhofer ILT 的研究人员发现，整个 USP 过程仍然比同等的纳秒激光烧蚀快 14%-59%。同时，表面粗糙度约为 0.17µm，比纳秒加工的表面粗糙度提高约 90%。

这种集成的光子加工链为工具和模具行业提供了诸多好处，例如，它可以在五轴机床上使用。典型的应用案例是在汽车工业中，制造汽车内部塑料零件的工具可以用这种方法加工。在一次测试中，已经使用 USP 激光器对大众汽车的一个样品工具进行了三步加工，包括微结构加工、清洗和表面抛光（见图 6）。使用 USP 激光器的加工时间保持恒定，同时可在非抛光区域获得 0.5µm 的表面粗糙度（比纳秒工艺低 4 倍）。

这项研究属于 eVerest 项目，它由德国联邦教育与研究部（BMBF）资助。❑

参考文献

1. J. Finger and A. Thoss, “High-throughput ultrashort-pulse laser micromachining,” Industrial Laser Solutions, 21-23 (Jan/Feb 2020); https://bit.ly/MicrostructRef2.
2. J. Finger et al., Adv. Opt. Technol., 7, 3 (May 2018); https://doi.org/10.1515/aot-2018-0008.
3. A. Brenner, B. Bornschlegel, and J. Finger, J. Laser Micro. Nanoen., 14, 1, 100–107 (2019); doi:10.2961/jlmn.2019.01.0017.
4. A. Brenner, L. Röther, M. Osbild, and J. Finger, Proc. SPIE, 11268, 112680P (Mar. 2, 2020); doi:10.1117/12.2551481.

超快加工

应用研究推动激光技术发展

目前立陶宛正在开展的一些新的激光技术和应用活动，旨在帮助本地公司在生产中更轻松、更快速地采用激光技术。

文/Karolis Ratautas, Paulius Gecys, Mindaugas Gedvilas, Gediminas Raciukaitis

自激光器诞生 60 年以来，激光应用（特别是材料加工）的领域正在稳步拓展，并且大多数先进的解决方案都源于超短脉冲（USP）激光器的使用；而在 USP 激光器方面，立陶宛的公司赢得了全球的良好认可。

物理科学与技术中心（FTMC）是立陶宛最大的科研机构，主要从事激光技术、光电、材料科学等领域的基础研究和技术开发工作；FTMC 旗下的激光技术部，则是欧洲新的激光技术及其应用诞生的活跃场所之一。下文将介绍该部门最近开发的一些高成熟度的、准备让客户直接安装使用的项目。

玻璃加工技术

新颖的激光玻璃加工技术，可以提供高速和精密制造，已经逐步成为了机械切割、金刚石锯和水射流切割等传统加工方法的一种有吸引力的替代方案。随着现代工业激光器的发展，基于激光的玻璃加工技术正在同时实现高产量和高加工质量。

激光背面加工技术是现在最灵活的玻璃加工技术之一。这种加工方式是将激光束通过玻璃样品聚焦到透明基板的背面。整个加工过程非常高效，仅需要 20W 的激光功率，材料的去除率就可以达到 >120mm^3/min。相比于使用金刚石锯的机械加工方式，这种加工方式能显著减小切口宽度，因此可以加工小至 150μm 的特征尺寸。由于激光切割过程可以实现无锥度加工，可以加工出极高的深宽比区域，可以实现表面剥落小于 50μm 的卓越切割质量，同时还可以实现倒角工艺。这种加工方法已经在浮法玻璃、硅酸盐玻璃和熔融石英上得到了验证。激光背面加工过程是通过扫描振镜光束定位完成的，所以几乎没有过程形状限制；此外，该加工过程还可以根据需求整合到各种工业过程中。

虽然激光背面加工是一种非常灵活的工艺，但是一些应用确实需要一些简单的直线条的高吞吐量切割。针对该应用，最有效的无切口激光加工方法是通过引入体内空隙进行划片式切割，然后再进行机械剥离。为了实现预期的剥离，需要沿着玻璃厚度方向完成进一步加工修饰。为此，需要对具有较大非衍射长度的贝塞尔光束进行调整，以适应这个加工过程。对于厚度为几百微米到几毫米的玻璃而言都可以实现每秒几米的高效切割（见图 2）。

聚焦的激光束不仅可用于切割和钻孔，还可用于 2.5D 铣削加工。气体喷嘴的制造，是这项技术的一个令人振奋的新兴应用领域。气体喷嘴被广泛应用于各种激光等离子实验中，用于激光尾波场加速度（LWFA）、二次 X 射线和 γ 光线生成，主要面向工业断层成像和医疗应用。对于定制的等离子体目标，需要具有融合分流和圆柱管的复合形状的喷嘴，以便沿着激光束传播的方向调节气体浓度。然而，这种复合形状十分复杂，用传统加工技术很难实现。此外，孔壁粗糙度将严重影响喷嘴性能，而且熔融石英的加工比金属更具挑战性。为此，FTMC 激光技术部开发了一种混合型激光加工技术——将纳秒激光加



图1：普雷西齐卡计量公司的ELAS玻璃加工激光机，其主要用于光学编码器的自由形状切割，该技术是由FTMC的研究人员和工程师共同开发。

工与飞秒激光诱导选择性刻蚀技术（FLISE）相结合，可以实现亚微米级的高精度、高速材料加工（见图 3）。[1]

精细、高效的激光烧蚀

仿生材料表面由于其独特的功能属性，引发了科学、技术和医学等领域的浓厚兴趣。特别是鲨鱼皮纹理的表面，不仅能减少与液体或气体的摩擦，而且还具有抗菌功能。FTMC 团队开发了一种高效激光烧蚀技术，在保证最大材料去除率的同时，实现了优异的加工质量。该技术通过在材料上高速地大面积“复制”鲨鱼皮纹理结构而得到了验证。

利用理论方法，预测出最优的激光烧蚀加工参数，能有效促进激光铣削技术在仿生表面制备方面的实际应用。采用最先进的双脉冲飞秒激光，实现了当下最高的铜激光铣削烧蚀效率，激光铣削的表面获得了最小的粗糙度和最佳加工质量，，使得这项新

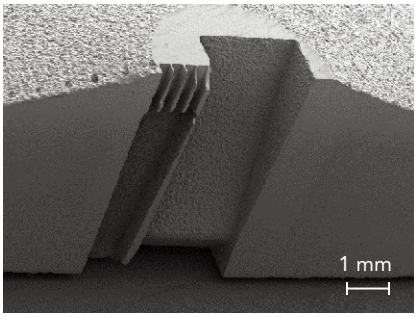


图3：采用背面加工和FLISE技术加工的气体喷嘴阵列横的截面图。

的激光加工技术比其竞争对手更加先进。此外，实验结果还表明，利用激光加工出的鲨鱼皮纹理表面，其与空气的摩擦阻力减少了 6%。该技术能够模仿鲨鱼皮状结构的生物启发表面、减少阻力的梯形 - 肋骨结构（见图 4）、以及像鱼一样的结构或其他复杂的树状形状，整个加工过程能够保证高速和低表面粗糙度。以上验证表明，这种高效的激光烧蚀技术能够与传统加工技术相竞争。

优化、可控的激光束扫描程序是一种灵活可靠的“复制”多功能仿生表面的技术。随着超短脉冲激光功率的提高以及价格与功率比的降低，加之高效精密激光铣削技术的发展，所有这些都为仿生功能表面的商业化开辟了新机遇，加速了小批量实验室加工到大型工业应用的时代进程。

激光和化学技术的结合

3D-MID（模制互连设备）的电路痕迹制造，是模具内集成电路生产最具挑战性的任务。3D-MID 不但在技术上很难实现，而且要实现高成本效益也是一项挑战。MID 是一种注塑成型热的热塑性零件，其电子电路直接集成到聚合物元件中。MID 可以通过消除单独的印刷电路板之间的连接器、缩短工艺链和减少接触面的集成（例如开关、传感器和天线），来达到节省材料、减轻重量和节约成本的目的。

在追求创新变革的时代，设备中使用的电子元件数量正在增加，MID 在汽车、航空、照明、计算甚至医药

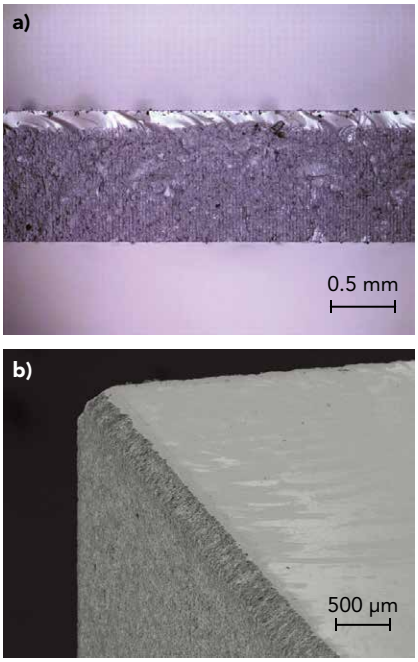


图2：（a）激光切割技术实现的玻璃组件的边缘；（b）采用背面激光加工的玻璃组件边缘，以及倒角情况。

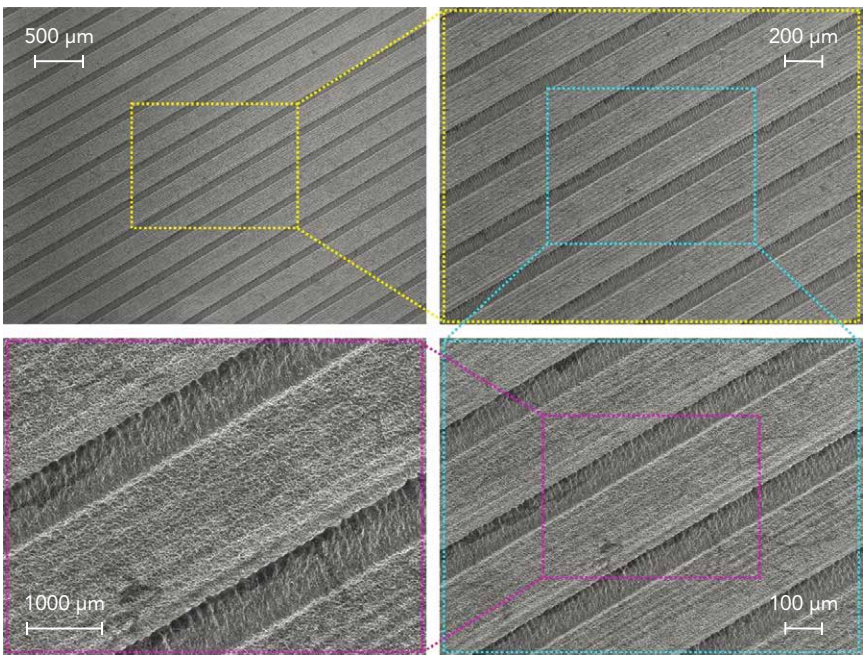


图4：扫描电子显微镜图像以70°的倾斜角和不同的放大倍率拍摄的纳秒激光在铜表面上制造的梯形肋骨纹理（Baltic HP, Ekspla）。激光脉冲持续时间为10ns，辐照波长为1064nm，脉冲重复率为100kHz，平均激光功率为12W，铜去除速率为1.4mm^3/min，加工速度为7mm^2/min。

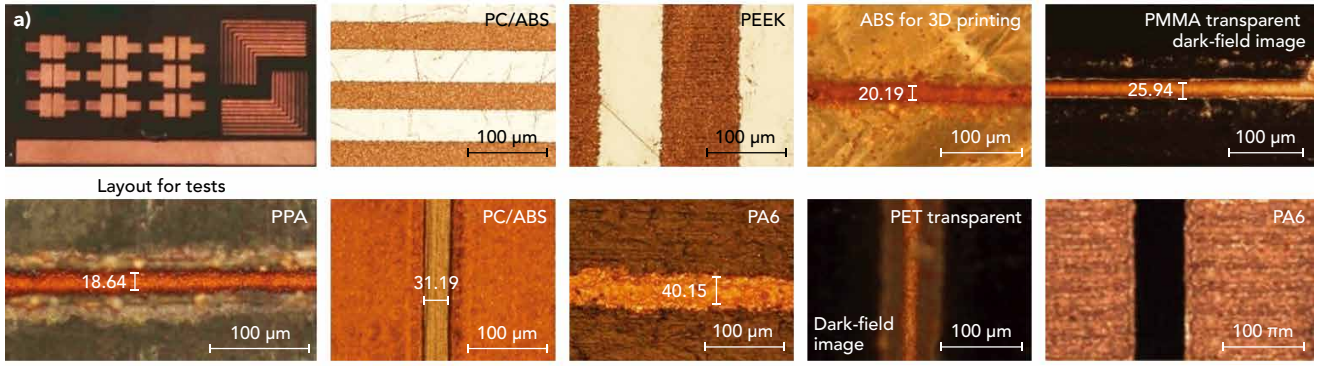


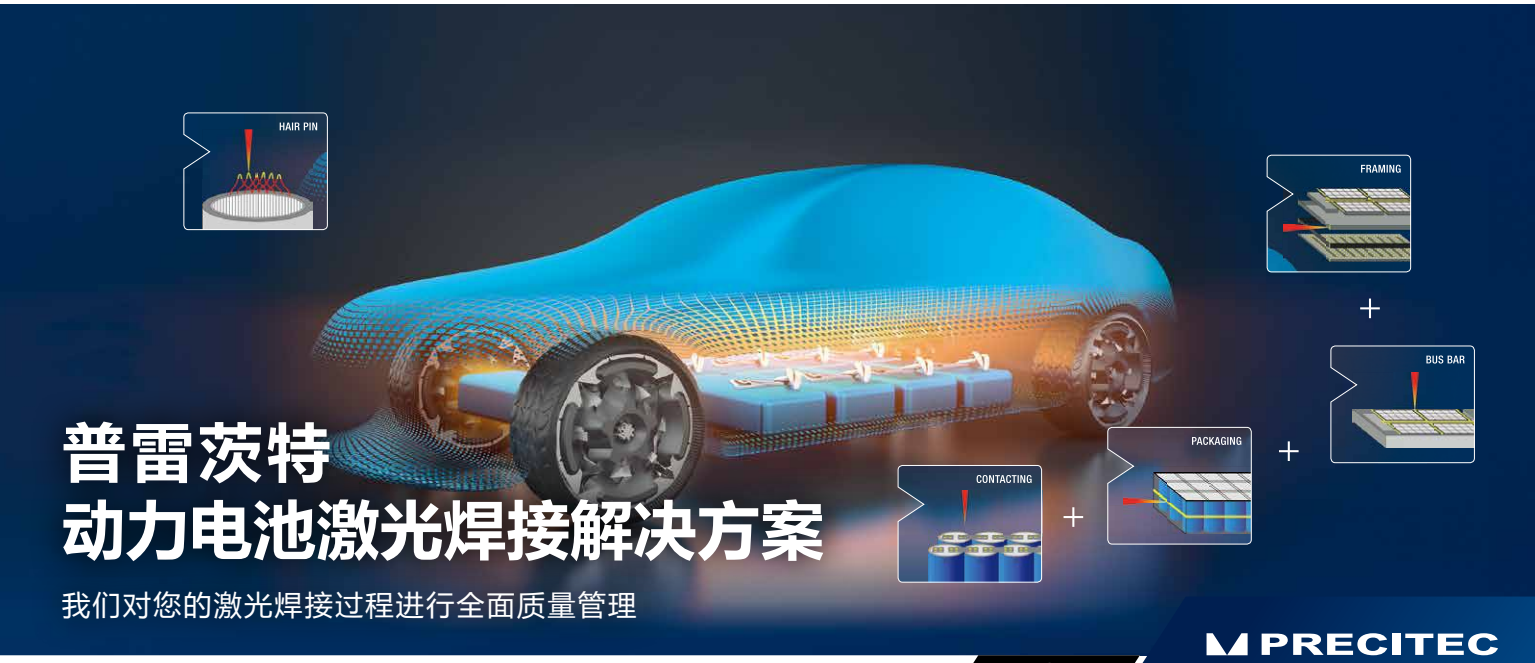
图5：（a）使用SSAIL工艺实现的铜沉积的空间分布图；（b）3D成型聚合物零件上的汽车电子电路。



领域都拥有巨大潜力。但是，由于零件通常具有复杂的 3D 几何形状，导致无法使用光刻等传统加工技术。激光诱导的选择性表面活化（SSAIL）方法，将有望解决在聚合物上生产电导体的挑战。[4]

SSAIL 包含三个主要步骤：介电表面的激光改性、浸入溶液对修改区域的化学激活，以及活性部分的化学无电金属沉积。SSAIL 可以提供高达 4m/s 的激光写入速度，空间电镀间距保持在窄至 25µm。[5]

相比于其他技术（如激光直接结构），SSAIL 工艺的主要优点是：它不需要聚合物基质中的特殊添加剂，可以使用标准的商用材料（市场上可买到）作为电路载体。因此，下转第31页



激光热丝加工

激光热丝加工可灵活应用于各种材料与场合

该方法提高了钎焊、熔覆、增材制造以及焊接的生产率和质量。

文/Kyle G. Smith，林肯电气公司

林肯电气公司(Lincoln Electric)在电弧焊行业已有 100 多年的历史；10 年前，该公司开始大力发展激光加工业务。随着数字焊接电源的进步，激光热丝加工（LHWP）也取得了进步。这种工艺的灵活性使其适合于不同行业的大量材料和应用。无论是钎焊、熔覆、增材制造还是焊接，都可以使用激光热丝加工来提高生产率和质量。

激光热丝加工最简单的形式，是将预热的金属丝与低功率密度激光束在工件表面形成的熔池相接触，这种方法已经被应用了几十年（见图 1）。不管是用电子还是光子来预热丝材，目的都是一样的。在这个过程中输入能量最经济有效的方法是通过电阻加热的方式，这要求电流能够在丝材中传输一段距离。有些公司选择在基板上方的阳极和阴极点之间进行加热，而其他公司（包括林肯电气）选择使用工件作为其中的一个电极。这样，能量梯度接近沉积区。从本质上讲，如果输入了太多的能量，丝材将不再保持其完整性，从而产生电弧。当使用传统的恒压电源时，电弧是很难恢复的。历史经验表明，为了保持稳定的加热，该工艺需要在远低于电弧阈值的水平下运行。

林肯电气于 2010 年开始涉足热丝加工领域。最初的热丝设备是基于恒压（CV）数字电源的。这台设备配备了一个受专利保护的消弧波形，然而，抑制时间有一个延迟。即使利用这台设备，在移动速度和焊珠一致性方面也存在显著差异。许多这类设备被用于汽车钎焊生产线上，加工过程通常在低于电弧阈值的预热水平以较低的沉积速率完成。

其他应用需要更高的沉积速率。为了达到较高的沉积效率，林肯电力的激光热丝（LHW）电源被设计成可以主动监测热丝的状况。LHW 电源能够以非常高的速率抑制任何持续的电弧，从而最大限度地提高丝材的温度和加工的一致性。

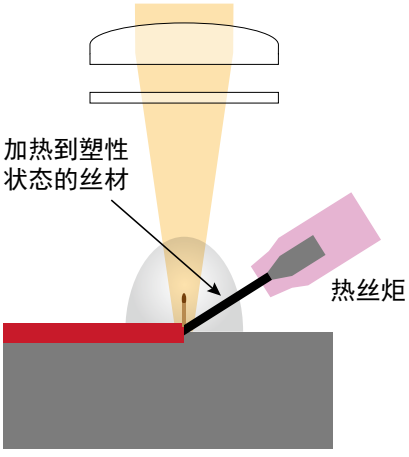


图1：激光热丝加工的工作原理图。

激光热丝熔覆

激光热丝熔覆（LHC）是高沉积速率激光加工的一个典型案例，它相较于传统的熔覆 / 堆焊工艺有许多优点。当要加工的零件非常精细或是需要满足严苛的化学规范时，LHC 是提高工件耐腐蚀和耐磨损性能的理想工艺。它也是理想的情况下，在需要能够抵抗足够应力而不导致涂层退化的情况下，LHC 也是保障冶金键合能力的理想工艺选择。

在熔覆操作中，高沉积速率、高移动速度和最小热输入通常至关重要。更常见的电弧工艺，如钨极气体保护焊（GTAW）或气体金属极电弧焊（GMAW），通常需要多层堆焊才能达到适当的化学成分，这就导致更厚的堆焊层，自然也需要更多的热量输入。为了解决电弧加工存在的这些问题，激光粉末熔覆已在各行各业得到广泛应用。

与传统的电弧熔覆方法相比，激光粉末熔覆具有许多优点，当然也有自身的不足之处。金属粉末比金属丝材更昂贵，在大多数情况下，生产高质量、一致性粉末所需的工艺比生产一炉金属的成本还要高。从环境和安全角度来看，粉末的处理也有一定的挑战性，而且粉末输送也比丝材输送



图2：超窄槽激光热丝焊接实例。

要困难。

在激光粉末熔覆中，熔化粉末和基体的所有能量都来自激光。有些粉末未熔化，受到污染，无法使用。在LHC过程中，大量的能量来自丝材的电阻加热，其利用率几乎接近100%。这使得每千瓦激光能量能够熔化更多的沉积材料，而且LHC与电弧无关。

表面污染、几何形状和所需的移动速度等因素，通常是电弧过程中的问题。严重抑制电弧的因素，对热丝加热的影响不同。更高的速度会导致更薄的熔覆层、更少的热量输入、更少的准备工作以及对基体更小的冶金影响。因此，与其他电弧焊工艺相比，LHC熔覆层的稀释率较低。相似沉积速率的电弧过程，稀释率高达30%，而LHC的稀释率通常在5%-10%之间。

热丝激光焊接

热丝激光焊接（HWLW）过程无电弧的特点，也有利于厚截面、窄坡口焊接（图2）。通常情况下，管道或板材的斜角较大，多焊道工艺可防止电弧在相邻壁之间来回移动。在没有电弧的情况下，可以大幅调整坡口几何形状，从而减少用焊接金属替换的体积。通常每层只需要一道焊缝，即使是厚度达50mm的材料。在碳钢、不锈钢和铬镍铁合金中，使用热丝激光成功焊接了低至4°（每侧2°）的夹角（见图3）。

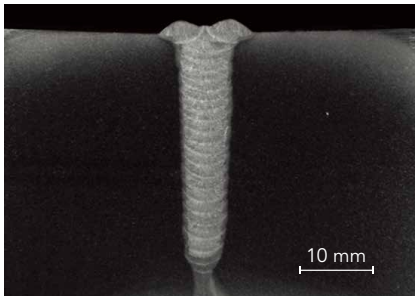


图3：碳钢表面激光热丝多道焊接Inconel 622实例。

在诸如核工程中的关键管道焊接中，HWLW被认为是钨极气体保护焊（GTAW）的一个极好的替代品。热丝激光焊接能以比GTAW更高的速率焊接金属，速度几乎是GTAW的5倍甚至更多。此外，HWLW的总热输入比GTAW低。这将获得更低的变形、更小的热影响区和更少的残余应力。截至2015年3月，HWLW工艺已被纳入美国机械工程师协会第九节规范案例2827“低功率密度激光束焊接”。

激光增材制造

激光热丝加工的另一个颇具潜力的应用领域是增材制造。一直以来，金属增材制造主要采用粉末的形式。粉末床系统和直接金属沉积头已成功应用。从本质上讲，这些系统存在着与激光粉末熔覆相同的问题。激光热丝应用于增材制造，已被证明是一个可行的解决方案。

激光热丝是一种非常灵活的过程，可以在许多不同的情况下实施。通过填充金属增加热量输入，已被证明是一种极为有效的方法，可以提高沉积和移动速度，同时减少整体热输入。❑

上接第29页

SSAIL能够开辟广泛的应用领域，而在这些应用领域中，目前的电子集成方法仍然过于昂贵。另外，SSAIL还能加工透明和柔性聚合物（见图5）。

行业的数字化转型

数字化转型正在所有国家的所有行业分支中进行着。即使在COVID-19疫情爆发期间，政府支持的也都是高科技企业。对于激光技术来说，这是一个绝佳的机会。FTMC正在运营一个“激光LT数字创新中心”（Laser LT Digital Innovation Hub），旨在帮助本地公司利用激光和其他光子技术转型升级其生产线。

对我们而言，这是一个促进新发展并将其部署到工厂中的机会。此外，欧洲最近还签署了一个名为“PULSATE on laser DIH”的新的European Horizon 2020项目，以帮助欧洲公司在生产中更轻松、更快速地采用激光技术。❑

参考文献

1. V. Tomkus et al., Appl. Surf. Sci., 483, 205–211 (2019).
2. A. Žemaitis, P. Ge ys, M. Barkauskas, G. Ra iukaitis, and M. Gedvilas, Sci. Rep., 9, 12280 (2019).
3. A. Žemaitis, M. Gaidys, P. Ge ys, G. Ra iukaitis, and M. Gedvilas, Opt. Lasers Eng., 114, 83 (2019).
4. K. Ratautas, A. Jagminien, I Stankevi ien, E. Norkus, and G. Ra iukaitis, Appl. Surf. Sci., 470, 405–410 (2019).
5. K. Ratautas et al., Results Phys., 16, 102943 (2020).

焊接在线检测

基于 AI 的机器视觉软件实现激光焊接质量在线检测

机器视觉软件HALCON实现焊接质量在线检查，减少错误产生，将最终产品的安全性和可靠性提高到一个新水平。

文/Mario Bohnacker, MVTec Software 公司HALCON 产品经理
Bernd Sattler，Manz机电一体化/测量技术/机器视觉部门主管

全球高科技机械工程公司 Manz 以生产锂离子电池的现代化激光系统而闻名。为了保证精确和安全的激光焊接工艺，该公司使用包含深度学习技术的机器视觉软件 HALCON，实现在线检查焊接工艺的质量，并减少错误的产生。这样，可以将电池自动生产的质量以及最终产品的安全性和可靠性提高到一个新水平。

全球高科技机械工程公司 Manz 以生产锂离子电池的现代化激光系统而闻名。该公司的电池激光系统 BLS 500，是一个灵活的模块化平台，适用于锂离子电池生产中的不同激光工艺（见图 1）。从标准化的机器基础开始，只需几个步骤就可以单独配置该系统，以适应各种应用（见图 2）。



图1：电池激光系统BLS 500是一个灵活的模块化平台，适用于锂离子电池生产中的不同激光工艺。

在自动生产电池块时，必须考虑到正极和负极，将各个电池单元高精度焊接到连接板上。例如，具有 90 个电池单元的电池模块（也用于电动汽车）包含 540 个焊接点，每个焊接点的大小为 1mm。为了满足汽车行业的高质量要求，面临的挑战是在不损坏相对较薄且较敏感的电池外壳的情况下，建立安全、稳定的焊接连接。

自动化焊接过程的质量检查

为了能为客户提供更多价值，让客户在节省成本的同时获得稳定的高质量焊缝，Manz 开始研究在线检测系统，以实现对焊接过程的 100%控制。此前，Manz 曾使用破坏性测试（例如横截面或拉力测试）对单个组件的焊缝进行统计测试。这样的检测过程不仅耗时、昂贵，而且不能保证每个焊缝都无故障。

现在 Manz 使用工业图像处理（机器视觉）来检查 BLS 500 激光系统的焊接过程，并实现了整个过程的自动化，其使用的 MVTec 的标准软件 HALCON，能借助 AI 深度学习算法显着改善错误检测。该技术的另一个优点是，它能显著减少编程工作量，并且可以应对尚未精确定义的错误。

训练过程需要大量的有效图像数据，例如需要六位数的样本图像才能达到可接受的错误检出率，也有许多不同的错误源可能会影响焊接过程。而激光系统的设计和制造通常与要制造的电池产品的开发同步进行，并且此过程需要与客户密切配合，因此设计会不断变化和调整。于是 Manz 在开始时使用大约 10 到最多 100 个样本图像来训练



图2：只需几步即可单独配置BLS 500电池激光系统，以适应各种应用。

模型，然后使用新的生产数据来不断改进流程。

不同解决方案的错误检出率比较

经过不断测试，Manz 将 MVTec HALCON 的错误检出率与广泛使用的免费开源 AI 解决方案的错误检出率进行了比较。

散焦是激光焊接过程中最常见的错误来源之一：当由于零件的变动而使激光的焦点没有最佳地位于其最薄点时，就会发生这种情况，从而导致焊接过程中输入的能量减少。该偏差可以通过零件与焊接源之间的正确距离来调节。

在第一个测试中，使用了 430 张图像进行训练。MVTec HALCON 中的深度学习算法对于散焦的误差判断正确率为 100%（见图 3）。而用于比较的开源软件，将大约 10% 的无瑕疵图像归类为有缺陷。在实际生产场景中，这将导致无缺陷的产品被视为次品，从而导致不必要的浪费。开源解决方案的另一个缺点是：训练需要 2600s（约 43min），而商业版本仅需要 200s（约 3min）。

在另一个测试中，对用于汽车电池供电的插头进行了测试。在这个案例中，MVTec HALCON 也能以非常强大的错误检出率胜出。仅使用 50 个训练图像，该软件就可以识别出所有有缺陷的零件，仅有大约 2% 的无故障零件被错误认为有故障。相比之下，开源软件的测试结果为：将所有缺陷零件中超过 1/3 的零件检测为无错误。显然，后者的结果无法接受。

基于无缺陷图像的异常值检测

此测试使用了 MVTec HALCON 中的“异常值检测”功能。这项技术的特殊优势是：只需要非常少量的图像数据。另外，训练仅需要显示无缺陷物体的图像，即所谓的“良好图像”。这使得 Manz 这样的机械工程公司能够节省大量时间和成本。因为生成错误图像的替代方法非常耗时、昂贵，通常需要数周时间。另外，在开始某个系列的生产时，并不能已知在机器生产周期中可能发生的所有错误。因此，不能充分描述异常的全部范围，以便用其他方法有效地解决需求。

借助 MVTec HALCON，Manz 可以在激光焊接过程中自动进行缺陷检查，并取得非常好的结果。使用较少数量的训练图像，可以在基于深度学习的异常值检测中，获得高效结果。该机器视觉标准软件的特殊优势在于，它包含预先训练的神经网络，这有助于在生产环境中更快地检测错误目标，缩短研发周期。MVTec 深入了解客户的需求以及相关的行业情况，因此可以专门对其深度学习网络进行预训练，提供可行的解决方案，实现更精确的检测结果。

小结

通过使用基于深度学习的机器视觉标准软件，Manz 能够在模块化 BLS 500 激光系统中，对激光焊接过程进行 100% 的质量控制。可靠地检测错误，可以使电池生产的质量长期保持较高水平。Manz 的客户还可以优化他们的生产，从更少的次品、更低的成本、更快的流程以及更高的质量和安全性中受益。❑

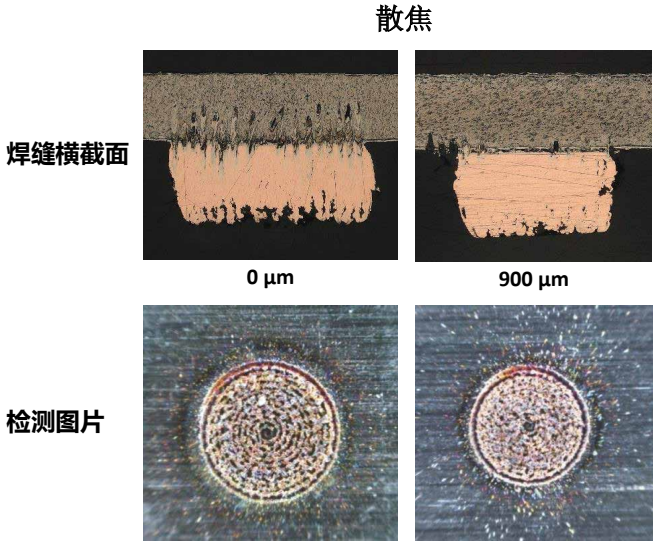


图3：图中显示了良好焊缝（左）和几乎没有材料混合的焊缝（右）的横截面。包括相应的检测图像，几乎看不到任何差异。尽管差异很小且背景不同，但深度学习仍可以100%正确分类。

超快激光器

皮秒和飞秒光纤激光器服务工业和科学应用

最新一代的超快光纤激光器的发展，让双光子显微光学、3D打印、精密切割等众多工业和科学应用受益。

文/John Wallace

皮秒和飞秒光纤激光器的问世，为工业和学术界提供了紧凑、易于维护的超快加工工具。超快激光用途广泛，可用于从材料加工到显微光谱以及其他科学应用等广泛领域。保偏光子晶体光纤、被动和主动锁模腔、半导体饱和吸收镜、频率转换等功能部件的发展，使超快光纤激光器处于技术领先地位。本文主要介绍超快光纤激光器产品及其应用实例。

光谱覆盖500~15000nm

每一家超快光纤激光器制造商都有其自身的创新技术。例如，德国Menlo Systems公司基于全保偏光纤设计，开发了自己的锁模技术（称为“Figure 9”，并已获得专利）。Menlo Systems公司飞秒光纤激光器产品经理Christian Mauser介绍说，叠加脉冲锁模技术利用非线性放大环形镜充当人工可饱和吸收体，[1,2]与其他锁模技术（如利用半导体可饱和吸收镜（SESAM）作为超快激光器的锁模元件）相比，具有明显优势。[3]

“非线性放大环形镜的叠加脉冲锁模技术，由于其优化的设计，在实现简单可靠操作的同时，还能实现较低的时间抖动、低相位噪声和超低的相对强度噪声（RIN）。”Mauser说，“光纤的设计使得空间非常紧凑，对温度和振动不敏感，从而实现免维护操作。由于超短飞秒激光脉冲具有非常高的峰值功率，通过各种非线性过程，如高次谐波、超连续谱或差频产生，可以实现500~15000nm的宽光谱覆盖。因此，可以实现波长为930nm、1040nm、1560nm和2050nm的飞秒激光振荡器。通过后续的放大和脉冲压缩，可以获得平均输出功率为几瓦、脉冲宽度40~400fs的高峰值功率输出。利用附加的非线性过程，可以对输出波长和脉宽进行调整。”

Mauser特别指出，重复频率和载波包络频率可以通过腔内执行器在大范围内进行调整，从而实现所谓的（完全）稳定光频率梳。稳定光频率梳在光谱学和计量学中的应用尤其重要，例如可用于研究原子钟的光学跃迁。光学和电子学的优化使时间抖动控制在阿秒量级，并且相位噪声也非常低。

在过去的几十年里，基于钛宝石（Ti:sapphire）的飞秒激光系统是多光子成像应用的主要光源，但是钛宝石飞秒激光系统构造非常复杂，并且占用空间大。光纤激光器作为固体激光器的有力替代品，尤其适用于显微镜学应用，例如用于便携式非线性内窥

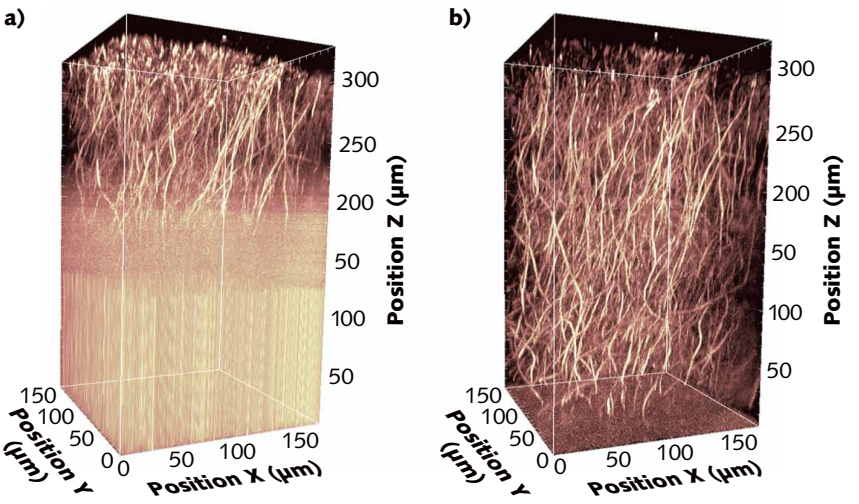


图1：用Alexa 647标记的300µm厚的小鼠大脑切片在（a）780nm和（b）1300nm激光激发下的双光子荧光图像。该测量是与马克斯-普朗克实验医学研究所(MPI)合作完成的。(图片来源：MPI, Menlo Systems)

镜系统，能够以前所未有的灵活方式对活体动物的神经元活动进行成像。[4] 由于脉冲重复频率在大范围内可调，光纤激光器也可以在多光子成像中提高信号产生效率。降低重复频率可以增加峰值功率，有利于产生非线性信号，同时保持低平均功率和对样品的低热损伤。

长波长趋附深度大，因此在多光子吸收机制下，即使激发功率较低，也能在样品的较深区域实现高对比度成像。特别是对厚样品的双光子成像，更长的波长有利于减少散射和提高对比度。图 1 是对 300μm 厚的鼠脑样本进行多光子荧光成像。样品用 Alexa 647 荧光剂染色，分别用 780nm 钛蓝宝石系统和 1030nm 掺镱光纤激光器（Menlo systems YLMO）的输出光激发。长波长激发的优势是显而易见的：即使在非常低的激发功率下，也能在样品的较深区域实现高对比度成像。

高速切割

Spectra-Physics 公司（MKS Instruments 旗下公司）为工业材料加工研发并生产了高功率皮秒和飞秒激光器，波长覆盖红外（IR）、绿光和紫外（UV）波段。产品营销总监 Scott White 说：“我们的混合型光纤激光器，脉冲能量高，例如红外飞秒激光单脉冲能量可达 600μJ；重频可以从单脉冲调节到 10MHz；独有的 TimeShift 技术不但使脉冲宽度可调节，并且波形可编程。这些优异的性能，使得高速微加工今天的各种复杂材料成为可能，如加工 OLED 显示器、脆性材料、薄膜、柔性印刷电路板（FPCB）等。”

Spectra-Physics 公司 50W 紫外皮秒光纤激光器 IceFyre 355-50，在脉冲宽度为 10ps、重频为 1.25MHz 时，单脉冲能量能够达到 40μJ，可以实现单脉冲到 10MHz 的重频调节。采用混合光纤设计，IceFyre 355-50 的 TimeShift 皮秒可编程脉冲串模式技术，允许用户改善激光波形，以优化加工速度和加工质量，并且能在脉冲串模式下产生数百微焦的脉冲能量。该款激光器具有 POD（脉冲选择）和 PSO（位置同步输出）触发输出功能，能够在高速、优质加工（例如使用多面扫描镜）时确保最低抖动。该款激光器能够加工广泛的材料，如玻璃、蓝宝石、柔性印刷电路板和平板显示材料等。

IceFyre 355-50 可用于智能手机中柔性显示材料的高速切割，如 OLED、PET（聚对苯二甲酸乙二醇酯）和 COP（环烯烃聚合物）等。OLED 由多层 PET 和 COP 堆叠而成，层之间通过粘合剂粘合。OLED 的多层结构必须要精确切割。紫外皮秒激光器用于柔性 OLED 高质量切割已经有几年的时间，但面临的挑战是：如何实现高速切割以满足消费电子产品的生产需求。White 指出，“由于 IceFyre 355-50 具有更高的功率和更高的重复频率，与之前更加昂贵的紫外皮秒激光器相比，用同样的功率和脉宽切割柔性 OLED 材料，速度快了近 90%。”

脉宽可调优化划线工艺

因光子晶体光纤（PCF）技术而闻名的丹麦 NKT Photonics 公司，将光子晶体光纤用于其光纤激光器中，例如，将光子晶体放大技术用于其 aeroPULSE 超快光纤激光器。NKT Photonics 公司超快激光部门高级副总裁 Carsten Thomsen 介绍说，公司的两款标准化皮秒激光器产品为 aeroPULSE PS10 和 aeroPULSE PS 40，分别提供 10W 和 40W 功率输出。两款产品的波长均为 1030nm，脉宽 5ps，脉宽还可以在 5~50ps 范围内定制。两款皮秒激光器都提供窄线宽输出，有利于频率转换应用。

NKT Photonics 公司 aeroPULSE FS 系列产品则以皮秒激光平台为基础，利用该公司的 Optocage 技术，实现了脉宽小于 500fs，指向稳定性高，输出功率为 20~50W 的飞秒超快激光输出。绿光（二倍频）和紫外（三倍频）倍频模块可用于 aeroPULSE 平台，可选择单波长或多波长输出。

Thomsen 说，最新的 aeroPULSE FS-50 飞秒光纤激光器实现了波长 1030nm、脉冲能量 40μJ、功率 50W 的激光输出。这款飞秒激光器还增加了优化激光加工的其他功能，包括脉冲串模式、功率衰减、重频选择（单脉冲到 50MHz）、脉宽选择（<500fs 到 3ps）以及门和触发控制。绿光（515nm）和紫外光（343nm）倍频模块的灵活使用，可用于加工热敏性或脆性材料。Thomsen 解释说：“这款激光器非常适用于薄膜切割、玻璃标记和切割、医用支架制造、IC 封装和 PCB 切割、低 k 材料的划线、用于生物成像的 OPA（光学参量放大）泵浦，以及抗腐蚀标记等。”

用于显示器的低 k 和温度敏感的材料，需要超快激光加工，以确保将热效应降到最低。下一代 OLED 及其他柔性显示由多层厚度小于 200μm 的介电材料组成，也需要超快激光加工。NKT Photonics 公司的 50W 飞秒激光器 aeroPULSE FS-50，特别适用于多层材料的加工，用户可以自行调节脉宽，优化加工工艺。此外，这款

飞秒激光器还可以调节重频、脉冲能量和脉冲串模式，优化激光划线、切割工艺，提高产量。同时，还可以选择绿光和紫外光加工，光斑尺寸和热效应进一步减小，加工精度增加，微裂纹和切口不均匀性降低，从而提高加工材料的成品率和可靠性。

微型打印

美国 Calmar Laser 公司是一家创新型超快光纤激光器和光纤放大器制造商，其创始人兼总裁 Tony Lin 指出，公司拥有多种专利技术，包括被动锁模飞秒光纤激光器、主动锁模皮秒光纤激光器、啁啾脉冲放大器、非线性波长转换模块、大芯径双包层掺铒 / 镱光纤放大器、光参量放大器和激光电子硬件及软件。Calmar Laser 生产的超快光纤激光器和光纤放大器主要面向 OEM、B2B 和科学应用客户，为其提供生物医学、半导体 / 微电子、电信、工业和科研等领域的解决方案。

该公司主要有三个产品平台：第一，OEM 模块，主要为其他高功率激光制造商提供可靠的定制化种子源或放大器模块；第二，设计先进的高速测试测量台式系统，供生产和研发应用；第三，为一些特定的应用开发高功率激光系统。

最近，Calmar Laser 公司的低功率台式激光器 Mendocino 系列又新增了几款飞秒激光器，可以提供 GHz 的低抖动同步信号。该款激光器有四种波长选择，分别为 780nm、850nm、1310nm 和 1550nm。脉冲宽度小于 0.3ps，时间抖动低至 200fs，非常适用于高速收发器、高速光电探测器的测试测量。

Carmel X-780 是市场上最小的一款高功率飞秒光纤激光器，输出波长为 780nm，输出功率高达 1W，脉冲宽度小于 90fs。Carmel X 系列产品所用的是超快掺铒光纤，采用 Calmar Laser 公司专有的饱和吸收技术，可在开启时提供可重复的稳定锁模，并且采用全光纤啁啾脉冲放大技术来提供更高的脉冲能量 / 更高的平均功率。波长为 1.55μm 啁啾脉冲通过铠装光缆传输到手掌大小的激光头，然后被压缩并转换为 780nm 输出，用于生物成像、双光子显微光学、光学计量、3D 纳米打印、太赫兹成像和眼科手术等领域。

奥地利 UpNano 公司是一家开发新型超快高分辨率 3D 打印系统的公司。2019 年，该公司推出了首个台式 3D 微打印纳米平台 NanoOne，用于微小组件的原型制造和小批量生产（见图 2）。设计该款 3D 打印系统最关键的组件之一是超快激光光源。

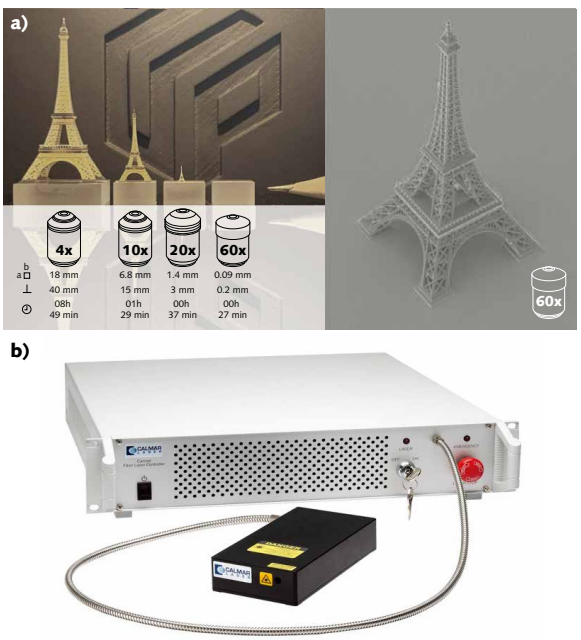


图2：NanoOne 3D打印系统打印的不同大小的埃菲尔铁塔模型。从左到右，分别展示了不同埃菲尔铁塔模型对应的三维尺寸、打印物镜的倍数及打印时间 (a)。NanoOne 3D打印系统所用光源就是高功率紧凑型 Carmel X-780 飞秒光纤激光器(b)。

UpNano 联合创始人兼技术主管 Peter Gruber 说，“要使打印产量提高 100 倍，就要提高打印速度，因此需要一个输出功率超过 1W 的超稳定的超快激光光源。此外，我们还需要激光光源的整体设计与我们紧凑的桌面打印系统兼容。经评估，Carmel X-780 飞秒激光器是全空气冷却设计，能够提供稳定的功率输出，是唯一一款能够满足要求的商用激光器。”

超快光纤激光器的科学应用

德国 TOPTICA Photonics 公司生产的多款激光器已经走进了世界各地的实验室，该公司研发的超快光纤激光器也势头正猛。TOPTICA 公司超快应用科学家 Adam Heiniger 表示：“掺铒光纤振荡器利用 SESAM 锁模技术使激光输出更加稳定。用掺铒光纤再对振荡器输出的激光进行放大，获得波长为 1560nm 的高功率激光输出。再用频率转换技术实现功率达到瓦量级、波长为 780nm、920nm 和 1050nm 的激光输出，这些波长特别适用于多光子成像。基于同一振荡器的光输出，我们还可以建立多通道、多波长同步激光输出系统，用于泵浦探测或相干拉曼化学成像。用光纤激光器搭建的激光应用系统，比固体激光器系统更加稳定，而且成本更低。”

由于泵浦探测装置会遇到机械延迟线缓慢的问题，TOPTICA 公司通过精确控制两个振荡器之间的重复频率偏移值，以快速改变泵浦光和探测光的时间延迟，实现异步光采样（ASOPS）。此外，Heiniger 还指出，公司已经掌握了微焦

量级光纤激光器脉冲选取技术，可以实现单脉冲选择。这种脉冲任意选取技术对光栅扫描式激光材料加工至关重要。通常光栅扫描系统不能在扫描转弯时保持固定的速度，而TOPTICA的超快光纤激光器重频可变，即使扫描速度变慢，也可以对脉冲数进行补偿，保持单位距离的脉冲数固定不变。

“双光子荧光显微成像（见图3）被用来监测大脑活动。最好的荧光探针如GFP或GCaMP，在920nm左右具有最佳的双光子激发效率。”Heiniger说，“到目前为止，只有钛宝石激光器能够提供满足双光子荧光成像所需要的脉宽、峰值功率和平均功率。TOPTICA公司的FemtoFiber ultra 920飞秒激光器，由于其空气冷却的设计，维护简单，成本低，结构紧凑等特点，是唯一一款可以与钛宝石激光器相媲美的光纤激光器。”

Heiniger解释说，利用光纤增益实现920nm的高功率、短脉宽激光输出，是相当有挑战性的。“这是我们的独家技术，但将1560nm的波长转换成920nm的波长输出，我们必须扩大频率转换模块。”用于双光子荧光成像，必须要特别精心的调节才能实现单脉冲高光束质量激光输出。将99%的脉冲能量暂时压缩在主脉冲，照射到样品上的光，每个光子能有效激发双光子荧光，而不会对脑组织样品产生热负荷。FemtoFiber ultra 920飞秒激光器可以在80MHz重复频率下提供1.5W的平均功率，脉宽小于100fs，峰值功率大于188kW。峰值功率与平均功率的比值，是衡量脉冲形状及其对双光子成像和活细胞加热影响的一个重要的品质因子，这款飞秒激光器的品质因子值超过125kW/W。

挪威Moser Lab公司的Weijian Zong和他的同事们，用FemtoFiber ultra 920激光器研究自由移动的老鼠大脑中的神经元活动。在实验中，用一种特殊的玻璃光纤将激光耦合进一个很小的显微镜，这个显微镜直接连接到自由活动的老鼠头部。“Clean-Pulse技术与集成色散预补偿技术相结合，是探究动物大脑功能的关键技术，”Heiniger指出，“此外，光纤激光设计可以减少不必要的背景噪声，以最大限度地减少激光对动物的干扰。”

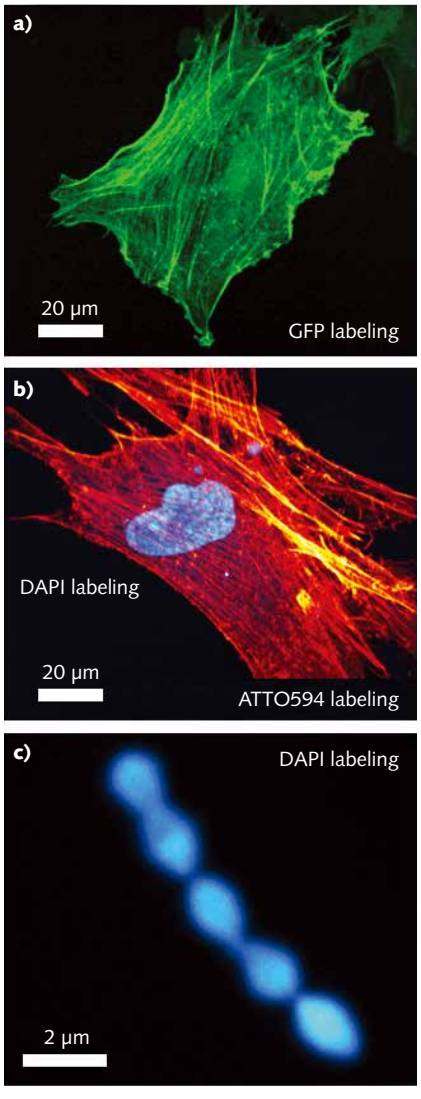


图3：FemtoFiber ultra 920超快光纤激光器用于双光子荧光成像：(a)用GFP标记的人类肌动蛋白的干细胞；(b)用ATTO594蛋白标记的人类肌动蛋白的干细胞和用DAPI荧光标记细胞核中的DNA；(c) 用DAPI标记的肺炎链球菌。（图片来源：TOPTICA Photonics）

光纤啁啾脉冲放大的先驱

美国IMRA America公司市场和销售专家Emily Grish介绍说，光纤啁啾脉冲放大是其公司的核心技术。基于该技术开发的FCPA锁模飞秒激光器，已经应用于材料加工中。“DE和DX系列产品的激光参数针对独特的飞秒应用进行了优化，”她说，“激光波长为1040nm，通过倍频也可以选择520nm和347nm的工作波长。该系列激光器的特点是重频可调，提供脉冲串模式和脉冲选择功能。”

DE 2050 ULTRA飞秒光纤激光器基于IMRA公司的全光纤FCPA技术，将绿光和紫外光全部集成在同一个系统中。这款工作在红外波段的飞秒激光器，其脉冲能量高达50µJ，平均功率高达20W，通过频率转换，也可以实现二倍频和三倍频激光输出。广泛应用于精密打标、表面修饰及透明材料的焊接等。

Grish说，DE 2050 ULTRA特别适合焊接玻璃或其他透明材料。两块透明材料紧密贴合，激光作用到两块材料的交界面，使其发生融化并最终贴合在一起，实现焊接。激光焊接是在室温下工作，对非工作区不产生影响，且不需要使用其他化学粘合剂因此，DE 2050 ULTRA可以在不改变制造流程的前提下，实现材料的在线拼接。一个典型的应用案例就是传感装置中玻璃板的接缝密封。

下一代SESAM技术

立陶宛EKSPLA公司生产的超快光纤激光器都使用SESAM被

动锁模振荡器和保偏掺镱光纤。“SESAM 光纤振荡器具有易自启动、高重频和高稳定性等优点。然而，该项技术最主要的缺点是 SESAM 的老化使激光器的寿命很短，”EKSPLA 公司 OEM 项目负责人 Aldas Juronis 说，“为了克服这一缺点，我们的工程师已经开发和测试了一种新的生长半导体晶圆的方法，可以延长 SESAM 的使用寿命。这些新一代 SESAM 经过了 15000 小时以上的不间断运行测试，没有任何老化迹象。基于这项新的 SESAM 技术，我们已经开始重新设计光纤激光器产品系列，以实现 24/7/365（每天 24 小时，每周 7 天，每年 365 天）不间断运行。”

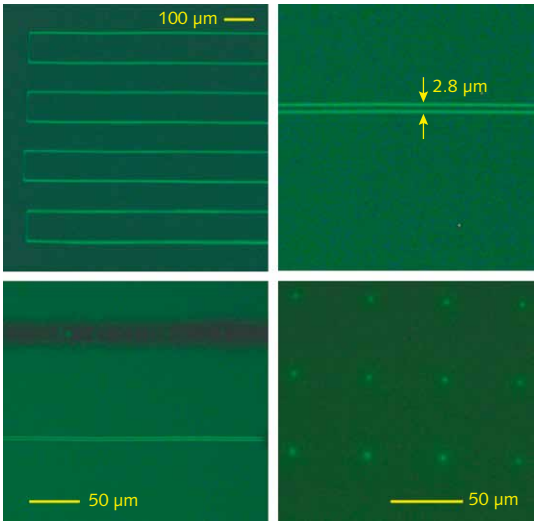


图4：FemtoLux飞秒激光直写技术在玻璃中诱导银纳米团簇荧光。图片用荧光显微镜拍摄。（图片来源：EKSPLA）

该公司拥有三个系列的光纤激光器产品：LightWire FPS 系列，是波长为 1064nm 的皮秒激光器，平均光功率 1.5~250mW，其中型号 FPS200 的激光器可配置 532nm 输出；LightWire FFS 系列产品有两种类型，一种是输出 1030nm 啁啾皮秒脉冲，作为飞秒 CPA 系统的种子源，另一种是直接飞秒激光输出，波长为 1064nm，平均功率为 50~200mW，脉宽小于 130fs；第三个系列是 FemtoLux 3 激光器，波长 1030nm，脉宽在 300fs~5ps 范围内可调，最大功率大于 3W，且支持二倍频波长输出。

Juronis 说：“FemtoLux 3 是一款升级为新一代超长寿命振荡器的光纤激光器。”这是一款工业级、紧凑型、无源风冷激光器，最大脉冲能量超过 3μJ（脉冲串模式下超过 10μJ），光束质量高，重频在 10kHz~5MHz 间可调，同时集成脉冲选择功能和功率衰减功能。这款激光器已经得到众多客户的认可，可以用于科学研究领域，如双光子显微成像、飞秒 OPO/OPA 系统泵浦，也可用于工业应用，如多光子聚合或透明材料的内部打标。”

波兰雅盖隆大学物理研究所的研究人员，用 FemtoLux 3 激光在掺银的玻璃中直写诱导银纳米团簇或银纳米粒子析出（见图 4）。由于银纳米结构独特的光学特性，适合多种光电应用。

中红外波长输出

超快光纤激光系统的输出波长通常位于近红外或可见光波段，但加拿大 Femtum 公司正在生产第一代中红外光纤激光器和光纤放大器，其波长位于 2800nm 及以上。该公司的产品包括：波长为 2800nm 的飞秒光纤激光器 Ultra 2800；波长为 2800nm 的光纤放大器 Amp 2800，该款放大器一级放大增益为 25dB，两级放大增益最高可达 40dB；功率可达瓦量级的飞秒激光器 UltraTune 3400，脉宽小于 150fs，波长在 2.8~3.5μm 范围内可调，能量和峰值功率分别可达 30nJ 和 100kW。“更高功率和更高单脉冲能量（微焦和毫焦量级）的激光器即将问世。”Femtum 公司联合创始人兼首席技术官 Simon Duval 说。

Ultratune 3400 是一款高光束质量、操作简单的飞秒光纤激光器，特别适用于聚合物、生物组织等有机材料，包括薄膜材料的选择性烧蚀、聚合物材料的表面修饰等。此外，该款激光器还可以利用其波长可调的特点，将波长调谐到与分子的共振波长一致，实现频率梳、红外显微光谱学、高光谱成像和其他光谱相关的应用。

Ultratune 3400 也可以将其波长调谐到 PMMA 和 PET（两种重要的工业聚合物）的吸收峰波段，在材料内部制备表面波导。这些生物相容性材料中的表面波导，可以用来制备低成本光子器件和传感器，用于物质识别及温度、压力监测。Duval 说，用更高的功率也可以实现微米级表面改性。利用振镜扫描头或电动位移平台组合，可以快速、精确地制备任意图案。

Ultratune 3400 也可以用于非线性光学，例如在硫系玻璃光纤中产生超连续谱。由于这种锁模激光器的波长比较长，可以在光纤中产生相干准瓦级中红外超连续光源，波长 2.5~5μm。稳定的超连续谱光源在中红外光谱域光学相干层析成像（OCT）或频率梳应用中，具有重要意义。❑

参考文献

1. W. Hänsel et al., Appl. Phys. B, 123, 41 (2017); doi:10.1007/s00340-016-6598-2.
2. J. Kim et al., Adv. Opt. Photonics (2016); doi:10.1364/aop.8.000465.
3. N. Raabe et al., Opt. Lett., 42, 6, 1068 (2017); doi:10.1364/ol.42.001068.
4. A. Lombardini et al., Light Sci. Appl., 7, 10 (2018).

为电动汽车制造中的激光焊接工艺保驾护航

——访普雷茨特精密技术（上海）有限公司销售总监刘良明先生



普雷茨特精密技术（上海）有限公司销售总监刘良明

文/Rossie Pang

电动汽车是当下的热门发展领域之一，其在环保、节能、经济、时尚等方面的特征，加上政府的一些扶持政策，使得电动汽车逐渐受到更多消费者的青睐。

电动汽车产业的发展，为激光焊接带来了新的市场机会，当然也伴随着新的挑战。由于汽车轻量化的发展需求，使得铝合金材料被更多地采用，如用于汽车车身、发动机中的各种零件、汽车底盘以及动力电池外壳。而铜作为优良的导电材料，在电动汽车和动力电池的制造中更是必不可少，其主要用于电池、电线与发卡电机中；市场研究公司 IDTechEx 预测，未来十年，汽车将成为铜行业增长的重要驱动力。

铝合金和铜材料的大量使用，也带来了大量的焊接工作，这对于激光焊接而言是巨大的市场机会。但另一方面，由于电动汽车与人身安全息息相关，这类高反有色金属焊接过程中出现的任何缺陷，如飞溅、气孔和裂纹等，都可能带来潜在的巨大风险。“因此，在电动汽车中，保证激光焊接的质量至关重要。”普雷茨特精密技术（上海）有限公司销售总监刘良明先生说道。

焊接工艺的提升

为了提升激光焊接的质量，业界正在从激光焊接技术层面努力，针对铝合金、铜等用传统焊接方法难以焊接的材料，不断有新的焊接工艺推出，如环形光斑焊接、光束摆动焊接、短波可见光和红外光的复合焊接等，以更好地提高焊接质量。

针对铝合金材料焊接中经常出现的一些缺陷，特别是 5 系和 6 系铝合金在激光焊接中常常出现的气孔、裂纹、熔宽较窄等问题，普雷茨特推出了 WeldMaster 智能摆动自适应焊接系统。这是一款基于 CMOS 相机的系统，并且激光束能够按照正弦波的轨迹进行高频摆动，这不但够提升焊接中的搭接能力，而且还能对焊缝的宽窄进行自适应调节，调节光束摆动的频率、幅度以及激光束的功率，实现热量输入的可控性，从而实现焊接品质的显著提升。



图1：WeldMaster智能摆动自适应焊接系统。

“铝合金焊接中有两个最常见的问题，一是热堆积，另一个是匙孔不稳定。WeldMaster 可以通过光束摆动和功率控制，减少热堆积效应；另一方面，光束的摆动也能扩大匙孔，使焊接过程更加稳定。”刘良明说，“WeldMaster 能够对 5 系和 6 系铝合金的焊接提供非常好的质量提升，能消除焊接过程中的气孔和裂纹，焊缝表面非常光滑，并且在焊接前不用去除氧化层，焊中不需要保护气体。目前该技术已经在一些主流汽车制造商中采用，用于电动汽车车门、电池盖板等零部件的焊接。”

焊接过程的实时监控

除了通过改进激光焊接技术来保证更高质量的焊接外，对焊接过程进行 100% 实时监控、及时剔除不良产品，也是保证焊接质量的一种有效手段。

在激光焊接过程中，有很多变化因素都可能导致焊接质量的不达标。如何对焊接质量进行可靠地检测，也是当下普遍较难解决的一大难题。目前，市场上对于焊接质量的检测，大多还是采用破坏性的抽检方法，这种方法不但效率低，成本高，而且无法做到 100% 全检。



图2：LWM4.0传感单元。

为了实现工件在焊接过程中的100% 在线检测，普雷茨特推出了一种创新的焊接质量实时检测系统——LWM4.0 传感单元。LWM4.0 传感单元的工作原理是，通过探测焊接过程中产生的等离子体、背光反射和热辐射这三个信号，并通过传感机制将它们转变为电信号，随后软件通过人工智能学习功能，给出一个焊接合格的参考范围，接下来将被检测的焊接工件与参考范围进行比对，进而来判断焊接是否达标。

利用 LWM4.0 传感单元，能够筛选出焊接质量合格的产品，把焊接质量不良或者可能有问题的产品剔除在外，从而保证只有合格的产品才能进入后序生产环节。

“LWM4.0 传感单元相当于一个筛选系统，能够对焊接过程中的异常实时报警，进而监督焊接过程的稳定性。”刘良明说道。

LWM4.0 传感单元还有另一个很重要的功能——追溯功能。“LWM4.0 传感单元能够将焊接过程实时数字化、量化，并将焊接过程产生的数据存储到数据库中，帮助用户实现个体追溯，比如通过扫描工件上的条码或二维码，就可以检测出工件是否合格。”刘良明说，“这也是对于汽车行业而言非常重要的一项功能。”

在批量生产中，LWM4.0 能够检测出焊缝的位置偏移、熔深不足、虚焊等问题，并可以记录焊缝质量和生产率信息，做到 100%可追溯，及早发现不良产品，减少返工。

LWM4.0 传感单元能与所有激光厂商的激光器配合使用，包括固体激光器和 CO2 激光器。目前该传感单元已经在汽车零部件行业领域的一级供应商中广泛使用。

焊接熔深的实时测量

激光焊接过程中遇到的难题之一就是熔深的不稳定。在实际焊接过程中，有很多因素都会导致熔深的变化，比如激光功率的变化、焊接光路中镜头的变化等。熔深的变化（熔深不够，或是熔深过大导致烧穿）很容易造成过流、发热等问题，对最终产品质量产生重大影响，而应用到电动汽车中，则是危及生命的安全隐患。

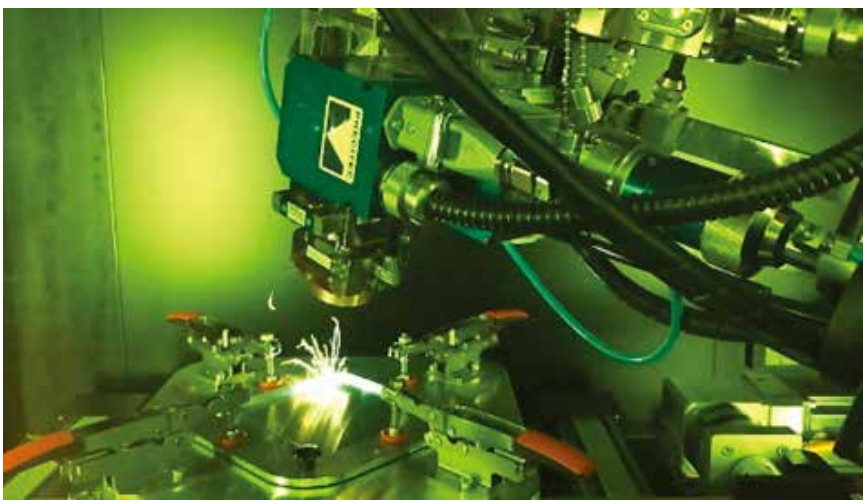


图3：IDM实时熔深测量系统。

因此，保证焊接过程中的熔深一致性至关重要。针对此，普雷茨特推出了 IDM 实时熔深测量系统，它基于光学相干断层扫描技术（OCT），可以实时地从匙孔的最低点测量熔深，最为重要的是，它还能够实现闭环控制，确保熔深的一致性。针对熔深测量中较难的获取匙孔（keyhole）的问题，普雷茨特新升级的 IDM 熔深测量系统还提供了 KeyHoleFinder 功能，大大优化了熔深的测量和控制。

“用户可以将 IDM 熔深测量功能和 LWM 传感功能叠加在一起使用，为保证焊接质量提供双重保障。”刘良明介绍说，“例如用于发卡电机绕线的焊接、软包电池电芯的焊接和圆柱电池电芯的焊接等。”

小结

无论当下电动汽车市场的发展速度如何，新能源汽车将是未来的一大发展趋势，已经是不争的事实。激光焊接已经是电动汽车生产中不可或缺的一种加工方式。随着用户对焊接品质的要求越来越高，对焊接过程监控的需求也会随之大增，未来将有很大的市场增长空间。普雷茨特在焊接技术、熔深测量和焊接过程监控技术方面所提供的技术和高性价比的解决方案，以及由 100 多名员工组成的专业服务团队，将为电动汽车生产中的激光焊接工艺保驾护航。❑

RFL–ABP光束可调激光器

锐科激光推出的 2020 新一代光束可调激光器 RFL-ABP，填补了国产光纤激光器光束可调技术的空白，通过运用自主研发的定制化光纤合束器，可实现高斯光斑、环形光斑、混合光斑等不同模式输出，可根据加工要求任意切换。同时，可独立调节纤芯、环芯功率，实现任意功率比，满足高品质激光切割及焊接需求。



RFL-ABP 激光器可在焊接过程中得到开放及稳定的匙孔，有效抑制飞溅产生，提高焊接应用的质量、效果和灵活性。其主要应用领域包括锂电行业、电子元器件、汽车制造等，如方形电池封口焊接、模组焊接中的软连接焊接、模组焊接中的 Busbar 汇流排焊接，以及模组焊接中的侧板焊接等。

锐科激光，www.raycuslaser.com

用于增材制造的AFX–1000光纤激光器

nLIGHT 的 AFX-1000 光纤激光器，是全球首款在光纤内部进行光斑调整的单模光纤激光器，采用创新的可调光斑技术，能够在单模和其他光束模式中自由切换，无需多余的光学镜组。



该产品主要应用于增材制造领域，在环形光斑模式下能够稳定熔池，减少烟尘和飞溅，提高材料的加工质量和生产效率。离散型的设计理念可实现每秒 30 次的极速光斑切换，为因熔化与凝固比例问题、微观物理特性与热应力所导致的零部件失效，提供了全新解决方案。经证实，该光纤激光器在环形光斑模式下加工致密材料（致密度＞99.5%）的速度，已超过每小时 100cm^3。

nLIGHT，www.nlight.cn

HMB多波长复合激光器

创鑫激光推出的 HMB 多波长复合激光器，可提供 8kW 的总输出功率，并可灵活调整输出光束模式参数，核心光束输出光纤直径 35μm/50μm，输出功率可达 4kW，外围光束输出光纤直径 300~500μm，输出功率可达 4kW。同时，该产品多双波长功率 10%～100%连续独立可调，内外光纤芯径多样化定制，适应不同的应用需求，良好的兼容性，适配现有的加工系统。



该激光器用于焊接时，核心光束可实现深熔焊接，外围光束可使匙孔周围温度梯度更平缓，焊接时匙孔更稳定，可减少飞溅，有效提高焊接质量和效率，焊接材料类型更为广泛。

创鑫激光，www.maxphotonics.com

高峰值功率脉冲式905nm线光斑激光模块LE01

炬光科技推出激光雷达发射端模块——高峰值功率脉冲式 905nm 线光斑激光模块 LE01。该激光发射模块的独特优势在于采用了行业领先的长焦快轴准直透镜（FAC）和慢轴光场匀化器，实现了小于 0.2° 的快轴发散角，20° 慢轴发散角与 90% 以上的慢轴光斑均匀度，并可根据汽车激光雷达客户的需求，定制不同的快、慢轴发散角、功率及能量分布。

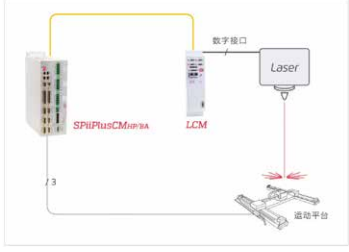


该模块采用车规级芯片、封装结构与光学组件，激光器设计寿命超过 10 万小时，主要用于智能驾驶汽车激光雷达、智能 3D 感知及红外照明等应用场景中。

炬光科技，www.cn.focuslight.com

ACS运动控制系统

ACS 的运动控制系统是基于 PC 的工业 ETHERCAT 控制平台，采用最新一代技术（CPU+DSP+FPGA+ 动力桥…），结合最佳的控制算法和软件工具，可实现最佳性能。通用的驱动技术允许使用任何电机及运动平台技术。



灵活的运动控制系统解决方案，可实现 ACS 产品驱控一体，模拟量力矩控制及脉冲 / 方向控制；独特的高级双驱龙门及自适应算法提高系统的精确度；附加的精激光能量控制功能以及振镜和平台联动功能，提高机器加工的质量、精度及吞吐量。

ACS，www.acsmotioncontrol.cn

AGV 5D 5轴激光扫描振镜

AEROTECH 公司开发的新产品 AGV 5D 5 轴激光微加工扫描振镜，能提供 5 轴扫描自由度，可满足更复杂、更精确的各种高难度工艺需求，是目前市场上领先的产品。



该产品适用于医疗器械制造、医疗介入类产品、自动化精密部件、激光微系统以及微电子等多种要求高精度的领域。

Aerotech，www.aerotech.com

BLINK FR系列高速激光探测器

LaserPoint 公司推出的新一代高速激光探测器 BLINK FR 系列，基于一种新型专利技术，该技术可使自然响应时间达到 90ms（typ），同时还可保持较宽的光谱响应范围及较高的功率密度承受能力，更可以直接接受高达 60W 的功率。



该款产品在超短脉冲测量和表征方面具有如下优势：高速响应，比标准的热电堆传感器快几十倍；1.5kW/cm^2 的高抗光损失能力；16cm × 16cm 的大有效口径；250~1100nm 和 10.6 μ m 的宽波长测量范围。

顶尖科仪，www.psci.cn

ES2高性能固态激光雷达传感器

Ouster 推出的高性能固态激光雷达传感器 ES2，基于其数字激光雷达架构而打造，通过应用一块 VCSEL 激光器芯片和一块 SPAD 探测器芯片，ES2 在分辨率、探测距离和可靠性上都实现了大幅提升。该产品采用“电子扫描”，可连续发射超过一万束激光到一个芯片上，其激光器与定制化数字探测器阵列结合使用，能够每秒计算出数万亿个光子。同时，该芯片上数以万计的激光器中每一个激光器都固定到视场中的不同位置，无需移动部件，便可达到高性能自动驾驶对探测范围、视场和分辨率的要求。



此款激光雷达传感器在反射率为 10% 的表面上，可探测 200m 以外的情况，是适用于高级驾驶辅助系统（ADAS）和工业自动化应用的低成本产品。

Ouster，www.ouster.com

用于太赫兹研究的飞秒光纤激光系统

Calmar Laser 公司的 Mendocino 双波长 780nm/1550nm Benchtop 激光系统，专为太赫兹辐射领域的研究人员而设计。



该系统具有高达 200mW 的高输出功率和 780nm 或 1550nm 的双波长输出。它通过 GaAs 或 InGaAs 光导开关产生太赫兹辐射，并通过方便的装甲光纤电缆传输和简单的光开关来选择所需的波长。

该激光系统提供前面板控制和专有的饱和吸收器技术，可提供可重复的模式锁定，具有高稳定性和高可靠性。

Calmar Laser，www.calmarlaser.com

Jasper Flex飞秒激光器

Fluence 公司的 Jasper Flex 飞秒激光器适用于要求高激光功率、高脉冲质量并且体积受限的应用系统。



这款飞秒振荡器能够耐受广泛的振动环境和温度环境，振荡器与光纤前置放大器一起，实现了一个能够高度准直的单片结构。能提供从 <250fs~20ps 的广泛的脉宽调谐选项。应用领域包括显示器修复和精密微加工等。

Fluence，www.fluence.technology

光纤准直器

Schöfter+Kirchhoff 公司的 60FC-SF 系列光纤直准器，能够提供非常精确的对焦设置，可用于单模光纤的激光辐射，也可用作具有高指向稳定性的光纤耦合器。即使激光源的发散或波长不同，聚焦设置的调整也可确保高耦合效率。



光纤端面和准直光学器件之间的距离使用螺纹环调节，螺纹间距为 0.35mm。改进的机械功能可提高对焦设置期间的指向稳定性，并减小间隙。镜头是弹簧加载的，线性轴承可确保镜头在调整对焦时不会旋转。

Schäfter+Kirchhoff，www.sukhamburg.com

手持式激光焊接系统

IPG Photonics 的 LightWELD 手持式激光焊接系统，可提供高度灵活的精密焊接。



该系统的激光功率高达 1500W，通过直观的控制装置进行调整，可针对各种材料和厚度进行快速调整，实现最佳焊接设置。选择存储模式可提供高达 2500W 的高峰值功率，实现更强大的焊接能力。该便携式系统外形美观，热输入低，控制简单，包括 74 个存储的预设和用户定义的工艺参数，新手焊工在几个小时内通过培训上手焊接。能够实现厚、薄和反射金属的快速、柔性焊接，并且变形或烧穿等效果极小。LightWELD 标配摆动焊接，可提供高达 5mm 的额外焊接宽度，同时提供高度美观的接缝。

IPG Photonics，www.ipgphotonics.com

用于高精度加工的CO_2激光器

Luxinar 公司的 SR AOM 密封 CO_2 激光器系列，专为需要减少热影响区的高精度应用而设计。

SR 10 AOM 和 SR 25 AOM 的输出波长均为 9.3μm，额定输出功率分别为 75W 和 150W。集成的交流光调制器可产生快速的光上升和下降时间（< 1μs），从而最大限度地减少不必要的热能。电源、调制器、控制驱动器和光学部件均密封于防护等级达 IP66 的机壳中，确保高度防尘、防热和防水，使其成为恶劣工业环境的理想之选。

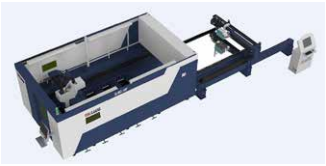


该系列激光器适用于各种高精度加工应用，如平板显示器中的缩微胶片切割、刻画、雕刻、标记和表面图案，以及汽车、电子、照明和软包装行业等行业中涉及的各种薄膜应用。

Luxinar，www.luxinar.com

DPM直接零件标示系统

大族激光适用于板材加工行业的 DPM 直接零件标示系统，有效解决实际生产中零件标记繁琐的问题，提升生产自动化率。

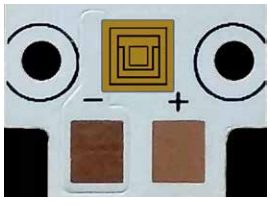


DMP 系统可在切割前就在板材上标记多个特定标识，当板材切割完成后，每个工件上都有一个身份标识码。系统对板材二次定位无额外要求，可自动识别板材位置，并进行坐标转换，自动运动到每个工件的正上方打标。配备自动调高装置，适应板材的高低起伏，确保打标清晰。可标记文字、一维码、二维码、轮廓和图片等多种对象。

大族激光，www.hanslaser.com

940nm 4W VCSEL芯片

新亮智能自主开发的 940nm 4W VCSEL 芯片，采用先进的氧化隔离技术，阈值电流低；具有极短的上升下降时间，实时性好；体积小易于集成。常温下电光转化效率高达 46.2%；在 60℃ 高温时，电光转换效率仍高达 40%。斜率效率（SE）为 1.13W/A，在整个温度范围内性能卓越，既能满足智能终端低功耗的要求，又能满足车规、航空级别的高可靠性要求。



广泛应用于 3D 传感器、激光雷达、红外照明、激光医疗、接近传感等多个领域。

新亮智能，www.brightai.cn

CoSF–R型超窄线宽单频光纤激光器

上海瀚宇的 CoSF-R 型超低噪声超窄线宽单频光纤激光器，采用独特的“优化行波腔”，消除了线腔光纤激光器中容易出现的驻波空间烧孔现象。



CoSF-R 超窄线宽单频光纤激光器的线宽远小于 1kHz，具有超低的相位噪声和频率噪声。超长激光腔设计使其整体噪声水平明显低于其他商用短腔单频激光器。

该产品广泛应用于分布式光纤传感、相干激光雷达、光纤水听器、激光光谱学、相干通信、冷原子物理学、气体吸收测量及其他科学研究。

上海瀚宇，www.shconnet.com.cn

Advertiser	广告商名称	网址	页码
AEROTECH INC.		www.aerotech.com	BC
CASTECH INC.		www.castech.com	5
Edmund Optics China		www.edmundoptics.cn/110-8617	9
华芯光电		www.everbrightphotonics.com	7
普雷茨特精密技术（上海）有限公司		www.precitec.de/en/products	29
Reci Laser	北京热刺激光	www.recilaser.com	25
Santec		www.santec.com.cn	1
安扬激光		www.yslphotonics.com	IBC

文章投稿指南

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

具体要求

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

发布新产品投稿指南

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

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

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

General Manager - China (中国区总经理)
Michael Tsui (徐旭升)
michaelt@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)
Mark Mak (麦协和)
markm@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

Gavin Hua (华北平)
gavinh@actintl.com.hk
Tel: 86 755 2598 8573 / 2598 8567

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

Wuhan (武汉)
Sky Chen (陈燕)
skyc@actintl.com.hk
Tel: 86 137 2373 9991

Eva Liu (刘婷)
eval@actintl.com.hk
Tel: 86 138 8603 3073

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
Mark Mak (麦协和)
markm@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

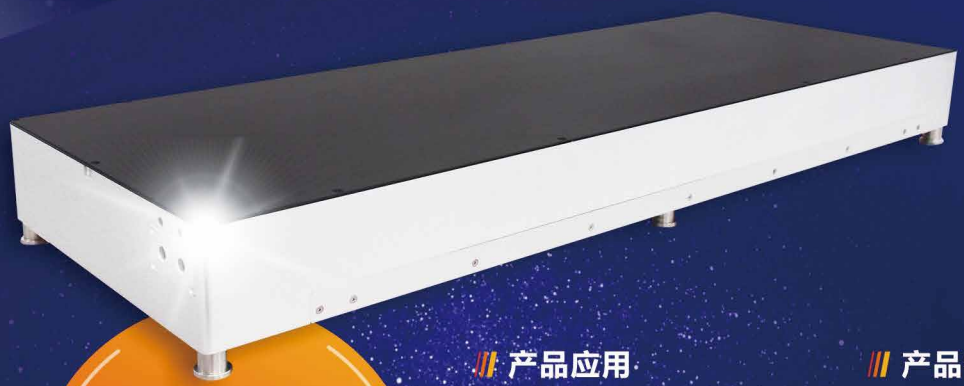
Europe & Middle East (欧洲及中东)

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

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

YSL 安扬激光
Photonics

武汉安扬激光技术有限责任公司
+86 27 87204039 Sales@yslphotonics.com
www.yslphotonics.com



100W 飞秒光纤激光器

产品应用

- OLED 模组切割
- 全面屏切割
- 蓝宝石&陶瓷盖板&玻璃切割与钻孔
- 复合薄膜材料加工
- 半导体晶圆加工
- 锂电池隔膜切割

产品特点

- 平均功率 >100W
- 脉冲宽度 ~300fs-10ps(可调)
- 重复频率 25-5000KHz(可调)
- 脉冲能量 >200uJ
- 支持 PSO/POD控制
- 支持 Burst脉冲串功能

20W 超连续谱光源



产品应用

- 光电流显微检测
- 纳米光子学
- 荧光光谱与成像
- 超分辨成像（STED）
- 光学相干断层扫描（OCT）
- 光声显微成像

产品特点

- 总功率 >20W
- 外部触发 1-80MHz
- 波长 400nm-2400nm
- 重复频率 0.01-200MHz
- 单脉冲能量 >1.5uJ
- 单模光纤输出

高精密运动控制全方位解决方案



驱控



压电



电机



平台



振镜

系统

AEROTECH

www.aerotech.com • +86 (21) 5508 6731
中国上海市杨浦区长阳路1687号B号楼B101-3室
sales@aerotech-china.com